



TUGAS AKHIR (KONVERSI ENERGI) - TM141585

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUDUT PLAT PENGANGGU DI DEPAN *RETURNING BLADE* TURBIN ANGIN SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN

**“Studi Kasus Untuk Rasio Panjang Plat Penganggu
Relatif Terhadap Diameter Sudu Turbin ($L/D = 2$)”**

MUHTADI SETYANTO
NRP. 2112100151

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwoni, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT (ENERGY CONVERSION) - TM141585

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTURBANCE PLATE ANGLE IN FRONT OF THE SAVONIUS WIND TURBINE TO ITS PERFORMANCE

**“Study Case for the Ratio of the Disturbance’s
Plate Length Relative to the Turbine Blade’s
Diameter (L/D) = 2”**

MUHTADI SETYANTO
NRP. 2112100151

Academic Advisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUDUT PLAT
PENGANGGU DI DEPAN *RETURNING BLADE*
TURBIN ANGIN SAVONIUS TERHADAP
PERFORMA TURBIN**

**“Studi Kasus untuk Rasio Panjang Plat Penganggu Relatif
Terhadap Diameter Sudu Turbin ($L/D = 2$)”**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Muhtadi Setyanto
NRP. 2112 100 151

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA..... (Pembimbing)
(NIP.196001291967011001)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D..... (Penguji I)
(NIP.196412281990031002)
3. Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D..... (Penguji II)
(NIP.197512062005011000)

SURABAYA
Juli, 2016

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SUDUT PLAT PENGANGGU DI DEPAN RETURNING BLADE TURBIN ANGIN SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN

**“Studi Kasus Untuk Rasio Panjang Plat Penganggu Relatif
Terhadap Diameter Sudu Turbin ($L/D = 2$)”**

Nama Mahasiswa : Muhtadi Setyanto
NRP : 2112 100 151
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar fosil sebagai satu-satunya sumber energi tentunya akan meninggalkan banyak masalah bagi manusia di masa depan, khususnya dampak dari energi fosil terhadap lingkungan. Masalah lingkungan yang memaksa dunia untuk mempertimbangkan pengembangan energi alternatif. Energi angin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan. Di antara sejumlah turbin angin, turbin Savonius dikenal sebagai sumber tenaga angin yang paling baik karena dapat bekerja di *tip speed ratio* yang rendah (Sheldahl et al, 1978). Pada prinsipnya, turbin angin Savonius bekerja dikarenakan perbedaan gaya *drag* yang dihasilkan oleh kedua sudunya, *advancing* dan *returning blade*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menempatkan plat penganggu di depan *returning blade* dari turbin.

Untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang memiliki diameter D 60 mm dan tinggi H 80 mm, plat datar yang memiliki lebar 120 mm dan tinggi 150 mm, digunakan sebagai penganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dari turbin. Penganggu ini divariasikan sudutnya yaitu $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Penelitian ini dilakukan di *wind tunnel* dengan jenis *subsonic*,

open circuit. Wind tunnel ini memiliki panjang 2980 mm, dengan *test section* 304 mm x 304 mm. Kecepatan *free stream* di wind tunnel diatur menjadi 8,85 m/s, 11,07 m/s, 13,28 m/s, sesuai dengan masing-masing bilangan Reynolds $Re = 6.0 \times 10^4$; 7.5×10^4 ; 9.0×10^4 (berdasarkan panjang $L = 2D-b$, dimana b adalah lebar *overlap* dari kedua *blade* turbin, dan kecepatan aliran *free stream*). Kecepatan angin diukur menggunakan *pitot-static tube* yang terhubung ke *inclined* manometer. Rotasi turbin diukur menggunakan *tachometer*. Torsi statis diukur menggunakan torsimeter dan daya *output* dari turbin ditentukan dengan mengukur tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator dengan menghubungkannya ke poros dari turbin angin Savonius.

Hasil eksperimen yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan penambahan plat pengganggu di depan *returning blade*, dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya putaran, torsi statis, dan *coefficient of power*, dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu apapun. Untuk $Re = 6.0 \times 10^4$, sudut dari plat pengganggu pada $\theta = 50^\circ$ adalah sudut yang paling efektif untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Putaran turbin meningkat hingga 2,89 kali lebih besar dan *coefficient of power* meningkat hingga 22,4 kali lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa menggunakan pengganggu apapun.

Kata kunci: Performa Turbin Savonius, Plat Penghalang, Variasi Sudut Plat Penghalang

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTURBANCE PLATE ANGLE IN FRONT OF THE RETURNING BLADE OF THE SAVONIUS WIND TURBINE TO ITS PERFORMANCE

**“Study Case for the Ratio of the Disturbance’s Plate Length
Relative to the Turbine Blade’s Diameter ($L/D = 2$)”**

Name : Muhtadi Setyanto
NRP : 2112 100 151
Department : Mechanical Engineering
Department, ITS Surabaya
Academic Advisor : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

The use of fossil fuels as the only source of energy will certainly leaves many human problems in the future, in particular the impact of fossil energy to the environment. The environments issues are forcing world to consider the incentives for development of alternative clean sources of energy. Wind energy is one of the most promising sources of renewable energy. Among a number of wind turbine, the Savonius turbine is known as the most quite wind power sources because it works at lowest tip-speed ratio (Sheldahl et al, 1978). In principle, Savonius wind turbine works caused by the difference of the drag force generated by it blades, advancing and returning blade. The purpose of this study is improving the performance of Savonius wind turbine by placing a disturbance plate in front of returning blade of the turbine.

In order to increase the performance of Savonius wind turbine that having a diameter D of 60 mm and height H of 80 mm, a plate having a width of 120 mm and a height of 150 mm is used as a disturbance located in front of returning blade of the turbine. This disturbance is located in a various angle of $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. The experiments were carried out in a subsonic open circuit wind

tunnel. This facility has a 2980 mm long, with test section 304 mm x 304 mm. The free stream velocity of wind tunnel adjusted to 8.85 m/s, 11.07 m/s, 13.28 m/s, corresponding respectively to Reynolds number $Re = 6.0 \times 10^4$; 7.5×10^4 ; 9.0×10^4 (based on equivalent length of $L = 2D - b$, where b is the width of overlap of the two turbine blades, and the free stream velocity). The velocity of wind is measured using a pitot-static tube connected to the inclined manometer. The rotation of turbine is measured by a tachometer. The static torque is measured by a torque meter and the power output of the turbine is determined by measuring of voltage and electric current resulted by generator connecting to the shaft of Savonius wind turbine.

The experimental result shows that by placing a disturbance plate in front of returning blade, can escalate the performance of the Savonius wind turbine. It is showed by the increasing of the rotation, the static torque, and the coefficient of power, compared with the Savonius wind turbine without any disturbance. For $Re = 6.0 \times 10^4$, the slope angle of disturbance plate at $\theta = 50^\circ$ is the most effective angle to improve the performance of Savonius wind turbine. The rotation of turbine increased up to 2.89 times greater and the coefficient of power become 22.4 times greater than the Savonius wind turbine without any disturbance.

Keywords: Performance of Savonius Wind Turbine, Disturbance Plate, Disturbance Plate Angle Variation

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Turbin Angin	7
2.2 Turbin Angin Savonius	8
2.3 Bilangan Reynolds (<i>Reynolds Number</i>).....	9
2.4 Power Turbin.....	10
2.5 Coefficient of Power (CoP).....	11
2.6 Gaya Drag	11
2.7 Tip Speed Ratio.....	14
2.8 Penelitian Terdahulu	15
2.8.1 Studi Eksperimen Turbin Angin Savonius Berpengganggu.....	15
2.8.2 Simulasi Pengoptimalisasian Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu di Sisi <i>Returning Blade</i>	17
2.8.3 Optimalisasi Bentuk <i>Blade</i> dari Turbin Angin Savonius yang dimodifikasi Menggunakan Pengganggu di depan <i>Returning Blade</i>	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 Parameter Pengukuran	23

3.2	Analisa Dimensi	25
3.2.1	Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	25
3.3	Peralatan yang digunakan.....	26
3.3.1	<i>Wind Tunnel</i> (Terowongan Angin).....	26
3.3.2	Benda Uji	27
3.4	Metode Pengukuran Daya	31
3.5	Prosedur Penelitian.....	32
3.6	Flowchart Penelitian.....	34
3.7	Alokasi Waktu Penelitian.....	34
BAB IV ANALISI DATA DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1	Data Penelitian dan Contoh Perhitungan.....	37
4.1.1	Perhitungan Bilangan Reynolds	37
4.1.2	Perhitungan Manometer	39
4.1.3	Perhitungan Daya	41
4.1.4	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	41
4.1.5	Perhitungan Tip Speed Ratio (λ)	42
4.2	Analisa Performa Turbin Angin Tipe Savonius Tanpa Pengganggu	42
4.2.1	Analisa Nilai Putaran Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	43
4.2.2	Analisa <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	44
4.2.3	Analisa Torsi Statis Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	46
4.2.4	Analisa <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	47
4.3	Analisa Performa Turbin Angin Tipe Savonius dengan Pengganggu Berupa Plat Datar	49
4.3.1	Analisa Pengaruh Putaran Terhadap Sudut Plat Datar Penggangu di Turbin Angin Savonius	49
4.3.2	Analisa Pengaruh Torsi Statis Terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu Turbin Angin Savonius	53

4.3.3 Analisa Pengaruh <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius	57
4.3.4 Analisa Pengaruh <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) di Turbin Angin Savonius	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai CD dari Berbagai Bentuk Geometri untuk $Re \geq 103$	13
Tabel 2.2 Dimensi dari Penyusunan Plat Pengganggu (Altan et al, 2008)	16
Tabel 3.1 Alokasi Waktu Penelitian.....	35
Tabel 4.1 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu.....	43
Tabel 4.2 Data Penelitian Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Turbin Angin Savonius.....	8
Gambar 2.2 Rotor Turbin Angin Savonius.....	9
Gambar 2.3 Skema Gaya Drag dan Lift.....	12
Gambar 2.4 Grafik Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio pada Rotor Turbin Angin (Fox, 1998)	15
<i>Gambar 2.5</i> Skema Turbin Angin Savonius Berpengganggu (Altan et al, 2008).....	16
Gambar 2.6 Pengaruh Panjang Curtain Terhadap Coefficient of Power (Altan et al, 2008).....	17
Gambar 2.7 Pengaruh Variasi Curtain Length Terhadap Coefficient of Power (Altan et al, 2008).....	17
Gambar 2.8 Skema Dua Sudu dan Tiga Sudu Turbin Angin Savonius dengan Plat Pengganggu (Mohamed et al, 2010).....	18
Gambar 2.9 Grafik Hubungan antara Speed Ratio (λ) dengan Coefficient of Power (CoP) di Turbin Angin Savonius yang Memiliki Dua Sudu (Mohamed et al, 2010).....	19
Gambar 2. 10 Grafik Hubungan antara Speed Ratio (λ) dengan Power of Coefficient (CoP) di Turbin Angin Savonius yang Memiliki Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010).....	19
Gambar 2.11 Skema turbin angin Savonius dengan konfigurasi sudu berbentuk setengah lingkaran dan sudu optimal (Thevenin et al, 2011).....	20
Gambar 2.12 Grafik perbandingan koefisien torsi dengan speed ratio (λ) (Thevenin et al, 2011).....	21

Gambar 2.13 Grafik perbandingan koefisien daya dengan speed ratio (λ) (Thevenin et al, 2011).....	21
Gambar 2.14 Grafik perbandingan koefisien torsi statis dengan speed ratio (λ) (Thevenin et al, 2011).....	22
Gambar 3.1 Skema Peralatan.....	24
Gambar 3.2 Wind Tunnel Subsonic, Open Circuit.....	27
Gambar 3.3 Skema Turbin Angin Tipe Savonius.....	27
Gambar 3.4 Plat Datar Pengganggu	28
Gambar 3.5 Tachometer OMEGA HHT12	29
Gambar 3.6 LUTRON Torquemeter TQ-8800.....	29
Gambar 3.7 Multimeter Sanwa Digital CD-800A.....	30
Gambar 3. 8 Pitot Static Tube	30
Gambar 3.9 Manometer.....	31
Gambar 3.10 Skema Pengukuran Daya.....	32
Gambar 3.11 Flowchart Penelitian	34
Gambar 4.1 Grafik Putaran Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu.....	43
Gambar 4.2 Grafik Coefficient of Power (CoP) Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu	45
Gambar 4.3 Grafik Torsi Statis Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu.....	46
Gambar 4.4 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap Tip Speed Ratio (TSR) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu.....	48
Gambar 4.5 Grafik Putaran terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius	49

Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Putaran Turbin (n/n_o) terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius.....	52
Gambar 4.7 Grafik Torsi Statis terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius	53
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Torsi Statis (T/T_o) terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius.....	56
Gambar 4.9 Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius ..	58
Gambar 4. 10 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap Bilangan Reynolds yang divariasikan.....	60
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> (CoP/CoP_o) terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius.....	61
Gambar 4. 12 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap Tip Speed Ratio (TSR) dan Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius.....	63
Gambar 4.13 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap Tip Speed Ratio (TSR) di Turbin Angin Savonius dengan Variasi Bilangan Reynolds.....	65

DAFTAR SIMBOL

A	Cross sectional area (m^2)
B	diameter overlap (m)
C_D	Koefisien drag
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
d	Panjang karakteristik Turbin Savonius (m)
E_k	Energi kinetik (Joule)
F_D	Gaya drag (N)
g	gaya gravitasi (m/s^2)
H	Tinggi turbin Savonius (m)
h	Kenaikan tinggi manometer (m)
I	Kuat arus yang dihasilkan dari generator (ampere)
L	Lebar plat pengganggu (m)
m_1	Massa udara pada keadaan standar (kg)
m_2	Massa udara pada saat penelitian (kg)
n	Putaran turbin (rpm)
n_o	Putaran turbin tanpa plat pengganggu (rpm)
P_w	Daya angin (watt)
P_r	Daya turbin (watt)
P_1	Tekanan absolut udara dalam keadaan standar (N/m^2)
P_2	Tekanan absolut udara saat pengujian (N/m^2)
r	Jari-jari turbin (m)
Re	Bilangan Reynolds
S	Proyeksi lebar plat pengganggu (m)
SG	<i>Specific Gravity</i>
T	Torsi statis dari putaran poros (N.cm)
T_o	Torsi statis turbin tanpa plat datar pengganggu (N.cm)

T_1	Temperatur udara standar ($^{\circ}\text{K}$)
T_2	Temperatur ruang penelitian ($^{\circ}\text{K}$)
t	Tinggi plat datar pengganggu
U_{∞}	Kecepatan aliran <i>free stream</i> udara (m/s)
V	Tegangan yang dihasilkan dari generator (volt)
x	Kenaikan tinggi manometer dalam sudut 15°
z	Jarak antara pusat poros turbin Savonius dengan pusat poros plat datar pengganggu (m)
ρ_1	Massa jenis udara pada keadaan standar (kg/m^3)
ρ_2	Massa jenis udara pada saat penelitian (kg/m^3)
μ	Viskositas udara (Ns/m^2)
θ	Sudut plat pengganggu (deg)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi merupakan suatu hal yang berperan penting dalam keberlangsungan kehidupan di bumi ini. Tidak dapat dipungkiri bahwa seiring berjalannya waktu, kebutuhan energi semakin meningkat, khususnya di Indonesia. Hal ini juga diiringi dengan bertambahnya jumlah penduduk yang pesat dan teknologi yang semakin maju, menjadi faktor tambahan yang menyebabkan ketergantungan manusia terhadap energi semakin tinggi. Sebagai contoh, ketergantungan terhadap energi fosil, terutama minyak bumi dalam hal pemenuhan konsumsi di dalam negeri masih tinggi, yaitu sebesar 96% dengan rincian 48% minyak bumi, 18% gas, dan 30% batu bara. Namun, ketersediaan energi fosil, khususnya minyak bumi, yang saat ini masih menjadi tulang punggung energi yang dimanfaatkan manusia, semakin berkurang. Sementara itu, di Indonesia, potensi sumber daya energi terbarukan sangatlah besar. Salah satu potensi sumber daya energi terbarukan yang bisa dimanfaatkan adalah energi angin.

Dalam aplikasinya, kekuatan dan tenaga angin dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik. Dengan menggunakan turbin angin, tenaga angin diubah menjadi listrik melalui generator listrik. Angin akan memutar sudu turbin yang terhubung ke generator listrik melalui poros dan generator listrik akan membangkitkan listrik. Berdasarkan arah putarannya, turbin angin di bagi menjadi dua jenis, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* dan *Vertical Axis Wind Turbine*.

Turbin angin Savonius adalah salah satu contoh dari *Vertical Axis Wind Turbine*. Turbin tipe ini ditemukan pertama kali oleh Sigurd Johannes Savonius di tahun 1922. Konsep dari turbin angin konvensional ini adalah tabung silinder yang dipotong menjadi dua bagian sama besar dan disatukan menjadi seperti huruf S. Sudu Turbin Savonius (*Savonius Blade*) ini hanya

memiliki dua sudu, yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan dari kedua *blade* tersebut terletak pada cekungan dalam sudu Turbin Savonius. Sisi *Advancing blade* memiliki cekungan di bagian dalam sudu turbin dan tegak lurus dengan arah datangnya aliran. Sedangkan *returning blade* adalah sisi yang membelakanginya.

Turbin angin ini bergerak karena adanya selisih gaya *drag* dari kedua sudu. Gaya *drag* yang terjadi di kedua sudu tersebut jika diselisihkan akan menghasilkan torsi yang apabila dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin angin, akan menghasilkan daya dari turbin angin. Untuk menghasilkan daya turbin angin yang lebih besar, maka selisih gaya *drag* juga harus makin besar. Untuk mengurangi gaya *drag* di daerah *returning blade*, diletakkan pengganggu berupa plat datar yang dipasang di depan *returning blade*. Pengganggu yang berupa plat datar ini dapat digerakkan ke arah *advancing blade* dengan besar sudut yang bervariasi.

Pada simulasi terdahulu yang pernah dilakukan oleh **Mohamed et al (2010)** mengenai optimasi dari Turbin Savonius dengan menggunakan pengganggu berupa plat di depan *returning blade*. Simulasi ini membandingkan Turbin Savonius dengan dua sudu dan tiga sudu yang menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Simulasi ini menggunakan *speed ratio* (λ) sebesar 0.7 dan kecepatan angin (U) sebesar 10 m/s. Sudut plat (β) divariasikan agar mendapatkan *output power* yang tinggi. Dari hasil simulasi tersebut, untuk Turbin Savonius yang memiliki dua sudu, dengan sudut $\beta = 100,83^\circ$, didapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*) relatif meningkat sebesar 27,3%. Sedangkan untuk Turbin Savonius yang memiliki tiga sudu, dengan sudut $\beta = 80,52^\circ$, didapatkan *Cp* relatif meningkat sebesar 27,5%.

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Altan et al (2008)** mengenai peningkatan kerja dari rotor Turbin Savonius dengan pengganggu berupa plat, dengan meletakkan plat tersebut di depan rotor turbin. Kedua plat tersebut memiliki panjang ℓ_1 dan ℓ_2 serta besar sudut plat α dan β . Pada penelitian ini digunakan *average*

wind speed sebesar 7 m/s dan *Reynolds Number* sebesar $1,5 \times 10^5$. Dari hasil penelitian tersebut, dengan menempatkan l_1 sebesar 45 cm dan l_2 sebesar 52 cm, sudut α sebesar 45° dan sudut β sebesar 15° , didapatkan *Coefficient of Power (CoP)* relatif meningkat sebesar 38% dengan penyusunan plat pengganggu yang optimum.

Pada simulasi yang dilakukan oleh **Thevenin et al (2011)** mengenai analisa pengaruh dari pemberian pengganggu dan mengganti sudu turbin dengan bentuk yang optimal terhadap performa turbin angin Savonius dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics*. Simulasi ini membandingkan sudu turbin angin Savonius yang berbentuk setengah lingkaran dengan sudu yang bentuknya optimal dan diberi pengganggu di depan *returning blade*. Dengan menggunakan kecepatan angin 10 m/s dan *speed ratio* (λ) sebesar 0,7. Dari hasil penelitian didapatkan koefisien daya output naik sebesar 38,9% saat $\lambda = 0,7$ dan kenaikan torsi saat 75,4% saat $\lambda = 1,4$ yang dibandingkan dengan turbin savonius tidak berpengganggu.

Dalam studi eksperimen ini akan dilakukan penelitian tentang *performance* dari *Savonius Wind Turbine* yang memiliki dua jenis sudu, yaitu *advancing blade*, sudu yang cembung dari sisi arah datangnya angin, dan *returning blade*, sudu yang cekung dari sisi arah datangnya angin. Pengganggu berupa plat datar ditempatkan di depan *returning blade* dengan sudut penempatan plat datar divariasikan dari 0° sampai 90° dengan kelipatan 5° dengan bilangan *Reynolds* sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonius yang memiliki dua sudu ini berputar karena gaya *drag* yang terjadi di sudu *advancing blade* lebih besar daripada di sudu *returning blade*. Semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu tersebut, semakin besar pula perbedaan torsi. Untuk meningkatkan efisiensi turbin angin tipe Savonius, dipasang pengganggu berupa plat datar dari *acrylic* di

depan *returning blade* dan diberikan variasi sudut. Ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi di *returning blade* akan terganggu oleh pengganggu berupa plat datar itu. Disamping itu, aliran fluida yang mengarah ke *returning blade* akan terhalang dan bisa mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade*. Maka, gaya *drag* yang terjadi di *advancing blade* akan semakin besar. Begitu pula dengan nilai torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar dan daya yang dihasilkan juga semakin besar.

Penelitian ini dilakukan menggunakan Turbin Savonius dengan pengganggu plat datar yang menutupi bagian *returning blade* dan diberikan variasi sudut kemiringan ke arah *advancing blade*. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Turbin angin Savonius dipasang secara vertikal dan diberi pengganggu efektif berupa plat datar yang memiliki panjang 120 mm, tebal 3 mm, dan tinggi 150 mm diletakkan di depan sisi *returning blade*. Dengan adanya pengganggu ini, gaya *drag* yang mengarah ke *returning blade* akan terganggu dan mengecil, sehingga selisih gaya *drag* yang terjadi antara kedua sudu semakin besar. Tentunya, perbedaan torsinya juga akan semakin besar dan daya yang dibangkitkan semakin besar pula.
2. Variasi sudut dari pengganggu berupa plat datar di depan *returning blade* akan menyebabkan aliran fluida mengarah ke *advancing blade* dan kecepatan fluida di *advancing blade* akan semakin meningkat. Hal ini akan meningkatkan gaya *drag* di sisi *advancing blade* dan mengakibatkan peningkatan torsi positif.

Untuk membuktikan hipotesa di atas, dilakukan studi eksperimen dengan turbin angin Savonius yang memiliki diameter (D)=60 mm dan nilai $L/D = 2$ dengan pengganggu berupa plat datar. Sudut pengganggu tersebut divariasikan dari 0° hingga 90° dengan kelipatan 5° pada bilangan *Reynolds* sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemasangan pengganggu berupa plat datar dari *acrylic* di depan *returning blade* terhadap performa turbin angin tipe Savonius. Plat datar yang digunakan memiliki nilai $L/D = 2$ dengan memvariasikan perubahan sudutnya (θ). Penelitian ini mengukur dan menghasilkan:

1. Putaran dari turbin angin tipe Savonius saat diberikan aliran udara dengan bilangan Reynolds sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
2. Torsi statis dari turbin angin tipe Savonius saat diberikan aliran udara dengan bilangan Reynolds sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
3. Nilai arus dan tegangan generator listrik untuk mendapatkan besar daya yang dihasilkan.
4. Bilangan Reynolds sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 terhadap *tip speed ratio* (λ).
5. Torsi statis dari turbin angin tipe Savonius terhadap *tip speed ratio* (λ).
6. *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ).

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang ada dari studi eksperimen Turbin Savonius ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa dilakukan di turbin angin Savonius dengan diameter (D) sebesar 60 mm.
2. Pengganggu diletakkan di depan *returning blade* berupa plat datar dari *acrylic* dengan tebal 3 mm, tinggi 150 mm, dan panjang (L) sebesar 120 mm.
3. Variasi kemiringan pengganggu dengan sudut (θ) yang digunakan adalah sebesar $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ dengan kelipatan 5° .
4. Bilangan *Reynolds* yang digunakan adalah sebesar $6,0 \times 10^4$, $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
5. Penelitian dilakukan dengan aliran udara satu arah.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang dilakukan ini adalah sebagai berikut:

1. Ikut serta dalam memanfaatkan potensi sumber daya energi terbarukan yang bisa dimanfaatkan, terutama energi angin.
2. Memberikan rancangan turbin angin tipe Savonius sesuai dengan sifat angin di daerah turbin angin tersebut akan dipasang.
3. Mengetahui konstruksi turbin angin tipe Savonius yang tepat dari berbagai variasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin Angin merupakan suatu perangkat mekanis yang dirancang khusus untuk mengkonversi sebagian energi kinetik menjadi energi mekanik yang berguna. Sebelum adanya turbin angin, dibuatlah kincir angin yang berguna untuk mengakomodasi kebutuhan para petani seperti memompakan air, dan menggiling padi. Seiring perkembangan zaman, maka dibuatlah turbin angin yang juga didefinisikan sebagai *Wind Energy Conversion System (WECS)* atau jika digunakan untuk memproduksi energi listrik disebut sebagai *Wind Turbine Generator (WTG)*. Berbagai desain turbin angin telah dikembangkan dan sebagian besar dari desain tersebut memutar *propellernya* dengan *lift force* atau *drag force* yang merupakan hasil dari interaksi dengan angin. Berdasarkan posisi sumbu rotornya, turbin angin dibagi menjadi dua, yaitu turbin angin dengan sumbu vertikal atau disebut *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* dan turbin angin dengan sumbu horizontal atau disebut *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*.

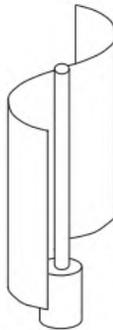
Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) memiliki kemampuan untuk menerima angin dari berbagai arah dan menggerakkan generator di permukaan tanah. Turbin angin sumbu vertikal tipe Savonius memiliki kecepatan rendah adalah tipe yang digunakan untuk mesin sederhana dengan efisiensi dan *rotation per minute (rpm)* rendah. Untuk menggerakkan turbin angin tipe Savonius, dibutuhkan gaya *drag*. Sedangkan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus akan menghasilkan keuntungan yang lebih besar dibandingkan tipe Savonius. Tipe ini membutuhkan gaya *lift* untuk menggerakkan turbinnya. Sumbu rotasi dari rotor turbin jenis ini tegak lurus terhadap permukaan tanah.

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) biasanya digunakan untuk tipe angin yang memiliki kecepatan sedang dan tinggi dengan profil *bladenya* berbentuk *airfoil* atau disebut juga

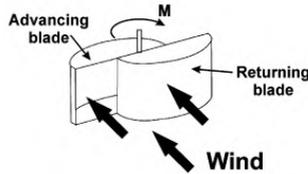
asymmetrical aerodynamic profile. Turbin jenis ini digunakan di pembangkit tenaga listrik dan biasanya memiliki rotor berjumlah dua atau tiga *blade*. Untuk menggerakkan *blade* di turbin angin jenis ini, dibutuhkan gaya *lift* dari angin yang bertiup. Turbin angin ini memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara dan diarahkan ke arah datangnya angin untuk dapat memanfaatkan tenaga angin.

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin jenis Savonius pertama kali ditemukan oleh **Sigurd Johannes Savonius** di awal abad 20-an, tepatnya di tahun 1922. Turbin yang memiliki sumbu vertikal ini rotornya berbentuk setengah silinder yang bentuknya menyerupai huruf “S”. Ada dua sisi di turbin ini, yaitu sisi yang berbentuk cembung atau disebut *returning blade* dan sisi lain yang berbentuk cekung disebut *advancing blade*. Sisi *returning blade* membelakangi arah datangnya angin, sedangkan sisi *advancing blade* akan menangkap angin. Dengan memanfaatkan gaya *drag* dari sudu-sudunya, turbin Savonius ini bisa bergerak dan bisa menghasilkan daya dengan cara mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanis yang kemudian menjadi energi listrik. Keunggulan dari turbin angin Savonius adalah tidak memerlukan torsi awal untuk memutarnya. Skema dari Turbin Angin Savonius dan bentuk rotornya bisa dilihat gambar 2.1 dan gambar 2.2.



Gambar 2.1 Skema Turbin Angin Savonius



Gambar 2.2 Rotor Turbin Angin Savonius

2.3 Bilangan Reynolds (Reynolds Number)

Bilangan Reynolds adalah suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan jenis aliran turbulente atau laminar. Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya viskos.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viskos}} \quad (2.1)$$

dimana,

$$\text{Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Gaya Viskos} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \quad (2.3)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right)} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

Dengan penjelasan:

- ρ : densitas fluida
- U_{∞} : kecepatan *free stream flow* di fluida
- μ : viskositas dinamis fluida
- L : panjang karakteristik,

dalam penelitian ini, panjang karakteristik (L) adalah $d = 2 \cdot D - b$.
dengan: d = diameter turbin

D = diameter sudu turbin

b = diameter overlap

Dalam perhitungan aliran fluida yang melewati turbin, diameter turbin (d) dapat digunakan untuk menggantikan panjang karakteristik (L). Maka rumusnya menjadi:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot d}{\mu} \quad (2.5)$$

2.4 Power Turbin

Pada dasarnya turbin angin diturunkan berdasarkan prinsip-prinsip dasar dengan menggunakan konservasi massa dan konservasi energi dalam aliran angin. Prinsip kerjanya yaitu mengubah energi kinetic yang berasal dari angin menjadi energi mekanik yaitu rotasi di turbin dan diubah menjadi energi listrik. Sehingga, yang berpengaruh terhadap daya keluaran turbin yaitu energy kinetic. Besarnya yaitu:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot U^2 \quad (2.6)$$

Energi angin tersebut dikonversi menjadi energi mekanik yang berupa rotasi di turbin. Maka besar luas dari turbin yang terkena angin dapat dirumuskan dengan:

$$A = 2 \cdot H \cdot D \quad (2.7)$$

Massa udara yang mengalir tiap satu sekon, dapat dituliskan dengan:

$$m = \rho \cdot U \cdot A \quad (2.8)$$

Besar daya angin dapat ditunjukkan dengan rumus:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U \cdot U^2 \quad (2.9)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.10)$$

dimana:

E_k = Energi Kinetik (Joule)

m = massa (kg)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

U = kecepatan (m/s)

P_w = daya angin (Watt)

A = luas penampang turbin (m^2)

H = tinggi turbin (m)

D = diameter sudu turbin (m)

Daya angin yang didapatkan dari rumus 2.10 adalah didapat dari angin saja. Tidak semua besar daya angin yang didapatkan bisa dikonversikan menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin. Besar *power turbine* dapat dihitung dari tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator turbin dan dapat dituliskan dengan:

$$P = V \cdot I \quad (2.11)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.12)$$

Maka, besar *power turbine* adalah:

$$P_r = \frac{V^2}{R} \quad (2.13)$$

dengan:

P = Daya turbin (Watt)

V = Tegangan yang dihasilkan generator (Volt)

I = Arus yang dihasilkan generator (Ampere)

2.5 Coefficient of Power (CoP)

Koefisien daya atau disebut juga *coefficient of power* adalah perhitungan yang dapat menentukan besarnya performa turbin angin. *coefficient of power* ditunjukkan dengan perbandingan antara daya mekanik dari turbin karena terkena angin dengan daya kinetik dari angin itu sendiri. Semakin besar nilai *coefficient of power* nya, maka performa turbin angin tersebut akan semakin baik. Besarnya *oefficient of power* adalah:

$$CoP = \frac{P_r}{P_w} \quad (2.14)$$

$$CoP = \frac{\text{energi yang dihasilkan}}{\text{energi awal}} \quad (2.15)$$

dengan:

CoP = *Coefficient of Power*

P_r = Daya mekanik turbin atau *power turbine* (Watt)

P_w = Daya kinetik angin (Watt)

Besar CoP adalah kurang dari 1, sehingga besar daya angin dengan adanya *Coefficient of Power* akan menjadi:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot CoP \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (2.16)$$

Maka untuk CoP dapat dituliskan dengan:

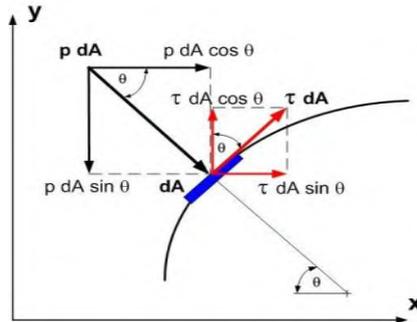
$$CoP = \frac{V \cdot I}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (2.17)$$

2.6 Gaya Drag

Gaya aerodinamika timbul dari sebuah benda yang dialiri aliran *viscous, incompressible*. Gaya tersebut dihasilkan karena

adanya tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya yang sejajar horisontal dengan arah aliran disebut dengan gaya *drag*, sedangkan gaya dengan arah vertikal atau tegak lurus dengan arah *free stream* disebut dengan gaya *lift*.

Gaya *drag* yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda). Gaya *drag* juga bisa terjadi berupa *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *friction drag* dan *pressure drag* ini disebut sebagai *total drag* seperti terlihat di gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Gaya Drag dan Lift

Komponen gaya searah sumbu - x adalah gaya hambat, sedangkan searah sumbu-y adalah gaya lift, gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \quad (2.18)$$

$$F_D = \int \cos\theta.(p.dA) + \int \sin\theta.(\tau.dA) \quad (2.19)$$

Gaya hambat sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* (C_D), Oleh karena itu persamaan untuk mengetahui gaya drag ini dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A} \quad (2.20)$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \quad (2.21)$$

dimana :

A = Luas permukaan benda (m^2)

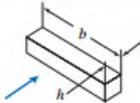
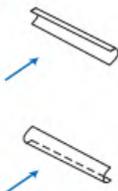
F_D = Gaya Drag (Newton)

$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2$ = Tekanan dinamis aliran bebas

Besar dari C_D bergantung dari bentuk geometri dari benda tersebut. Nilai C_D dari masing-masing geometri terlihat di tabel 2.1.

Tabel 2.1 Nilai C_D dari Berbagai Bentuk Geometri untuk $Re \geq 10^3$

(Fox, 1998)

Object	Diagram	$C_D(Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

^aData from Hoerner [16].

^bBased on ring area.

2.7 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio adalah perbandingan antara kecepatan putar di ujung sudu turbin dengan kecepatan *free stream* udara. *Tip speed ratio* atau TSR dilambangkan dengan λ . Rumusnya adalah:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2.22)$$

di mana:

λ = *tip speed ratio*

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

R = jari-jari turbin (m)

U = kecepatan angin (m/s)

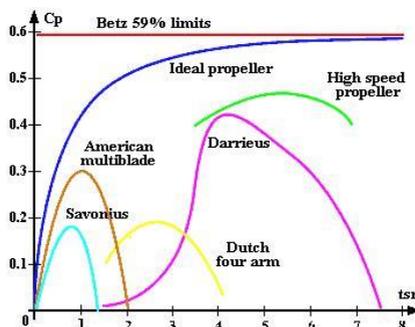
Nilai *tip speed ratio* juga bisa diperoleh dari persamaan:

$$\lambda = \frac{\text{Blade tip speed}}{U} \quad (2.23)$$

dimana *blade tip speed* adalah kecepatan putar di ujung blade atau rotor. *Blade tip speed* rumusnya adalah:

$$\text{Blade Tip Speed} = \frac{\text{rotational speed (RPM)} \times \pi \times D}{60} \quad (2.24)$$

Tiap jenis turbin angin mempunyai karakteristik masing-masing. Karakteristik ini bisa dinilai dari gambar 2.4 mengenai grafik yang menunjukkan *coefficient of power* terhadap rasio dari *tip speed ratio*. Terlihat bahwa bentuk dari grafik tiap rotor berbeda dan berbentuk parabolik. Ini dapat diartikan bahwa semakin meningkatnya *tip speed ratio*, tidak selalu diiringi dengan meningkatnya *coefficient of power*. Ada titik tertinggi dari masing-masing rotor dimana pada titik tersebut nilai *coefficient of power* atau efisiensinya turbinnya adalah maksimum. Pada gambar 2.4 juga terlihat ada *Ideal Betz limit*, yaitu titik maksimum dari *coefficient of power* yang dapat dicapai oleh turbin angin terhadap energi mekanik yang dihasilkan oleh *free stream* udara. Seorang ahli aerodinamika dari Jerman, Albert Betz, mengemukakan bahwa *coefficient of power* maksimum yang dapat dicapai oleh semua jenis turbin angin adalah senilai 0,593.



Gambar 2.4 Grafik *Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio* pada Rotor Turbin Angin (Fox, 1998)

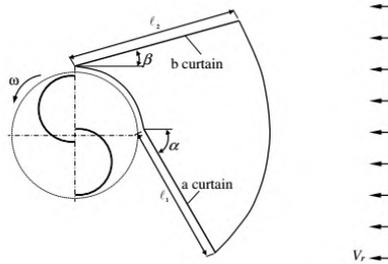
2.8 Penelitian Terdahulu

Untuk melakukan penelitian ini, ada beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini. Penelitian tersebut yaitu:

2.8.1 Studi Eksperimen Turbin Angin Savonius Berpengganggu

Penelitian mengenai studi eksperimen ini telah dilakukan oleh **Burçin Deda Altan, et al (2008)** mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius dengan menambahkan pengganggu berupa plat yang berfungsi untuk mendefleksikan angin. *Power Performance* dari turbin angin Savonius hanya $CoP \approx 15\%$. Ini relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan *horizontal axis wind turbine* yang memiliki $CoP \approx 25\%$ dan turbin angin Darrieus dengan $CoP \approx 35\%$.

Karena torsi di *returning blade* lebih kecil daripada di *advancing blade*, rotor akan berputar ke arah torsi yang positif. Untuk menaikkan *power*, maka torsi yang negatif harus dikurangi atau dihilangkan. Maka, plat ini diletakkan di depan *returning blade* untuk mengurangi torsi yang negatif tersebut. Skemanya terlihat di gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema Turbin Angin Savonius Berpengganggu (Altan et al, 2008)

Ada tiga macam variasi panjang plat di ℓ_1 dan ℓ_2 dari plat pengganggu yang digunakan. Ketiga jenisnya ditunjukkan di tabel 2.2 dibawah ini.

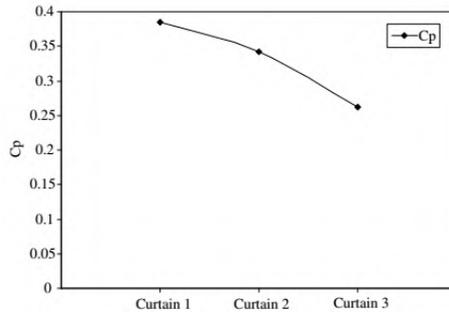
Tabel 2.2 Dimensi dari Penyusunan Plat Pengganggu (Altan et al, 2008)

Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

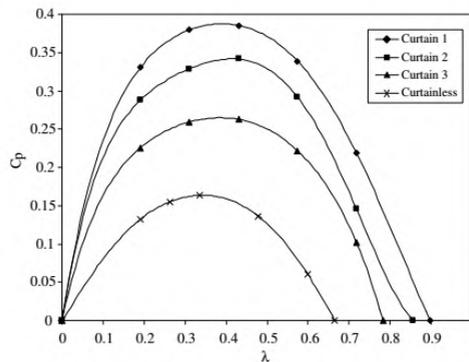
Untuk melakukan penelitian ini, *Wind tunnel* yang digunakan adalah tipe *open-circuit* dengan *power capacity* sebesar 5,7 kW. Peletakkan turbin angin Savonius adalah $L \cong 5$ m sebelum pintu keluar *wind tunnel*. Kecepatan angin rata-rata sebesar 7 m/s dengan Bilangan Reynold sebesar $1,5 \times 10^5$. Selain memvariasikan ℓ_1 dan ℓ_2 , variasi sudut α dari 30° hingga 60° dan sudut β dari 0° hingga 15° .

Setelah dilakukan percobaan, hasil yang *Coefficient of Power* optimal adalah menggunakan *curtain 1* ($\ell_1 = 45$ cm dan $\ell_2 = 52$ cm) dengan variasi sudut α sebesar 45° dan β sebesar 15° . Dengan variasi yang optimal ini didapatkan *Coefficient of*

Power sebesar 38,5%. Hasilnya dapat dilihat di gambar 2.6 dan 2.7.



Gambar 2.6 Pengaruh Panjang *Curtain* Terhadap *Coefficient of Power* (Altan et al, 2008)



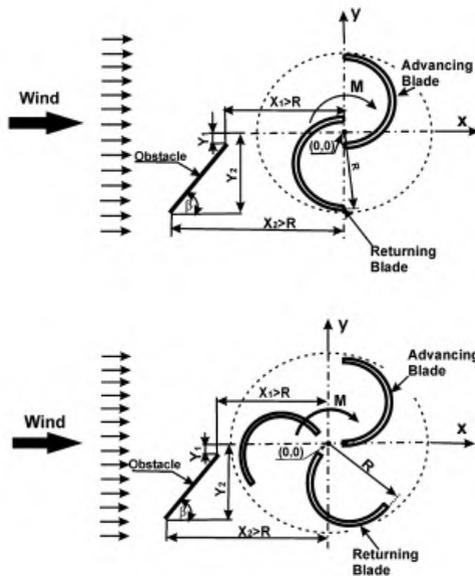
Gambar 2.7 Pengaruh Variasi *Curtain Length* Terhadap *Coefficient of Power* (Altan et al, 2008)

2.8.2 Simulasi Pengoptimalisasian Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengganggu di Sisi *Returning Blade*

Penelitian kali ini menggunakan simulasi dengan *software* CFD yang dilakukan oleh Mohamed et al, 2010, dengan tujuan

untuk mengoptimalkan penggunaan turbin angin Savonius. Hal ini didasari karena turbin angina Savonius memiliki kecepatan dan efisiensi yang rendah. Bahkan secara teoritis, $CoP \approx 0.18$ adalah yang terbaik. Namun dibalik kelemahannya, harganya yang murah, simple, dan sederhana, merupakan kelebihan yang dimiliki turbin angin Savonius. Oleh karena itu, jika efisiensi yang tinggi bisa didapatkan, turbin angin Savonius akan menjadi pelengkap yang menarik untuk membangkitkan listrik dari tenaga angin.

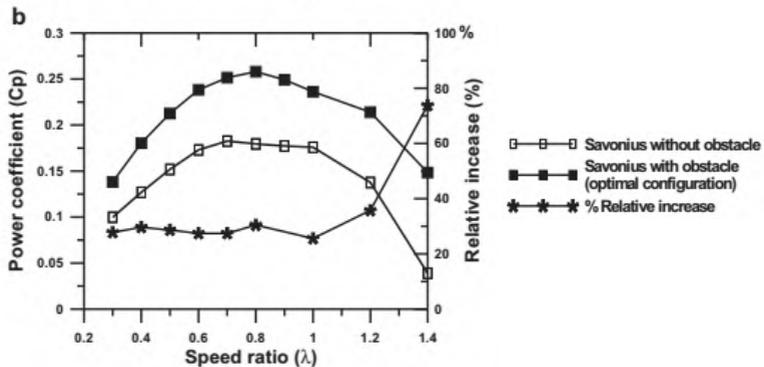
Penelitian ini memvariasikan besar sudut plat (β) dan *speed ratio* (λ) dan menggunakan kecepatan 10 m/s. Dalam penelitian ini dibandingkan antara turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dan tiga sudu yang masing-masing diberi pengganggu seperti gambar 2.8.



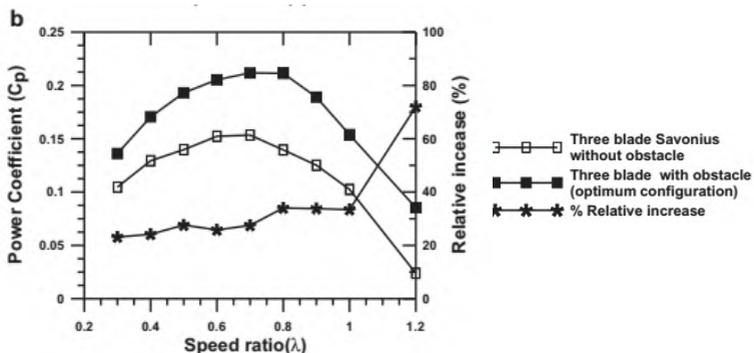
Gambar 2.8 Skema Dua Sudu dan Tiga Sudu Turbin Angin Savonius dengan Plat Pengganggu (Mohamed et al, 2010)

Dari hasil simulasi di *software* CFD, *Coefficient of Power* untuk turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu akan

meningkat sebesar 27,3% dengan *speed ratio* (λ) sebesar 0,7 dan besar sudut β adalah 100,8°. Sedangkan untuk turbin angin Savonius yang memiliki tiga sudu, *Coefficient of Power*nya akan meningkat sebesar 27,5% dengan *speed ratio* (λ) sebesar 0,7 dan besar sudut β adalah 80,52°. Hasilnya dapat dilihat di gambar 2.9 dan 2.10.



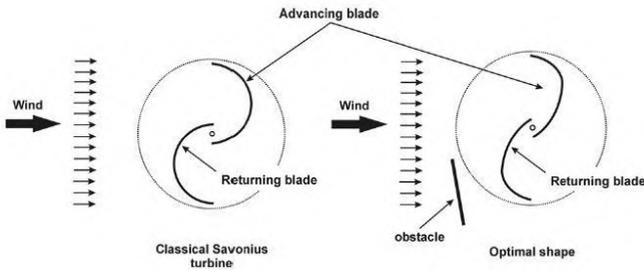
Gambar 2.9 Grafik Hubungan antara *Speed Ratio* (λ) dengan *Coefficient of Power* (CoP) di Turbin Angin Savonius yang Memiliki Dua Sudu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2. 10 Grafik Hubungan antara *Speed Ratio* (λ) dengan *Power of Coefficient* (CoP) di Turbin Angin Savonius yang Memiliki Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)

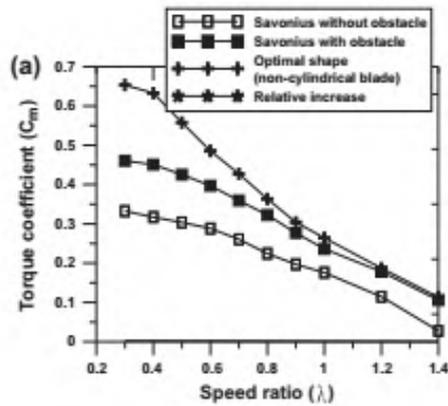
2.8.3 Optimalisasi Bentuk *Blade* dari Turbin Angin Savonius yang dimodifikasi Menggunakan Pengganggu di depan *Returning Blade*

Penelitian kali ini menggunakan simulasi dengan *software* CFD yang dilakukan oleh **Thevenin et al, 2010**, dengan menganalisa pengaruh dari pemberian pengganggu dan bentuk dari sudu turbin terhadap performa turbin Savonius dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics*. Ada dua bentuk sudu yang disimulasikan, yaitu seperti di gambar 2.11.

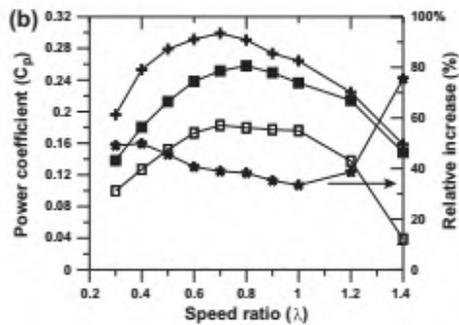


Gambar 2.11 Skema turbin angin Savonius dengan konfigurasi sudu berbentuk setengah lingkaran dan sudu optimal (**Thevenin et al, 2011**)

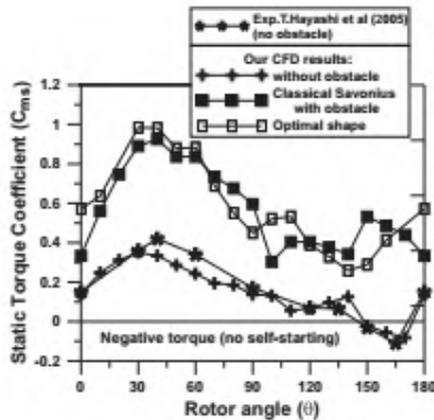
Dipenelitian ini, yang diukur adalah nilai koefisien torsi, koefisien daya, dan koefisien torsi statis terhadap *speed ratio* (λ). Dari perbandingan ketiganya, didapatkan hasil grafik seperti gambar 2.12, 2.13, dan 2.14.



Gambar 2.12 Grafik perbandingan koefisien torsi dengan *speed ratio* (λ) (Thevenin et al, 2011)



Gambar 2.13 Grafik perbandingan koefisien daya dengan *speed ratio* (λ) (Thevenin et al, 2011)



Gambar 2.14 Grafik perbandingan koefisien torsi statis dengan $speed\ ratio\ (\lambda)$ (Thevenin et al, 2011)

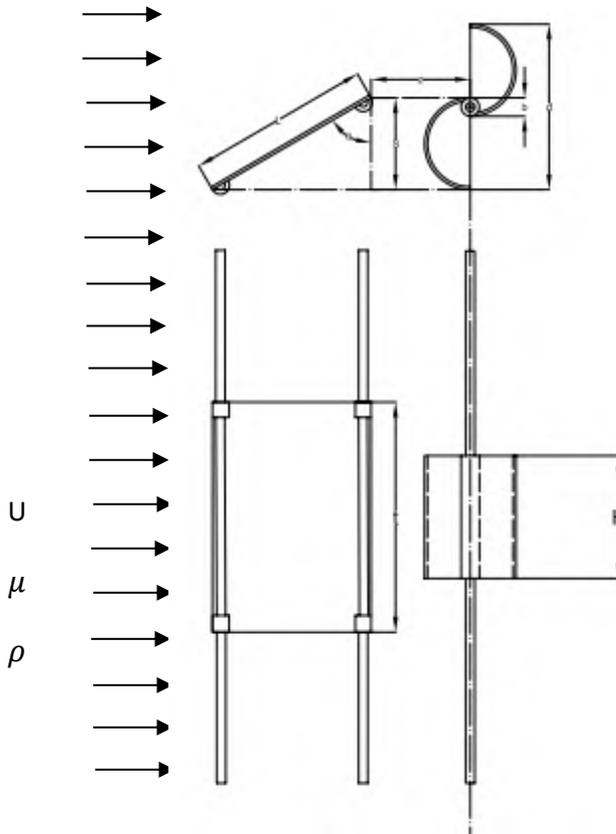
Dari hasil yang didapatkan dari penelitian ini, terlihat bahwa dengan menggunakan bentuk sudu turbin yang optimal dan pengganggu di depan *returning blade*, nilai dari koefisien torsi statis, koefisien daya, dan koefisien torsi yang lebih besar daripada turbin yang tidak menggunakan pengganggu ataupun dengan sudu turbin yang setengah lingkaran. Dengan menggunakan sudu turbin yang optimal ini, didapatkan koefisien daya output naik sebesar 38,9% saat $\lambda = 0,7$ dan kenaikan torsi saat 75,4% saat $\lambda = 1,4$ yang dibandingkan dengan turbin savonius tidak berpengganggu.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

1.1 Parameter Pengukuran

Pada studi eksperimen turbin angin tipe Savonius yang dilakukan di *wind tunnel*, pengganggu berupa plat datar diletakkan di depan *returning blade* dan divariasikan sudut kemiringannya mulai 0° hingga 90° dengan kelipatan 5° . Sehingga, perlu adanya analisa dimensi untuk mengetahui parameter apa saja yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran. Parameter tersebut adalah massa jenis fluida (ρ), kecepatan fluida (V), viskositas fluida (μ), diameter turbin (D), besar variasi sudut plat pengganggu (θ), perbandingan lebar plat pengganggu dengan diameter turbin ($\frac{L}{D}$), dan proyeksi dari lebar plat terhadap sudut pada penghalang (S). Skema peralatan beserta parameternya digambarkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Peralatan

dengan:

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

U = kecepatan fluida (m/s)

μ = viskositas fluida (Ns/m^2)

D = diameter turbin (m)

θ = sudut plat pengganggu

L = lebar plat pengganggu (m)

S = proyeksi lebar plat terhadap sudut penghalang (m)

t = tinggi penghalang (m)

H = tinggi turbin (m)

z = jarak antara pusat poros turbin dan pusat poros penghalang (m)

1.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengurangi jumlah kerumitan variabel eksperimental dengan teknik peringkasan. Selain itu, analisa dimensi juga bisa untuk mengetahui apakah parameter pengujian berpengaruh terhadap karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa plat datar. Metode yang digunakan adalah Metode Buckingham (*Phi-Teorema*).

1.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power (CoP)*

Setelah dilakukan analisa dimensi, diperoleh enam grup tak berdimensi, yaitu:

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2} = \text{Coefficient of Power}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D} = \text{Bilangan Reynolds}$$

$$\pi_3 = \frac{L}{D} = \text{Rasio lebar pengganggu berupa plat datar dengan diameter sudu turbin angin Savonius.}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D} = \text{Rasio proyeksi lebar plat pada turbin savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.}$$

$$\pi_5 = \frac{H}{D} = \text{Rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin angin Savonius.}$$

$$\pi_6 = \frac{b}{D} = \text{Rasio lebar } \textit{overlap} \text{ dengan diameter sudu turbin angin Savonius.}$$

$$\pi_7 = \frac{t}{D} = \text{Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius.}$$

Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{L}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{t}{D}\right)$$

Pada penelitian ini, variable tetapnya adalah $\frac{L}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{t}{D}$. Sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}$ dan $\frac{S}{D}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin. Sehingga,

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}\right)$$

dimana nilai dari $S = L \cos \alpha$ dan D sebanding dengan d ($D = \frac{d+b}{2}$), maka didapatkan:

$$CoP = f_3(Re, \alpha)$$

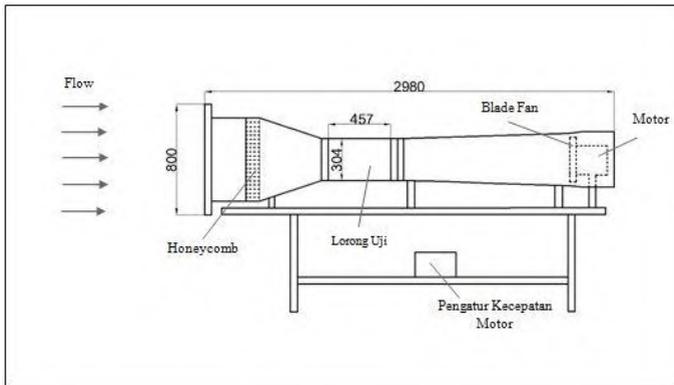
1.3 Peralatan yang digunakan

1.3.1 Wind Tunnel (Terowongan Angin)

Penggunaan *wind tunnel* dimaksudkan agar dapat mengerjakan uji coba dengan sebuah model di dalam terowongan yang dialiri udara yang bergerak mengalir searah. Dengan menggunakan *wind tunnel*, kondisinya mendekati kenyataan dan biayanya lebih murah, sehingga hasilnya bisa dikatakan akurat. *Wind tunnel* yang digunakan seperti pada gambar 3.2.

Spesifikasi Wind Tunnel

Jenis <i>wind tunnel</i>	: <i>Subsonic, open circuit wind tunnel</i>
Bentuk <i>test section</i>	: Penampang segi delapan
Dimensi	
Panjang	: 457 mm
Lebar	: 304 mm
Tinggi	: 304 mm
Kecepatan maksimal	: 20 m/s
Mach number	: <0,9



Gambar 3.2 *Wind Tunnel Subsonic, Open Circuit*

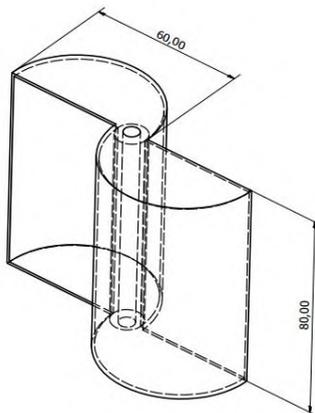
1.3.2 Benda Uji

Pada studi eksperimen ini, benda yang diujikan adalah turbin angin tipe Savonius dengan pengganggu berupa plat datar. Skema Turbin Savonius terlihat pada gambar 3.3.’

Profil turbin angin Savonius

Tinggi (T) : 80 mm

Diameter (D) : 60 mm

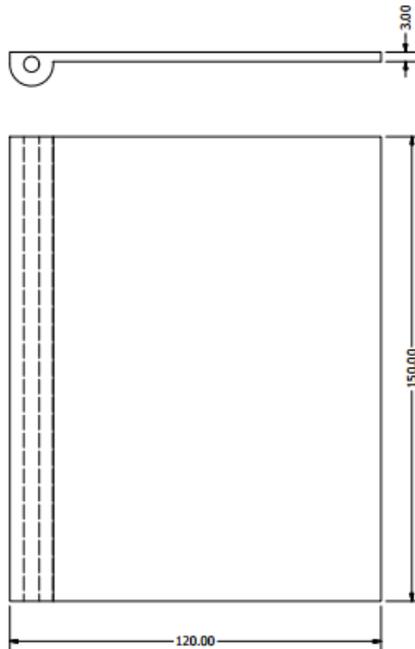


Gambar 3.3 Skema Turbin Angin Tipe Savonius

Profil pengganggu berupa plat datar seperti pada gambar

3.4 dengan spesifikasi:

Lebar (d)	: 120 mm
Tinggi (L)	: 150 mm
Tebal	: 3 mm
Sudut kemiringan	: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75°, 80°, 85°, dan 90°.



Gambar 3.4 Plat Datar Pengganggu

3.3.3 Alat Ukur

Pada studi eksperimen ini, digunakan tiga alat ukur yang digunakan untuk mencari putaran turbin dan torsi yang dihasilkan.

a. Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek yang berputar. Tachometer yang digunakan yaitu ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA tipe HHT12*** dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit seperti di gambar 3.5.



Gambar 3.5 Tachometer OMEGA HHT12

b. Torquemeter

Torquemeter adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur torsi dari suatu objek. Jenis *torquemeter* yang digunakan adalah **LUTRON *Torquemeter*** dengan **model TQ-8800, high resolution 0,1 Newton-cm** seperti pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 LUTRON Torquemeter TQ-8800

c. Multimeter

Multimeter adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur tegangan (*voltmeter*), hambatan

(*ohmmeter*), dan arus listrik (*amperemeter*). Jenis yang digunakan adalah Multimeter Sanwa Digital tipe CD-800A dengan resolusi 0,1 mV untuk tegangan DC, 0,001 V untuk tegangan AC, 0,01 mA untuk arus DC, 0,01 mA untuk arus AC, serta 0,1 ohm untuk hambatan seperti pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Multimeter Sanwa Digital CD-800A

d. Pitot Static Tube

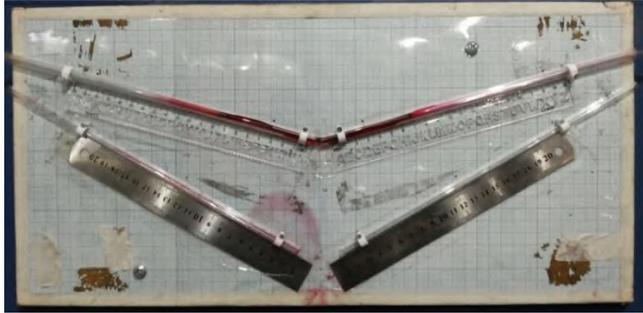
Pitot Static Tube adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur tekanan dinamis aliran dan digunakan untuk menghitung kecepatan aliran udara di *wind tunnel* seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Pitot Static Tube

e. Manometer

Manometer yang digunakan adalah *Inclined Manometer*, adalah alat ukur yang berfungsi untuk mengukur tekanan udara di ruang yang tertutup. Manometer yang digunakan memiliki sudut kemiringan 15° dengan fluida *red oil* dan *specific gravity* 0,827 seperti pada gambar 3.9.



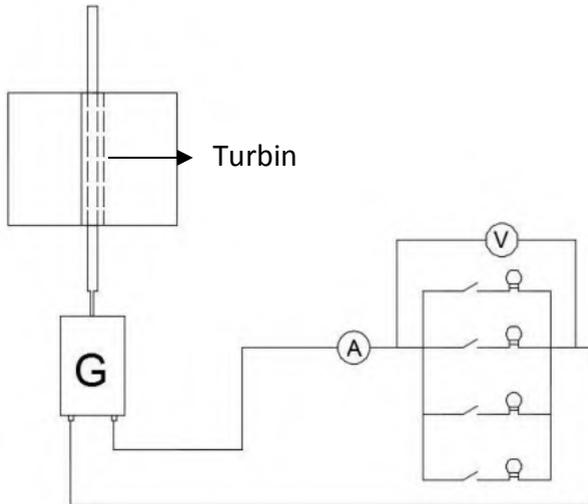
Gambar 3.9 Manometer

f. Generator Listrik

Generator listrik digunakan untuk energi kinetik dari putaran poros turbin angin tipe Savonius menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik ini diukur menggunakan multimeter.

1.4 Metode Pengukuran Daya

Besar power yang dihasilkan oleh turbin angin tipe Savonius ini diukur dengan cara menghubungkan poros turbin dengan poros generator menggunakan *flexible coupling*. Lalu generator akan mengeluarkan tegangan dan arus yang akan menyalakan beban berupa beberapa buah lampu. Lampu dipasang secara paralel dan diberikan saklar, agar beban lampu dapat diatur dan bisa ditemukan jumlah daya terbesar yang dihasilkan. Besar nilai tegangan dan arus digunakan untuk menghitung besar daya riil. Skema pengukuran dayanya ditunjukkan pada gambar 3.10 dengan G adalah generator yang letaknya dibawah turbin angin tipe Savonius, A adalah *amperemeter*, dan V adalah *voltmeter*.



Gambar 3.10 Skema Pengukuran Daya

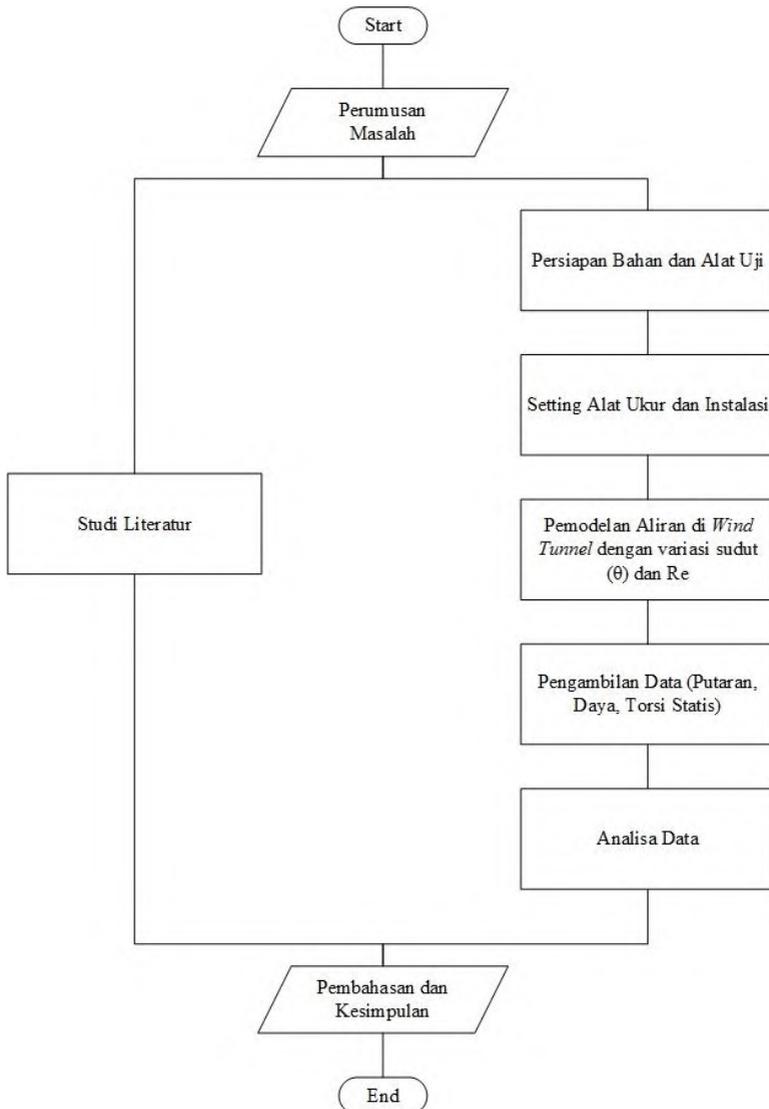
1.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian untuk pengambilan data adalah:

1. Merencanakan, membeli, dan membuat peralatan yang digunakan.
2. Memasang benda uji berupa Turbin Savonius di *test section* pada *wind tunnel*.
3. Menyalakan *fan* dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan inverter agar nilai kecepatan di *test section* sesuai yang diharapkan pada bilangan Reynolds $6,0 \times 10^4$.
4. Mengatur besar frekuensi di *inverter* dengan melakukan pengukuran terhadap temperatur dan kecepatan aliran dengan menggunakan *pitot tube* dan manometer agar menghasilkan bilangan Reynolds yang diharapkan.
5. Mengukur putaran poros Turbin Savonius dengan *tachometer*.
6. Mengukur torsi statis dengan menggunakan *torquemeter*.
7. Menghubungkan poros turbin angin Savonius dengan generator listrik.

8. Mengukur tegangan dan hambatan listrik yang diberikan rangkaian pembebanan dan dihubungkan dengan generator menggunakan multimeter.
9. Mematikan *fan*.
10. Mengulangi langkah 3 sampai 9 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 .
11. Memasang pengganggu berupa plat datar yang dipasang di depan *returning blade* dengan sudut 0° terhadap aliran fluida.
12. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan mengubah sudut dari pengganggu yang berupa plat datar menjadi 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , dan 90° .
13. Mematikan *fan*.
14. Mengolah data yang berupa putaran dan torsi menjadi *Coefficient of Power* (CoP), putaran (RPM), dan torsi statis serta memasukkan data tersebut ke grafik terhadap variasi sudut. Grafik dibuat dengan variasi bilangan Reynolds dan *tip speed ratio*.

1.6 Flowchart Penelitian



Gambar 3.11 *Flowchart* Penelitian

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan Bilangan Reynolds, yaitu 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 serta sudut plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius antara sudut 0° hingga 90° dengan kelipatan 5° . Data yang didapatkan dari penelitian ini adalah nilai torsi statis, putaran, dan *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat datar pengganggu.

2.1 Data Penelitian dan Contoh Perhitungan

Untuk mengetahui properties dari udara yang digunakan pada penelitian ini, digunakan sampel data saat sudut plat datar (θ) sebesar 50° dan Bilangan Reynolds sebesar $7,5 \times 10^4$.

2.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

- Massa Jenis Udara (ρ)

Berdasarkan persamaan Boyle – Gay Lussac mengenai pemuain gas, didapatkan bahwa:

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

Karena $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan 4.1 berubah menjadi:

$$\frac{P_1 \times m_1}{T_1 \times \rho_1} = \frac{P_2 \times m_2}{T_2 \times \rho_2} \quad (4.2)$$

dimana:

- P_1 = Tekanan absolut udara pada saat keadaan standar sebesar $1,01325 \text{ N/m}^2$
- P_2 = Tekanan absolut udara pada saat pengujian
- T_1 = Temperatur udara standar sebesar $288,2^\circ\text{K}$
- T_2 = Temperatur ruang penelitian sebesar $26,5^\circ\text{C}$ atau $299,5^\circ\text{K}$ (diasumsikan konstan)
- m_1 = Massa udara pada keadaan standar (acuan)

- m_2 = Massa udara pada saat penelitian
 ρ_1 = Massa jenis udara pada keadaan standar sebesar
 $1,225 \text{ kg/m}^3$
 ρ_2 = Massa jenis udara pada saat penelitian

Keadaan saat penelitian dan keadaan standar berada di ketinggian yang sama, sehingga:

$$P_1 = P_2 \quad (4.3)$$

Massa udara saat penelitian dan keadaan standar itu sama, maka:

$$m_1 = m_2 \quad (4.4)$$

Berdasarkan batasan di atas, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2} \quad (4.5)$$

$$\rho_2 = \frac{288,2^\circ K \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{299,5^\circ K}$$

$$\rho_2 = 1,17878 \text{ kg/m}^3$$

- **Viskositas Absolut Udara (μ)**

Untuk perhitungan viskositas absolut udara, digunakan persamaan Sutherland, yaitu:

$$\mu_2 = \frac{bT_2^{0.5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.6)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{msK}^{0.5}}$$

$$S = 110,4^\circ K$$

Temperatur udara di ruangan pengujian adalah $26,5^\circ C$ atau $299,5^\circ K$, sehingga:

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{msK}^{0.5}} \times (299,5^\circ K)^{0.5}}{1 + \frac{110,4^\circ K}{299,5^\circ K}}$$

$$\mu_2 = 1,8436 \times 10^{-5}$$

- **Kecepatan Free Stream**

Kecepatan *Free Stream* didapatkan dari rumus Bilangan Reynolds, yaitu:

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} D}{\mu} \quad (4.7)$$

Sehingga untuk kecepatan *free stream*:

$$U_{\infty} = \frac{Re \times \mu}{\rho \times D} \quad (4.8)$$

dimana:

Re = Bilangan Reynolds, dalam perhitungan ini digunakan $7,5 \times 10^4$

ρ = Massa jenis udara sebesar $1,17878 \text{ kg/m}^3$

μ = Viskositas udara sebesar $1,8507 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$

D = Panjang karakteristik turbin angin Savonius sebesar $10,6 \text{ cm}$ atau $0,106 \text{ m}$

U_{∞} = Kecepatan *free stream* udara dalam m/s

Maka:

$$U_{\infty} = \frac{7,5 \times 10^4 \times 1,8436 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{1,17878 \text{ kg/m}^3 \times 0,106 \text{ m}}$$

$$U_{\infty} = 11,0659 \text{ m/s}$$

2.1.2 Perhitungan Manometer

Manometer digunakan untuk mengukur kecepatan *free stream* udara sesuai dengan variasi Bilangan Reynolds yang sudah ditentukan. Fluida yang digunakan untuk manometer adalah *red oil* yang memiliki *specific gravity* sebesar 0,804. Manometer ini memiliki sudut 15° . Sesuai dengan Hukum Bernoulli, yaitu:

$$\frac{P_{statis}}{\rho} + \frac{V_{statis}^2}{2} + gZ_{statis} = \frac{P_{stagnasi}}{\rho} + \frac{V_{stagnasi}^2}{2} + gZ_{stagnasi} \quad (4.9)$$

Karena ketinggian (z) antara titik statis dan titik stagnasi sama, besar gaya gravitasi juga sama, maka persamaannya menjadi:

$$\frac{P_{statis}}{\rho} + \frac{V_{statis}^2}{2} = \frac{P_{stagnasi}}{\rho} + \frac{V_{stagnasi}^2}{2} \quad (4.10)$$

Kecepatan stagnasi bernilai nol, maka persamaannya menjadi:

$$\frac{P_{statis}}{\rho} + \frac{V_{statis}^2}{2} = \frac{P_{stagnasi}}{\rho} \quad (4.11)$$

Besarnya nilai *free stream* udara adalah sama dengan kecepatan statis, maka:

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(P_{stagnasi} - P_{statis})}{\rho}} \quad (4.12)$$

Selisih antara tekanan stagnasi dan tekanan statis digunakan untuk menentukan ketinggian manometer. Sehingga persamaannya menjadi:

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(\rho_{red\ oil} \times g \times h)}{\rho_{udara}}} \quad (4.13)$$

$$U_{\infty} = \sqrt{2 \times \frac{(SG_{red\ oil} \times \rho_{air} \times g \times h)}{\rho_{udara}}} \quad (4.14)$$

Maka, ketinggian manometer sesuai dengan kecepatan *free stream* udara yang dibutuhkan adalah:

$$h = \frac{U_{\infty}^2 \times \rho_{udara}}{2 \times SG_{red\ oil} \times \rho_{air} \times g} \quad (4.15)$$

dimana:

h = Ketinggian manometer yang dibutuhkan dalam meter

U_{∞} = Kecepatan *free stream* udara dalam *m/s* digunakan 11,0659 *m/s*

ρ_{udara} = Massa jenis udara sebesar 1,185 *kg/m³*

$SG_{red\ oil}$ = Specific gravity red oil sebesar 0,804

ρ_{air} = Massa jenis air sebesar 1000 *kg/m³*

g = Gravitasi sebesar 9,81 *m/s²*

Maka,

$$h = \frac{(11,0659 \text{ m/s})^2 \times 1,185 \text{ kg/m}^3}{2 \times 0,804 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h = 9,19 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Karena manometer yang digunakan ini memiliki kemiringan 15°, maka ketinggian manometer yang dibutuhkan adalah:

$$x = \frac{h}{2 \times \sin 15} \quad (4.16)$$

$$x = \frac{9,19 \times 10^{-3} \text{ m}}{2 \times \sin 15}$$

$$x = 17,77 \times 10^{-3} \text{ m} = 17,77 \text{ mm}$$

2.1.3 Perhitungan Daya

Untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius, digunakan rumus:

$$P_r = V \times I \quad (4.17)$$

dimana:

P_r = Daya listrik yang dihasilkan turbin angin, dalam Watt

V = Tegangan listrik, dalam Volt

I = Arus listrik, dalam Ampere

Sebagai contoh, saat sudut plat datar (θ) sebesar 50° dan Bilangan Reynolds sebesar $7,5 \times 10^4$ didapatkan tegangan listrik sebesar 1,58 V dan arus sebesar 68,3 mA, maka:

$$P_r = 1,53 \text{ V} \times 0,0683 \text{ A}$$

$$P_r = 0,1045 \text{ Watt}$$

2.1.4 Perhitungan Coefficient of Power

CoP atau *Coefficient of Power* adalah perbandingan antara keluaran daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius terhadap daya input yang menggerakkan turbin angin Savonius. Sementara itu, daya output dihitung dengan:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \quad (4.18)$$

Data turbin angin Savonius adalah:

- Diameter sudu turbin angin Savonius (D) = 60 mm = 0,06m
- Tinggi turbin angin Savonius (H) = 80 mm = 0,08 m
- Diameter *overlap* (b) = 14 mm = 0,014 mm

Maka, nilai luasan yang terkena angin dari turbin angin Savonius adalah:

$$A = (2D - b) \times H \quad (4.19)$$

$$A = (2 \times 0,06\text{m} - 0,014\text{m}) \times 0,08\text{m}$$

$$A = 8,48 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

Saat sudut plat datar (θ) sebesar 50° dan Bilangan Reynolds sebesar $7,5 \times 10^4$ di dapatkan:

$$\rho_{udara} = 1,17878 \text{ kg/m}^3$$

$$U = 11,07 \text{ m/s}$$

Maka,

$$P_w = \frac{1}{2} \times 1,17878 \text{ kg/m}^3 \times 8,48 \times 10^{-3} \text{ m} \times (11,07 \text{ m/s})^3$$

$$P_w = 6,78 \text{ Watt}$$

Dari data di atas, maka didapatkan nilai CoP sebesar:

$$CoP = \frac{P_r}{P_w} \quad (4.20)$$

$$CoP = \frac{0,1045 \text{ Watt}}{6,78 \text{ Watt}}$$

$$CoP = 0,0154 = 1,54\%$$

2.1.5 Perhitungan Tip Speed Ratio (λ)

Tip Speed Ratio atau TSR adalah perbandingan antara kecepatan yang berada di ujung turbin angin Savonius dengan kecepatan *free stream* udara. Dalam perhitungan TSR, putaran turbin yang digunakan adalah saat diberi pembebanan atau saat dirangkai dengan generator. Perhitungan TSR adalah:

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{U_\infty} \quad (4.21)$$

$$\lambda = \frac{2 \times \pi \times n_{terbebani} \times R}{60 \times U_\infty} \quad (4.22)$$

$$\lambda = \frac{2 \times 3,14 \times 648 \times \frac{0,106 \text{ m}}{2}}{60 \times 11,0659 \text{ m/s}}$$

$$\lambda = 0,3248$$

2.2 Analisa Performa Turbin Angin Tipe Savonius Tanpa Penganggu

Analisa performa turbin angin Savonius tanpa penganggu ini akan disajikan dalam bentuk grafik. Adapun grafik yang akan dibahas adalah nilai putaran, *coefficient of power* (CoP), dan torsi statis terhadap Bilangan Reynolds serta CoP terhadap *tip speed ratio* (TSR).

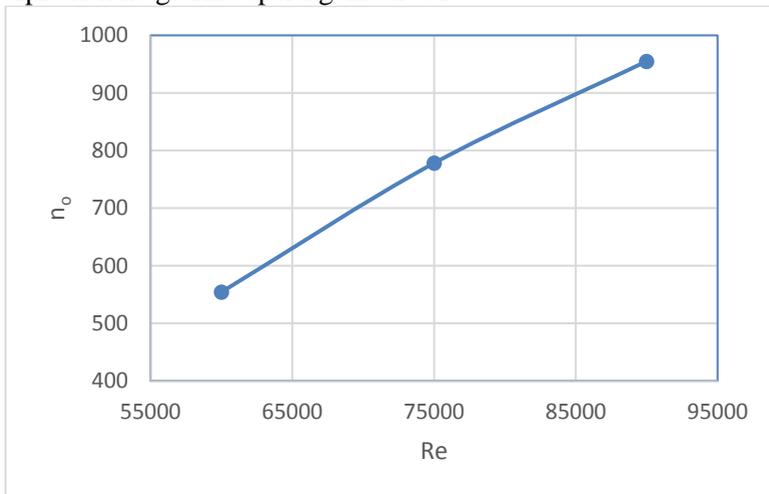
Dari penelitian yang dilakukan di turbin angin tipe Savonius dengan tiga Bilangan Reynolds dan tanpa penganggu, didapatkan data:

Tabel 4.1 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Penganggu

Bilangan Reynolds	Putaran (n_o)	Torsi Statis (N.cm)	CoP
6×10^4	554	1,6	0,12
$7,5 \times 10^4$	778	1,8	0,29
9×10^4	955	2	0,3

2.2.1 Analisa Nilai Putaran Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Penganggu

Penelitian ini mengukur putaran turbin angin Savonius saat tidak berikan pembebanan dari generator dengan menggunakan *tachometer*. Dengan menggunakan tiga jenis Bilangan Reynolds, yaitu 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 , data yang didapatkan diplotkan ke grafik seperti gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Putaran Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Penganggu

Gambar 4.1 merupakan grafik putaran fungsi dari Bilangan Reynolds untuk turbin angin Savonius tanpa penganggu.

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa *trendlinenya* semakin naik dari mulai Bilangan Reynolds terendah sampai tertinggi. Nilai putaran tertinggi berada saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 . Sedangkan nilai putaran terendah berada saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 . Dengan semakin tinggi Bilangan Reynolds, maka kecepatan *free stream* udara yang dihasilkan juga akan semakin tinggi pula. Seiring meningkatnya kecepatan *free stream* udara, maka nilai putarannya juga akan semakin meningkat. Gaya *drag* yang diterima oleh kedua sudu turbin angin Savonius juga akan meningkat. Sehingga, nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan semakin meningkat pula.

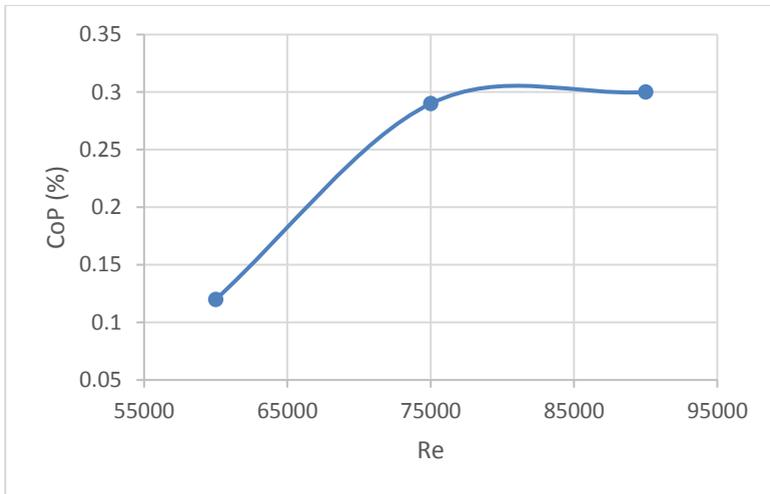
2.2.2 Analisa *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Penelitian ini mengukur *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan cara mengukur keluaran daya yang dihasilkan dari generator yang telah diberi pembebanan. Besar nilai arus dan tegangannya diukur menggunakan multimeter *digital* dan dilakukan perhitungan CoP seperti di contoh perhitungan. Dengan menggunakan tiga jenis Bilangan Reynolds, yaitu 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 , nilai CoP terlihat di tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Penelitian *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Bilangan Reynolds	Arus (mA)	Tegangan (V)	Daya Output (mW)	Daya Input (Watt)	CoP (%)
6×10^4	2,598	1,6	4,1568	3,4644	0,12
$7,5 \times 10^4$	11,236	1,72	19,3259	6,78018	0,29
9×10^4	19,729	1,78	35,1176	11,7056	0,30

Data yang didapatkan diplotkan ke grafik seperti gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Penganggu

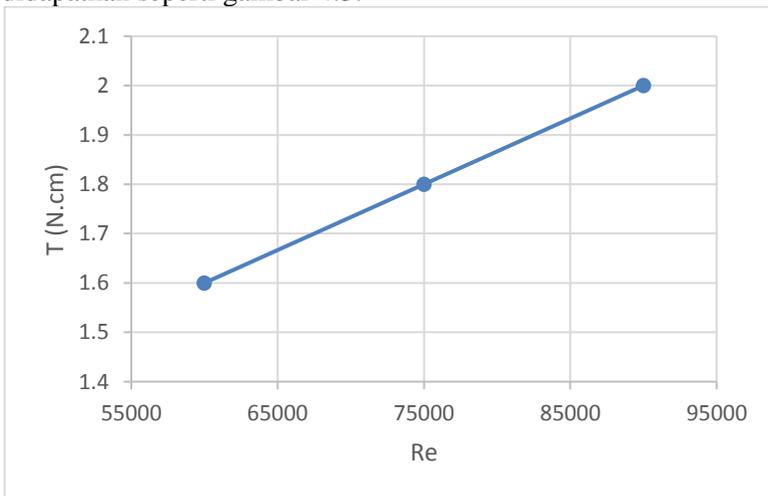
Gambar 4.2 merupakan grafik *coefficient of power* (CoP) fungsi dari Bilangan Reynolds untuk turbin angin Savonius tanpa penganggu. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa *trendlinenya* semakin naik dari mulai Bilangan Reynolds terendah sampai tertinggi. Nilai CoP tertinggi berada saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 . Sedangkan nilai putaran terendah berada saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 . Saat Bilangan Reynolds bernilai $7,5 \times 10^4$, nilai CoP nya hampir sama dengan saat Bilangan Reynolds 9×10^4 .

CoP atau *coefficient of power* adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan daya yang dihasilkan oleh *free stream* udara untuk menggerakkan turbin. CoP bisa disebut juga sebagai efisiensi dari turbin angin Savonius. Seperti yang terlihat di tabel 4.2, keluaran daya yang dihasilkan saat Bilangan Reynolds 6×10^4 adalah yang paling kecil dan semakin naik hingga Bilangan Reynolds yang bernilai 9×10^4 .

Keluaran daya ini dipengaruhi oleh putaran turbin angin Savonius. Semakin cepat putaran turbinnya, maka nilai keluaran dayanya akan semakin besar. Begitu juga dengan daya input yang dihasilkan akan semakin besar mulai dari Bilangan Reynolds 6×10^4 hingga Bilangan Reynolds 9×10^4 . Ini disebabkan karena kecepatan *free stream* udara yang menyapu turbin angin Savonius semakin besar seiring meingkatnya Bilangan Reynolds. Sehingga, efisiensi terbaik dari turbin angin Savonius ini adalah saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 .

2.2.3 Analisa Torsi Statis Terhadap Bilangan Reynolds Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Penelitian ini mengukur torsi statis turbin angin Savonius saat posisi 0° terhadap sudu turbin angin Savonius yang terkena aliran udara *free stream*. Pengukuran ini menggunakan torsimeter statis dengan tiga jenis Bilangan Reynolds, yaitu 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Penelitian ini dilakukan pada suhu ruangan, yaitu $26,5^\circ\text{C}$. Dengan menggunakan *torquemeter*, hasilnya didapatkan seperti gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik Torsi Statis Sebagai Fungsi dari Bilangan Reynolds (Re) untuk Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

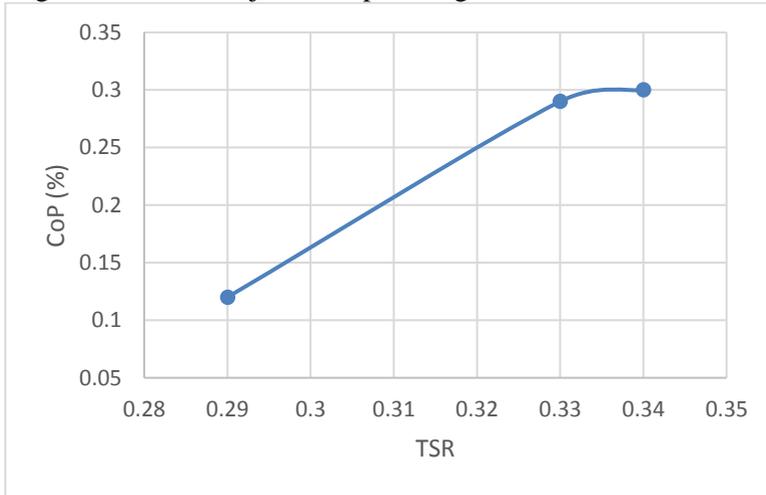
Gambar 4.3 merupakan grafik torsi statis fungsi dari Bilangan Reynolds untuk turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa *trendlinenya* semakin naik seiring naiknya Bilangan Reynolds. Nilai torsi statis tertinggi berada saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 . Sedangkan nilai torsi statis terendah berada saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 .

Kenaikan torsi statis ini disebabkan oleh kecepatan *free stream* udara yang semakin meningkat seiring naiknya Bilangan Reynolds. Kecepatan *free stream* udara ini mempengaruhi nilai dari gaya *drag* yang diterima oleh kedua sudu turbin angin Savonius. Semakin besar kecepatan *free stream* udara, maka gaya yang dibutuhkan untuk menahan turbin angin Savonius juga semakin besar dan nilai torsi statisnya juga akan semakin besar pula. Torsi statis ini terukur karena adanya gaya *drag* yang terjadi di turbin angin Savonius yang pusatnya di tengah sudu turbin dan jaraknya adalah sejauh jari-jari sudu turbin yang diukur dari tengah poros turbin. Perbedaan bentuk dari *advancing blade* dan *returning blade* yang memiliki nilai *coefficient drag* berbeda, menyebabkan perbedaan besar gaya *drag* yang bekerja di sudu turbin angin Savonius. Sesuai dengan rumus gaya *drag*, maka *coefficient drag*, densitas udara, kecepatan udara, dan luas penampang turbin yang terkena aliran udara mempengaruhi besarnya gaya *drag*. Dalam penelitian ini, besar dari densitas udara, *coefficient drag*, dan luas penampang turbin yang terkena aliran udara adalah tetap. Maka yang mempengaruhi besar gaya *drag* adalah kecepatan aliran udara. Oleh karena itu, seiring bertambahnya kecepatan aliran udara, dimana Bilangan Reynolds juga ikut naik, maka nilai torsi statis pun akan naik juga.

2.2.4 Analisa Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (TSR) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Penelitian ini menunjukkan keterkaitan antara *coefficient of power* (CoP) dengan *tip speed ratio* (TSR). CoP dan TSR

dipengaruhi oleh kecepatan *free stream* udara. Jika keduanya diplot di grafik, maka ditunjukkan seperti di gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap Tip Speed Ratio (TSR) Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Gambar 4.4 merupakan grafik *coefficient of power* (CoP) fungsi dari *tip speed ratio* (TSR) untuk turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa *trendlinenya* semakin naik. Saat TSR bernilai 0,283, nilai CoP nya adalah 0,12. Ini terjadi saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 . Saat Bilangan Reynolds sebesar $7,5 \times 10^4$, terjadi kenaikan yang signifikan di TSR dan CoPnya, yaitu sebesar 0,324 dan 0,29. Ketika Bilangan Reynolds meningkat lagi menjadi 9×10^4 , nilai TSR dan CoPnya meningkat tetapi tidak signifikan, yaitu sebesar 0,336 dan 0,30.

Kenaikan *tip speed ratio* (TSR) ini dikarenakan kenaikan putaran dari turbin angin Savonius. Kenaikan putaran turbin angin Savonius dikarenakan kenaikan Bilangan Reynolds. Jadi, kenaikan TSR dipengaruhi oleh kenaikan Bilangan Reynolds. Dari grafik diatas, kenaikan signifikan terjadi saat Bilangan Reynolds 6×10^4 menuju $7,5 \times 10^4$. Namun, saat Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$ menuju 9×10^4 , kenaikannya tidak signifikan. Ini terjadi di

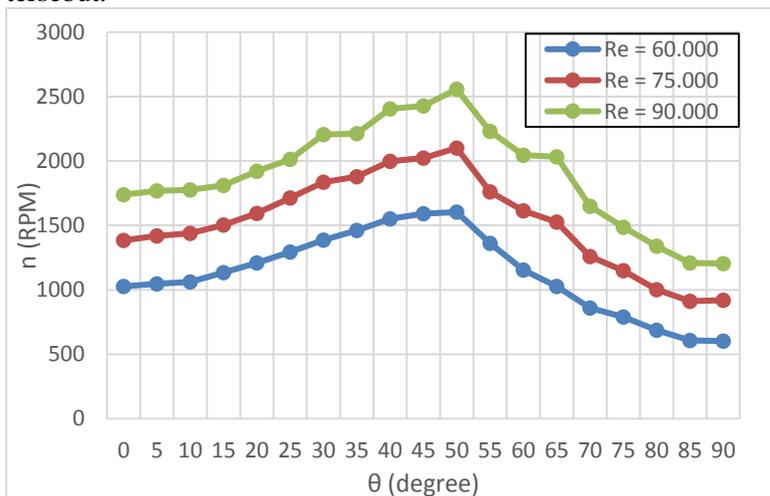
karenakan efisiensi turbin angin Savonius yang mengikuti besar Bilangan Reynolds dan kecepatan *free stream* udara.

2.3 Analisa Performa Turbin Angin Tipe Savonius dengan Pengganggu Berupa Plat Datar

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius diberikan pengganggu berupa plat datar yang diletakkan di depan *returning blade*. Plat datar ini memiliki panjang 120 mm dan tinggi 150 mm. Bilangan Reynolds yang digunakan ada tiga macam, yaitu 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Sudut bukaan plat datar pengganggu divariasikan mulai sudut 0° hingga 90° dengan kelipatan 5° .

2.3.1 Analisa Pengaruh Putaran Terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Putaran merupakan parameter yang mempengaruhi performa dari turbin angin Savonius. Untuk menentukan performa terbaik dari turbin angin Savonius, diberikan plat datar pengganggu yang divariasikan sudutnya. Gambar 4.5 akan menjelaskan hal tersebut.



Gambar 4.5 Grafik Putaran terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Gambar 4.5 adalah grafik putaran turbin angin Savonius fungsi dari sudut posisi plat pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai putaran terus meningkat dan mencapai puncaknya di sudut plat pengganggu sebesar 50° dan akan terus turun hingga sudut plat pengganggu sebesar 90° . Ini berlaku untuk ketiga jenis Bilangan Reynolds. Terlihat juga bahwa Bilangan Reynold 9×10^4 memiliki nilai putaran yang paling tinggi diantara Bilangan Reynolds lainnya.

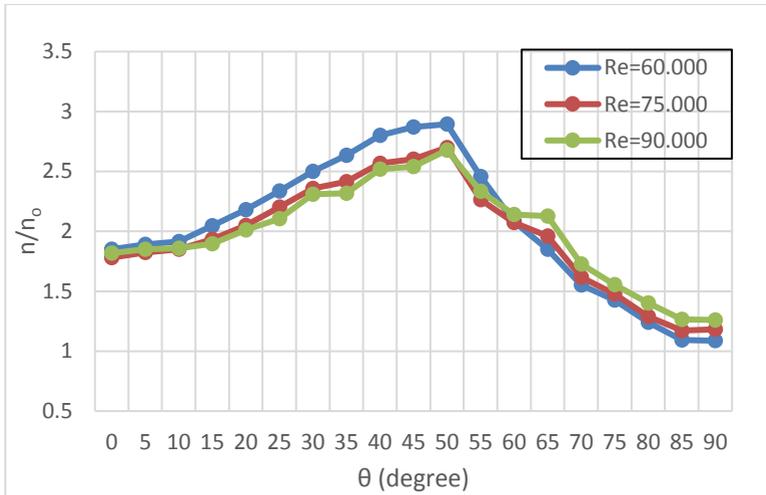
Semakin tinggi Bilangan Reynolds, maka kecepatan *free stream* udara yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Peningkatan kecepatan *free stream* udara berpengaruh terhadap gaya *drag* yang diterima kedua sudu turbin, sehingga gaya *drag* yang diterima oleh kedua sudu turbin angin Savonius meningkat. Peningkatan gaya *drag* ini disebabkan oleh meningkatnya selisih gaya *drag* di kedua sudu turbin angin Savonius. Sehingga, nilai putaran yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan semakin meningkat pula. Dengan memberikan plat pengganggu di depan *returning blade*, putaran turbin angin Savonius akan meningkat. Seperti yang terlihat di gambar 4.5, plat datar itu menghalangi udara yang menuju *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada blade tersebut semakin kecil. Seiring mengecilnya gaya *drag* di sisi *returning blade*, maka selisih gaya *drag* antara sisi *advancing blade* dan sisi *returning blade* akan semakin membesar, sehingga putaran yang dihasilkan turbin angin Savonius akan semakin besar pula.

Ditinjau dari spesifikasi plat datar pengganggu yang $L/D = 2$, yang memiliki lebar plat 120 mm, maka secara teoritis, plat datar tersebut akan menutup sisi *returning blade* mulai dari sudut 0° hingga sudut 60° . Secara teoritis, nilai tertinggi dari putarannya akan berada di sudut 60° karena udara yang diarahkan ke *advancing blade* lebih banyak, sedangkan sisi *returning blade* akan tetap tertutup. Namun, dari hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan nilai tertinggi dari putaran turbin angin Savonius adalah di sudut 50° . Hal ini terjadi dikarenakan aliran udara yang

diarahkan ke sisi *advancing blade* lebih banyak sebagai akibat dari panjang plat yang melebihi diameter *returning blade*. Aliran udara yang diarahkan ke sisi *advancing blade* pada saat sudut 50° lebih banyak dibandingkan pada saat sudut 60° .

Trendline grafik yang semakin naik dari sudut 0° hingga 50° ini selain berfungsi untuk menghalangi aliran udara yang menuju ke arah *returning blade*, juga berfungsi untuk mengarahkan aliran udara ke arah *advancing blade*. Aliran udara tersebut menyebabkan gaya *drag* yang terjadi di *advancing blade* akan semakin meningkat. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* juga semakin meningkat. Sehingga, putaran yang terjadi akan semakin tinggi. Puncak dari nilai putaran berada di sudut 50° dan setelah itu akan selalu turun hingga sudut 90° . Penurunan ini dikarenakan adanya aliran udara ke arah *returning blade*, sehingga gaya *drag* yang terjadi di *returning blade* semakin besar dan selisih gaya *drag*nya semakin mengecil. Sehingga, nilai putaran akan turun.

Jika nilai putaran saat diberikan plat datar pengganggu dibandingkan dengan nilai putaran saat tidak berpengganggu sebagai fungsi dari sudut plat datar pengganggu, akan terlihat seperti gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Putaran Turbin (n/n_0) terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

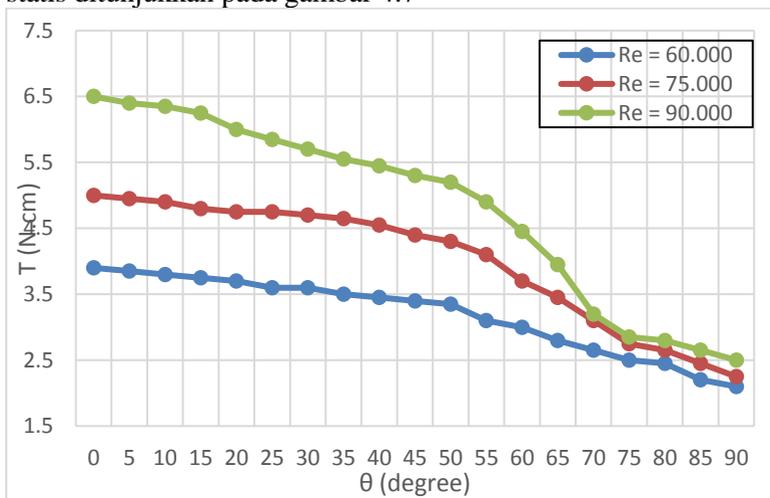
Penelitian ini dilakukan dengan tiga Bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Pada gambar 4.6 terlihat bahwa nilai perbandingan putaran berpengganggu dengan tanpa pengganggu menghasilkan titik tertinggi di sudut 50° untuk tiga jenis Bilangan Reynolds. Kenaikan putaran terbesar adalah saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 , yaitu naik dari 554 rpm saat tidak berpengganggu menjadi 1603 rpm dengan pengganggu atau sebesar 289,4%. Saat Bilangan Reynolds bernilai $7,5 \times 10^4$, putarannya naik dari 778 rpm tanpa pengganggu menjadi 2100 rpm dengan pengganggu, atau naik sebesar 269,9%. Sedangkan saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 , putarannya naik dari 955 rpm saat tidak berpengganggu menjadi 2557 rpm dengan pengganggu, atau naik sebesar 267,78%.

Terlihat pada gambar 4.6, nilai perbandingan putaran turbin angin Savonius, $n/n_0 > 1$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin

angin Savonius itu dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius.

2.3.2 Analisa Pengaruh Torsi Statis Terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu Turbin Angin Savonius

Torsi statis merupakan parameter yang berpengaruh terhadap performa turbin. Torsi ini diukur saat turbin angin Savonius berada di sudut 0° pada posisi tegak lurus dari *free stream* udara. Pengaruh variasi sudut plat datar pengganggu terhadap torsi statis ditunjukkan pada gambar 4.7



Gambar 4.7 Grafik Torsi Statis terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Gambar 4.7 adalah grafik torsi statis turbin angin Savonius fungsi dari sudut plat datar pengganggu yang divariasikan. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai torsi statis akan terus turun dari sudut plat datar pengganggu sebesar 0° hingga 90° . Ini berlaku untuk tiga Bilangan Reynolds yang divariasikan. Nilai torsi statis tertinggi berada di Bilangan Reynolds 9×10^4 , disusul dengan Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$ dan Bilangan Reynolds 6×10^4 .

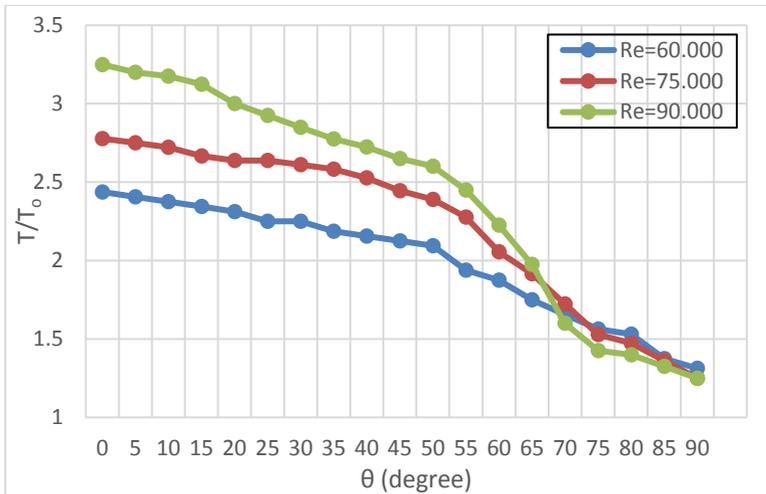
Semakin tinggi nilai Bilangan Reynolds, maka semakin tinggi juga nilai torsi statisnya. Hal ini disebabkan oleh seiring kenaikan Bilangan Reynolds, kecepatan *free stream* udara juga naik. Seiring kecepatan *free stream* udara yang naik ini, gaya yang dibutuhkan untuk menahan turbin angin Savonius juga akan semakin besar, sehingga, nilai torsi statisnya juga akan semakin besar pula. Sesuai dengan gambar 4.7, *trendline* grafik selalu turun. Besar torsi statis dipengaruhi oleh gaya dan panjang dari lengan torsi. Dengan adanya pemberian plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin Savonius, aliran udara akan diarahkan ke *advancing blade* seiring dengan semakin besarnya sudut bukaan plat datar pengganggu. Pada penelitian ini, nilai torsi statis diukur saat turbin ditahan tegak lurus dengan arah datangnya aliran udara. Seiring semakin besarnya sudut bukaan di plat datar pengganggu, maka semakin banyak aliran udara yang diarahkan ke *advancing blade* dan ke arah poros turbin. Sehingga lengan torsi semakin pendek. Memendeknya lengan torsi ini mempengaruhi nilai torsi statis yang semakin kecil pula. Selain itu, nilai torsi statis akan semakin turun itu disebabkan juga oleh aliran udara yang masuk ke sisi *returning blade* turbin angin Savonius. Semakin besar sudut bukaan plat datar pengganggu, maka semakin besar pula aliran udara yang masuk ke sisi *returning blade*. Ini juga menyebabkan nilai torsi statis yang semakin kecil. Secara teoritis, sudut 0° hingga 60° , penurunan torsi statis dikarenakan pusat gaya *drag* yang bekerja di *advancing blade* yang berubah karena variasi sudut plat datang pengganggu. Sedangkan dari sudut 65° hingga 90° , penurunan nilai torsi statis selain dikarenakan pusat gaya *drag* yang bekerja di *advancing blade* berubah, juga dikarenakan adanya aliran *free stream* udara yang mengarah ke *returning blade*, sehingga menyebabkan gaya *drag* di *returning blade* membesar. Akibatnya, selisih gaya *drag* antara kedua sudu mengecil dan nilai torsi statis juga ikut mengecil.

Terlihat pada gambar 4.7, saat sudut plat pengganggu sebesar 75° , besar torsi statis memiliki nilai yang hampir sama, yaitu saat Bilangan Reynolds 6×10^4 , torsi statisnya bernilai 2,5 N.cm. Saat

Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, torsi statisnya bernilai 2,75 N.cm, dan saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 , torsi statisnya bernilai 2,85 N.cm. Ini dikarenakan pada sudut 75° , aliran udara ada yang diarahkan oleh plat datar pengganggu menuju *advancing blade* dan ada juga yang melewati plat datar pengganggu menuju ke *returning blade*. Meskipun kecepatan *free stream* udara semakin meningkat seiring meningkatnya Bilangan Reynolds, aliran *free stream* udara yang diarahkan ke *advancing blade* dan aliran *free stream* udara yang melewati plat datar pengganggu menuju *returning blade* memiliki besar yang hampir sama. Sehingga, pada posisi sudut plat datar pengganggu 75° nilai torsi statisnya hampir sama.

Nilai torsi statis terbesar adalah saat sudut plat datar pengganggu sebesar 0° . Hal ini dikarenakan plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* tersebut, menimbulkan *wake* di depan *returning blade* yang dapat memperkecil gaya *drag* di *returning blade*. Sehingga, selisih gaya *drag* di antara kedua sudu membesar dan nilai torsi statisnya akan membesar pula. Maka, penempatan sudut plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius untuk meningkatkan nilai torsi statis paling efektif berada di sudut 0° pada Bilangan Reynolds 9×10^4 .

Jika nilai torsi statis saat diberikan plat datar pengganggu dibandingkan dengan nilai torsi statis saat tidak berpengganggu sebagai fungsi dari sudut plat datar pengganggu, akan terlihat seperti gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Torsi Statis (T/T_0) terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Penelitian ini dilakukan dengan tiga Bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Pada gambar 4.8, terlihat bahwa nilai perbandingan torsi statis saat berpengganggu dengan tanpa pengganggu terhadap sudut bukaan plat datar pengganggu, *trendlinenya* semakin turun. Nilai perbandingan torsi statis terbesar untuk setiap Bilangan Reynolds adalah saat sudut plat pengganggu 0° . Sedangkan nilai terbesarnya adalah saat Bilangan Reynolds 9×10^4 , yaitu dengan kenaikan sebesar 325%. Saat Bilangan Reynolds bernilai $7,5 \times 10^4$, nilai perbandingan torsi statisnya naik sebesar 277,78%. Sedangkan saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 , nilai perbandingan torsi statisnya naik sebesar 243,75%

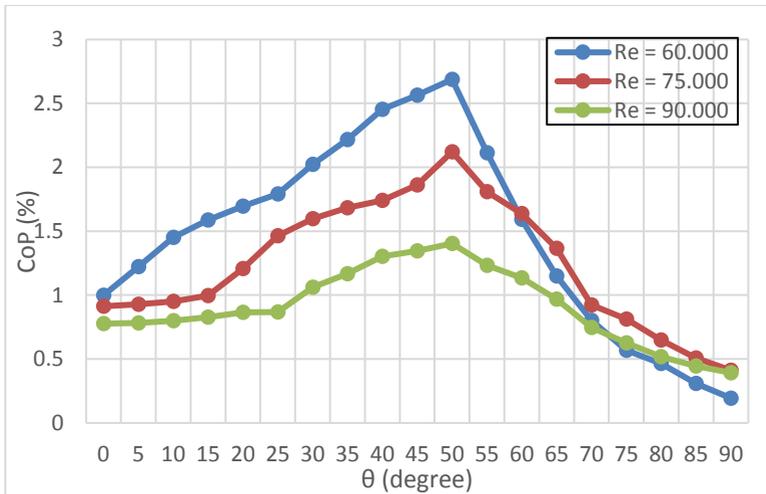
Saat sudut plat datar pengganggu sebesar 90° , besar $T/T_0 \approx 1$. Hal ini dikarenakan dengan adanya plat datar pengganggu yang sejajar dengan arah datangnya aliran *free stream* udara, kedua sudu turbin, yaitu *advancing blade* dan *returning blade*, mendapatkan gaya *drag* yang besarnya sama, sehingga nilai torsi statisnya hampir sama dengan tak berpengganggu. Hanya saja, dengan

adanya plat datar pengganggu bersudut 90° , ada aliran yang terpecah di ujung plat datar pengganggu itu, sehingga aliran *free stream* udara diarahkan ke kedua sudu turbin angin Savonius. Nilai torsi statis dari turbin angin Savonius berpengganggu pada sudut 90° sedikit lebih besar dibandingkan turbin angin Savonius yang tanpa pengganggu.

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa nilai perbandingan torsi statis turbin angin Savonius, $T/T_0 > 1$. Ini menunjukkan bahwa dengan pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius itu dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Peningkatan ini dikarenakan gaya *drag* yang terjadi di *returning blade* dihalangi oleh plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *blade* tersebut, sehingga selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat juga. Maka, nilai torsi statisnya akan turut meningkat. Selain itu, peningkatan ini juga disebabkan oleh aliran *free stream* udara yang diarahkan oleh plat datar pengganggu ke arah *advancing blade*, sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu turbin ini meningkat pula. Torsi statis yang dihasilkannya juga meningkat.

2.3.3 Analisa Pengaruh *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Coefficient of Power (CoP) adalah perbandingan antara daya output dan daya input atau dikenal juga dengan efisiensi turbin. Metode yang digunakan untuk mengukur daya output adalah dengan cara menghubungkan turbin angin Savonius dengan generator yang sudah dihubungkan ke beban berupa lampu. Nilai tegangan (V) dan arus (I) diukur menggunakan multimeter *digital*. Data hasil penelitian ini dapat dilihat di gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Sudut Plat Datar Penganggu di Turbin Angin Savonius

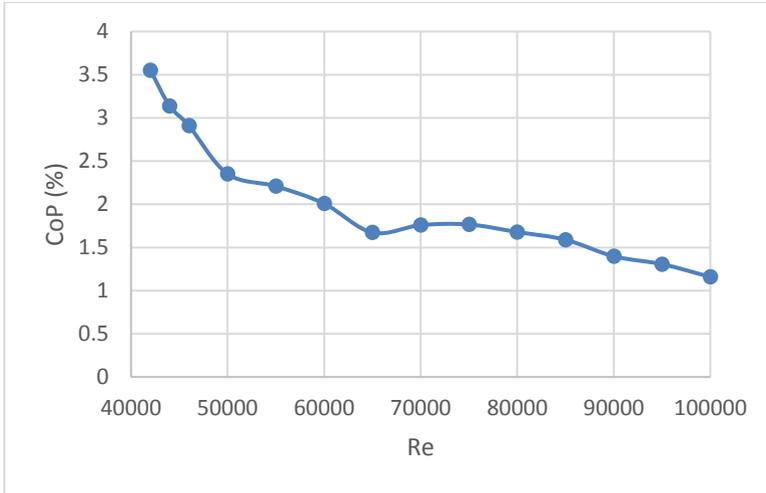
Gambar 4.9 adalah grafik *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius fungsi dari sudut plat datar penganggu yang divariasikan. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai CoP tertinggi adalah saat sudut plat datar penganggu sebesar 50° untuk setiap Bilangan Reynolds. Sedangkan Bilangan Reynolds yang menghasilkan CoP tertinggi adalah saat bernilai 6×10^4 .

Jika dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa plat datar penganggu, nilai CoPnya berbeda dengan turbin angin Savonius yang diberikan plat datar penganggu. Saat tanpa penganggu, nilai Bilangan Reynolds yang menghasilkan CoP tertinggi adalah saat bernilai 9×10^4 . Ini diikuti oleh Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, dan 6×10^4 . Sedangkan saat diberikan plat datar penganggu, nilai CoP tertinggi adalah saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 . Disusul oleh Bilangan Reynolds yang bernilai $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Ini menunjukkan efisiensi turbin yang berbeda antara tidak menggunakan penganggu dan menggunakan penganggu. Namun, kesamaannya adalah memiliki

nilai puncak yang sama, yaitu saat sudut 50° . Bisa dikatakan sudut 50° adalah sudut optimal untuk menghasilkan CoP terbesar.

Secara teoritis, plat datar pengganggu akan menutup sisi *returning blade* mulai dari sudut 0° hingga sudut 60° dan nilai maksimum dari dari CoP akan sama seperti putarannya. Namun, dari hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan nilai tertinggi dari CoP turbin angin Savonius adalah di sudut 50° . Hal ini terjadi dikarenakan nilai *power* yang dihasilkan juga akan semakin besar saat sudut 50° . Udara yang diarahkan ke sisi *advancing blade* lebih banyak karena panjang plat pengganggu yang lebih panjang daripada diameter *returning blade*. Sisi *returning blade* yang masih tertutup oleh plat datar pengganggu, menyebabkan aliran udara ke *returning blade* terhambat dan gaya *drag* semakin besar, sehingga menyebabkan putaran dari turbin angin Savonius semakin meningkat dan daya yang dihasilkan juga meningkat. Maka, nilai CoP juga akan semakin meningkat.

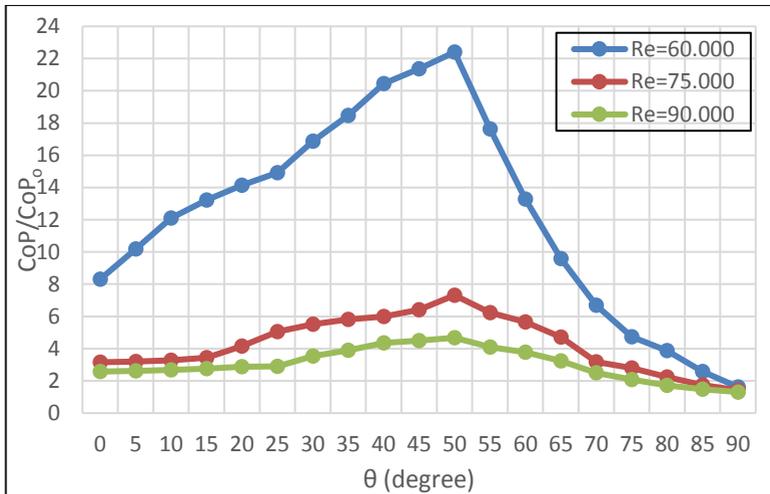
Untuk mencari titik optimal dalam pengaturan Bilangan Reynold di penggunaan turbin angin Savonius berpengganggu ini, dilakukan penelitian dengan memvariasikan Bilangan Reynolds mulai dari $4,2 \times 10^4$ hingga 10×10^4 dengan penempatan plat datar pengganggu pada sudut 50° . Hasil penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Bilangan Reynolds yang divariasikan

Dari gambar 4.10 terlihat bahwa *trendlinenya* cenderung turun hingga Bilangan Reynolds bernilai 10×10^4 . Titik maksimum dari *coefficient of powernya* adalah bernilai 3,55% saat Bilangan Reynolds bernilai $4,2 \times 10^4$. Sehingga, konfigurasi untuk mendapatkan efisiensi maksimum adalah saat plat datar penganggu memiliki sudut 50° , Bilangan Reynolds bernilai $4,2 \times 10^4$, sehingga menghasilkan nilai *coefficient of power* 3,55%.

Jika nilai CoP saat diberikan plat datar penganggu dibandingkan dengan nilai CoP saat tidak berpenganggu sebagai fungsi dari sudut plat datar penganggu, terlihat seperti gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) terhadap Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

Penelitian ini dilakukan dengan tiga Bilangan Reynolds terhadap bukaan sudut plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Pada gambar 4.11, terlihat bahwa sudut bukaan plat datar pengganggu paling optimal adalah di 50° . Nilai tertinggi dari perbandingan CoP berpengganggu dan CoP tak berpengganggu adalah saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 , yaitu sebesar 2240,06%. Sedangkan saat Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, nilai perbandingannya adalah 731,4%. Saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 , nilai perbandingannya adalah 467,9%.

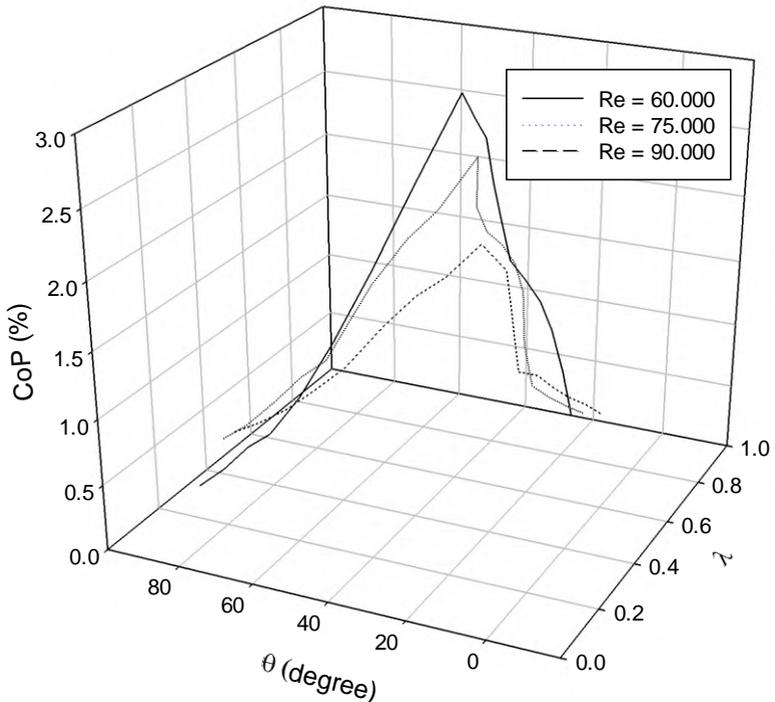
Saat besar sudut plat pengganggu 90° , nilai $CoP/CoP_0 \approx 1$. Ini dikarenakan dengan adanya plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dengan sudut 90° , memecah aliran *free stream* udara di ujung plat datar tersebut sama besar dan mengarahkannya ke kedua sudu turbin angin Savonius. Sehingga gaya *drag* yang diterima kedua sudu turbin angin Savonius besarnya sama. Nilai *coefficient of power* yang dihasilkan juga hampir sama dengan turbin angin Savonius tak berpengganggu.

Hanya saja pada turbin angin Savonius tanpa pengganggu, aliran *free stream* udara tidak diarahkan sama sekali. Sehingga, nilai *coefficient of powernya* sedikit lebih kecil dibandingkan turbin angin Savonius berpengganggu dengan sudut 90° .

Terlihat pada gambar 4.11, nilai perbandingan *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius, $CoP/CoP_o > 1$. Hal ini dikarenakan dengan pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius akan meningkatkan gaya *drag* yang terjadi di *advancing blade* dan meningkatkan selisih gaya *drag* yang terjadi antara kedua sudu. Sehingga, daya outputnya meningkat dan *coefficient of powernya* juga meningkat. Maka, pemberian plat datar pengganggu di depan *returning blade* dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius, khususnya dalam hal efisiensi turbin angin Savonius.

2.3.4 Analisa Pengaruh *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) di Turbin Angin Savonius

Coefficient of power (CoP) adalah perbandingan antara daya output dengan daya input. Sedangkan *tip speed ratio* (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan di ujung *blade* turbin dengan kecepatan aliran udara. Jika keduanya diplot ke grafik, ditunjukkan oleh gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik *Coefficient of Power (CoP)* terhadap *Tip Speed Ratio (TSR)* dan Sudut Plat Datar Pengganggu di Turbin Angin Savonius

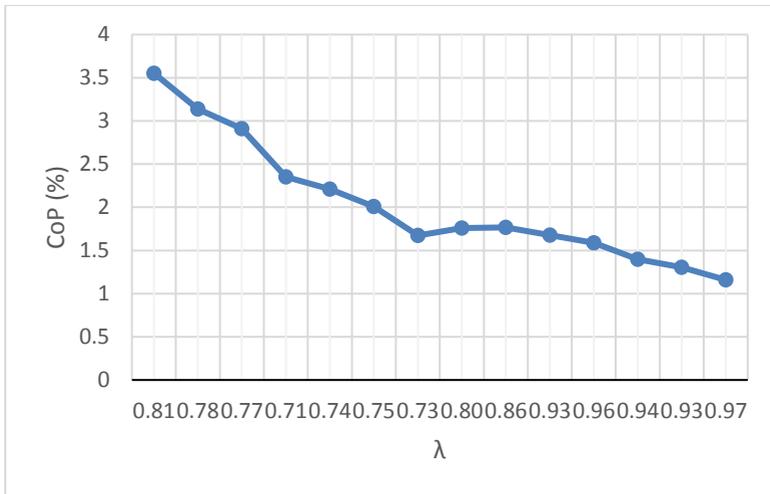
Gambar 4.12 adalah grafik *coefficient of power (CoP)* fungsi dari *tip speed ratio (TSR)* dan sudut plat datar penggu untuk turbin angin Savonius. Dari grafik tersebut terlihat bahwa *trendlinenya* cenderung naik dan akan turun sampai titik tertentu. Titik puncaknya adalah ketika bukaan plat pengganggu sampai di sudut 50° . Dari tiga jenis Bilangan Reynolds yang digunakan, nilai *tip*

speed ratio dan *coefficient of power* tertinggi ada saat Bilangan Reynolds bernilai 6×10^4 .

Dari gambar 4.12 terlihat bahwa saat Bilangan Reynolds 6×10^4 , nilai tertinggi adalah saat *tip speed ratio* bernilai 0,816 dan *coefficient of power* bernilai 2,688%. Sedangkan saat Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, nilai tertinggi adalah saat *tip speed ratio* bernilai 0,90 dan *coefficient of power* bernilai 2,12%. Saat Bilangan Reynolds bernilai 9×10^4 , nilai tertinggi adalah saat *tip speed ratio* 0,9278 dan *coefficient of power* 1,40%

Saat nilai *tip speed ratio* sama pada ketiga Bilangan Reynolds, nilai *coefficient of power* berbeda, dimana semakin kecil Bilangan Reynoldsnnya, nilai *coefficient of powernya* akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan besarnya nilai *coefficient of power* dan *tip speed ratio* dipengaruhi oleh kecepatan udara dan daya inputnya. Sedangkan kenaikan Bilangan Reynolds juga mengakibatkan kenaikan kecepatan aliran udara. Sehingga, semakin besar kecepatan udara dan daya inputnya, maka nilai *coefficient of powernya* juga akan semakin besar. Semakin besar kecepatan alirannya, semakin besar juga nilai *tip speed rationya*. Namun, kenaikan daya input ini tidak diikuti oleh kenaikan daya output yang sebanding. Ketidaksebandingan ini diakibatkan oleh efisiensi yang dimiliki oleh turbin angin Savonius tersebut.

Untuk melihat pengaruh antara *coefficient of power* dengan *tip speed ratio* di Bilangan Reynoldsnnya sama, maka dilakukan penelitian saat plat datar penganggu diletakkan di sudut 50° dengan Bilangan Reynolds mulai dari $4,2 \times 10^4$ sampai 10×10^4 dengan kenaikan setiap 5×10^3 . Hasilnya terlihat di gambar 4.13.



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) di Turbin Angin Savonius dengan Variasi Bilangan Reynolds

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa seiring naiknya Bilangan Reynolds, maka *coefficient of power* akan semakin turun. Terlihat bahwa titik tertingginya adalah ketika Bilangan Reynolds bernilai $4,2 \times 10^4$. Dengan demikian, konfigurasi optimal dari efisiensi kerja turbin angin Savonius adalah saat Bilangan Reynolds rendah, yaitu $4,2 \times 10^4$ yang memiliki *coefficient of power* 3,55% dan *tip speed ratio* 0,81.

Hal ini dikarenakan pengaruh aliran *free stream* udara di *coefficient of power* dan *tip speed ratio*. Kenaikan Bilangan Reynolds yang juga mempengaruhi kenaikan kecepatan *free stream* udara ini tidak diiringi oleh kenaikan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Tidak sebandingnya kenaikan daya yang dihasilkan oleh turbin angin savonius ini dikarenakan efisiensi dari turbin angin Savonius itu. Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa efisiensi turbin angin Savonius yang digunakan untuk penelitian ini memiliki efisiensi tertinggi pada saat Bilangan Reynolds $4,2 \times 10^4$.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds 6×10^4

Posisi	Frekuensi	Putaran	Torsi Statis	Tegangan (Volt)	Arus (mA)	Putaran Daya
Standar	22.30	554	1.6	1.6	2.598	452
0	29.8	1025.5	3.9	1.8	19.2	662.8
5	29.55	1047.4	3.85	1.81	23.4	750.2
10	29.5	1061.2	3.8	1.81	27.8	815.2
15	29.1	1133	3.75	1.82	30.2	878.68
20	28.3	1208.8	3.7	1.83	32.1	912.85
25	27.7	1294	3.6	1.83	33.9	943.86
30	26.55	1385.7	3.6	1.84	38.1	1019.3
35	26.25	1459.7	3.5	1.85	41.5	1107.5
40	26	1551.2	3.45	1.86	45.7	1201.9
45	25.7	1590.6	3.4	1.87	47.5	1250.2
50	25.45	1603.3	3.35	1.87	49.8	1302.2
55	24.75	1362	3.1	1.85	39.6	1053.2
60	23.95	1152.9	3	1.81	30.5	869.41
65	23.7	1025.4	2.8	1.77	22.5	712.2
70	23.65	860.25	2.65	1.75	15.9	595.2
75	23.6	789.71	2.5	1.74	11.3	504.8
80	23.45	688.04	2.45	1.68	9.6	475.2
85	23.2	605.77	2.2	1.67	6.4	420.1
90	23.15	602.34	2.1	1.64	4.1	368.32

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds 6×10^4

Posisi	Daya (mW)	Daya Input (Watt)	CoP	CoP (%)	Tip Speed Ratio
Standar	4.1568	3.464403171	0.0012	0.12	0.283321431
0	34.56	3.464403171	0.009975744	0.997574425	0.415454524
5	42.354	3.464403171	0.012225482	1.22254824	0.470238358
10	50.318	3.464403171	0.014524291	1.452429106	0.510981484
15	54.964	3.464403171	0.015865359	1.586535899	0.550771848
20	58.743	3.464403171	0.016956167	1.695616737	0.572190196
25	62.037	3.464403171	0.01790698	1.790698049	0.591627801
30	70.104	3.464403171	0.02023552	2.02355201	0.6389149
35	76.775	3.464403171	0.022161104	2.21611043	0.694200188
40	85.002	3.464403171	0.024535828	2.453582791	0.753371744
45	88.825	3.464403171	0.025639337	2.563933689	0.783647021
50	93.126	3.464403171	0.026880821	2.688082057	0.816241522
55	73.26	3.464403171	0.0211465	2.114649952	0.660164008
60	55.205	3.464403171	0.015934924	1.593492365	0.544961251
65	39.825	3.464403171	0.011495487	1.149548654	0.446419299
70	27.825	3.464403171	0.008031686	0.803168645	0.373081672
75	19.662	3.464403171	0.005675436	0.567543644	0.316417386
80	16.128	3.464403171	0.004655347	0.465534732	0.297863593
85	10.688	3.464403171	0.003085091	0.308509128	0.263325959
90	6.724	3.464403171	0.001940883	0.194088265	0.230869357

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$

Posisi	Frekuensi	Putaran	Torsi Statis	Tegangan (Volt)	Arus (mA)	Putaran Daya
Standar	28.4	778	1.8	1.72	11.236	648
0	37.6	1384.5	5	1.85	33.5	970.2
5	37.35	1418.5	4.95	1.86	33.8	990.2
10	37.3	1438.8	4.9	1.86	34.7	1010.4
15	36.65	1503.6	4.8	1.86	36.3	1032.5
20	35.95	1594.2	4.75	1.87	43.8	1145.2
25	35.15	1714.3	4.75	1.87	53.1	1325.4
30	33.8	1835.4	4.7	1.87	57.9	1431.7
35	33.45	1878.5	4.65	1.88	60.7	1487.9
40	32.65	1996.8	4.55	1.9	62.1	1521.2
45	32.3	2023.7	4.4	1.9	66.4	1601.5
50	31.7	2100.4	4.3	1.91	75.3	1802.5
55	30.6	1761.1	4.1	1.89	64.9	1562.2
60	30.55	1612	3.7	1.88	59.1	1438.3
65	30.5	1525.9	3.45	1.86	49.8	1257.2
70	30.45	1258.9	3.1	1.82	34.4	985.2
75	30.35	1148.6	2.75	1.82	30.3	923.02
80	30.15	1002	2.65	1.79	24.6	823.2
85	29.9	912	2.45	1.79	19.2	727.33
90	28.8	920.22	2.25	1.78	15.7	668.2

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$

Posisi	Daya (mW)	Daya Input (Watt)	CoP	CoP (%)	Tip Speed Ratio
Standar	19.3259	6.78018397	0.0029	0.29	0.324721951
0	61.975	6.78018397	0.00914	0.914061	0.486180921
5	62.868	6.78018397	0.00927	0.927231	0.496203204
10	64.542	6.78018397	0.00952	0.951921	0.506325709
15	67.518	6.78018397	0.00996	0.995814	0.517400331
20	81.906	6.78018397	0.01208	1.20802	0.573875893
25	99.297	6.78018397	0.01465	1.464518	0.664176658
30	108.273	6.78018397	0.01597	1.596904	0.717445089
35	114.116	6.78018397	0.01683	1.683081	0.745607702
40	117.99	6.78018397	0.0174	1.740218	0.762294803
45	126.16	6.78018397	0.01861	1.860716	0.802534267
50	143.823	6.78018397	0.02121	2.121226	0.903258205
55	122.661	6.78018397	0.01809	1.80911	0.782840482
60	111.108	6.78018397	0.01639	1.638717	0.720752442
65	92.628	6.78018397	0.01366	1.366158	0.630000674
70	62.608	6.78018397	0.00923	0.923397	0.493697633
75	55.146	6.78018397	0.00813	0.813341	0.462538357
80	44.034	6.78018397	0.00649	0.473438481	0.412517145
85	34.368	6.78018397	0.00507	0.355447582	0.364475335
90	27.946	6.78018397	0.00412	0.323000085	0.334844456

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds 9×10^4

Posisi	Frekuensi	Putaran	Torsi Statis	Tegangan (Volt)	Arus (mA)	Putaran Daya
Standar	33.90	955	2	1.78	19.729	806
0	44.9	1737	6.5	1.87	48.6	1393.2
5	45.3	1767	6.4	1.87	49	1451.2
10	45.1	1775.4	6.35	1.89	49.6	1469.9
15	44.35	1810.7	6.25	1.89	51.2	1512.4
20	43.1	1919.7	6	1.9	53.3	1553.8
25	42.15	2011.7	5.85	1.9	53.5	1549
30	40.35	2205	5.7	1.9	65.4	1721.1
35	40.4	2213.7	5.55	1.91	71.5	1910.2
40	39.3	2405.7	5.45	1.93	79.1	2090.6
45	39.05	2426.7	5.3	1.93	81.7	2161.8
50	38.05	2557.3	5.2	1.94	84.7	2221.2
55	37.5	2229.3	4.9	1.92	75.1	1989.2
60	37.25	2044.8	4.45	1.92	69.2	1826.2
65	37.15	2032.1	3.95	1.91	59.4	1654.2
70	37.1	1648.4	3.2	1.87	46.8	1396.1
75	37	1486.3	2.85	1.86	39.4	1236.2
80	36.6	1338.9	2.8	1.85	32.7	1109.7
85	36.25	1207.5	2.65	1.83	28.5	1009
90	36.2	1203.7	2.5	1.81	25.4	924.5

Data Hasil Pengujian dengan Bilangan Reynolds 9×10^4

Posisi	Daya (mW)	Daya Input (Watt)	CoP	CoP (%)	Tip Speed Ratio
Standar	35.1176	11.70557738	0.003	0.3	0.336683032
0	90.882	11.70557738	0.00776	0.776399	0.581968735
5	91.63	11.70557738	0.00783	0.782789	0.606196546
10	93.744	11.70557738	0.00801	0.800849	0.614007927
15	96.768	11.70557738	0.00827	0.826683	0.631761064
20	101.27	11.70557738	0.00865	0.865143	0.649054709
25	101.65	11.70557738	0.00868	0.868389	0.647049649
30	124.26	11.70557738	0.01062	1.061545	0.718939413
35	136.565	11.70557738	0.01167	1.166666	0.797930432
40	152.663	11.70557738	0.01304	1.30419	0.873287279
45	157.681	11.70557738	0.01347	1.347059	0.903029006
50	164.318	11.70557738	0.01404	1.403758	0.927841627
55	144.192	11.70557738	0.01232	1.231823	0.830930382
60	132.864	11.70557738	0.01135	1.135049	0.762841878
65	113.454	11.70557738	0.00969	0.96923	0.690993886
70	87.516	11.70557738	0.00748	0.747644	0.583180126
75	73.284	11.70557738	0.00626	0.626061	0.516386556
80	60.495	11.70557738	0.00517	0.516805	0.463544864
85	52.155	11.70557738	0.00446	0.445557	0.421480371
90	45.974	11.70557738	0.00393	0.392753	0.386182957

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian dan analisa yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Penggunaan plat datar pengganggu dengan $L/D=2$ di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada Bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 , efektif untuk menaikkan performa turbin angin Savonius untuk $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$. Hal ini ditandai dengan peningkatan putaran (n), torsi statis (T), dan *coefficient of power* (CoP) di turbin angin Savonius dengan plat datar pengganggu dibandingkan turbin angin Savonius tanpa plat datar pengganggu.
2. Pada variasi sudut plat datar pengganggu sebesar 50° , didapatkan nilai putaran paling tinggi untuk setiap Bilangan Reynolds dan persen kenaikan jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Untuk Bilangan Reynolds 6×10^4 , nilai putaran yang dihasilkan adalah 1603,3 rpm, naik sebesar 289,4%. Untuk Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, nilai putaran yang dihasilkan adalah 2100,4 rpm, naik sebesar 269,974%. Sedangkan untuk Bilangan Reynolds 9×10^4 , nilai putaran yang dihasilkan adalah 2557,3 rpm, naik 267,78%
3. Pada variasi sudut plat datar pengganggu 0° , didapatkan nilai torsi statis paling tinggi untuk setiap Bilangan Reynold dan persen kenaikan jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Untuk Bilangan Reynolds 6×10^4 , nilai torsi statis yang dihasilkan adalah 3,9 N.cm, naik 243,75%. Untuk Bilangan Reynolds $7,5 \times 10^4$, nilai torsi statis yang dihasilkan adalah 5 N.cm, naik 277,78%. Sedangkan untuk Bilangan Reynolds 9×10^4 , nilai torsi statis yang dihasilkan adalah 6,5 N.cm, naik sebesar 325%.
4. Nilai *Coefficient of Power* (CoP) tertinggi bernilai 3,55%, yaitu saat variasi sudut plat datar pengganggu sebesar 50° dan

Bilangan Reynolds $4,2 \times 10^4$. Peningkatan CoP terbesar adalah saat Bilangan Reynolds 6×10^4 dan sudut plat datar pengganggu sebesar 50° , yaitu sebesar 2240,068% lebih tinggi daripada CoP tanpa pengganggu.

5. Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) tertinggi adalah saat Bilangan Reynolds $4,2 \times 10^4$ dan variasi sudut plat pengganggu 50° , yaitu bernilai 3,55% dan 0,81.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk menunjang penelitian ini adalah:

1. Perlu diperhitungkan perbandingan antara luas benda uji dengan luas *test section* di wind tunnel untuk penelitian selanjutnya, agar hasil yang didapat bisa lebih maksimal.
2. Nilai *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius ini paling besar adalah saat Bilangan Reynolds $4,2 \times 10^4$, yaitu sebesar 3,55%. Sehingga, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut di sekitar Bilangan Reynolds tersebut.
3. Dalam melakukan pengukuran daya output untuk *coefficient of power* (CoP), diharapkan menggunakan cara yang lain untuk mendapatkan hasil efisiensi turbin yang lebih besar.
4. Generator yang digunakan sebaiknya sesuai dengan spesifikasi dari beban yang diberikan untuk mendapatkan hasil yang akurat.
5. Untuk mengukur besarnya torsi, sebaiknya menggunakan torsi meter dinamis, agar hasil torsi yang didapatkan lebih mudah untuk diperhitungkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M., December 2008. "An Experimental and Numerical Study on the Improvement of the Performance of Savonius Wind Rotor". **Energy Conversion and Management** 49, 12:3425-3432.
- Altan, B. D., Atilgan, M., Ozdamar, A., September 2008. "An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining". **Experimental Thermal and Fluid Science** 32, 8:1673-1678.
- Altan, B. D., Atilgan, M., April 2010. "The Use of a Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors". **Renewable Energy** 35, 4:821-829.
- Fox, Robert W., McDonald, Alain T., dan Pritchard, Philip J., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, Fifth Edition**, John Willey & Sons, Inc.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., November 2010. "Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade". **Renewable Energy** 35, 11:2618-2626.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., Januari 2011. "Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade". **Energy Conversion and Management** 52, 1:236-242.
- Piggott, H., 2009. **A Wind Turbine Recipe Book, The Axial Flux Windmill Plans**, Metric Edition.
- Sheidahi, R.E., Blackwell, B.F., and Feltz, L.V., 1978. "Wind Tunnel Performance Data for Two and Three-Buckets Savonius Rotors", **Journal of Energy**, Vol. 2, 1978. pp. 160-164.
- Spera, D. A., 2009. **Wind Turbine Technology, Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, Second Edition**, ASME Press.

- Tong, W., 2010. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**, WIT Press.
- Zed, F., Suharyani, Y. D., Rasyid, A., Hayati, D., Rosdiana, D., Mohi, E., Santhai, F., Pambudi, S. H., Malik, C., Santosa, J., Nurohim, A., 2014. **Outlook Energi Indonesia 2014**, Dewan Energi Nasional.

BIODATA PENULIS



Muhtadi Setyanto adalah anak pertama dari dua bersaudara yang berasal dari Jakarta. Ia keturunan Jawa, lahir di Jakarta, 6 April 1994. Semasa hidupnya, dimulai dari TK Islam Al-Jihad, SD Nasional I yang kemudian pindah ke SD Angkasa IX, SMP Negeri 49 Jakarta, hingga SMA Negeri 81 Jakarta, penulis arungi di kota kelahirannya. Dengan keinginan untuk hidup mandiri dan mencari pengalaman baru, penulis memilih ITS yang berada di Kota Surabaya, khususnya

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS sebagai tempat menimba ilmunya.

Selama empat tahun perkuliahan, penulis aktif di beberapa organisasi dan kepanitiaan. Saat tahun kedua perkuliahan, penulis aktif sebagai staf di Departemen Hubungan Luar, Himpunan Mahasiswa Mesin FTI ITS. Karena tingginya dedikasi terhadap HMM FTI ITS, penulis dipercaya sebagai Kepala Biro Alumni dan Industri di tahun ketiga perkuliahan. Namun, karena penulis merasa masih membutuhkan ilmu lebih mengenai organisasi, penulis juga aktif di SPE ITS SC sebagai *staff of External Affairs Department* dan alhamdulillah di akhir perkuliahan, penulis mendapatkan predikat *The Best Staff of External Affairs Department*. Atas prestasi dan kontribusinya di SPE ITS SC, saat tahun keempat perkuliahan, penulis tidak hanya mempersiapkan tugas akhir dan mengejar target yang belum tercapai saja, namun juga dipercaya menjadi *Head of External Affairs Department* di SPE ITS SC.

Agar ilmu yang didapat di perkuliahan lebih aplikatif, penulis melaksanakan kerja praktik di Total E&P Indonesia selama dua bulan dan magang di ConocoPhillips Indonesia selama satu bulan. Untuk menunjukkan dedikasinya ke Teknik Mesin ITS, penulis menjadi asisten Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa. Sebagai bukti prestasinya di Teknik Mesin ITS, penulis mendapatkan lima besar kenaikan akademik terbaik di ME Award tahun 2014/2015.

Don't hesitate to contact me through muhtadisetyanto@gmail.com