



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR – TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER
PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE SAVONIUS**

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,6$; $Re = 9,7 \times 10^4$;
 $1,45 \times 10^5$; $1,78 \times 10^5$ dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”

EKA CAHYANTI
NRP 02111440000024

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
2018



TUGAS AKHIR – TM 141585

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,6$; $Re = 9,7 \times 10^4$;
 $1,45 \times 10^5$; $1,78 \times 10^5$ dengan $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ ”

EKA CAHYANTI
NRP 02111440000024

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
2018



FINAL PROJECT – TM 141585

***EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF
OBSTACLE CYLINDER TO THE PERFORMANCE OF
SAVONIUS WIND TURBINE***

*“Case Study for Comparison $d/D = 0.5$; Ratio $S/D = 1.6$;
Reynolds number= 9.7×10^4 , 1.45×10^5 , 1.78×10^5 ; with $y/D =$
 0.0 ; 0.25 ; 0.5 ”*

EKA CAHYANTI
NRP 0211144000024

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2018

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER
PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN TIPE SAVONIUS**

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,6$; $Re = 9,7 \times 10^4$,
 $1,45 \times 10^5$, $1,78 \times 10^5$; dengan $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ ”

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

EKA CAHYANTI
NRP. 02111440000024

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196010041986011001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.T (Penguji I)
NIP. 197104051997021001
3. Vivien Suphandani, ST., M.E., Ph.D (Penguji II)
NIP. 198105292003122001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto (Penguji III)
NIP. 196202161995121001

SURABAYA

JULI 2018

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,6$; $Re = 9,7 \times 10^4$;
 $1,45 \times 10^5$; $1,78 \times 10^5$ dengan $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ ”

Nama Mahasiswa : Eka Cahyanti
NRP : 0211144000024
Jurusan : Teknik Mesin FTI- ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono,
DEA

Abstrak

Penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, telah banyak digunakan sebagai sumber energi primer di hampir setiap negara, termasuk Indonesia tanpa dapat diperbarui dalam waktu singkat karena proses pembentukannya membutuhkan waktu jutaan tahun. Penggunaan energi baru terbarukan menjadi alternatif pengganti energi fosil yang lebih ramah lingkungan, salah satunya adalah energi angin. Namun kecepatan angin rata rata disekitar kita memiliki nilai 3-7 m/s, energi angin dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin angin Savonius untuk dikonversi menjadi energi listrik. Turbin angin Savonius mempunyai peforma yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan peforma turbin angin Savonius dengan pemberian silinder penghalang didepan returning blade. Dengan pemberian silinder penghalang diharapkan mampu meningkatkan selisih gaya drag yang akan meningkatkan CoP, Cm, torsi statis dan kecepatan putaran turbin angin Savonius

Penelitian ini merupakan studi eksperimen menggunakan axial fan sebagai sumber aliran udara dengan bantuan honeycomb sebagai penyearah aliran. Benda uji berupa turbin angin Savonius dua sudu dengan dimensi sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm, diameter turbin (L) sebesar 303,4 mm, tinggi (H) sebesar 294,4 mm diameter poros (b) sebesar 19 mm, dan diameter end plate (D_0) sebesar 321 mm. Silinder penghalang dengan diameter (d) sebesar 88,8 mm dan tinggi (t) sebesar 500 mm diletakkan di depan returning blade untuk mengurangi gaya drag pada sisi returning turbin angin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jarak S/D sebesar 1,6, variasi Tip Speed Ratio, dan y/D sebesar 0,0; 0,25; 0,5. Alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin menggunakan anemometer, torsi statis menggunakan torque meter, pengukuran torsi dinamis menggunakan brake dynamometer, dan kecepatan putar poros menggunakan tachometer.

Hasil yang didapatkan adalah pemberian silinder penghalang dapat meningkatkan CoP turbin angin Savonius pada Reynolds number sebesar $9,7 \times 10^4$ dengan posisi $y/D=0,5$. Turbin angin Savonius mempunyai kenaikan CoP maksimal sebesar 1,042 kali. Kenaikan terbesar dari torsi statis maksimal pada turbin angin dengan menggunakan penghalang posisi $y/D=0,5$ dibandingkan turbin angin tanpa penghalang adalah sebesar 1,63 kali yaitu pada posisi sudut 30° dengan $Re=9,7 \times 10^4$. Kenaikan terbesar dari Coefficient of Moment (C_m) maksimal pada turbin angin dengan menggunakan penghalang posisi $y/D=0,25$ dibandingkan turbin angin tanpa penghalang adalah sebesar 1,026 kali pada $Re= 1,45 \times 10^5$. Peningkatan putaran paling tinggi yaitu sebesar 1,086 kali pada $y/D=0,5$ $Re=9,7 \times 10^4$.

Kata kunci : Turbin angin Savonius, Silinder Pengganggu, Coefficient of Power, Posisi Tranversal Silinder Pengganggu.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFECT OF OBSTACLE CYLINDER AGAINST TO THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

*“Case Study for Comparison $d/D = 0.5$; Ratio $S/D = 1.6$;
Reynolds number= 9.7×10^4 , 1.45×10^5 , 1.78×10^5 ; with y/D
 $= 0.0$; 0.25 ; 0.5 ”*

Student’s Name : Eka Cahyanti
NRP : 0211144000024
Department : Mechanical Engineering FTI- ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono,
DEA

Abstract

The usage of fossil energy such as oil, coal and fuel become the primary source of energy in almost all countries, including Indonesia. As we know that the formation of fossil energy needs billion years until it become ready to be exploited. The use of renewable energy become an alteratif way to reduce the usage of fossil energy which more sustainable. One of renewable energy is wind energy with average of wind velocity in indonesia is around 3-7 m/s. Even in some location the wind velocity could be faster which we can exploit by large horizontal wind turbine. But when we talk about the wind that has velocity 3-7 m/s which we can find around us, the most suitable device to exploit this wind energy is by using Savonius turbine. Savonius turbine consist of 2 blades with half circular shape that is gather in a vertical shaft. The upside view looks like “S” shape, one blade is advancing blade and the other is returning blade. Savonius

turbine has low performance capability. This experiment aims to understand the effect of circular cylinder as an obstacle that will be located in front of returning blade to increase the performance of this turbine. The expectation of giving the obstacle is to increase the difference of drag force between advancing and returning blade then it will increase CoP, C_m , statics torque and the rotation velocity of Savonius turbine.

This research conducts an experimental study using axial fan as the wind resource and honeycomb. The experiment object is Savonius turbine using 2 blades with diameter $D=165.2$ mm, turbine diameter $L=303.4$ mm, height $H=294.4$ mm, porous diameter $b=19$ mm, and end plate diameter $D_0=321$ mm. Circular cylinder as an obstacle with diameter $d=88.8$ mm and height $t=500$ mm located in front of returning blade reduce drag force on the returning blade. The ratio distance of $S/D=1.6$, variation of Tip Speed Ratio, and ratio of $y/D=0.0; 0.25; 0.5$. Equipment device that is used in this research is anemometer to measure wind velocity, torque meter to measure statics torque, brake dynamometer to measure the dynamics torque, and tachometer to measure the rotation velocity on turbine's shaft.

The result of this experiment shows that by using circular cylinder as an obstacle in front of returning blade could increase maximum CoP by the amount of 1.042 times with Reynolds $Re=9.7 \times 10^4$ and the ratio of $y/D=0.5$. The increase of statics torque is 1.63 times at angle position 30° with $Re=9.7 \times 10^4$ at position $y/D=0.5$. The increase of maximum Coefficient of Moment (C_m) is 1.026 times by using obstacle with the ratio $y/D=0.25$ with $Re=1.45 \times 10^5$. And the increase of rotation is 1.086 times at $y/D=0.5$ with $Re=9.7 \times 10^4$.

Keyword : Savonius Turbine, Circular Cylinder Obstacle, Coefficient of Power, Transversal Position Of Obstacle Cylinder.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan petunjuk sehingga Tugas Akhir yang berjudul **Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius** “Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,6$; $Re = 9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$, $1,78 \times 10^5$ dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ” dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat dan salam juga penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada :

1. Keluarga penulis, Papa Karsono, Mama Sri Astutik, adik Tata dan adik Genthur atas segala dukungan, restu dan doa yang selalu dipanjatkan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah mencurahkan ilmu, perhatian, waktu, tenaga, bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Vivien Suphandani, ST., MT., PhD, Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT, dan Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak sekali bantuan selama penulis menuntut ilmu di ITS baik dalam bidang akademik maupun non akademik.

5. Clarissa Edwina Kawi dan Meika Andiani teman baik yang selalu menghibur penulis, mendukung penulis serta menjadi rekan belajar yang baik.
6. Tim Savonius kelompok 4, elsa, jasmi, lina, meika, clarissa, ammar, yudis, ayu, riri, andri, vita yang bersama-sama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Alik dinikavanilla, atas dukungan dan menjadi teman seperjuangan saat Exchange dan memberikan teladan yang baik bagi penulis.
8. Mukaromah atas segala bantuannya kepada penulis.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan perkuliahan S1 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xxiii
DAFTAR SIMBOL	xxvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	7
1.3. Batasan Masalah	9
1.4. Tujuan Penelitian	10
1.5. Manfaat Penelitian	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Angin	12
2.2. Turbin Angin	13
2.2.1 Turbin Angin sumbu Horizontal	14
2.2.2 Turbin Angin sumbu Vertikal	16
2.3. Turbin Angin Savonius	18
2.4. Gaya <i>Drag</i>	19
2.5. Daya Turbin	21
2.6. Bilangan Reynolds	25
2.7. Aliran Melalui Silinder	26
2.8. <i>Tips Speed Ratio</i>	29
2.9. <i>Coefficient Of Power</i>	31
2.10. <i>Endplate</i>	32
2.11. Penelitian Terdahulu	34
2.11.1. Pengurangan Gaya Drag pada Silinder Sirkular dengan Penempatan Silinder Pengganggu Tipe I Pada Sisi Upstream	34

2.11.2. Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu Plat.....	38
2.11.3. Optimalisasi Turbin Angin Savonius dengan Dua dan Tiga Sudu Menggunakan Penghalang di Depan Returning blade.....	40
2.11.4. Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengaruh Variasi Parameter Geometri dari Turbin Angin Savonius.....	44
2.11.5. Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi Returning blade Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius.....	50
2.11.6. Studi Eksperimen Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada peforma turbin angin Savonius..	55
2.11.7. Studi Numerik Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada peforma turbin angin Savonius.....	57
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	63
3.1 Parameter Yang Diukur.....	63
3.2 Analisa Dimensi.....	64
3.2.1. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	65
3.2.2. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	68
3.3 Peralatan.....	71
3.3.1. Axial Fan.....	71
3.3.2. Benda Uji.....	72
3.3.3. Penyangga Turbin Angin Savonius.....	74
3.3.4. Honeycomb.....	44
3.3.5. Alat Ukur.....	75
a. <i>Tachometer</i>	75
b. <i>Anemometer</i>	77
c. <i>Brake Dynamometer</i>	78
d. <i>Torque Meter</i>	79
e. Pelumas.....	80
f. <i>multimeter</i>	81
g. <i>Voltage Regulator</i>	82

h.	Neraca Pegas	83
i.	Benang	84
j.	<i>Bearing</i>	84
k.	Massa pemberat	84
3.4	Langkah Pengukuran	85
3.4.1	prosedur penelitian	85
3.4.2	Flowchart	87
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	90
4.1	Data Penelitian dan Contoh Perhitungan	90
4.1.1	Bilangan Reynolds	90
4.1.2	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	93
4.1.3	Perhitungan Besar Nilai Torsi Dinamis	94
4.1.4	Perhitungan Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	94
4.1.5	Perhitungan Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	95
4.2	Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	95
4.2.1	Putaran Turbin Angin Savonius tanpa penghalang (n_0) sebagai Fungsi Reynolds <i>number</i> (Re)	96
4.2.2	<i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang Sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	96
4.2.3	<i>Coefficient of Moment</i> (C_{m0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang Sebagai Fungsi Nilai TSR	97
4.2.4	Torsi Statis (T_{s0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang Sebagai Fungsi posisi sudut <i>blade</i>	99
4.3	Analisis Performa Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu	102
4.3.1	<i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds <i>number</i> $9,7 \times 10^4$	104
4.3.2	<i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds <i>number</i> $1,45 \times 10^5$	107

4.3.3	<i>Coefficient of Power (CoP)</i> Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$	109
4.3.4	Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$	110
4.3.5	Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$	113
4.3.6	Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$	115
4.3.7	Perbandingan <i>Coefficient of Moment (Cm)</i> Turbin Angin Savonius Dengan Dan Tanpa Penghalang Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$	116
4.3.8	Perbandingan <i>Coefficient of Moment (Cm)</i> Turbin Angin Savonius Dengan Dan Tanpa Penghalang Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$	118
4.3.9	Perbandingan <i>Coefficient of Moment (Cm)</i> Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$	121
4.3.10	Perbandingan Putaran Fungsi Reynolds Number Pada Turbin Angin Savonius Tanpa Dan Dengan Silinder Penghalang Posisi $y/D=0,0;0,25;0,5$	123
4.3.10	Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya.....	125

BAB V PENUTUP	130
5.1 Kesimpulan.....	130
5.2 Saran.....	130
DAFTAR PUSTAKA	133
LAMPIRAN	136
BIODATA PENULIS	141

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Energi kinetik angin (Alireza Khaliq, 2010)).....	13
Gambar 2.2	Komponen turbin angin sumbu horizontal. (JF Manwell, 2002).....	15
Gambar 2.3	Macam macam jenis turbin angin sumbu horizontal (JF Manwell, 2002).....	16
Gambar 2.4	Macam macam jenis turbin angin sumbu vertikal (JF Manwell, 2002).....	17
Gambar 2.5	Turbin Savonius sisi melintang.....	19
Gambar 2.6	Turbin Angin Savonius Konvensional (Mohammed et al, 2010).....	19
Gambar 2.7	FBD Brake Dynamometer.....	24
Gambar 2.8	Aliran Melalui Silinder.....	27
Gambar 2.9	Mekanisme Terjadinya Separasi pada Aliran Melewati Silinder.....	28
Gambar 2.10	Grafik Hubungan antara <i>Coefficient of Power</i> Dengan <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Pritchard, 1998).....	30
Gambar 2.11	Grafik pengaruh <i>endplate</i> pada peforma turbin angin Savonius. (Akwa et al, 2008).....	33
Gambar 2.12	Skematik turbin angin Savonius dengan <i>end plate</i> (a) gambar 2D (b) gambar 3D (c) pola aliran (Akwa et al, 2008).....	34
Gambar 2.13	Skema Penelitian Pada Wind Tunnel (Triyogi et al, 2009).....	35
Gambar 2.14	<i>Distribusi Pressure Coefficient (Cp) pada Silinder Sirkular dengan Variasi Sudut Iris</i> pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al, 2009).....	36
Gambar 2.15	P Variasi Sudut Potong Silinder Penghalang terhadap Perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al, 2009).....	37
Gambar 2.16	Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008).....	38

Gambar 2.17	Efek kecepatan putar dikarenakan sudut α dan β).	39
Gambar 2.18	Grafik Pengaruh Cop Turbin terhadap Besar Sudut Plat ($\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$) pada Pengganggu 1 (Altan et al, 2008).	39
Gambar 2.19	Skema Instalasi Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Dua dan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010).	40
Gambar 2.20	Grafik Perbandingan (a) Koefisien Torsi terhadap <i>Speed Ratio</i> (b) Dua Sudu (Mohamed et al, 2010).	41
Gambar 2.21	Performa Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu (a) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Torque Coefficient</i> (b) Hubungan antara <i>Tip Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient</i> (M.H. Mohamed et al, 2010).	42
Gambar 2.22	Perbandingan struktur aliran pada saat <i>self starting</i> dengan speed ratio (λ) = 0,7; (a) turbin dua sudu, (b) turbin tiga sudu (Mohamed et al, 2010).	43
Gambar 2.23	Skema Turbin Angin Savonius (Mahmoud et al, 2010).	44
Gambar 2.24	Pengaruh variasi jumlah <i>blade</i> pada <i>Coefficient of Power</i> fungsi Kecepatan Angin pada Turbin (Mahmoud et al, 2010).	45
Gambar 2.25	Pengaruh Jumlah <i>Blade</i> pada Daya Aktual Turbin fungsi Kecepatan Angin).	45
Gambar 2.26	Pengaruh Jumlah <i>Stage</i> Turbin pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin pada $\alpha=1$ (Mahmoud et al, 2010).	47
Gambar 2.27	Pengaruh <i>Overlap Ratio</i> pada Daya Aktual Turbin fungsi Kecepatan Angin (Mahmoud et al, 2010).	48

Gambar 2.28	Pengaruh <i>Aspect Ratio</i> pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin(Mahmoud et al, 2010).....	49
Gambar 2.29	Pengaruh <i>End Plates</i> pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin	49
Gambar 2.30	Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP ₀) sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,4 –2,4.....	51
Gambar 2.31	Grafik Perbandingan Putaran antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tanpa Silinder Pengganggu (n/n ₀) sebagai Fungsi Jarak pada S/D = 1,4 – 2,4.....	52
Gambar 2.32	Grafik Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tanpa Silinder Pengganggu (T/T ₀) sebagai Fungsi Jarak pada S/D = 1,4 – 2,4.....	53
Gambar 2.33	Skema penempatan turbin angin savonius dan plat pengganggu tunggal didepan returning blade turbin angin savonius. (Aip et al, 2017).....	55
Gambar 2.34	Grafik perbandingan nilai putaran dengan dan tanpa menggunakan plat datar tunggal (n/n ₀) terhadap nilai S/D pada Re=30.000 dan 90.000 (Aip et al, 2017).....	56
Gambar 2.35	Grafik perbandingan nilai coefficient of power dengan dan tanpa menggunakan plat datar tunggal (CoP/CoP ₀) terhadap nilai S/D pada Re=30.000 dan 90.000 (Aip et al, 2017).....	57
Gambar 2.36	Aliran mengenai turbin angin savonius untuk Re=30.000 tanpa penghalang (a) vektor kecepatan (b) kontur tekanan, untuk Re=90.000 (c) vektor kecepatan (d) kontur tekanan (Aip et al, 2017).....	58

Gambar 2.37	Kontur tekanan pada turbin angin savonius untuk $Re=30.000$ (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e). 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Aip et al, 2017).....	59
Gambar 2.38	Kontur tekanan pada turbin angin savonius untuk $Re=90.000$ (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e). 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Aip et al, 2017).....	60
Gambar 2.39	Vektor kecepatan di sekitar turbin Savonius dengan plat pengganggu $S / D = 2,0$ untuk $Re = 90.000$. (Aip et al, 2017).....	61
Gambar 3.1	Skema Penelitian turbin angin Savonius tampak atas.....	64
Gambar 3.2	<i>Axial Fan</i> CKE SPV-18.....	71
Gambar 3.3	Skema Susunan Peralatan beserta alat uji.....	72
Gambar 3.4	Turbin Savonius.....	73
Gambar 3.5	Silinder sirkular sebagai penghalang.....	74
Gambar 3.6	Skema Susunan Penyangga dan turbin Angin Savonius (a)tampak depan, (b) tampak samping.....	74
Gambar 3.7	<i>Honeycomb</i>	75
Gambar 3.8	Tachometer OMEGA seri HHT12.....	76
Gambar 3.9	Anemometer.....	77
Gambar 3.10	Susunan <i>brake dynamometer</i>	79
Gambar 3.11	<i>Torque meter</i> LUTRON model TQ-8800.....	80
Gambar 3.12	CODY DT-9205A Digital Multimeter.....	81
Gambar 3.13	<i>Voltage Regulator</i>	82
Gambar 3.14	Neraca pegas.....	83
Gambar 3.15	Benang.....	84
Gambar 3.16	Massa pemberat.....	85
Gambar 3.17	<i>Flowchart</i>	88
Gambar 4. 1	Grafik Putaran Turbin Angin Savonius tanpa penghalang (no) terhadap nilai Reynolds number.....	96

Gambar 4.2	Grafik COP turbin Savonius tanpa penghalang fungsi TSR pada masing-masing Reynolds number $9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$, dan $1,78 \times 10^5$	98
Gambar 4.3	Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (C_{m0}) turbin angin Savonius tanpa penghalang sebagai fungsi TSR.....	100
Gambar 4.4	Grafik Torsi Statis (T_{s0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang Sebagai Fungsi posisi sudut <i>blade</i>	102
Gambar 4.5	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$	104
Gambar 4.6	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$	107
Gambar 4.7	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$	109
Gambar 4.8	Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$	111
Gambar 4.9	Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$	113
Gambar 4.10	Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$	115
Gambar 4.11	Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> (C_m) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$	117

Gambar 4.12	Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$	119
Gambar 4.13	Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$	121
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan kecepatan putaran fungsi Reynolds number pada turbin angin Savonius tanpa penghalang dan dengan silinder penghalang posisi $y/D=0,0;0,25;0,5$	123
Gambar 4.15	Grafik Pengaruh Cop Turbin terhadap Besar Sudut Plat ($\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$) pada Pengganggu 1 (Altan et al, 2008).....	123
Gambar 4.16	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$	123
Gambar 4.17	Grafik Hubungan antara <i>Coefficient of Power</i> Dengan <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Pritchard, 1998).....	123

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data Nilai Koefisien Drag, CD, untuk Beberapa Benda Pada $Re > 10^3$ (Fox, 1998).....	21
Tabel 3.1	Dimensi Primer Parameter CoP.....	65
Tabel 3.2	Dimensi Primer Parameter Cm.....	69
Tabel 3.3	Spesifikasi <i>Axial fan</i> CKE AFD-560.....	72
Tabel 3.4	Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12.....	76
Tabel 3.5	Spesifikasi OMEGA HHF141 Digital Anemometer.....	77
Tabel 3.6	Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800.....	80
Tabel 3.7	Spesifikasi Pelumas WD-40 <i>Multi-Use Product</i>	81
Tabel 3.8	Spesifikasi CODY DT-9205A <i>Digital Multimeter</i>	82
Tabel 3.9	Spesifikasi <i>Voltage Regulator</i> Model TDGC 2J-3.....	83
Tabel 3.10	Spesifikasi neraca pegas.....	83
Tabel 3.11	Spesifikasi Benang.....	84
Tabel 4.1	Reynolds number dan Kecepatan.....	93

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

CoP	<i>Coefficient of Power</i>
CoP ₀	<i>Coefficient of Power</i> turbin tanpa silinder pengganggu
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
b	Diameter poros (m)
C _D	<i>Coefficient drag</i>
C _M	<i>Coefficient of Moment</i>
C _{M0}	<i>Coefficient of Moment</i> turbin tanpa silinder pengganggu
d	Diameter silinder pengganggu (m)
D ₀	Diameter <i>end plates</i> (m)
E _k	Energi kinetik (Joule)
A	<i>Cross sectional area</i> (m ²)
F _D	Gaya <i>drag</i> (N)
m	Massa pemberat (kg)
n	Jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)
n ₀	Jumlah putaran poros turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (rpm)
P _W	Daya kinetik angin (Watt)
P _T	Daya aktual turbin (Watt)
R	Jari-jari turbin (m)
r	Jari-jari silinder atau poros turbin (m)
Re	Bilangan Reynolds
T _d	Torsi dinamis turbin (N.m)
T _s	Torsi statis dari putaran poros (N.cm)
T _{s0}	Torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (N.cm)

V	Kecepatan aliran fluida (m/s)
y	Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
S	Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)
s	Massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
T	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
g	gaya gravitasi (m/s^2)
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
h	Tinggi silinder pengganggu (m)
L	Panjang karakteristik atau Diameter turbin angin Savonius (m)
ρ	Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ	Viskositas dinamis (Ns/m^2)
ω	Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
TSR	<i>Tip Speed Rasio</i>
θ	Sudut sudu turbin angin Savonius ($^{\circ}$)
o	Tebal PVC

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, telah banyak digunakan sebagai sumber energi primer di hampir setiap negara, termasuk Indonesia tanpa dapat diperbarui dalam waktu singkat karena proses pembentukannya membutuhkan waktu jutaan tahun. Hal ini menjadi masalah tersendiri untuk beberapa tahun mendatang karena persediaannya yang semakin menipis dan penggunaannya secara besar besaran di masa sekarang. Berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2017*, terbukti cadangan minyak bumi Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada akhir 2015. Dengan tingkat produksi minyak bumi saat ini dan tidak ada penemuan cadangan minyak bumi baru, maka cadangan terbukti minyak bumi Indonesia akan habis dalam kurun waktu 11 tahun lagi. Cadangan potential gas bumi mengalami sedikit peningkatan, namun cadangan terbuhtinya terus menurun. Dengan kondisi cadangan dan produksi saat ini diperkirakan gas bumi akan habis dalam kurun waktu 36 tahun ke depan. Sumber daya batubara selama kurun waktu 4 tahun terakhir mengalami sedikit peningkatan, sedangkan cadangan batubara mengalami penurunan akibat produksi batubara untuk pemenuhan konsumsi domestik dan komoditas ekspor. Diperkirakan dengan produksi saat ini, cadangan batubara akan habis dalam waktu 70 tahun jika tidak ditemukan cadangan baru.

Pemakaian energi fosil secara terus menerus pun memberikan dampak negatif bagi lingkungan. Salah satunya adalah peningkatan kadar karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_2) di udara yang meningkatkan radiasi yang terperangkap di atmosfer bumi. Hal ini berpengaruh pada peningkatan suhu secara *global*. Pelepasan sulfur oksida (SO_2) ke udara saat bahan fosil ini dibakar juga menjadi penyebab utama terjadinya hujan asam yang berdampak

negatif pada lingkungan, tumbuhan dan kesehatan manusia. Selain itu, pada pertambangan batu bara dapat juga memberikan dampak negatif pada tanah. Perlu diketahui bahwa lapisan batu bara berada di tanah yang subur, sehingga setelah dimanfaatkan sebagai pertambangan batu bara daerah tersebut tidak lagi bisa dimanfaatkan untuk pertanian atau hutan dalam kurun waktu tertentu.

Oleh karena itu, penggunaan energi baru terbarukan menjadi alternatif pengganti energi fosil yang lebih ramah lingkungan dan dapat diperoleh disekitar kita tanpa khawatir akan habis ketersediannya. Indonesia memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan yang cukup besar dengan variasi yang cukup beragam. Salah satu energi terbarukan yang mudah, murah, ramah lingkungan dan ditemukan di Indonesia adalah energi Angin. Energi angin pun menjadi energi yang banyak digemari sebagai energi bersih dengan kemampuannya yang dapat bersaing. Data yang didapatkan dari *Outlook Energy Indonesia 2017*, bahwa sumber daya angin yang tersedia di Indonesia adalah 970 MW, dan untuk saat ini kapasitas yang terpasang hanya 1,96 MW. Dari angka ini, dapat dikatakan bahwa potensi angin di Indonesia cukup besar, namun penggunaannya masih belum bisa maksimal untuk memanfaatkan energi angin tersebut.

Pada kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi, turbin angin yang tepat yang dapat digunakan adalah turbin Savonius selain itu turbin ini tidak membutuhkan torsi awal yang besar. Turbin Savonius adalah salah satu turbin angin yang paling sederhana. Turbin ini adalah salah satu jenis turbin dengan axis vertikal yang mampu mengubah energi angin horizontal menjadi energi kinetik rotasi. Energi kinetik rotasi yang dihasilkan tersebut kemudian digunakan untuk memutar rotor dan menghasilkan listrik. Turbin Savonius terdiri dari 2 baling baling berbentuk setengah silinder yang saling berlawanan arah tergabung di satu poros jika dilihat tampak atas bentuk baling balingnya akan terlihat seperti bentuk "S" pada penampang melintang. Turbin Savonius, pertama kali dikembangkan oleh *engineer* asal

Finlandia, Singuard Savonius pada tahun 1920, dimana plat silinder dibelah menjadi dua bagian yang bagian tengahnya disatukan sehingga membentuk huruf S. Terdapat dua jenis *blade* pada turbin Savonius yaitu, *advancing blade* dan *returning blade*. Secara aerodinamis, turbin ini dapat berputar karena gaya drag yang dihasilkan angin pada *advancing blade* lebih besar dari pada *returning blade*. Namun kelemahan dari turbin ini adalah turbin angin Savonius mempunyai efisiensi yg paling rendah dibanding turbin angin tipe lain.

Oleh karena itu banyak para peneliti yg melakukan riset dalam upaya untuk meningkatkan kinerja turbin angin tipe Savonius. Salah satunya penelitian tentang pengurangan gaya drag pada silinder dengan penambahan *I type bluff body* sebagai kontrol pasive oleh **Triyogi et al (2009)**, Variasi sudut iris silinder pengganggu yang digunakan adalah $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$ dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular dengan jarak $S/d = 1,375$ dengan sisi potong tegak lurus arah aliran. Penelitian ini dilakukan di dalam *subsonic wind tunnel* pada *Reynolds number* $5,3 \times 10^4$. Pemberian silinder pengganggu tipe I membuat *streamline* pada sekitar silinder sirkular menjadi dan menyebabkan hilangnya titik stagnasi pada sisi *downstream* silinder sirkular serta menunda terjadinya separasi pada silinder sirkular. Sehingga, daerah *wake* (daerah bertekanan rendah) di belakang silinder sirkular menjadi lebih sempit yang menyebabkan penurunan gaya *drag* yang terjadi pada silinder sirkular. Hasil yang didapatkan adalah pada sudut iris 65° dengan sudut *stagger* 0° paling efektif menghasilkan pengurangan gaya drag sebesar 0,52 daripada gaya *drag* pada silinder tunggal tanpa diberi penghalang.

Penelitian selanjutnya mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin, dilakukan oleh **Altan et al (2008)** dengan memvariasikan panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) dan besar sudut plat (α dan β) pada kecepatan angin 7 m/s serta bilangan Reynolds $1,5 \times 10^5$, hasil yang didapatkan ialah

Coefficient of Power (Cop) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu l_1 sebesar 45cm dan l_2 sebesar 52 cm dengan sudut pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

Selanjutnya penelitian dilakukan oleh **M.H. Mohamed et al (2010)**, yaitu penelitian tentang pemilihan turbin Savonius dengan memperhatikan jumlah sudu menggunakan software *Computational Fluid Dynamics* dimana peneliti membandingkan performa dari turbin Savonius yang menggunakan dua sudu dan tiga sudu dengan plat penghalang pada sudut tertentu yang diletakkan didepan *returning blade* untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius. Variasi yang digunakan dalam simulasi dengan *Computational Fluid Dynamic (CFD)* adalah sudut dari plat penghalang terhadap turbin Savonius (β) dan *Tip Speed Ratio (TSR)*. Pada kecepatan 10 m/s *Tip Speed Ratio*, dapat meningkatkan koefisien daya pada turbin Savonius sebesar 27,3% dengan dua sudu dan 27,5% pada turbin Savonius dengan tiga sudu. Kenaikan Cop yang tidak jauh berbeda antara turbin angin Savonius dua sudu dengan tiga sudu, maka turbin angin Savonius dengan dua sudu dianggap lebih baik daripada turbin angin Savonius tiga sudu karena instalasinya lebih sederhana, dan murah.

Penelitian lainnya dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**, yaitu upaya peningkatan performa turbin angin Savonius dengan variasi jumlah *blade*, jumlah *stage* turbin, *overlap ratio*, *aspect ratio*, dan pemberian *end plates* pada turbin angin Savonius. Jumlah *blade* yang diujikan adalah 2 *blade* (2b), 3 *blade* (3b), dan 4 *blade* (4b); jumlah *stage* turbin yang digunakan adalah *single stage* dan dua *stage* turbin; *overlap ratio* (β) dengan variasi 0; 0,2; 0,25; 0,3 dan 0,35, *aspect ratio* yang digunakan adalah sebesar 0,5; 1; 2; 4 dan 5 dengan ada dan tidaknya *end plates* pada turbin angin Savonius. Penelitian ini dilakukan pada *windtunnel* dengan range kecepatan angin 0-13 m/s. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan

dua *blade* lebih efisien daripada dengan tiga atau empat *blade*. Turbin dengan dua *stage* memiliki performa yang lebih tinggi daripada turbin dengan *single stage*, dikarenakan *specific power* turbin dengan dua *stage* lebih besar daripada turbin dengan satu *stage*. Selanjutnya, pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio* dan *Coefficient of Power* dari turbin akan meningkat seiring dengan kenaikan *aspect ratio* (α). Penambahan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates* dikarenakan penambahan endplate dapat memperbesar jumlah angin yang menghantam sudu dari turbin angin Savonius.

Penelitian selanjutnya dilakukan (Daniel et al, 2017) tentang pengaruh silinder sirkular sebagai pengganggu aliran di depan sisi *returning blade* terhadap performa turbin angin tipe Savonius dengan variasi $(d/D) = 0,75$; Jarak $S/D = 1,5 \leq S/D \leq 2,4$; dan variasi bilangan Reynolds = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* terbukti efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditandai dengan putaran dari turbin Savonius memiliki kenaikan maksimal sampai 1,9 kali dari putaran turbin tanpa pengganggu pada $Re = 3 \times 10^4$; torsi statis memiliki kenaikan maksimal sampai 1,74 kali dari torsi statis turbin tanpa pengganggu pada $Re = 9,0 \times 10^4$ dan *Coefficient of Power* memiliki kenaikan maksimal sampai 13,35 pada $Re = 3 \times 10^4$. Selain itu, variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin Savonius. Untuk semua bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan bahwa jarak $S/D = 1,6$ terbukti efektif meningkatkan performa turbin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini ditandai dengan nilai puncak (*peak value*) dari putaran, torsi statis dan *Coefficient of Power* turbin.

Penelitian lain yang mendukung penelitian ini adalah tentang Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada performa

turbin angin Savonius ini dilakukan secara eksperimen oleh **Aip et al (2017)** menggunakan *Blower* sebagai sumber angin. Material yang digunakan untuk turbin adalah PVC dengan diameter 4 inch=102 mm, tinggi $H=300$ mm, diameter poros sebesar 16 mm. Penghalang yang digunakan mempunyai ketebalan 3 mm dan tinggi 300 mm dengan variasi lebar penghalang sebesar 102 mm, 104 mm, 105 mm, 108 mm, 113 mm, 117 mm, 144 mm, 165 mm, 186 mm, dan 203 mm. Variasi S/D adalah 1,0; 1,2; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83; dan 2. Reynolds number yang digunakan 30.00 dan 90.000. pengukuran torsi dinamis menggunakan *brake dynamometer* dengan penambahan massa setiap 50 gram. Pada $Re=30.000$ memiliki kenaikan CoP pada semua variasi S/D dengan diberikan plat pengganggu datar tunggal. Namun pada $re=90.000$ dengan diberikan plat pengganggu akan menurunkan nilai CoP pada $S/D>1,41$. Hasil yang didapatkan adalah dengan diletakkan plat datar pengganggu tunggal didepan returning blade memiliki pengaruh pada peforma turbin angin Savonius yang akan meningkatkan peformanya. Pada $S/D>1,41$ pada $Re -90.000$ CoP dengan menggunakan plat pengganggu lebih rendah dari pada tanpa pengganggu. Penurunan sebesar 60,7 % terjadi pada $S/D=1,82$ pada $Re =90.000$.

Penelitian selanjutnya ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan software STAR CCM++ tentang Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada peforma turbin angin Savonius oleh **Aip et al (2017)**. Tinggi turbin $H=300$ mm, diameter poros sebesar 16 mm. Penghalang yang digunakan mempunyai ketebalan 3 mm dan tinggi 300 mm dengan variasi lebar penghalang sebesar 102 mm, 104 mm, 105 mm, 108 mm, 113 mm, 117 mm, 144 mm, 165 mm, 186 mm, dan 203 mm. Variasi S/D adalah 1,0; 1,2; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83; dan 2. Reynolds number yang digunakan 30.000 yaitu pada kecepatan 2,48 m/s dan 90.000 yaitu pada kecepatan 7,45 m/s. Hasil yang didapatkan yaitu Ukuran plat pengganggu tunggal yang dipasang di depan plat pengganggu *returning blade* turbin angin Savonius memainkan peran penting dalam kinerja rotor

turbin. Secara umum, pemasangan plat pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius lebih efektif untuk meningkatkan kinerja turbin. Tetapi hal ini tergantung pada lebar plat pengganggu dan jumlah Reynolds (Re). Untuk lebar plat pengganggu besar ($S/D = 2$) pada $Re = 90.000$, kinerja turbin Savonius menjadi lebih rendah daripada ketika turbin tanpa plat pengganggu. Ini diperlukan pembenaran, baik melalui simulasi dengan rotor turbin dalam keadaan berputar, atau studi eksperimental.

Dari beberapa referensi penelitian di atas maka perlu dilakukannya penelitian lanjutan tentang peningkatan efisiensi turbin Savonius. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara meletakkan silinder penghalang di depan *returning blade*. Studi eksperimen ini akan menggunakan variasi ratio antara jarak antara sumbu axis turbin Savonius dengan pusat silinder penghalang (y) dengan diameter turbin Savonius (D) dan bilangan Reynolds (Re) yang akan dilakukan pada aliran eksternal untuk menghindari terjadinya efek *blockage*.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Turbin Savonius dapat berputar dikarenakan adanya perbedaan besar nilai gaya drag pada *advancing blade* dan *returning blade*. Hal ini dikarenakan nilai *coefficient drag* (C_D) pada *advancing blade* lebih besar daripada *coefficient drag* (C_D) pada *returning blade*. Namun perbedaan antara gaya drag pada *advancing blade* dan *returning blade* belum maksimal sehingga menyebabkan efisiensi dari turbin Savonius masih rendah yaitu sekitar 20% sehingga perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan effisiensinya. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan memberikan sebuah penghalang berupa silinder di depan *returning blade* dengan jarak S . Hal ini akan memperkecil gaya drag yang dihasilkan angin pada *returning blade* sehingga diharapkan mampu meningkatkan peformanya.

Pada penelitian ini akan digunakan turbin Savonius dengan jumlah sudu sebanyak 2 buah sudu dan dilakukan analisa pengaruh peletakkan silinder di depan *returning blade* dengan nilai $d/D = 0,5$; $S/D = 1,6$ dan variasi $y/D = 0$; $0,25$; $0,5$ dalam kondisi aliran udara terbuka (eksternal). Hipotesa awal yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemberian penghalang didepan *returning blade* berupa silinder yang tegak lurus dengan arah aliran dengan nilai $S/D = 1,6$ dapat memberikan pengurangan gaya drag di sisi *returning blade* sehingga akan memperbesar selisih nilai gaya drag antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dengan semakin besarnya selisih gaya drag, torsi akan meningkat yang akan diikuti dengan peningkatan daya turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan wake yang timbul dibelakang penghalang mempercepat perubahan *boundary layer* menjadi turbulen saat mengenai *returning blade* sehingga titik separasi menjadi mundur ke belakang menyebabkan area wake (daerah bertekanan rendah) dari *returning blade* lebih sempit dan gaya drag pada *returning blade* menurun.
2. Variasi posisi silinder pengganggu dalam arah transversal atau tegak lurus arah datangnya angin (y) dengan variasi (y/D) dengan variasi $0,0$; $0,25$; $0,50$ dimaksudkan untuk mendapatkan posisi optimum dimana wake dari silinder pengganggu digunakan secara efektif untuk menunda titik separasi dari *returning blade* turbin angin Savonius sejauh mungkin ketika turbin berputar sehingga menyebabkan gaya drag pada sudu *returning* semakin mengecil. Disisi lain untuk mendapatkan posisi optimum silinder pengganggu dapat mengetahui posisi mana yang dapat lebih mengarahkan aliran udara ke sisi *advancing blade*, sehingga gaya drag pada sudu *advancing* dapat semakin meningkat.

3. Penempatan silinder pengganggu didepan *returning blade* diduga dapat menyebabkan tekanan didepan *returning blade* turun, sedangkan tekan tekanan dibelakang *returning blade* diasumsikan sama seperti tidak menggunakan silinder pengganggu yang akan menyebabkan *pressure drag* yang menyebabkan selisih tekanan didepan dan dibelakang *returning blade* menurun. Akibatnya selisih gaya *drag* didepan dan dibelakang *returning blade* akan meningkat. Hal ini akan memperbesar nilai torsi dan meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP)

Untuk membuktikan hipotesa diatas, maka akan dilakukan penelitian menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm dengan menggunakan *endplate*.

1.3 TUJUAN

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder penghalang di depan *returning blade* dengan jarak peletakkan yang divariasikan pada y/D sebesar 0; 0,25 dan 0,5. dengan cara:

1. Mengukur putaran dari turbin angin Savonius ketika dialirkan udara
2. Mengukur kecepatan angin yang diarahkan ke turbin angin Savonius
3. Mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius ketika dialirkan udara
4. Mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius ketika dialirkan udara
5. Menghitung *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin angin Savonius
6. Menghitung *Coefficient of Moment* (Cm) dari turbin angin Savonius

1.4 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang dapat menunjang tercapainya tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Aliran yang digunakan diasumsikan hanya berasal dari satu arah.
2. Aliran udara diasumsikan sebagai aliran *uniform, steady* dan *incompressible* pada sisi *upstream*
3. Eksternal *flow*
4. Perpindahan panas akibat gesekan udara dengan komponen alat diabaikan.
5. Variasi jarak antara sumbu axis turbin Savonius dan titik pusat silinder penghalang y/D adalah 0; 0,25 dan 0,5 pada nilai Reynolds number $9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$.
6. Penelitian menggunakan turbin angin jenis Savonius dengan nilai rasio perbandingan diameter silinder penghalang dan diameter sudu turbin angin Savonius sebesar $d/D = 0,5$
7. Perbandingan jarak antara titik pusat silinder dengan *returning blade* dan diameter *blade* $S/D = 1,6$
8. Diameter sudu turbin = 165,2 mm

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian penambahan silinder penghalang pada sisi *returning blade* turbin Savonius adalah:

1. Dapat menjelaskan pengaruh yang diberikan silinder penghalang terhadap nilai torsi, putaran dan *Coefficient of Power* turbin Savonius
2. Dapat menjelaskan pengaruh variasi y/D terhadap nilai torsi, putaran serta *Coefficient of Power*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 ANGIN

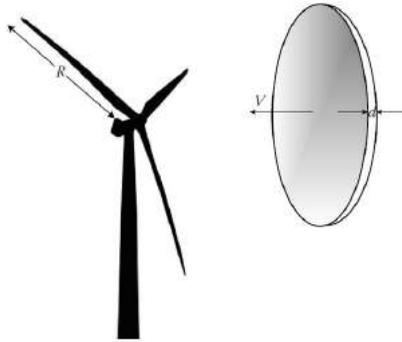
Angin adalah udara yang bergerak yang terdiri dari banyak gas yang ada di atmosphere. Angin merupakan fenomena udara yang bergerak dari daerah katulistiwa ke kutub, seiring udara hangat naik ke atmosphere, dan udara yang lebih dingin turun ke permukaan bumi. Bentuk permukaan daratan yang tidak beraturan adalah faktor utama yang membentuk angin. angin merupakan energi berkelanjutan karena termasuk dalam energi terbarukan yang terdistribusi luas, dan berlimpah.

Wind Energy Conversion Systems (WECS) melibatkan banyak aspek dari disiplin ilmu seperti kinematik, mekanik, aerodinamik, meteorologi, daya listrik, sistem daya. Energi kinetik angin dapat dinyatakan dalam persamaan dibawah ini:

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \rho Vv^2 = \frac{1}{2}\rho Adv^2 = \frac{1}{2}\rho R^2\pi dv^2 \quad (2.1)$$

Dimana

- Ek = energi kinetik angin
- m = masa angin
- v = kecepatan angin
- ρ = masa jenis udara angin,
- A = luas rotor
- R = panjang baling baling
- D = ketebalan *air disk*



Gambar 2.1 Energi kinetik angin (Alireza Khaliq, 2010)

2.2 TURBIN ANGIN

Turbin angin merupakan elemen yang paling penting dari sebuah pembangkit listrik tenaga angin. Turbin angin digunakan untuk mendapatkan energi listrik sebagai hasil konversi dari energi kinetik angin. sebagai generator listrik, turbin angin terhubung ke beberapa jaringan listrik. Jaringan itu terdiri dari rangkaian baterai penyimpanan, *residential scale power system*, jaringan isolasi, dan jaringan peralatan listrik yang besar. Dari daya sendiri, turbin angin menghasilkan daya yang cukup kecil berkisar 10 kW atau kurang dari itu. Pada total kapasitas pembangkit, turbin cukup besar yang digunakan bisa sampai menghasilkan range 500 kW – 2 MW . Turbin yang lebih besar seperti ini biasanya digunakan pada negara negara di Eropa dan Amerika Serikat.

Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin adalah dengan memanfaatkan energi kinetik dari angin bergerak yang dengan kecepatan tertentu kemudian ditangkap oleh turbin angin. Baling-baling turbin dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk menggerakkan poros rotor generator. Baling-baling memutar poros dari turbin yang akan menyebabkan

rotor pada generator akan bergerak dan generator kemudian mengubah energi rotasi menjadi energi listrik.

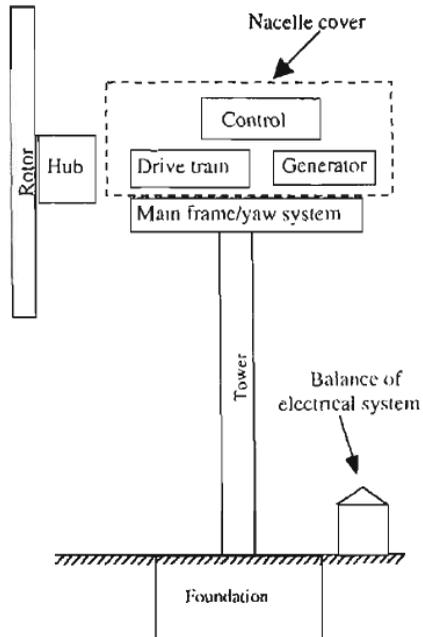
Berdasarkan arah sumbunya, turbin angin dibedakan menjadi dua jenis, yaitu:

2.2.1 Turbin Angin Sumbu Horizontal

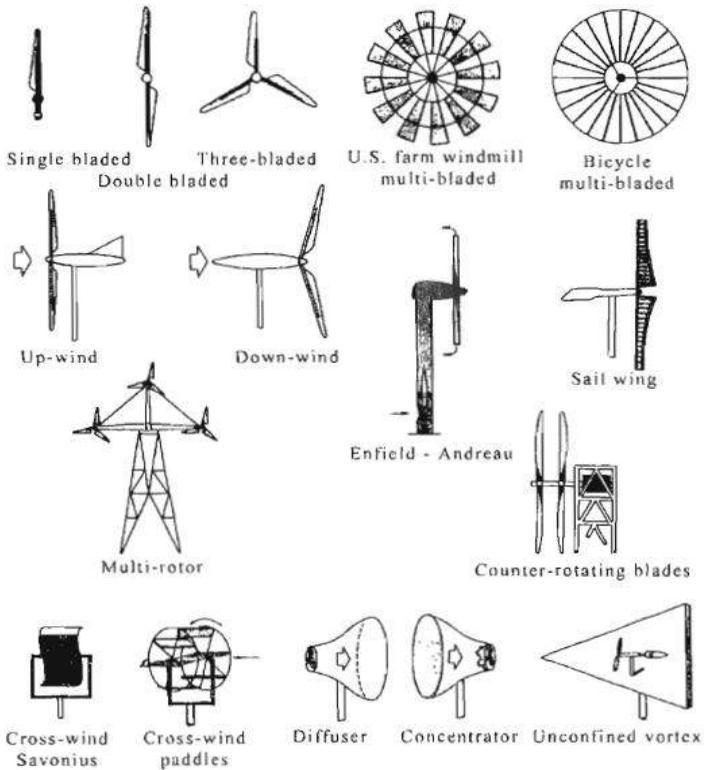
Turbin angin sumbu horizontal (Horizontal Axis Wind Turbines) ialah turbin angin turbin dengan posisi poros sejajar terhadap arah gerak angin dan posisi *blade* turbin ini tegak lurus terhadap arah angin. *Blade* yang digunakan pada turbin angin jenis ini berbentuk airfoil, angin akan melewati kedua sisi permukaan *blade* yang berbentuk airfoil yang kecepatannya lebih cepat pada permukaan atas. Perbedaan tekanan pada permukaan atas dan bawah menghasilkan gaya angkat (*lift*). Kebanyakan HAWT saat ini terdiri dari dua atau tiga baling baling, meskipun ada yang memiliki lebih banyak jumlah baling baling. Ada dua jenis turbin HWAT yaitu turbin angin upwind dan turbin angin downwind. Baling baling dari HWAT dikonstruksi untuk bergerak dengan pusat ditengah tengah, sehingga gaya angkat (*lift force*) menyebabkan rotasi pada pusat tengah. Gaya drag dimana tegak lurus dengan gaya angkat menghambat rotasi rotor.

Kelebihan dan kekurangan HWAT menurut Norwegian University Of Science And Technology, keuntungan dari HWAT adalah baling baling berada di sisi pusat gravitasi turbin menyebabkan stabilitas tinggi, turbin mengumpulkan energi angin yang maksimal dengan membiarkan angle of attack diatur dari jarak jauh, kemampuan untuk memutar baling baling rotor saat badai sehingga dapat meminimalisir kerusakan, menara yang tinggi memberikan akses untuk mendapatkan angin yang dengan kecepatan lebih besar. Kebanyakan HWAT adalah *self-starting*, lebih murah karena produksinya yang massal. Namun ada beberapa kekurangan dari HWAT adalah kesulitan untuk dioperasikan dekat dengan permukaan tanah, menara yang tinggi dan baling baling yang panjang sulit untuk dipindahkan dari satu tempat ke tempat yang

lain, membutuhkan prosedur instalasi khusus, dan dapat menyebabkan masalah navigasi saat ditempatkan di *offshore*.



Gambar 2.2 Komponen turbin angin sumbu horizontal. (JF Manwell, 2002)



Gambar 2.3 Macam macam jenis turbin angin sumbu horizontal (JF Manwell, 2002)

2.2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Berbeda dengan HAWT, rotor VAWT berputar secara vertikal di dengan sumbu vertikal. Turbin angin sumbu vertikal memiliki poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak vertikal. Walaupun tidak seefisien HWAT, namun turbin ini memiliki keuntungan diaplikasikan dekat dengan permukaan tanah, lebih mudah dan aman untuk dibangun, dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah dan mengatasi turbulensi lebih baik dari pada HWAT. Karena efisiensi maksimalnya hanya 30%,

biasanya hanya untuk penggunaan pribadi. Ada beberapa jenis turbin ini yaitu turbin Giromill, turbin Savonius, dan turbin Darrieus.

kelebihan utama susunan turbin ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar bekerja secara efektif. Kelebihan ini sangat berguna untuk lokasi penempatan yang arah anginnya bervariasi. Turbin angin jenis ini mampu untuk memanfaatkan angin dari berbagai arah.

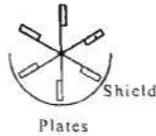
Primarily drag-type



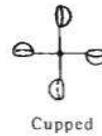
Savonius



Multi-bladed
Savonius



Plates



Cupped

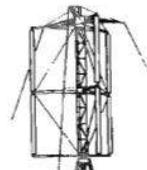
Primarily lift-type



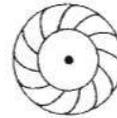
ϕ -Darrieus



Δ -Darrieus



Giromill



Turbine

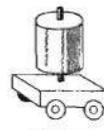
Combinations



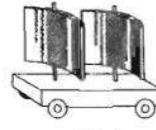
Savonius / ϕ -Darrieus



Split Savonius

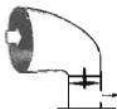


Magnus

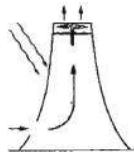


Airfoil

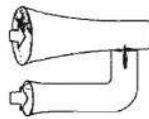
Others



Deflector



Sunlight



Venturi



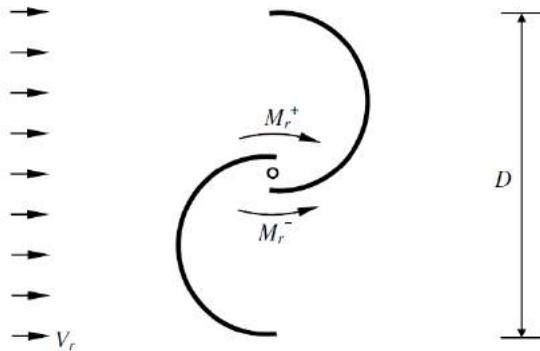
Confined Vortex

Gambar 2.4 macam macam jenis turbin angin sumbu vertikal
(JF Manwell, 2002)

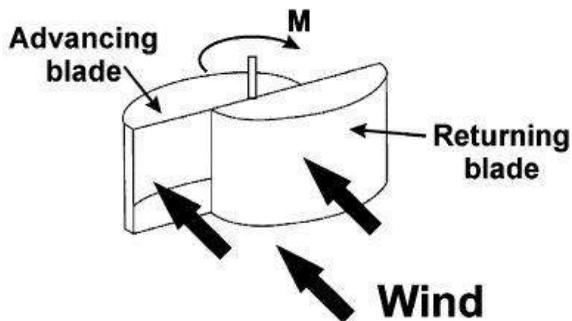
2.3 TURBIN ANGIN SAVONIUS

Turbin Savonius adalah salah satu turbin angin yang paling sederhana. Turbin angin Savonius adalah salah satu jenis turbin angin dengan sumbu axis vertikal yang mampu mengubah energi angin horizontal menjadi energi kinetik rotasi. Energi kinetik rotasi yang dihasilkan tersebut kemudian digunakan untuk memutar rotor dan menghasilkan listrik. Turbin Savonius dapat berputar dikarenakan adanya perbedaan besar nilai gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Hal ini dikarenakan nilai *coefficient drag* (C_D) pada *advancing blade* lebih besar daripada *coefficient drag* (C_D) pada *returning blade*.

Turbin Savonius terdiri dari 2 baling baling berbentuk setengah silinder yang saling berlawanan arah tergabung di satu poros jika dilihat tampak atas bentuk baling balingnya akan terlihat seperti bentuk "S" pada penampang melintang. Turbin Savonius, pertama kali dikembangkan oleh *Engineer* asal Finlandia, Singuard Savonius pada tahun 1920, dimana plat silinder dibelah menjadi dua bagian yang bagian tengahnya disatukan sehingga membentuk huruf S. Terdapat dua jenis *blade* pada turbin Savonius yaitu, *advancing blade* dan *returning blade*. Secara aerodinamis, turbin ini dapat berputar karena gaya drag yang dihasilkan angin pada *advancing blade* lebih besar dari pada *returning blade*. Kelebihan dari turbin Savonius ini hanya membutuhkan kecepatan angin yang tidak terlalu tinggi, turbin yang tepat untuk memanfaatkan energi angin adalah turbin Savonius karena tidak membutuhkan torsi awal yang besar. Selain itu juga desain turbin ini sederhana dan lebih murah. Namun kelemahan dari turbin ini adalah turbin angin Savonius mempunyai efisiensi yg paling rendah dibanding turbin angin tipe lain.



Gambar 2.5 Turbin Savonius sisi melintang



Gambar 2.6 Turbin Angin Savonius Konvensional
(Mohammed et al, 2010)

2.4 GAYA DRAG

Drag merupakan komponen gaya pada suatu benda (bodi) yang bekerja dalam arah sejajar (paralel) dengan arah alirannya. Gaya drag terbentuk karena adanya tekanan dan gaya geser dari aliran fluida terhadap permukaan dari benda tersebut. Sehingga

Gaya drag total merupakan penjumlahan dari *friction drag* dan *pressure drag*. *Friction drag* (F_{Df}) merupakan gaya hambat yang diakibatkan oleh tegangan geser antara fluida dan permukaan benda. *Pressure drag* (F_{Dp}) merupakan gaya hambat yang diakibatkan adanya tekanan fluida dan arahnya tegak lurus terhadap permukaan benda.

Berikut perumusan gaya drag :

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \quad (2.2)$$

keterangan:

F_D : Gaya drag total (N)

ρ : densitas fluida (kg/m^3)

U : kecepatan aliran fluida (m/s)

A : luas proyeksi benda yang terkena aliran fluida (m^2)

C_D : Koefisien drag yang besarnya bergantung pada bentuk geometri dari suatu benda. Nilai C_D dari masing-masing geometri dapat dilihat pada tabel 2.1

Koefisien *drag* (C_D) dinyatakan sebagai berikut

$$C_D \equiv \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.3)$$

Angka $\frac{1}{2}$ ditambahkan sebagai faktor gesekan yang didefinisikan pada persamaan (2.3) dengan maksud untuk membentuk tekanan dinamik. Sehingga persamaan (2.3) bisa ditulis sebagai

$$C_D = f(Re) \quad (2.4)$$

Dari persamaan diatas diketahui untuk gaya *drag* dipengaruhi oleh nilai koefisien *drag* (C_D), massa jenis fluida (ρ), kecepatan fluida (U^2), dan luas proyeksi benda yang terkena aliran fluida (A). Nilai koefisien *drag* pada berbagai permukaan benda

dapat dilihat pada **tabel 2.1** yaitu tabel yang menjelaskan nilai Re pada suatu nilai C_d tertentu.

Tabel 2. 1 Data Nilai Koefisien Drag, C_D , untuk Beberapa Benda Pada $Re > 10^3$ (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.

2.5 DAYA TURBIN

Turbin angin bekerja dengan cara mengkonversi energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik (putaran) untuk menggerakkan turbin, kemudian dikonversi lagi menjadi daya turbin yang dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik.

Daya dari aliran angin yang memutar turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot U^2 \quad (2.5)$$

Dimana massa udara yang mengalir tiap detik dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \quad (2.6)$$

sehingga daya angin yang menabrak turbin (P_w) adalah sebagai berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot U \cdot A) \cdot U^2 \quad (2.7)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot A \quad (2.8)$$

Dimana luas penampang, A , dalam penelitian ini merupakan luas permukaan turbin angin Savonius yang ditabrak oleh angin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$A = (2D - b) \cdot H \quad (2.9)$$

keterangan:

E_k : Energi Kinetik (Joule)

\dot{m} : massa udara yang mengalir tiap detik (kg/s)

U : kecepatan angin (m/s)

ρ : densitas udara (kg/m³)

P_w : daya angin (watt)

A : luas permukaan turbin yang ditumbuk oleh angin (m²)

D : diameter sudu turbin (m)

b : diameter *poros*(m)

H : tinggi turbin (m)

Namun tidak semua daya angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin. Daya aktual turbin P_T dihitung berdasarkan torsi dinamis dan putaran turbin diukur menggunakan *rotary torque* sensor. Hasil pengukuran yang terbaca kemudian dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_T = Td \cdot \omega \quad (2.10)$$

keterangan:

P_T : daya pada turbin (watt)

Td : torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin (N-cm)

ω : putaran yang dihasilkan oleh turbin (rad/detik)

Besar putaran yang dihasilkan oleh turbin (ω) didapatkan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi.n}{60} \quad (2.11)$$

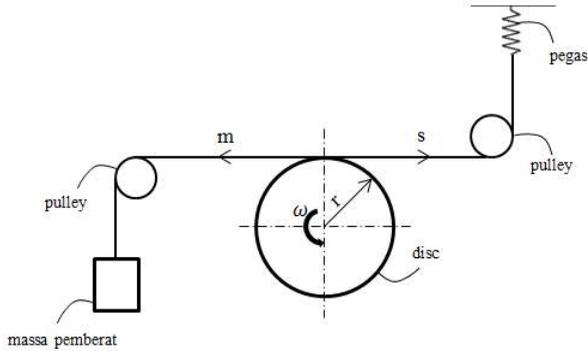
Dimana

n : kecepatan putar poros turbin angin Savonius (rpm)

sehingga persamaan 2.10 menjadi sebagai berikut

$$P_T = \frac{Td.\pi.n}{30} \quad (2.12)$$

Adapun alat yang digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis yaitu *Brake dynamometer* namun tidak dapat menyajikan nilai torsi dinamis secara langsung. Pengukuran yang dilakukan pada *brake dynamometer* dapat diukur melalui pengukuran massa pemberat dan massa yang terbaca pada pegas. Kemudian nilai torsi dinamis harus dihitung berdasarkan *Free Body Diagram* pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 FBD Brake Dynamometer

Melalui Gambar 2.7, nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$Td = \{(s - m)g\} \times r \quad (2.13)$$

dimana:

s = massa yang terbaca pada pegas (kg)

m = massa beban (kg)

g = gravitasi (m/s^2)

r = jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Sehingga persamaan 2.10 menjadi:

$$P_T = (\{(s - m)g\} \cdot r) \cdot \omega \quad (2.14)$$

Dimana diketahui bahwa,

\dot{m} : laju alir massa angin (kg/s)

U : kecepatan angin (m/s)

ρ : densitas udara (kg/m^3)

Q : debit angin (m^3/s)

A : cross sectional area (m^2)

2.6 BILANGAN REYNOLDS

Bilangan Reynolds (Re) merupakan bilangan tidak berdimensi yang ditemukan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1880. Dalam mekanika fluida, **bilangan Reynolds** adalah rasio antara gaya inersia (ρv^2) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Re digunakan untuk mengklasifikasikan suatu aliran menjadi aliran laminar, turbulen, atau transisi. Re diperoleh dari rasio antara gaya inersia dengan gaya viskos sebagaimana dirumuskan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \quad (2.15)$$

dimana,

$$\text{Gaya Inersia} = \rho \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.16)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \mu \cdot \frac{U_{\infty}}{L} \cdot L^2 \quad (2.17)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\mu \cdot \frac{U_{\infty}}{L} \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.18)$$

Dalam penelitian tentang turbin Savonius ini, panjang karakteristik (L) didefinisikan menjadi:

$$L = 2D - e \quad (2.19)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot (2D - e)}{\mu} \quad (2.20)$$

keterangan:

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

U_∞ : kecepatan aliran *free stream* fluida (m/s)

μ : viskositas dinamik fluida (N.s/m^2)

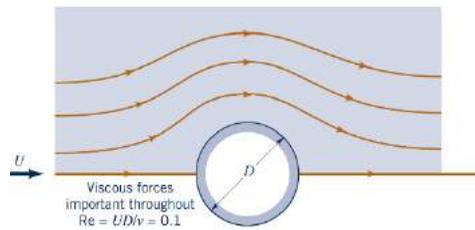
L : panjang karakteristik turbin (m)

D : diameter sudu turbin Savonius (m)

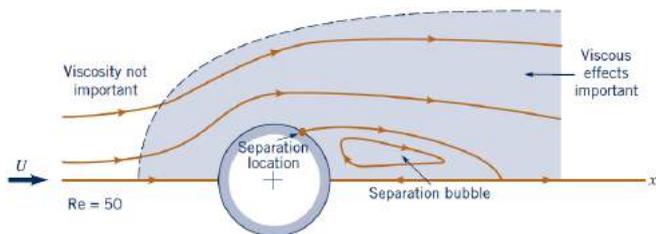
b : diameter poros (m)

2.7 Aliran Melalui Silinder

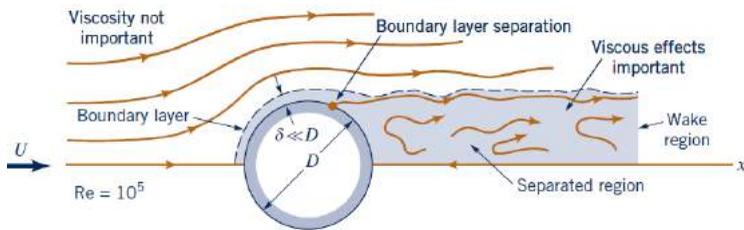
Berikut ini adalah gambar aliran external melalui bodi silinder.



(a) Aliran *viscous* dengan Reynolds *number* rendah



(b) aliran melalui silinder dengan *moderate* Reynolds *number*



(c) Aliran melalui silinder dengan Reynolds *number* besar

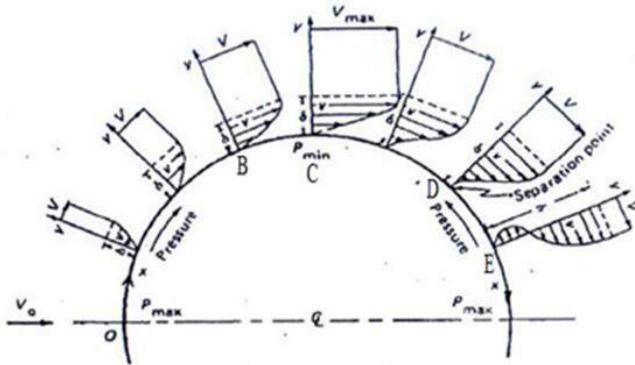
Gambar 2.8 Aliran Melalui Silinder

Pada nilai bilangan Reynolds rendah ($Re < 1$) yang melalui silinder akan dicirikan bahwa kehadiran cilinder dan efek kekentalan yang menyertainya dirasakan seluruh bodi silinder pada bidang aliran yang luas secara relatif. Pada gambar 2.8 (a) mengindikasikan bahwa untuk $Re = UD/v = 0.1$ efek *viscous* penting untuk beberapa diameter pada arah manapun dari silinder. Yang mengejutkan adalah karakteristik *streamline* dari aliran tersebut simetrik pada depan dan belakang silinder.

Seiring bertambahnya nilai Reynolds *number* area dibelakang silinder dimana efek viscous tersebut berlaku menjadi semakin sempit dengan daerah viscous membentang hanya untuk jarak pendek di depan silinder kemudian aliran kehilangan bentuk simetriknya antara downstream dan upstream. Karakteristik aliran eksternal yang lainnya adalah terjadi separasi dengan bodi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 (b). Dengan bertambahnya nilai Reynolds *number*, *fluid inertia* menjadi sangat penting pada beberapa lokasi di bodi silinder, yang menunjukkan lokasi separasi. Sehingga, gelembung separasi dibelakang silinder dimana seharusnya fluida di mana beberapa cairan sebenarnya mengalir *upstream*

Pada nilai Reynolds *number* yang besar, daerah yang terkena dampak gaya *viscous* di downstream hanya sampai melibatkan lapisan batas tipis ($\delta \ll D$) di bagian depan silinder dan ireguler dan *unsteady* yang meluas jauh ke downstream dari silinder. Aliran diluar daerah *boundary layer* dan pada area *wake* mengalir secara *inviscid*. Dan tentu saja kekentalan fluida adalah

sama pada seluruh bidang aliran. Apakah iya atau tidak, efek viscous adalah penting tergantung tinjauan di lokasi mana yang kita pertimbangkan.



Gambar 2.9 Mekanisme Terjadinya Separasi pada Aliran Melewati Silinder (Farullahasby, 2013)

Gambar 2.9 menjelaskan proses terjadinya separasi dan *wake* pada aliran yang melewati silinder. Fluida dari titik A sampai C mengalami percepatan tetapi gradien tekanannya negatif [$\frac{dP}{d\theta} < 0$]. Setelah melewati titik C, fluida mengalami peningkatan tekanan atau gradien tekanannya bernilai positif [$\frac{dP}{d\theta} > 0$]. Hal ini disebut juga sebagai *adverse pressure gradient* dan hal ini menyebabkan partikel fluida didalam *boundary layer* menjadi lambat. Gaya tekan dan gaya geser pada elemen bawah melawan arah aliran. Perbedaan tekanan dan gaya geser ini mengakibatkan momentum pada aliran di bagian atas lebih besar dan sangat berpengaruh terhadap fluida yang terletak dekat permukaan. Ketika momentum partikel fluida berkurang terus oleh gaya tekan dan gaya geser maka aliran fluida dipermukaan diperlambat hingga diam sampai pada titik D, gradient kecepatan menjadi nol [$dU/dy |_{y=0}$]. Pengaruh adverse gradient ini adalah mengurangi kecepatan.

Lebih jauh lagi yaitu di titik E terjadi *adverse pressure gradient* yang cukup oleh karena itu aliran didekat permukaan telah berbalik arah dan fluida sudah tidak mampu mengikuti bentuk dari permukaan dan menjauhinya. Titik awal terjadi peristiwa pemisahan aliran dari permukaan kontur disebut dengan titik separasi. Penyebab dari titik separasi ini adalah momentum yang digunakan untuk menggerakkan fluida sudah tidak mampu lagi mengatasi gaya gesek dan tekanan balik (*adverse pressure gradien*).

Jika separasi terjadi, maka akan terbentuk daerah di belakang silinder yang tidak tersentuh oleh aliran yang disebut *wake*. Daerah *wake* adalah daerah bertekanan rendah yang dibentuk oleh terpisahnya *boundary layer* bagian atas dan bagian bawah. Lebar dari *wake* dipengaruhi oleh posisi titik separasi. Pada kasus aliran turbulen, *boundary layer* lebih mampu untuk bertahan terhadap *adverse pressure gradient* dan gaya gesek, sehingga titik separasi terletak lebih ke belakang *body*, hal ini menyebabkan daerah *wake* yang terbentuk lebih sempit.

2.8 TIP SPEED RATIO

Tip Speed Ratio merupakan rasio antara kecepatan angin dengan kecepatan putar di ujung sudu turbin angin. *Tip Speed Ratio* yang dilambangkan dengan TSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (2.21)$$

keterangan:

TSR : *Tip Speed Ratio*

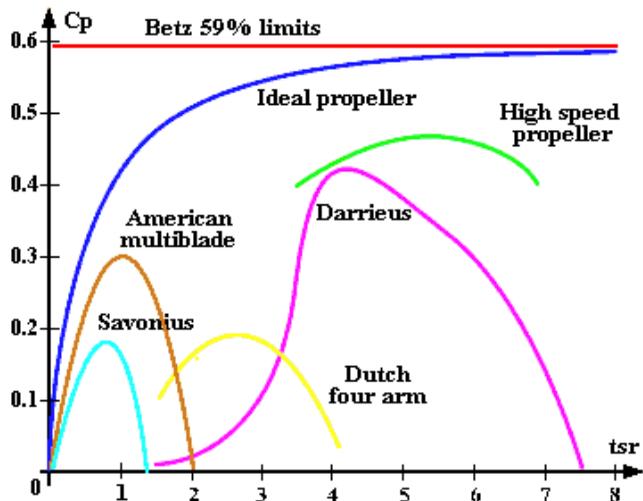
ω : kecepatan sudut turbin (rad/s)

R : jari-jari turbin (m)

U : kecepatan angin (m/s)

Jika rotor turbin berputar terlalu lambat, sebagian besar angin akan melewati celah antara sudu-sudunya, hal ini

menyebabkan daya yang dihasilkan kecil karena angin yang langsung bertatapan dengan sudunya hanya sebagian kecil. Namun, ketika rotor turbin berputar terlalu cepat, sudu turbin seolah-olah akan permukaan solid antar satu sudu dengan sudu yang lain. Berdasarkan **Gambar 2.10** dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai *TSR*, *Coefficient of Power* akan meningkat hingga titik optimumnya, dan nilai *Coefficient of Power* akan turun seiring dengan meningkatnya nilai *TSR*. Menurut aturan Betz, *Coefficient of Power* maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin angin adalah 0,593. Masing-masing jenis turbin angin memiliki titik kerja awal yang berbeda. Apabila titik kerja awal suatu turbin terletak pada nilai *TSR* yang rendah, artinya turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah.



Gambar 2.10 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power* Dengan *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Pritchard, 1998)

Batas Betz (*Betz Limit*) merupakan batas *Coefficient of Power* terbesar yang dapat dihasilkan turbin angin dibanding

energi mekanik yang dihasilkan aliran udara yang mengenyainya. Seorang ahli aerodinamika Jerman, *Albert Betz*, menemukan bahwa *Coefficient of Power* maksimum untuk turbin angin adalah 0.593. *Coefficient of Power* maksimum ini adalah nilai *Coefficient of Power* tertinggi untuk seluruh jenis turbin angin, baik *Horizontal Axis Wind Turbin (HAWT)* maupun *Vertical Axis Wind Turbin (VAWT)* sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar 2.10 diatas. Untuk turbin angin dengan titik mulai *TSR* rendah menunjukkan bahwa turbin angin dapat mulai bekerja pada kecepatan yang rendah pula misalnya turbin angin *Savonius*, *American Multiblade*, dan ideal propeler.

2.9 COEFFICIENT OF POWER

Coefficient of Power (CoP) merupakan rasio antara daya mekanik turbin ketika mendapat aliran fluida (P_t) yaitu *power output* turbin dengan daya kinetik dari angin itu sendiri (P_w) yaitu sebagai *power input*. Jadi, ada dua faktor utama yang mempengaruhi nilai dari *CoP*, yaitu daya mekanik dari turbin atau daya keluaran dari turbin karena terkena angin, dan daya kinetik dari angin itu sendiri sebagai daya input yang dikenakan ke turbin. *Coefficient of Power (CoP)* menentukan performa dari suatu turbin angin. Besarnya *Coefficient of Power (CoP)* ditunjukkan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_t}{P_w} \quad (2.22)$$

Besarnya nilai daya kinetik dari angin (P_w) dan daya mekanik turbin (P_t) dapat diketahui dari persamaan yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, yaitu pada persamaan 2.10 dan 2.8. Sehingga besarnya *Coefficient of Power (CoP)* dapat dihitung dari persamaan berikut:

$$CoP = \frac{Td \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (2.23)$$

dimana : CoP = *Coefficient of Power* (dalam %)
 Td = Torsi dinamis turbin angin Savonius (Nm)
 ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
 U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
 A = Luas penampang turbin angin Savonius (m²)

Sedangkan *Coefficient of Moment* (C_m) merupakan perbandingan antara torsi *real* yang dimiliki oleh rotor dengan torsi teoritis yang besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R} \quad (2.24)$$

Dimana

R = jari jari turbin angin Savonius

Persamaan 2.23 dan 2.24 jika dibandingkan akan didapatkan hubungan antara *Coefficient of Power* (CoP) dan *coefficient of torque* (C_T) dengan *Tip Speed Ratio* sebagai berikut :

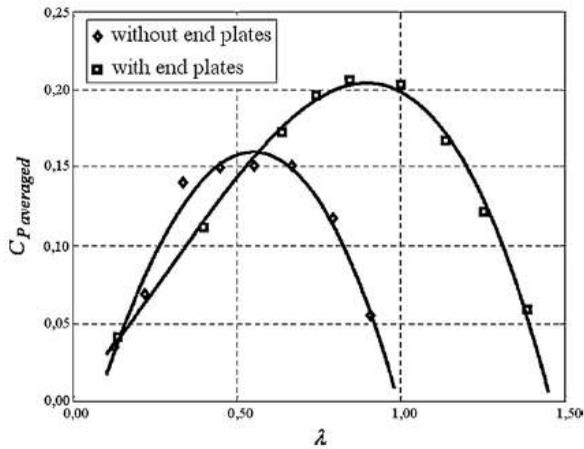
$$\frac{C_{op}}{C_m} = \frac{\omega.R}{U} = TSR \quad (2.25)$$

2.10 *End plate*

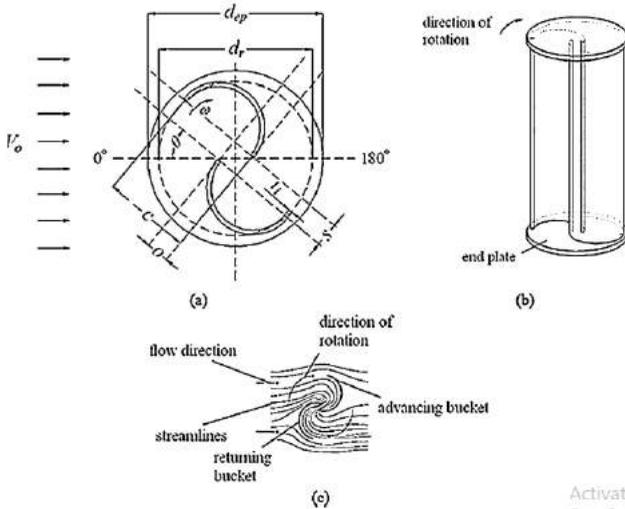
End plate adalah aksesoris tambahan yang dapat ditambahkan pada turbin angin Savonius untuk meningkatkan performanya. Seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut, *end plate* dapat meningkatkan rata rata *power coefficient* turbin angin Savonius secara besar. Turbin juga beroperasi lebih efisien pada *Tip Speed Ratio* yang lebih tinggi.

Piringan pada ujung turbin mencegah udara keluar dari sisi cekung mengalir ke aliran eksternal, dan juga menjaga perbedaan

tekanan sisi cekung dan sisi cembung. Diameter *end plate* yang direkomendasikan adalah 1.1 kali ukuran diameter turbin Savonius.



Gambar 2.11 Grafik pengaruh *endplate* pada peforma turbin angin Savonius. (Akwa et al, 2008)



Gambar 2.12 Skematik turbin angin Savonius dengan *end plate* (a) gambar 2D (b) gambar 3D (c) pola aliran (Akwa et al, 2008)

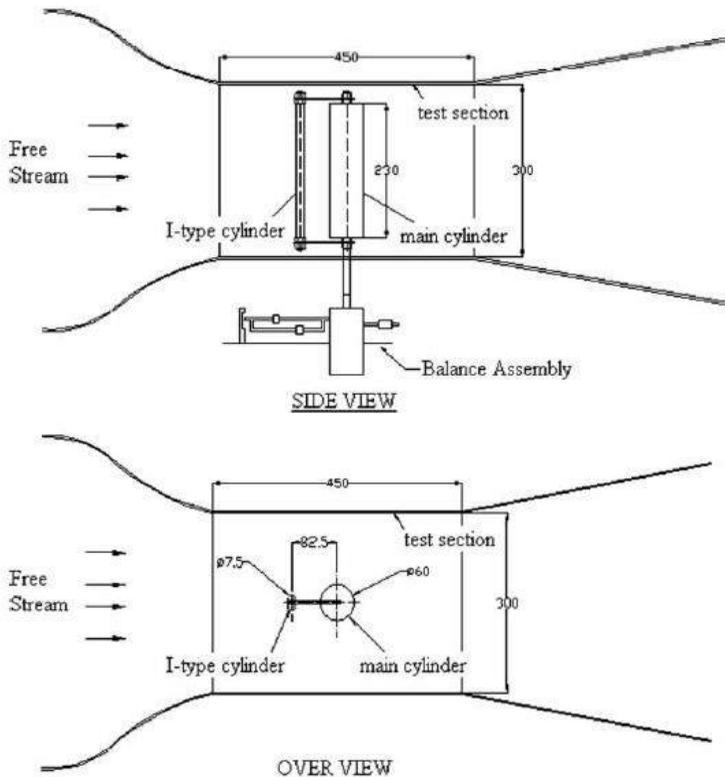
2.11 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah referensi dari penelitian penelitian terdahulu yang berkaitan dengan performa turbin angin Savonius dengan peletakkan penghalang pada turbin Savonius.

2.11.1 Pengurangan Gaya *Drag* pada Silinder Sirkular dengan Penempatan Silinder Pengganggu Tipe I Pada Sisi Upstream

Penelitian dilakukan oleh Triyogi et al (2009) untuk mengurangi gaya *drag* pada silinder sirkular dengan menempatkan pengganggu berupa silinder pengganggu tipe I yaitu silinder pejal yang dipotong kedua sisinya secara paralel dengan menggunakan variasi sudut potong pada sisi upstream silinder sirkular. Ukuran silinder sirkular $d=60$ mm dengan pengganggu berupa *bluff body* berdiameter $d_s=7,5$ mm dengan variasi sudut iris silinder pengganggu yang masing masing $\theta_s =$

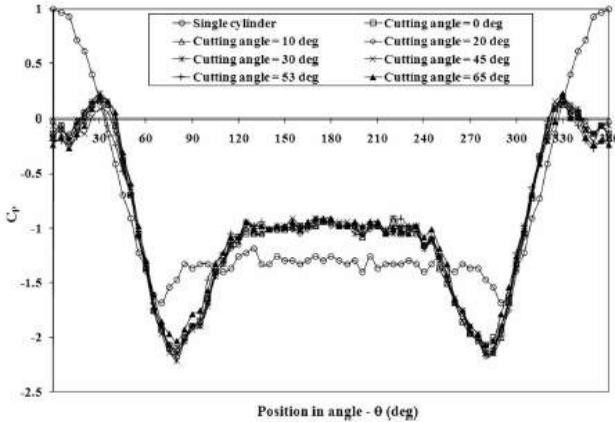
$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$ dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular dengan perbandingan $S/d = 1,375$. Kecepatan angin yang digunakan adalah sebesar 14 m/s dan bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$. Penelitian dilakukan pada *subsonic windtunnel*.



Gambar 2.13 Skema Penelitian Pada Wind Tunnel (Triyogi et al, 2009)

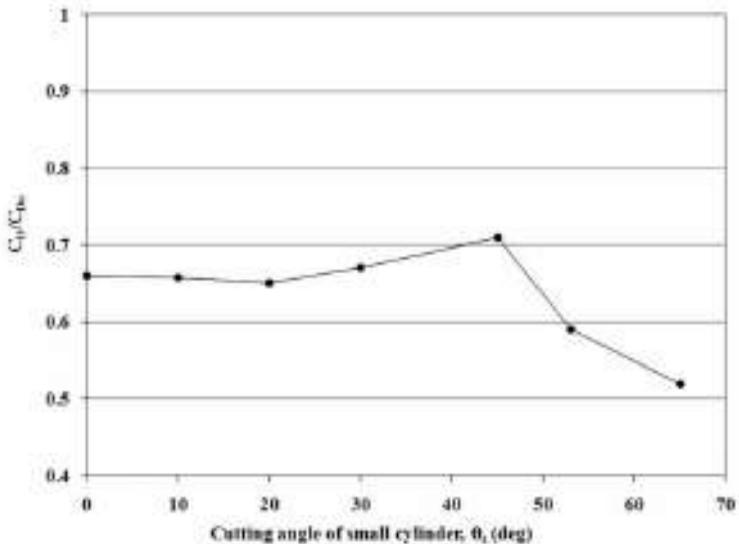
Hasil penelitian yang didapatkan adalah data distribusi *pressure coefficient* (C_p) yang simetris untuk semua silinder penghalang. Distribusi *pressure coefficient* (C_p) di sekitar silinder

sirkular pada $Re = 5,3 \times 10^4$ untuk variasi sudut iris $\theta_s = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 53^\circ$ dan 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular pada jarak $S/d = 1,375$ dapat dilihat pada gambar 2.13 berikut ini.



Gambar 2.14 Distribusi *Pressure Coefficient* (C_p) pada Silinder Sirkular dengan Variasi Sudut Iris pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al, 2009)

Berdasarkan Gambar 2.14, nilai C_p untuk pada $\theta=0$ mendekati 0 atau bernilai negatif, hal ini dikarenakan quasi static vortex yang terbentuk diantara silinder sirkular dan silinder tipe I. sedangkan nilai maksimum C_p sebesar 0,1 - 0,2 pada *reattachment region*, dimana *shear layer* terseparasi dari silinder penghalang. Posisi *reattachment region* terletak pada $\theta = 30^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 330^\circ$ (bagian bawah). Untuk sudut iris $\theta_s = 53^\circ$, dihasilkan nilai C_p terendah yaitu sebesar -2,14 pada posisi $\theta = 80^\circ$ (bagian atas) dan $\theta = 280^\circ$ (bagian bawah). Selain itu, didapatkan hasil bahwa pemberian silinder penghalang mampu menunda terjadinya separasi pada bagian atas dan bagian bawah silinder utama.

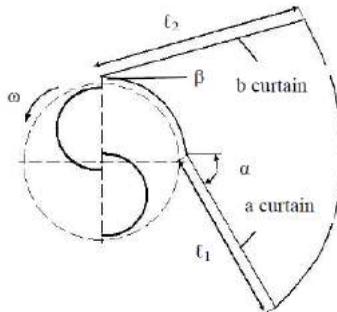


Gambar 2.15 Variasi Sudut Potong Silinder Penghalang terhadap Perbandingan C_D/C_{D0} pada $Re = 5,3 \times 10^4$ (Triyogi et al, 2009)

Gambar 2.15 menunjukkan pengaruh variasi sudut iris terhadap ratio koefisien *drag* dengan dan tanpa silinder penghalang (C_D/C_{D0}), dengan nilai (C_D/C_{D0}) < 1 yang berarti bahwa koefisien *drag* dengan diberi silinder penghalang lebih kecil dari pada koefisien drag tanpa diberi silinder penghalang. Gambar 2.15 menunjukkan pada sudut iris $\theta_s = 65^\circ$ memberikan pengurangan gaya *drag* paling tinggi sedangkan sudut iris $\theta_s = 45^\circ$ menunjukkan pengurangan gaya *drag* paling rendah. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa silinder pengganggu tipe I pada sudut iris $\theta_s = 65^\circ$ paling efektif mengurangi gaya *drag* sebesar 0,52 kali dari silinder sirkular tanpa penghalang.

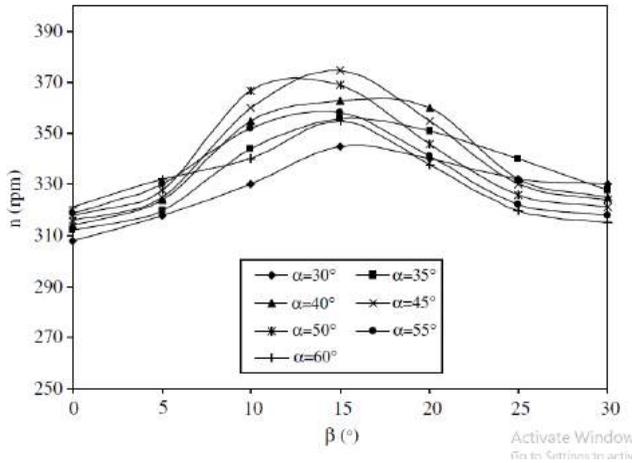
2.11.2 Penelitian Turbin Angin Savonius Berpengganggu Plat Datar

Penelitian ini dilakukan oleh **Altan et al (2008)**, yaitu dengan mengatur aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa dua buah plat yang diposisikan di depan turbin seperti gambar 2.16, dengan variasi yang digunakan adalah panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) dan besar sudut plat (α dan β) menggunakan kecepatan angin 7 m/s pada bilangan *Reynolds* $1,5 \times 10^5$.

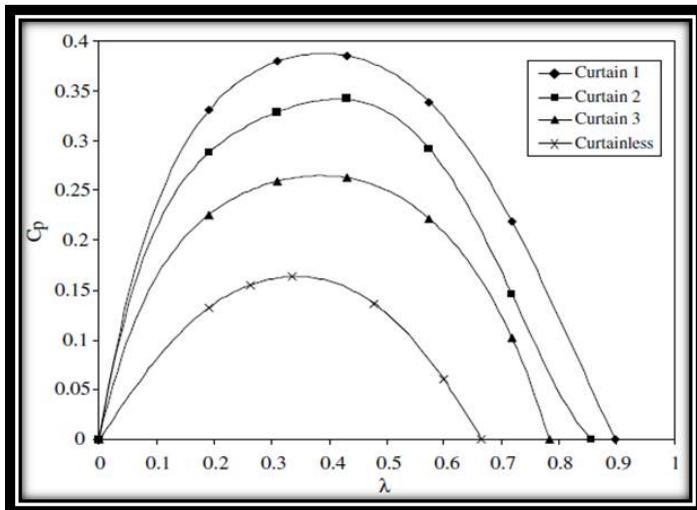


Gambar 2.16 Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin Savonius (**Altan et al, 2008**)

Hasil penelitian dapat dilihat pada gambar 2.17, yang menjelaskan bahwa *Coefficient of Power (C_{op})* dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% apabila diberi pengganggu dengan susunan yang optimal, yaitu dengan panjang plat pengganggu ℓ_1 sebesar 45cm dan ℓ_2 sebesar 52 cm dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.



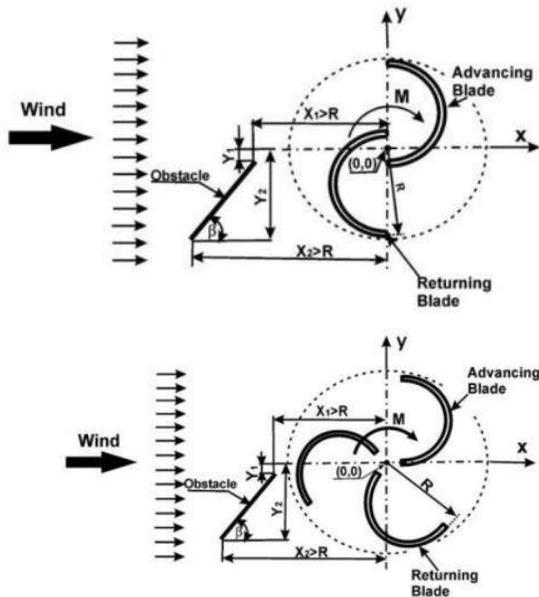
Gambar 2.17 Efek kecepatan putar dikarenakan sudut α dan β



Gambar 2.18 Grafik Pengaruh Cop Turbin terhadap Besar Sudut Plat ($\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$) pada Pengganggu 1 (Altan et al, 2008)

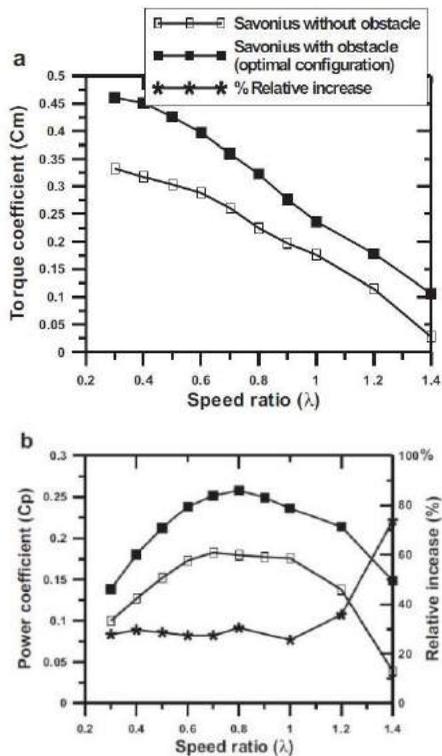
2.11.3 Optimalisasi Turbin Angin Savonius dengan Dua dan Tiga Sudu Menggunakan Penghalang di Depan *Returning blade*

Penelitian ini dilakukan **Mohamed et al (2010)** dengan simulasi software computational fluid dynamics. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan dan membandingkan performa turbin angin Savonius menggunakan dua sudu dan tiga sudu dengan pemberian penghalang yang diletakkan di depan *returning blade*. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah besar sudut penghalang terhadap turbin Savonius (β) dan *Tip Speed Ratio* (TSR). Skema instalasi penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.19

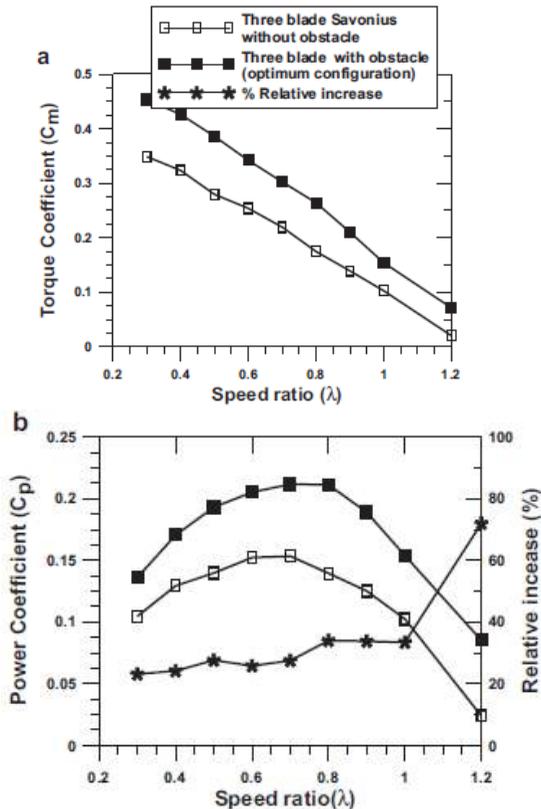


Gambar 2.19 Skema Instalasi Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Dua dan Tiga Sudu (**Mohamed et al, 2010**)

Hasil yang diperoleh dari simulasi ini adalah data koefisien nilai koefisien Moment (C_m) dan Power (C_p) untuk turbin angin Savonius yang menggunakan dua dan tiga sudu. Pengaruh antara C_m dan C_p terhadap speed ratio (TSR) pada turbin angin Savonius dengan dua dan tiga sudu dapat dilihat pada **Gambar 2.20**.



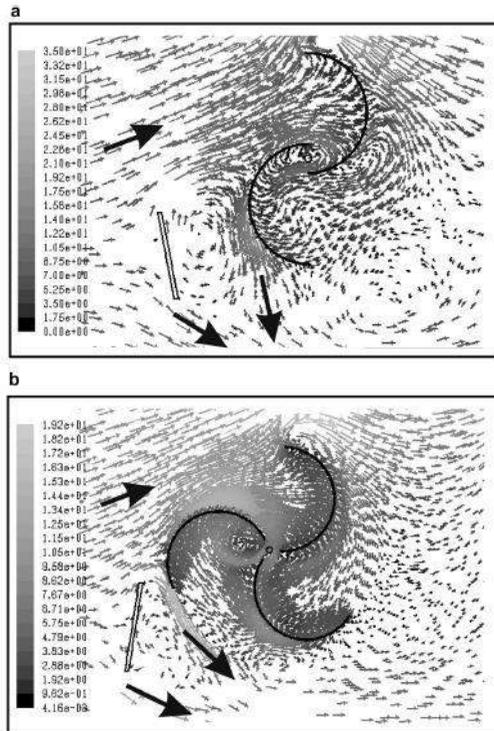
Gambar 2.20 Grafik Perbandingan (a) Koefisien Torsi terhadap *Speed Ratio* (b) Koefisien Daya terhadap *Speed Ratio*, Pada Turbin Angin Savonius menggunakan Dua Sudu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2.21 Performa Turbin Angin Savonius dengan Tiga Sudu (a) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Torque Coefficient* (b) Hubungan antara *Tip Speed Ratio* dan *Power Coefficient* (M.H. Mohamed et al, 2010)

Dapat disimpulkan dari hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah pemberian plat penghalang di depan *returning blade* dapat meningkatkan kemampuan *self starting*

pada turbin angin dimana aliran fluida pada turbin Savonius pada saat melakukan self starting dapat dilihat pada gambar simulasi CFD



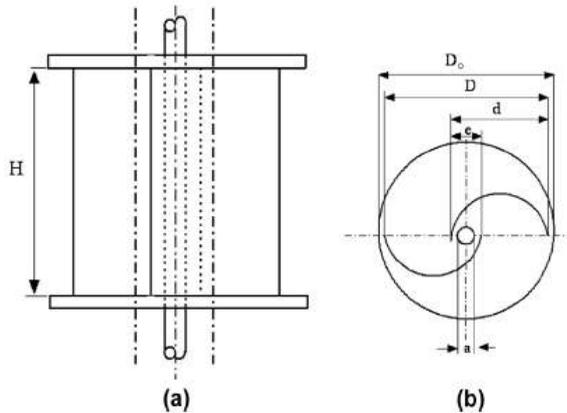
Gambar 2.22 Perbandingan struktur aliran pada saat *self starting* dengan speed ratio (λ) = 0,7; (a) turbin dua sudu, (b) turbin tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

Dari hasil yang didapatkan, efisiensi dari turbin angin Savonius juga mengalami peningkatan. Untuk turbin angin Savonius dua sudu, peningkatan yang terjadi adalah sebesar 27,3% pada $\beta = 100,8^\circ$ dan TSR = 0,7. Untuk turbin angin Savonius tiga sudu, terjadi peningkatan sebesar 27,5% pada $\beta =$

80,52° dan TSR = 0,7. Dengan perbedaan nilai koefisien daya yang kecil dan hampir tidak memberikan kenaikan yang signifikan antara turbin angin Savonius dua sudu dengan tiga sudu, maka lebih baik menggunakan turbin angin Savonius dengan dua sudu dengan pertimbangan instalasi lebih mudah dan biaya lebih murah serta lebih praktis.

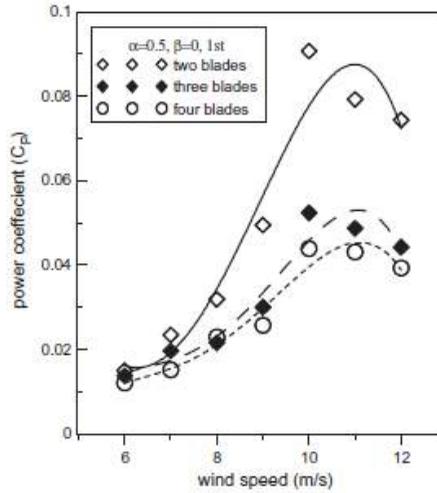
2.11.4 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Pengaruh Variasi Parameter Geometri dari Turbin Angin Savonius

Penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)** pada turbin angin Savonius untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan menggunakan pengaruh variasi parameter geometri dari turbin angin Savonius. Parameter geometri yang digunakan adalah variasi jumlah *blade*, *overlap ratio*, *aspect ratio*, jumlah *stage*, dan pemberian *end plate*. Variasi jumlah *blade* yaitu dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b), dan empat *blade* (4b); variasi jumlah *stage* turbin adalah *single stage* dan *two stage*; *overlap ratio* $\beta = (e - a)/d$ dengan variasi 0; 0,2; 0,25; 0,3 dan 0,35, dengan perbandingan antara tinggi turbin (H) dan diameter turbin (D) sebagai *aspect ratio* (α) dengan variasi 0,5; 1; 2; 4 dan 5 dengan ada dan tanpa diberi *end plates* pada turbin angin Savonius. Skema desain turbin angin Savonius pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut ini.

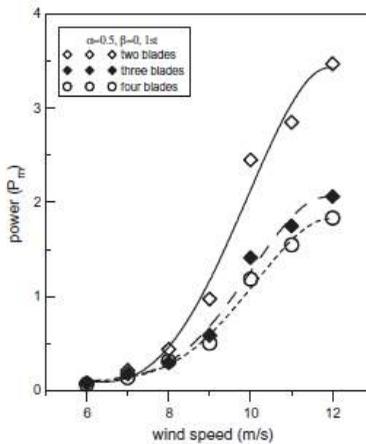


Gambar 2.23 Skema Turbin Angin Savonius (Mahmoud et al, 2010)

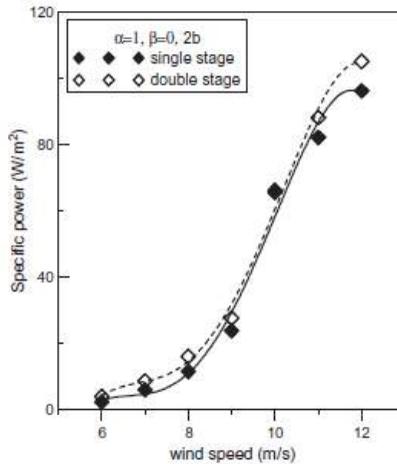
Percobaan dilakukan pada windtunnel dengan range kecepatan 0-13 m/s. Diameter sudu bervariasi sebesar 0,3; 0,2; 0,1 dan 0,08 m yang terbuat dari PVC. Material *end plate* dengan tebal 2,5 mm terbuat dari plat kayu, dengan ukuran diameter *end plate* 110 % diameter turbin. Diameter poros turbin yang digunakan adalah sebesar 14 mm dengan panjang 62 cm. Dari studi eksperimen ini, diperoleh kesimpulan bahwa jumlah *blade* berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih tinggi daripada turbin dengan tiga *blade* atau empat *blade*, berikut hasil yang didapatkan yang dituangkan menjadi grafik.



Gambar 2.24 Pengaruh variasi jumlah blade pada *Coefficient Of Power* fungsi Kecepatan Angin pada Turbin (Mahmoud et al, 2010)

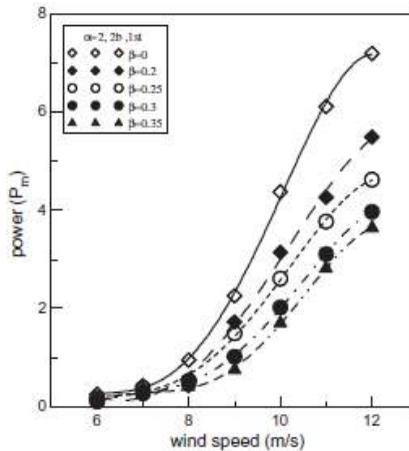


Gambar 2.25 Pengaruh Jumlah *Blade* pada Daya Aktual Turbin fungsi Kecepatan Angin (Mahmoud et al, 2010)



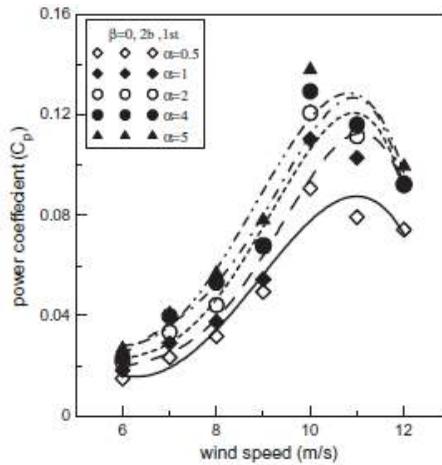
Gambar 2.26 Pengaruh Jumlah *Stage* Turbin pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin pada $\alpha=1$ (Mahmoud et al, 2010)

Pada eksperimen ini, nilai *overlap ratio* divariasikan dari nilai 0 sampai 0.35 yang berpengaruh pada nilai daya aktual turbin terhadap kecepatan angin seperti pada gambar 2.26. Dapat dilihat bahwa nilai daya aktual pada turbin tanpa *overlap* lebih tinggi daripada daya turbin dengan menggunakan *overlap*.



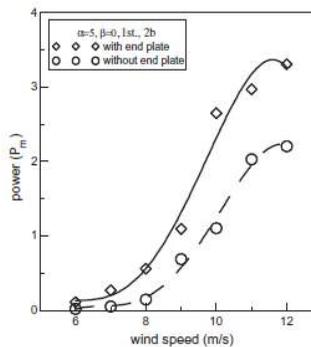
Gambar 2.27 Pengaruh Overlap Ratio pada Daya Aktual Turbin fungsi Kecepatan Angin (Mahmoud et al, 2010)

Nilai variasi *aspect ratio* yang digunakan mulai dari 0,5 sampai 5 menunjukkan adanya pengaruh pada nilai *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin. Didapatkan hasil bahwa nilai *Coefficient of Power* semakin naik seiring dengan kenaikan nilai *aspect ratio* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.27.



Gambar 2.28 Pengaruh *Aspect Ratio* pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud et al, 2010)

Hasil eksperimen ini menunjukkan bahwa turbin dengan *end plates* memiliki daya aktual yang lebih tinggi daripada turbin tanpa *end plates*.



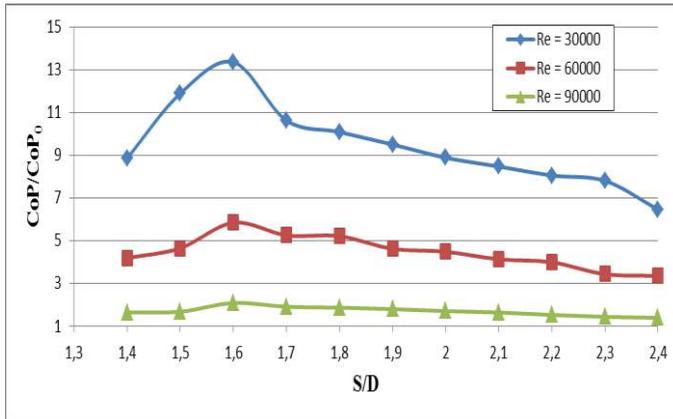
Gambar 2.29 Pengaruh *End Plates* pada Daya Aktual Turbin terhadap Kecepatan Angin (Mahmoud et al, 2010)

Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih efisien daripada dengan tiga atau empat *blade*. Turbin dengan *two stage* memiliki performa yang lebih ti dibanding turbin dengan satu *stage*, karena *specific power* turbin dengan dua *stage* lebih besar daripada turbin dengan satu *stage*. Selain itu, pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio*. *Coefficient of Power* dari turbin akan meningkat seiring dengan kenaikan *aspect ratio* (α). Penggunaan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates*.

2.11.5 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi *Returning blade* Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius

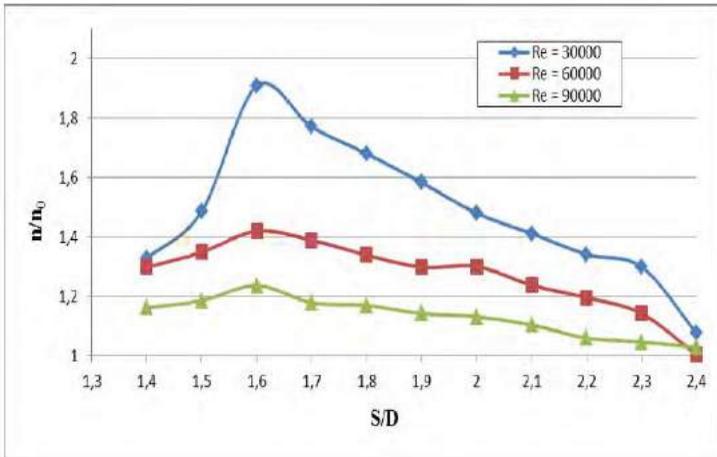
Penelitian ini dilakukan secara eksperimen oleh **Daniel Fernando (2017)** menggunakan *Blower* sebagai penghasil sumber angin. Benda uji berupa Turbin Savonius dua sudu dengan diameter sudu (D) 101,6 mm, tinggi (H) 300 mm, diameter turbin 190,2 mm dan diameter overlap 13 (a) mm . Untuk meningkatkan performa dari turbin, maka ditambahkan sebuah pengganggu berupa silinder sirkular dengan diameter (d) 76,2 mm dan tinggi 500 mm di depan *returning blade* untuk mengurangi gaya hambat yang terjadi. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan variasi jarak S/D antara 1,5 – 2,4 dan menggunakan bilangan *Reynolds* sebesar 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 , nilai bilangan *Reynolds* didapatkan berdasarkan perhitungan kecepatan *free stream* dan panjang karakteristik dari turbin angin ($2D - a$). Untuk pengukuran kecepatan aliran angin digunakan Anemometer, sedangkan pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan alat *Torquemeter*. Putaran turbin dapat diukur menggunakan *tachometer* dan torsi dinamis dapat diukur dengan menggunakan mekanisme *brake dynamometer*. Dari putaran dan

torsi dinamis ini, nantinya akan diperoleh berapa besar daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.



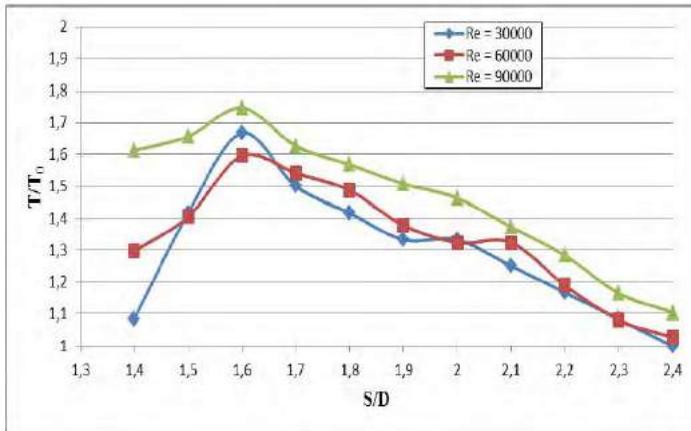
Gambar 2.30 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$

Pada gambar 2.30 menunjukkan grafik perbandingan nilai *performance* turbin angin Savonius dengan pengganggu dibandingkan dengan tanpa menggunakan pengganggu (CoP/CoP_0). Adapun tujuan untuk melakukan perbandingan data ini adalah untuk mengetahui seberapa besar kenaikan performa turbin angin Savonius setelah diberikan pengganggu sesuai dengan data yang telah disebutkan. Pada ketiga nilai bilangan *Reynolds* yang diteliti, nilai CoP/CoP_0 mempunyai nilai diatas satu. Dari hal ini dapat disimpulkan adanya penghalang berupa silinder sirkular pada bagian sudu *returning blade* turbin angin Savonius dengan perbandingan d/D (perbandingan diameter silinder sirkular pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius) sebesar 0,75 terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin tipe Savonius dimana pernyataan ini diperoleh berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan.



Gambar 2.31 Grafik Perbandingan Putaran antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tanpa Silinder Pengganggu (n/n_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$

Gambar 2.31 menunjukkan grafik perbandingan putaran antara turbin angin Savonius dengan pengganggu silinder sirkular dengan diameter (d) = 101,6 mm dan tanpa silinder pengganggu (n/n_0). Pada $Re = 3 \times 10^4$ kenaikan terbesar dari putaran sebesar 1,9 kali terhadap nilai putaran turbin angin Savonius tanpa pengganggu sementara untuk $Re = 6 \times 10^4$ kenaikan maksimal dari putaran sebesar 1,4 kali dan pada $Re = 9 \times 10^4$ kenaikan maksimal dari putaran sebesar 1,23 kali.

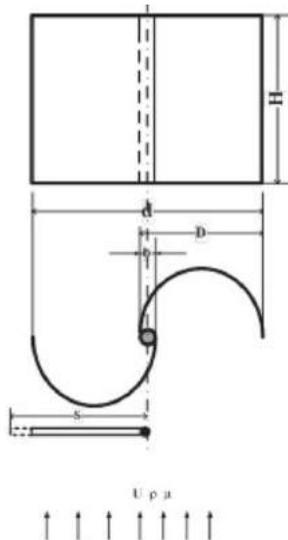


Gambar 2.32 Grafik Perbandingan Torsi Statis antara Turbin Angin Savonius Berpengganggu dan tanpa Silinder Pengganggu (T/T_0) sebagai Fungsi Jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$

Gambar 2.32 menunjukkan grafik perbandingan torsi statis antara turbin angin Savonius dengan pengganggu silinder sirkular dengan diameter (d) = 101,6 mm dan tanpa silinder pengganggu (T/T_0), dimana torsi statis adalah torsi yang diukur ketika turbin angin berada dalam keadaan tidak berputar dan membentuk bukaan sudu pada sudut 0° . Dari gambar 2.32 dapat dilihat bahwa semua nilai T/T_0 adalah diatas 1. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Kenaikan torsi statis pada S/D 1,6, dimana pada S/D ini performa turbin angin Savonius memiliki kinerja yang paling bagus, adalah; pada $Re = 3 \times 10^4$ mengalami kenaikan torsi statis sebesar 1,67 kali terhadap nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa pengganggu sementara pada $Re = 6 \times 10^4$ kenaikan torsi statis sebesar 1,6 kali dan pada $Re = 9 \times 10^4$ kenaikan torsi statis memiliki nilai terbesar yaitu 1,74 kali.

Pada semua bilangan Reynolds yang diteliti dan untuk $S/D = 1,4 - 2,4$; semua nilai menunjukkan bahwa perbandingan putaran memiliki nilai lebih besar dari satu. Hal ini menjelaskan bahwa dengan diletakkannya silinder pengganggu di depan *returning blade*, terbukti efektif meningkatkan performa turbin. Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* terbukti efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditandai dengan putaran dari turbin Savonius memiliki kenaikan maksimal sampai 1,9 kali dari putaran turbin tanpa pengganggu pada $Re = 3 \times 10^4$; torsi statis memiliki kenaikan maksimal sampai 1,74 kali dari torsi statis turbin tanpa pengganggu pada $Re = 9,0 \times 10^4$ dan *Coefficient of Power* memiliki kenaikan maksimal sampai 13,35 pada $Re = 3 \times 10^4$. Selain itu, variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin Savonius. Untuk semua bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan bahwa jarak $S/D = 1,6$ terbukti efektif meningkatkan performa turbin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini. Hal ini ditandai dengan nilai puncak (*peak value*) dari putaran, torsi statis dan *Coefficient of Power* turbin.

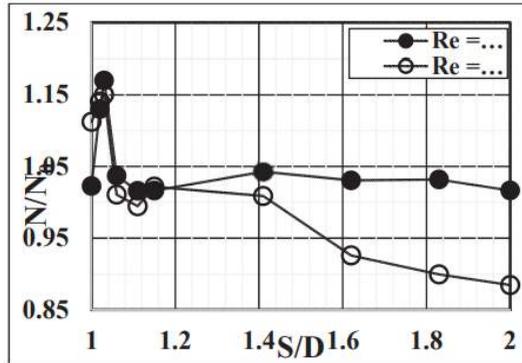
2.11.6 Studi Eksperimen Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada peforma turbin angin Savonius



Gambar 2.33 Skema penempatan turbin angin savonius dan plat pengganggu tunggal didepan returning blade turbin angin savonius. (Aip et al, 2017)

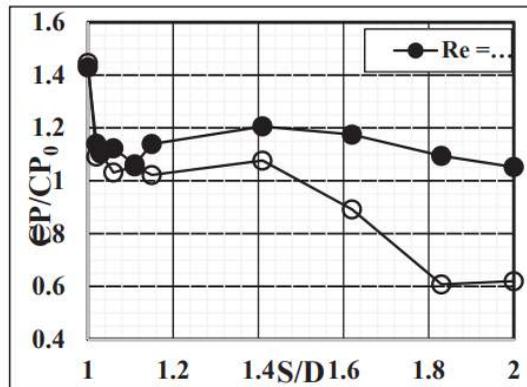
Penelitian ini dilakukan secara eksperimen oleh **Aip et al (2017)** menggunakan *Blower* sebagai penghasil sumber angin. Material yang digunakan untuk turbin adalah PVC dengan diameter 4 inch=102 mm, tinggi $H= 300$ mm, diameter poros sebesar 16 mm. Penghalang yang digunakan mempunyai ketebalan 3 mm dan tinggi 300 mm dengan variasi lebar penghalang sebesar 102 mm, 104 mm, 105 mm, 108 mm, 113 mm, 117 mm,144 mm, 165 mm, 186 mm, dan 203 mm. Variasi S/D adalah 1,0; 1,2; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83; dan 2. Reynolds number yang digunakan 30.00 dan 90.000. pengukuran torsi dinamis menggunakan *brake dynamometer* dengan penambahan massa setiap 50 gram.

Didapatkan hasil perbandingan nilai putaran terhadap S/D dan perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) sebagai berikut:



Gambar 2.34 Grafik perbandingan nilai putaran dengan dan tanpa menggunakan plat datar tunggal (n/n_0) terhadap nilai S/D pada $Re=30.000$ dan 90.000 (Aip et al, 2017)

Pada $Re=30.000$ pada semua variasi lebar plat datar pengganggu tunggal (S) memiliki kenaikan nilai putaran saat diberikan penghalang. Namun pada $Re=90.000$ memiliki kenaikan sampai $S/D=1,41$ dan mengalami penurunan nilai putaran dengan diberikannya penghalang pada $S/D>1,41$. Penurunan paling besar adalah sebesar 0,88 kali pada $S/D=2$.



Gambar 2.35 Grafik perbandingan nilai coefficient of power dengan dan tanpa menggunakan plat datar tunggal (CoP/CoP_0) terhadap nilai S/D pada $Re=30.000$ dan 90.000 (Aip et al, 2017)

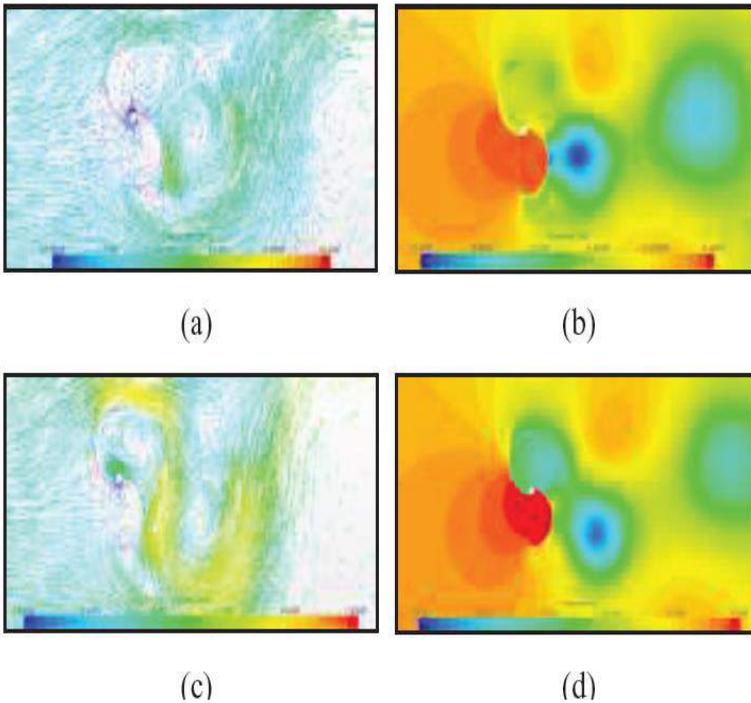
Pada $Re=30.000$ memiliki kenaikan CoP pada semua variasi S/D dengan diberikan plat pengganggu datar tunggal. Namun pada $re=90.000$ dengan diberikan plat pengganggu akan menurunkan nilai CoP pada $S/D > 1,41$.

Hasil yang didapatkan adalah dengan diletakkan plat datar pengganggu tunggal didepan returning blade memiliki pengaruh pada peforma turbin angin Savonius yang akan meningkatkan peformanya. Pada $S/D > 1,41$ pada $Re = 90.000$ CoP dengan menggunakan plat pengganggu lebih rendah dari pada tanpa pengganggu. Penurunan sebesar 60,7 % terjadi pada $S/D=1,82$ pada $Re = 90.000$.

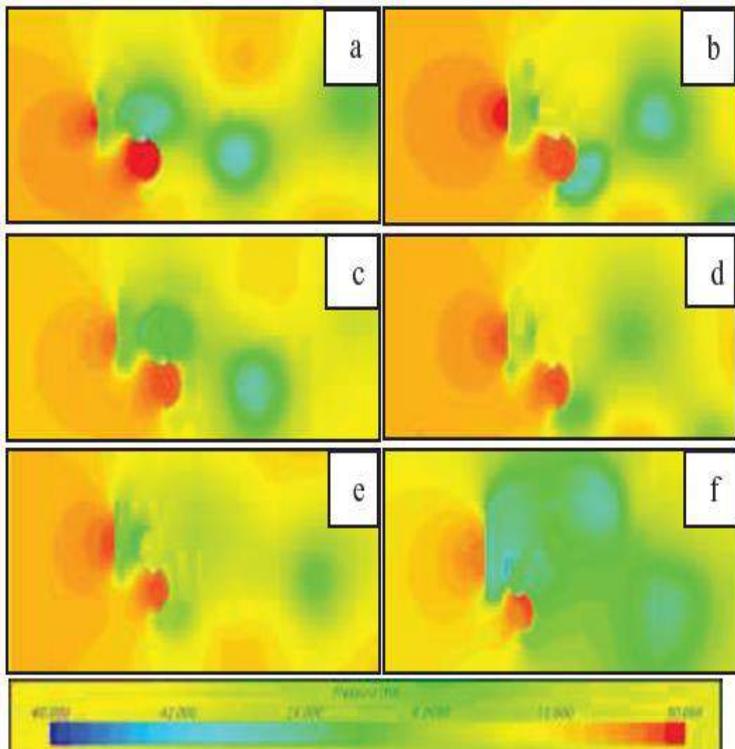
2.11.7 Studi Numerik Pengaruh lebar plat pengganggu tunggal pada peforma turbin angin Savonius

Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan software STAR CCM++ oleh Aip et al (2017). Tinggi turbin $H= 300$ mm, diameter poros sebesar 16 mm. Penghalang yang digunakan mempunyai ketebalan 3 mm dan

tinggi 300 mm dengan variasi lebar penghalang sebesar 102 mm, 104 mm, 105 mm, 108 mm, 113 mm, 117 mm, 144 mm, 165 mm, 186 mm, dan 203 mm. Variasi S/D adalah 1,0; 1,2; 1,03; 1,06; 1,11; 1,15; 1,41; 1,62; 1,83; dan 2. Reynolds number yang digunakan 30.000 yaitu pada kecepatan 2,48 m/s dan 90.000 yaitu pada kecepatan 7,45 m/s.



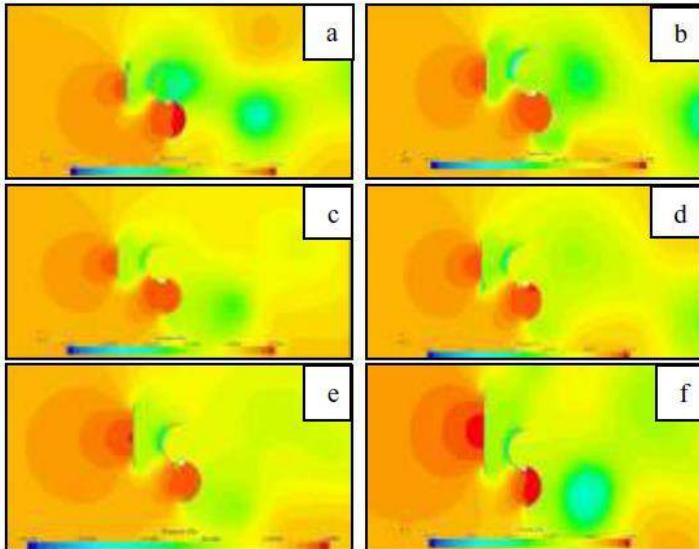
Gambar 2.36 Aliran mengenai turbin angin savonius untuk $Re=30.000$ tanpa penghalang (a) vektor kecepatan (b) kontur tekanan, untuk $Re=90.000$ (c) vektor kecepatan (d) kontur tekanan (Aip et al, 2017)



Gambar 2.37 Kontur tekanan pada turbin angin savonius untuk $Re=30.000$ (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1,02$, (c) $S/D = 1,03$, (d) $S/D = 1,15$, (e). 1.41 and (f) $S/D = 2,00$ (Aip et al, 2017)

Gambar 2.37 menunjukkan hasil simulasi untuk aliran disekitar turbin Savonius dengan plat pengganggu bervariasi pada $S/D = 1,00; 1,02, 1,03, 1,15, 1,41$ dan $2,00$, untuk $Re = 30.000$. Seperti yang terlihat pada gambar bahwa karena pemasangan plat pengganggu di depan *returning blade* mengurangi tekanan di bagian belakang pelat plat pengganggu atau di depan area *returning blade*, sementara itu tekanan di belakang *returning blade* relatif tidak berubah dibandingkan dengan turbin rotor Savonius tanpa plat pengganggu. Hal ini menyebabkan perbedaan

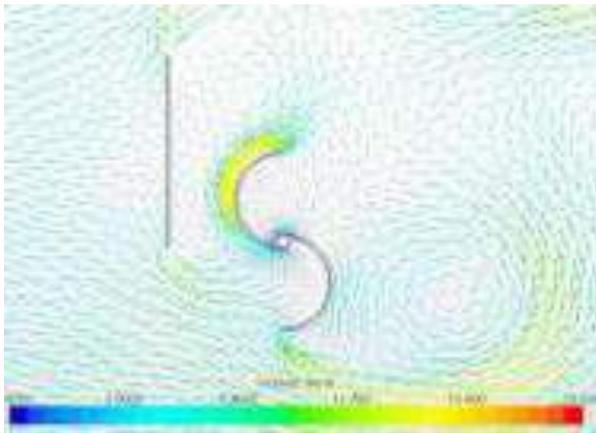
tekanan pada *returning blade* kembali menurun dan sebagai hasilnya torsi statik positif meningkat. Pemasangan pelat pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius diharapkan untuk meningkatkan kinerja turbin.



Gambar 2.38 Kontur tekanan pada turbin angin savonius untuk $Re=90.000$ (a) $S/D = 1,00$, (b) $S/D = 1.02$, (c) $S/D = 1.03$, (d) $S/D = 1.15$, (e). 1.41 and (f) $S/D = 2.00$ (Aip et al, 2017)

Untuk $SD = 2$, plat datar pengganggu tunggal yang dipasang di depan *returning blade* diprediksi akan menurunkan kinerja turbin. Hal ini tampaknya karena daerah dengan tekanan lebih rendah di depan *returning blade* kembali lebih besar daripada $S/D < 2$, hal ini menyebabkan aliran cenderung lewat di wilayah ini daripada mendorong *returning blade* maju untuk menghasilkan torsi positif pada *returning blade*. Sebagai hasilnya, diperoleh penurunan kinerja turbin. Hal ini jelas ditunjukkan oleh vektor kecepatan di sekitar turbin dengan plat pengganggu

(gambar 2.39), jika dibandingkan dengan vektor kecepatan di sekitar turbin tanpa plat pengganggu (gambar 2.38 c). Jadi, Ukuran plat pengganggu tunggal yang dipasang di depan plat pengganggu *returning blade* turbin angin Savonius memainkan peran penting dalam kinerja rotor turbin. Secara umum, pemasangan plat pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius lebih efektif untuk meningkatkan kinerja turbin. Tetapi hal ini tergantung pada lebar plat pengganggu dan jumlah Reynolds (Re). Untuk lebar plat pengganggu besar ($S/D = 2$) pada $Re = 90.000$, kinerja turbin Savonius menjadi lebih rendah daripada ketika turbin tanpa plat pengganggu. Ini diperlukan pembenaran, baik melalui simulasi dengan rotor turbin dalam keadaan berputar, atau studi eksperimental.



Gambar 2.39 Vektor kecepatan di sekitar turbin Savonius dengan plat pengganggu $S / D = 2,0$ untuk $Re = 90.000$. (Aip et al, 2017)

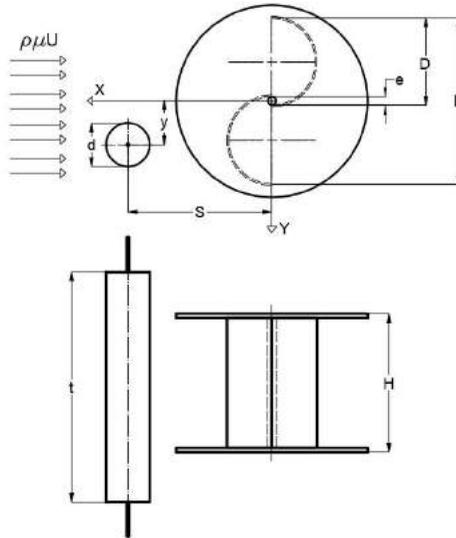
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter Yang Diukur

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui pengaruh parameter parameter tertentu terhadap hasil penelitian. Parameter-parameter yang terdapat dalam penelitian ini antara lain, kecepatan fluida (U), densitas fluida (ρ), diameter turbin Savonius (D), viskositas fluida (μ), diameter silinder sirkular penghalang (d), diameter poros (b), jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius (y), kecepatan putaran sudu turbin angin Savonius (ω), jarak antara proyeksi titik pusat turbin Savonius sejajar terhadap proyeksi titik pusat silinder penghalang, dan jarak titik pusat silinder penghalang terhadap sisi tengah *returning blade* turbin Savonius (S). Parameter-parameter pengujian dan skema penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Penelitian turbin angin Savonius tampak atas

Berdasarkan skema penelitian gambar 3.1, diperkirakan nilai *Coefficient of Power* akan bergantung pada:

- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- d : diameter karakteristik turbin angin Savonius (m)
- b : diameter poros (m)
- y : jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius
- S : jarak titik pusat silinder penghalang terhadap sisi tengah *returning blade* turbin Savonius (M)
- ω : putaran sudu turbin angin Savonius (rad/s)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin

Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$	L
---------	---------------------	-----------------	-----------------	---------------	---	---	---	---	---------------	---

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ, U, D .

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 10-3 = 7 grup tanpa dimensi.

$$i. \quad \pi_1 = \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M \quad : a + 1 = 0$$

$$L \quad : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t \quad : -b - 3 = 0$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

- ii. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{\omega D}{U}$$

$$\pi_7 = \frac{y}{D}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 : *Coefficient of Power*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : ratio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

π_4 : ratio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

π_5 : ratio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 : *Tip Speed Ratio*

π_7 : ratio jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{y}{D}\right)$$

Pada penelitian ini didapatkan variable $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}$, sebagai variabel tetap, sedangkan variabel $\frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{\mu}{\rho U D}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga :

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

Atau

$$C_{op} = f_3 \left(\frac{y}{D}, TSR, Re \right)$$

3.2.2 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Metodologi penentuan analisa dimensi yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

$$Moment = f(\rho, \mu, V, D, d, S, b, \omega, y)$$

Jumlah parameter (n) = 11 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

M = *Moment* (J)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

μ = Viskositas udara (Ns/m^2)

U = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

S = Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*

b = Diameter poros (m)

ω = Putaran sudu turbin angin Savonius (rad/s)

y = Jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.
Dipilih M, L, t .

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Tabel 3.2 Dimensi Primer Parameter Cm

Parameter	M	ρ	μ	U	D	d	S	b	ω	y
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$	L

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ, U, D .

Jumlah parameter berulang (m) = $r = 3$.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $n - m = 10 - 3 = 7$ grup tanpa dimensi.

$$\text{iii. } \pi_1 = \rho^a U^b D^c M = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^2}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 2 = -2$$

diperoleh :

$$a = -1 ; b = -2 ; c = -3$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-2} D^{-3} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^2 D^3}$$

- iv. Dengan cara yang sama diperoleh:

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_6 = \frac{\omega D}{U}$$

$$\pi_7 = \frac{y}{D}$$

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 : *Coefficient of Moment*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : ratio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

π_4 : ratio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

π_5 : ratio diameter *overlap* dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 : *Tip Speed Ratio*

π_7 : ratio jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius.

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{e}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{y}{D}\right)$$

Pada penelitian ini didapatkan variable $\frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}$ sebagai variabel tetap, sedangkan variabel $\frac{y}{D}$,

$\frac{\omega D}{U}, \frac{\mu}{\rho U D}$ divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Moment* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{M}{\rho U^2 D^3} = f_4 \left(\frac{y}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{\mu}{\rho U D} \right)$$

Atau

$$C_{op} = f_5 \left(\frac{y}{D}, TSR, Re \right)$$

3.3 Peralatan

Penelitian yang akan dilakukan membutuhkan beberapa peralatan penunjang untuk mendapatkan hasil penelitian yang baik. Untuk itu beberapa peralatan yang akan menunjang pengambilan data eksperimen adalah :

3.3.1 Axial Fan

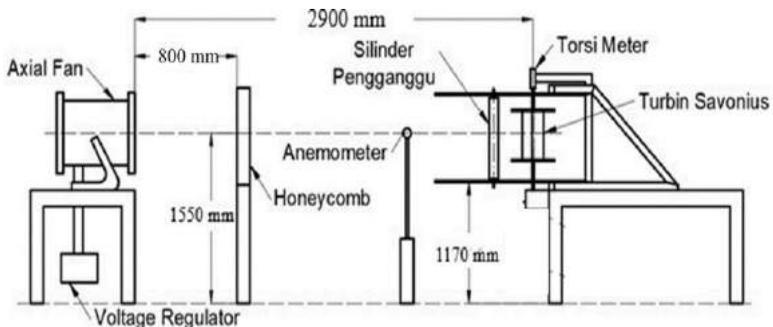
Alat yang digunakan untuk menciptakan aliran angin pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *Axial fan*. Kecepatan angin yang dihasilkan akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin Savonius. *Axial fan* yang digunakan adalah **CKE SPV-18**. Untuk spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.2



Gambar 3.2 *Axial fan* CKE SPV-18.

Tabel 3.3 Spesifikasi *Axial fan* CKE AFD-560

SPECIFICATIONS	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 RPM
Air Flow	4413 CFM
Power	1700 Watt
Static Press	520 Pa
Phase	1
Voltage	220 – 240 V

**Gambar 3.3** Skema Susunan Peralatan beserta alat uji

3.3.2 Benda Uji

Pada penelitian ini, sebagai benda kerja digunakan turbin angin tipe Savonius dengan penghalang berupa plat.

a. Profil turbin angin tipe Savonius sebagai berikut :

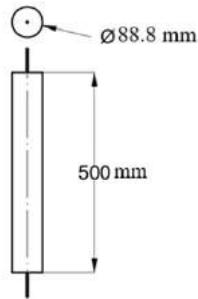
- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tinggi (H) : 294,4 mm
- Diameter turbin ($L = 2D - 2o - b$) : 303,4 mm
- Diameter poros (b) : 19 mm
- Diameter *end plate* (D_0) : 321 mm
- Bahan *endplate* : Aluminium cladding 2024
- Bahan *blade* : PVC

- Massa turbin : 1,56 kg (tanpa poros dan endplate)
- Tebal PVC (o) : 2 mm



Gambar 3.4 Turbin Angin Savonius

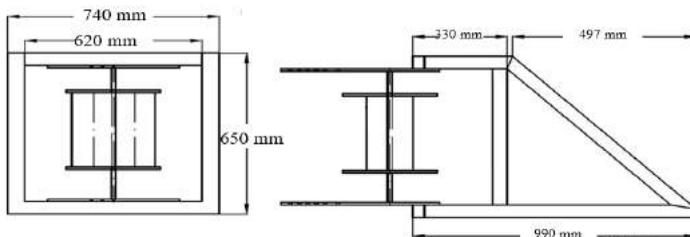
- b. Profil Penghalang Silinder Sirkular sebagai berikut
- Diameter silinder sirkular : 88.8 mm
 - Tinggi penghalang silinder sirkular (t) : 500 mm
 - Rasio jarak antara puncak *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu dan diameter sudu turbin Savonius (S/D) : 1,6
 - Jarak antara puncak *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu (S) : 264,32 mm
 - Variasi rasio posisi silinder penghalang yang tegak lurus arah datangnya aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius (y/D) : 0,0; 0,25; 0,5.
 - Rasio diameter silinder penghalang dan diameter tubin angin Savonius (d/D) : 0,5



Gambar 3.5 Silinder sirkular sebagai penghalang

3.3.3 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian digunakan sebuah penyangga yang digunakan sebagai tempat peletakkan turbin angin Savonius dan juga plat penghalang. Berikut skema dari penyangga turbin angin Savonius sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.6 a dan b.



(a)

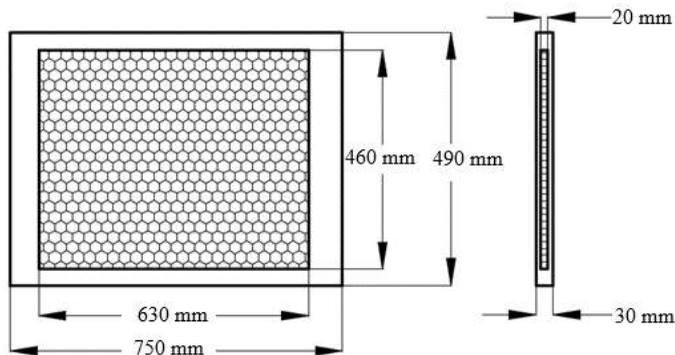
(b)

Gambar 3.6 Skema Susunan Penyangga dan turbin Angin Savonius (a)tampak depan, (b) tampak samping

3.3.4 Honeycomb

Penelitian menggunakan *Honeycomb* yang berguna untuk membuat aliran angin dari *Axial fan* menuju benda uji menjadi *uniform*. Ukuran *Honeycomb* didasarkan oleh penelitian yang

dilakukan **Bradshaw et al (1979)**. Berikut skema dari *Honeycomb* beserta *cover* dengan ukuran *meshing* dari *honeycomb* sebesar 9 lubang/cm².



Gambar 3.7 *Honeycomb*

Spesifikasi *honeycomb* yang digunakan adalah sebagai berikut :

Panjang sisi <i>frame</i>	: 750 mm
Panjang sisi <i>honeycomb</i>	: 630 mm
Tinggi <i>honeycomb</i>	: 460 mm
Tinggi <i>frame</i>	: 490 mm
Tebal <i>frame</i>	: 30 mm
Tebal <i>honeycomb</i>	: 20 mm
<i>Meshing size</i>	: 16 lubang/inch ²

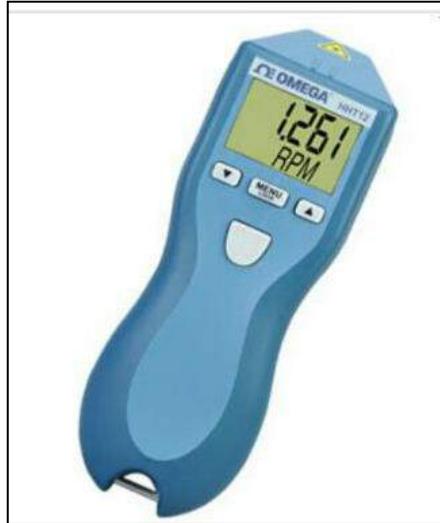
3.3.5 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (N.m) yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

a. Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan pada penelitian ini menggunakan tipe *Economical Non-Contact Pocket*

Optical Tachometer OMEGA seri HHT12 dengan spesifikasi pada tabel 3.2



Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3.4 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01 % of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 "AA" 1,5 V dc batteries
Environmental	5 to 40° C

b. Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin (*airflow velocity*). Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini memiliki tipe **Omega HHF141 Digital Anemometer** yang bisa dilihat pada gambar 3.10. Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, meter/s dan km/h. Selain itu alat ini dapat mengukur suhu udara dalam satuan °F dan °C.



Gambar 3.9 Anemometer

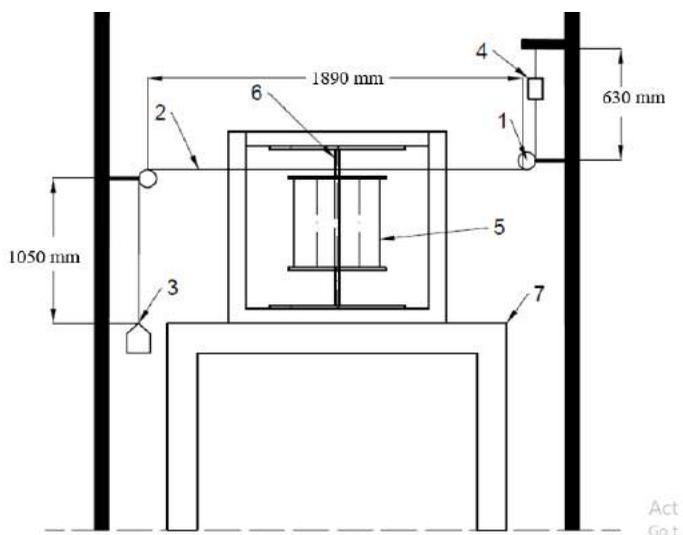
Tabel 3.5 Spesifikasi OMEGA HHF141 Digital Anemometer

SPECIFICATIONS	
Accuracy	AP275: +/- 1.0% of reading +/- 1 digit AP100: +/- 0.5% of F.S. +0.75% of reading + 1 digit

Resolutions	0.01 m/sec
Display	0.5 inch LCD, 4 digits
Air Flow	
Range	Resolution
AP100	1,5 to 35,00 m/sec
2,75 inch	0,2 to 40,00 m/sec
Temperature	
Operating Type	Temperature
Instrument	0 to 50°C
Probes	-20 to 100°C

c. Brake dynamometer

Brake dynamometer merupakan alat ukur manual yang berfungsi untuk mengukur torsi dinamis. Nilai torsi dinamis tidak didapatkan tidak secara langsung namun melalui perhitungan selisih massa pemberat dan nilai yang dibaca oleh neraca pegas. Berikut adalah gambar *free body diagram* dari *brakedynamometer*.



Gambar 3.10 Susunan *brake dynamometer*

Keterangan

1. Pulley
2. Benang
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Disk
7. Meja penyangga

d. *Torque Meter*

Torque meter ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. *Torque meter* yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.



Gambar 3.11 Torque meter LUTRON model TQ-8800

Tabel 3.6 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800

Display Unit/ Resolution				
Unit	Max. range	High resolution	Low resolution	Over load protection range
kg-cm	15 kg-cm	0,01 kg-cm	0,1 kg-cm	22,5 kgf-cm max
Lb-inch	12,99 Lb-inch	0,01 Lb-inch	0,1 Lb-inch	19,53 Lbf-inch max
N-cm	147,1 N-cm	0,1 N-cm	1 N-cm	220,1 N-cm max

e. Pelumas

Pelumas digunakan untuk mengurangi efek gesekan pada *Bearing* turbin angin Savonius maka digunakan pelumas serbagunq. Spesifikasi WD-40 *Multi-Use Product* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Spesifikasi Pelumas WD-40 *Multi-Use Product*

	SPECIFICATIONS
Code	M6271
Name	WD-40 <i>Multi-Use Product</i>
Type	<i>Lubricant</i> 191 ML/155 G/6.5 FL. OZ.
Weight	0.3 Kg

f. *Multimeter*

Multimeter adalah alat untuk mengukur besarnya voltase yang digunakan untuk menggerakkan *axial fan*. Multimeter yang digunakan adalah **CODY DT-9205A *Digital Multimeter***.

**Gambar 3.12** CODY DT-9205A *Digital Multimeter*

Spesifikasi CODY DT-9205A *Digital Multimeter* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.8 berikut ini.

Tabel 3.8 Spesifikasi CODY DT-9205A *Digital Multimeter*

SPECIFICATIONS	
Measurement Type	ACV
Range	200 mV – 750 V
Best Accuracy	$\pm (0,8\% + 2)$
Resolution	0,01 mV
Input Impedance	10 M Ω
Frequency Range	40 – 400 Hz
Size	191 L x 89 mm W x 35 mm H

g. *Voltage Regulator*

Pada penelitian ini menggunakan *voltage regulator* untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan saat penelitian. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah ***Voltage Regulator Model TDGC 2J-3***.

**Gambar 3.13** *Voltage Regulator*

Spesifikasi *voltage regulator* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.9 berikut.

Tabel 3.9 Spesifikasi *Voltage Regulator Model TDGC 2J-3*

SPECIFICATIONS	
Model	TDGC 2J-3
Input	110/220 V
Output	0 – 250 V
Frequency	50 – 60 Hz
I Max	4,8/12 A
Cap.	2 KVA

h. Neraca pegas

Neraca pegas digunakan untuk mengukur nilai S (gram) yang digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake dynamometer*.



Gambar 3.14 Neraca pegas

Tabel 3.10 Spesifikasi neraca pegas

Merk	Nagata
Kapasitas maksimal	10 kg
Ketelitian	50 gram

i. Benang

Benang berfungsi untuk menghubungkan massa pemberat dengan neraca pegas setelah dililitkan di disk poros turbin. Berikut adalah spesifikasi benang nylon yang digunakan



Gambar 3.15 Benang

Tabel 3.11 Spesifikasi Benang

Merk	Optimum lazer
Kapasitas beban maksimal	20 kg
Diameter	0,6 mm

j. *Bearing*

Bearing digunakan sebagai bantalan poros turbin angin Savonius ketika turbin berputar. *Bearing* yang digunakan dalam penelitian ini adalah IBC GERMANY 6201THBP630966P.

Dimensi *Bearing* adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} D_o &= 3,225 \text{ cm} \\ D_i &= 1,2 \text{ cm} \\ \text{Tebal} &= 1 \text{ cm} \end{aligned}$$

k. Massa Pemberat

Pemberat digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dan variasi TSR pada brake dynamometer.



Gambar 3.16 Massa pemberat

3.4 Langkah Pengukuran

Penelitian ini dilakukan dengan prosedur atau urutan yang akan dijelaskan pada sub bab 3.4.1 dan sub bab 3.4.2 yang akan menjelaskan prosedur penelitian melalui diagram alir (*flowchart*). Berikut penjelasannya:

3.4.1 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji (turbin Savonius) pada *test section* didepan *axial fan* seperti pada gambar 3.3 .
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan Termometer
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang diharapkan.
5. Melakukan cek voltase lagi dengan menggunakan *multimeter* untuk memastikan voltase yang diberikan pada *axial fan* sesuai dengan yang dibutuhkan.
6. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan Anemometer sesuai dengan perhitungan Reynolds number yang diinginkan yaitu $9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$ dan

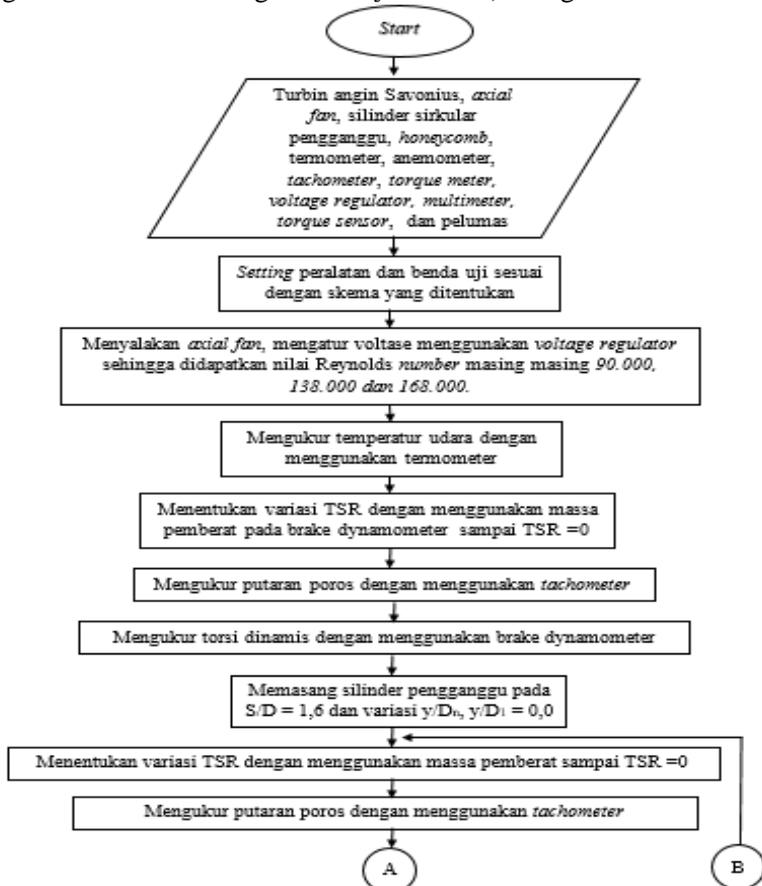
$1,78 \times 10^5$. dengan kecepatan masing masing
5,01m/s,7,5 m/s 9,2 m/s.

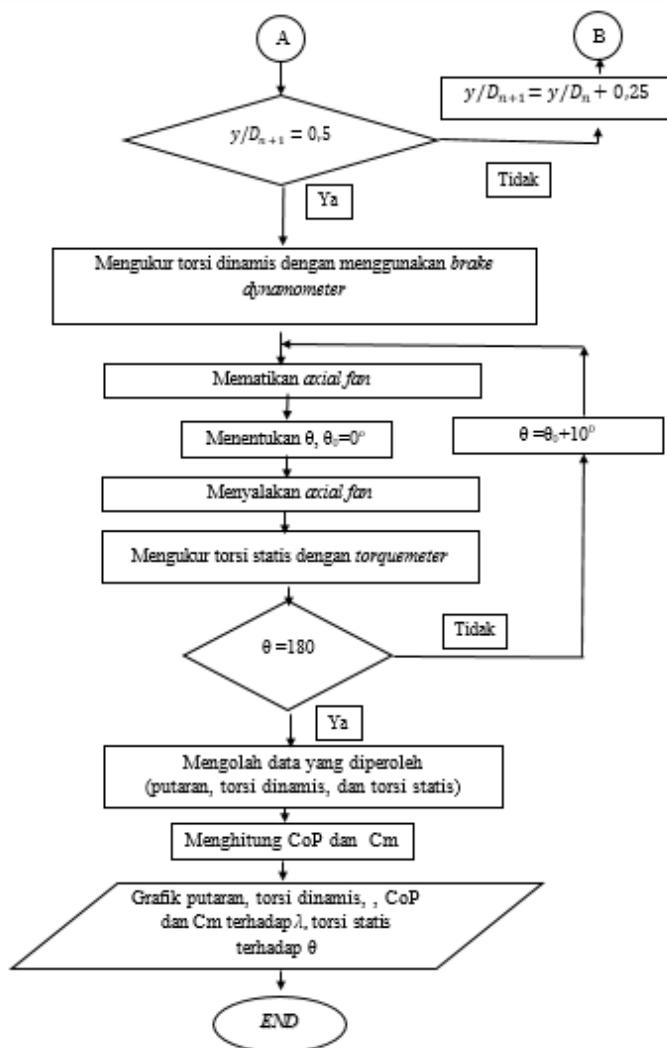
7. Setelah mendapatkan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros turbin angin tanpa beban dengan menggunakan Tachometer untuk mendapatkan *Tip Speed Ratio* maksimum.
8. Mengukur torsi dinamis dengan diberikan massa beban pertama sebesar 15 gram dengan menggunakan *brake dynamometer*.
9. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan menambah variasi massa pemberat sampai mendapatkan nilai *Tip Speed Ratio* sebesar 0
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat silinder dan pusat silinder pengganggu dengan rasio $(S/D) = 1,6$ dengan rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah angin terhadap sudu turbin angin Savonius $(y/D)=0$.
11. Mengulangi langkah 3 sampai 9 dengan variasi y/D sebesar 0,25 dan 0,5
12. Mematikan *axial fan*.
13. Menentukan variasi sudut $\theta=0^\circ$ searah dengan datangnya angin.
14. Menyalakan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 13 sampai 16 dengan mengubah variasi $10^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan sudut sebesar 10° .
16. Mematikan *axial fan*.
17. Melakukan pengukuran torsi statis terhadap dengan menggunakan *torquemeter*.
18. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran, torsi statis dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik torsi statis terhadap sudut θ , *Coefficient of Power* (CoP) dan *Coefficient of Moment (Com)* terhadap *Tip Speed Ratio*, dan kecepatan putaran terhadap Reynolds number.

19. Membandingkan hasil data yang diperoleh antara turbin angin Savonius berpenghalang dengan turbin angin Savonius tanpa penghalang.

3.4.2 *Flowchart* Penelitian

Urutan langkah pengambilan data pada penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir (*flowchart*) sebagai berikut:





Gambar 3.17 Flowchart

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian dan Contoh Perhitungan

Data yang didapatkan dari hasil eksperimen menunjukkan pengaruh pemberian penghalang silinder didepan *returning blade* terhadap peforma turbin angin Savonius. Eksperimen dilakukan dengan variasi Reynolds number, posisi y/D , *Tip Speed Ratio* (λ), dan sudut dari posisi *blade* turbin angin Savonius . Data yang diperoleh dari studi eksperimen ini antara lain kecepatan putar turbin (n) nilai torsi statis, torsi dinamis, *Coefficient of Power* (CoP) dan *Coefficient of Moment* (Cm) turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder penghalang.

Beberapa asumsi yang digunakan adalah fluida udara dengan aliran *steady* dan *incompressible* yang memiliki beberapa nilai properties sebagai berikut :

1. Tekanan *absolute* udara dalam keadaan standar *atmosphere* (P_1) = 1,01325 N/m²
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_1) = 288,2 K
3. Temperatur udara ruangan kerja (T_2) = 28 °C = 301 K
4. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_1) = 1,225 kg/m³

4.1.1 Bilangan Reynolds

Untuk mendapatkan nilai bilangan reynold pertama tama dengan mencari nilai Massa Jenis Udara (ρ), Viskositas Udara (μ), Kecepatan (U).

- **Massa Jenis Udara (ρ)**

Dari persamaan umum gas ideal, didapatkan bahwa:

$$P V = m R T \quad (4.1)$$

Dengan nilai m dan R yang dianggap konstan pada udara, maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan

Boyle – Gay Lussac tentang pemuaian gas didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (4.2)$$

Dengan $V = \frac{m}{\rho}$, kemudian substitusikan ke persamaan 4.2 akan didapatkan persamaan :

$$\frac{P_1 m_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2 m_2}{T_2 \rho_2} \quad (4.3)$$

dimana:

P : tekanan udara pada tekanan atmosfer = 1 atm = 101325 Pa

T₁ : temperatur udara pada keadaan 1 (acuan) = 288,2 K

ρ₁ : massa jenis udara pada keadaan 1 (acuan) = 1,225 kg/m³

m₁ : massa udara pada keadaan 1 (acuan)

P₂ : tekanan absolut udara pada keadaan 2 (penelitian)

T₂ : temperatur udara pada keadaan 2 (penelitian) = 28°C = 301 K

ρ₂ : massa jenis udara pada keadaan 2 (penelitian)

m₂ : massa udara pada keadaan 2 (penelitian)

Posisi 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga P₁ = P₂ dan m₁ = m₂. Sehingga akan didapatkan persamaan

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2} \quad (4.4)$$

$$\rho_2 = \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{301 \text{ K}} = 1,1729 \text{ kg/m}^3$$

- **Viskositas Udara (μ)**

Dengan menggunakan persamaan Sutherland, didapatkan viskositas udara sebagai berikut:

$$\mu = \frac{b T^{3/2}}{S+T} \quad (4.5)$$

Untuk udara mempunyai nilai:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{1/2}}$$

$$S = 110,4 K$$

$$T = \text{temperatur saat penelitian} = 301 K$$

Dengan substitusi nilai persamaan 4.4, sehingga didapatkan:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{1/2}} \cdot (301 K)^{3/2}}{(110,4 + 301) K} \\ &= 1,8507 \times 10^{-5} kg/ms \end{aligned}$$

- **Kecepatan (U)**

Persamaan kecepatan adalah sebagai berikut :

$$U = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times L} \quad (4.6)$$

dimana:

$$Re = 9,7 \times 10^4$$

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, (diameter turbin)

$$L = 2D - 2o - b = (2 \times 165,4 \text{ mm}) - (2 \times 2 \text{ mm}) - 13 \text{ mm} = 303,4 \text{ mm} = 0,3034 \text{ m}$$

sehingga didapatkan :

$$U = \frac{9,7 \times 10^4 \times 1,8507 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}{1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,3034 \text{ m}} = 5,01 \text{ m/s}$$

Didapatkan data Reynolds number dengan nilai kecepatannya untuk pengujian adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Reynolds number dan Kecepatan

Reynolds number	Kecepatan (m/s)
$9,7 \times 10^4$	5,01
$1,45 \times 10^5$	7,5
$1,78 \times 10^5$	9,2

4.1.2 Perhitungan Tip Speed Ratio (TSR)

Persamaan untuk mendapatkan TSR pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ tanpa penghalang adalah sebagai berikut:

$$TSR = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (4.7)$$

Dimana:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}; n = \text{rpm} \quad (4.8)$$

Pada kecepatan 5,01 m/s, didapatkan data sebagai berikut:

m= 25 gram

n = 265,71 rpm

$$\omega = \frac{2 \pi (266,39)}{60} = 27,88 \text{ rad/s}$$

R = jari-jari sudu turbin angin

$$R = \frac{L}{2} = \frac{(2D - 2t - b)}{2}$$

$$R = \frac{303,4 \text{ mm}}{2} = 151,7 \text{ mm} = 0,1517 \text{ m}$$

$$U = 5,01 \text{ m/s}$$

Sehingga didapatkan nilai TSR:

$$TSR = \frac{27,88 \frac{rad}{s} \times 0,1517 m}{5,01 \frac{m}{s}} = 0,84$$

4.1.3 Perhitungan Besar Nilai Torsi Dinamis

Persamaan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ tanpa penghalang adalah sebagai berikut:

$$T = \{(m - s)g\} \times r \quad (4.9)$$

dimana:

- m : massa beban yang digantungkan pada benang
- s : massa pegas yang terbaca pada neraca massa
- g : gravitasi bumi ($9,81 \text{ m/s}^2$)
- R : jari-jari *silinder yang dihambat* = $0,0095 \text{ m}$

Dengan menggunakan data kecepatan $5,01 \text{ m/s}$ didapatkan nilai

$$m = 15 \text{ gram}$$

$$s = 190$$

$$r = 0,0095 \text{ m}$$

sehingga didapatkan nilai torsi dinamis:

$$T = \left\{ \left(\frac{190 - 15}{1000} \right) \right\} kg \cdot (9,81) \frac{m}{s^2} \cdot 0,0095 \text{ m} = 0,0163 \text{ Nm}$$

4.1.4 Perhitungan Coefficient of Power (CoP)

Persamaan untuk mendapatkan CoP pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{\{(massa \text{ beban} - \text{massa pegas})g\} \times r \times \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \quad (4.10)$$

dimana:

A = Luas sapuan pada turbin yang ditabrak oleh angin

$$A = L.H = 0,3034 \text{ m} \times 0,2944 \text{ m} = 0,089321 \text{ m}^2$$

Dengan menggunakan data pada Reynolds *number* $9,7 \times 10^4$ dengan nilai sebagai berikut :

$$m = 10 \text{ gram}$$

$$s = 190$$

$$r = 0,0095 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai CoP:

$$CoP = \frac{\left\{ \frac{190-10}{1000} \right\} kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,00925 m \cdot 27,88 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,1729 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,089321 \text{ m}^2 \cdot (7,5 \frac{m}{s})} = 0,0914$$

4.1.5 Perhitungan *Coefficient of Moment* (Cm)

Perhitungan *Coefficient of Moment* (Cm) dengan menggunakan persamaan 2.24 yaitu sebagai berikut :

$$C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R} \quad (4.11)$$

Dengan menggunakan data pada Reynolds *number* $9,7 \times 10^4$ dengan nilai sebagai berikut :

$$m = 15 \text{ gram}$$

$$s = 190$$

$$r = 0,0095 \text{ m}$$

A = Luas sapuan pada turbin yang ditabrak oleh angin

$$A = L.H = 0,3034 \text{ m} \times 0,294,4 \text{ m} = 0,089321 \text{ m}^2$$

$$T = 0,0163 \text{ Nm}$$

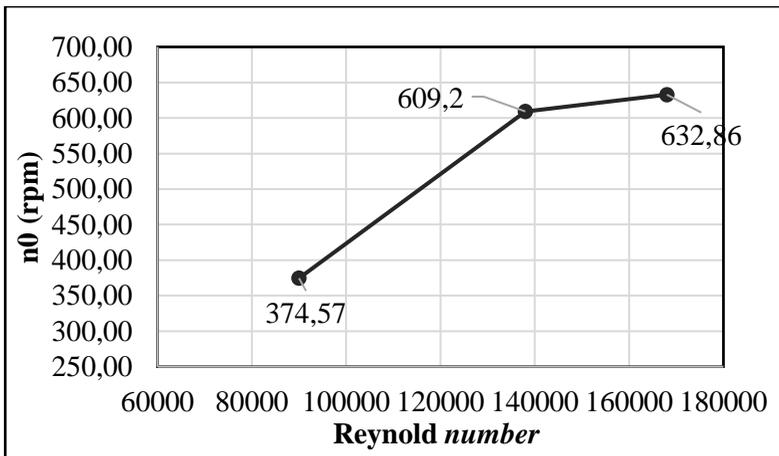
$$C_m = \frac{2 \cdot (0,0163 \text{ Nm})}{(1,1729 \text{ kg/m}^3) \cdot 0,089321 \text{ m}^2 \cdot (5,01 \text{ m/s})^2 \cdot 0,0095 \text{ m}} = 0,0815$$

4.2 Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pengujian performa turbin angin Savonius dilakukan tanpa menggunakan silinder penghalang didepan *returning blade*. Adapun variasi yang digunakan adalah variasi Reynolds number dan Tip Speed Ratio (TSR) untuk mengetahui nilai putaran dari turbin (n_0), torsi statis (T_{s0}), *Coefficient of Moment* (C_{m0}) dan *Coefficient of Power* (CoP_0) dari turbin angin Savonius .

4.2.1 Putaran Turbin Angin Savonius tanpa penghalang (n_0) sebagai Fungsi Reynolds number (Re)

Pengujian dilakukan saat turbin berputar dengan pemberian massa pemberat sebesar 0 gram pada *brakedynamometer* tanpa menggunakan silinder penghalang pada Reynolds number sebesar $9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$, $1,78 \times 10^5$. Pembacaan dilakukan dengan menggunakan *Tachometer digital* untuk mendapatkan nilai putaran turbin angin Savonius, data hasil percobaan ditunjukkan pada gambar 4.1.



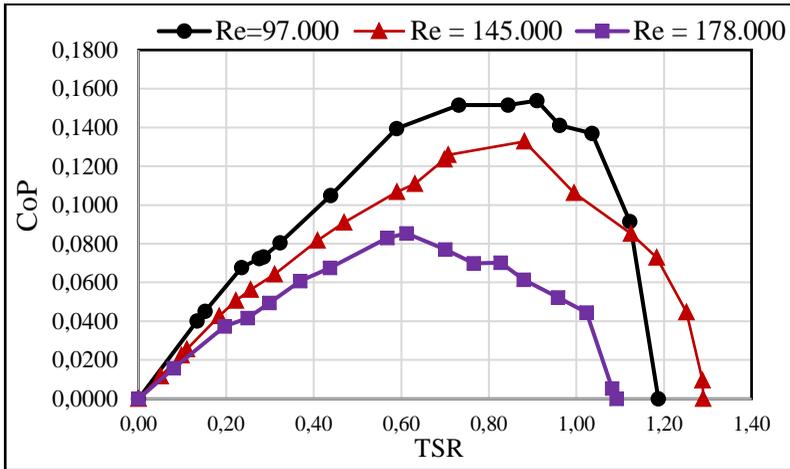
Gambar 4. 1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius tanpa penghalang (n_0) terhadap nilai Reynolds number

Gambar 4.1 Menunjukkan trendline grafik yang terus meningkat seiring bertambahnya nilai Reynolds number. Nilai putaran turbin terendah dimiliki turbin angin Savonius dengan Reynolds number sebesar $9,7 \times 10^4$ dengan $n_0=374,56$ rpm, dan putaran tertinggi dimiliki turbin angin Savonius pada Reynolds number sebesar $1,78 \times 10^5$ dengan $n_0=609,2$ rpm. Dari grafik diatas, dapat diketahui bahwa turbin angin Savonius tanpa penghalang mempunyai kecepatan putar yang meningkat seiring bertambahnya Reynolds number. Reynolds number mempunyai perbandingan lurus terhadap kecepatan angin, dengan rumus $(Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot (2D-b)}{\mu})$ semakin besar Reynolds number, maka kecepatan fluida udara yang menabrak sudu turbin semakin tinggi dan jumlah fluida udara yang memutar blade turbin angin Savonius semakin banyak menyebabkan turbin angin Savonius berputar lebih cepat. Kecepatan aliran fluida berpengaruh pada gaya drag yang diterima blade turbin angin Savonius. Semakin tinggi nilai kecepatan maka semakin besar pula gaya drag yang diterima oleh sudu sudu turbin angin Savonius. Dimana nilai Coefficient of drag dari advancing blade yang lebih besar daripada returning blade, maka semakin besar kecepatan angin yang diberikan akan semakin besar pula selisih gaya drag pada sudu-sudu turbin angin Savonius sehingga turbin dapat berputar lebih cepat.

4.2.2 Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang Sebagai Fungsi Tip Speed Ratio (TSR)

Coefficient of Power (CoP) turbin angin Savonius didapatkan dari rumus $(\frac{T_d \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3})$. Daya output yang dihasilkan oleh turbin angin berasal dari perkalian torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Cara mendapatkan nilai torsi dinamis adalah dengan menggunakan Brake Dynamometer dengan

menghitung selisih massa pemberat yang diberikan dan nilai yang terbaca pada neraca pegas dikali percepatan gravitasi dan jari jari disk yang dikenai benang. Penambahan variasi massa dilakukan untuk mendapatkan variasi nilai TSR dari turbin angin Savonius . Berikut adalah grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa penghalang sebagai fungsi TSR pada masing masing pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$; $1,45 \times 10^5$; dan $1,78 \times 10^5$. Data yang didapatkan dari hasil penelitian bisa dilihat di gambar 4.2



Gambar 4.2 Grafik COP turbin Savonius tanpa penghalang fungsi TSR pada masing-masing Reynolds number $9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$, dan $1,78 \times 10^5$.

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan nilai CoP_0 turbin Savonius tanpa penghalang terhadap nilai TSR masing masing pada Reynolds number sebesar $9,7 \times 10^4$; $1,45 \times 10^5$; dan $1,78 \times 10^5$. Trendline grafik tersebut memiliki bentuk parabolik dengan nilai CoP_0 naik sampai TSR tertentu sampai pada CoP_0 maksimumnya kemudian turun sampai TSR maksimum. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder penghalang CoP_0 paling

tinggi adalah pada Reynolds *number* sebesar $9,7 \times 10^4$ yaitu pada $TSR=0,91$ dengan nilai CoP_0 maksimum= $0,1539$. Pada penelitian dengan menggunakan Reynolds *number* sebesar $1,45 \times 10^5$ mempunyai nilai $CoP_{0maksimum}$ sebesar $0,1328$ pada $TSR=0,88$. Pada penelitian dengan menggunakan Reynolds *number* sebesar $1,78 \times 10^5$ didapatkan nilai CoP_0 maksimum sebesar $0,0853$ % pada $TSR=0,61$.

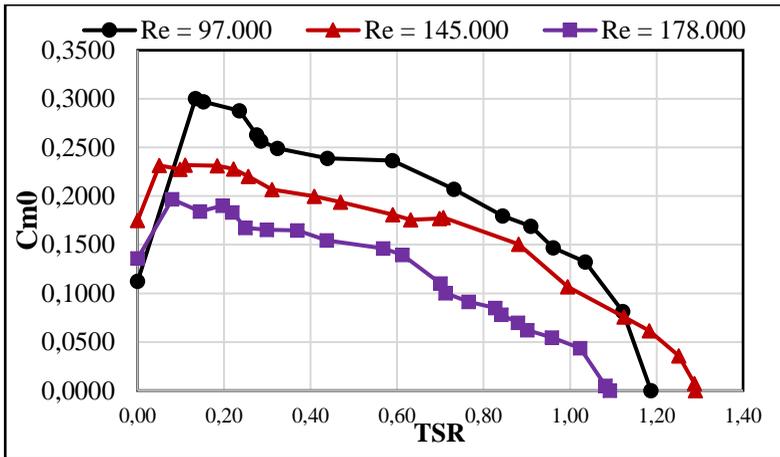
Ketiga nilai CoP_0 masing-masing menunjukkan bahwa performa turbin angin Savonius akan meningkat sampai TSR optimal tertentu dan akan turun setelah melewati TSR optimalnya pada masing masing Reynolds *number*. Pada Turbin angin Savonius tanpa menggunakan silinder penghalang ini bekerja lebih optimal Reynolds *number* sebesar $9,7 \times 10^4$ atau pada kecepatan $5,01$ m/s. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa kemampuan turbin angin Savonius terhadap nilai kecepatan yang tinggi tidak begitu baik karena pada Reynolds *number* $9,7 \times 10^4$ mempunyai nilai CoP_0 yang paling tinggi kemudian menurun pada Reynolds *number* $1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$.

Hal ini dikarenakan nilai CoP_0 Turbin angin Savonius fungsi Reynolds *number* mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP_0 maksimum pada Reynolds *number* tertentu dan akan turun setelah melewati titik maksimumnya. Diduga nilai CoP_0 pada Reynolds *number*= $9,7 \times 10^4$ berada pada posisi setelah melewati nilai CoP_0 maksimumnya sehingga performa akan terus menurun seiring bertambahnya Reynolds *number*. Dan semakin besar nilai Reynolds *number* semakin menurun CoP_0 . Sehingga turbin angin Savonius bekerja kurang efektif pada kecepatan tinggi.

4.2.3 Coefficient of Moment (C_{m0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang Sebagai Fungsi Nilai TSR

Pengujian dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa diberikan penghalang didepan *returning blade* pada Reynolds *number* masing masing $9,7 \times 10^4$; $1,45 \times 10^5$; dan $1,78 \times 10^5$. Cara

mendapatkan variasi TSR adalah dengan menambahkan massa pemberat pada *brakedynamometer*. Selain itu torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih nilai yang terbaca pada neraca pegas dengan massa pemberat yang kemudian dikali dengan gravitasi dan jari jari disk yang dikenai benang. Dengan perhitungan pada persamaan 2.24 yaitu ($C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R}$) maka didapatkan nilai dari *Coefficient of Moment* (C_{m_0}) turbin.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Moment* (C_{m_0}) turbin angin Savonius tanpa penghalang sebagai fungsi TSR

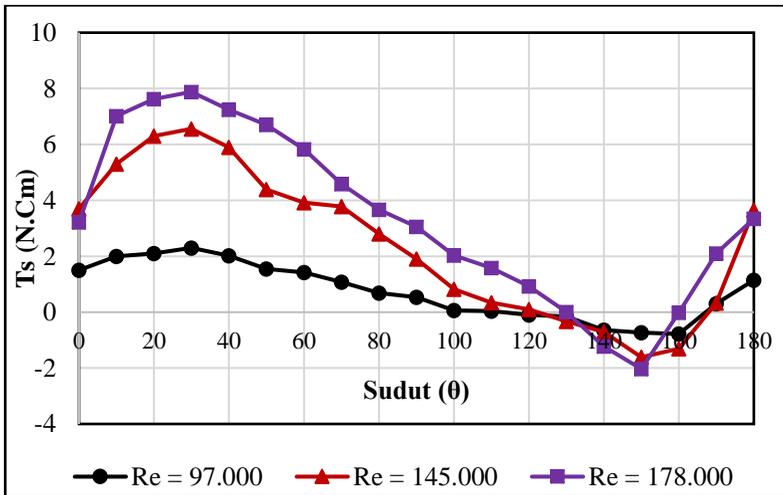
Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan nilai C_{m_0} terhadap nilai Reynolds *number* masing-masing sebesar $9,7 \times 10^4$; $1,45 \times 10^5$; dan $1,78 \times 10^5$ sebagai fungsi TSR. Nilai TSR yang didapatkan bervariasi dari 0 sampai 1,21. Dapat dilihat bahwa trendline dari grafik bahwa nilai C_{m_0} semakin menurun dengan bertambahnya nilai TSR. Grafik dengan Reynolds number $= 9,7 \times 10^4$ mempunyai nilai C_{m_0} paling besar dibandingkan dengan grafik pada nilai Reynolds number $= 1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$. Pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ nilai C_{m_0} maksimum yaitu sebesar 33,2% pada TSR 0,13 dan pada TSR=0 nilai C_{m_0}

adalah sebesar 12,4 %. Pada Reynolds *number* $1,45 \times 10^5$ nilai Cm_0 maksimum berada pada $TSR=0,1$ dengan nilai sebesar 25,6% dan pada $TSR=0$ nilai Cm_0 sebesar 19,3%. Untuk data Cm_0 pada Reynolds *number* $1,78 \times 10^5$, nilai maksimum Cm_0 adalah 21,3% pada $TSR 0,077$ dan $Cm_0=14,72$ % pada $TSR=0$.

Secara garis besar dapat dilihat trendline Cm_0 turun seiring bertambahnya nilai TSR . Hal ini dikarenakan semakin besar nilai TSR semakin kecil massa yang diberikan pada brake dinamometer yang akan berpengaruh pada nilai S yang terbaca pada neraca Pegas. Nilai S akan berpengaruh pada nilai torsi dinamis dari turbin saat berputar pada TSR tersebut. Semakin besar massa pemberat maka semakin besar nilai s pada neraca pegas. torsi dinamis berbanding lurus dengan selisih dari nilai yang terbaca pada neraca pegas dan massa pemberat dengan rumus torsi dinamis adalah $Td = \{(s - m)g\} \times r$. Dimana torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai Cm_0 , semakin kecil massa pemberat maka TSR semakin meningkat. Sehingga hal ini membuat trendline dari grafik Cm_0 ini turun seiring naiknya TSR . Nilai Cm_0 maksimum yang paling tinggi terdapat pada Reynolds *number* $=9,7 \times 10^4$. Nilai Cm_0 terendah adalah pada Reynolds *number* $1,78 \times 10^5$. Nilai Cm_0 akan naik seiring meningkatnya nilai Reynolds *number* sampai nilai maksimumnya dan akan turun setelah melewati nilai maksimum. Nilai Cm_0 terendah terdapat pada kecepatan tinggi dikarenakan setelah melewati nilai maksimumnya pada Reynolds *number* tertentu nilai Cm akan turun seiring bertambahnya Reynolds *number*. Nilai Cm juga berbanding terbalik dengan nilai kecepatan angin pangkat dua sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka semakin rendah pula Cm turbin angin Savonius. Hal ini yang menyebabkan pada kecepatan tinggi atau Reynolds *number* tinggi nilai Cm semakin rendah. Sehingga turbin angin Savonius bekerja lebih efektif pada kecepatan rendah, namun kurang efektif bekerja pada kecepatan sedang dan tinggi pada kondisi ini.

4.2.4 Torsi Statis (T_{s0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang Sebagai Fungsi posisi sudut *blade*.

Torsi statis (T_{s0}) didapatkan dengan menggunakan alat *torquemeter* pada turbin angin Savonius tanpa penghalang didepan *returning blade*. Sudut dari sudu sudu turbin angin Savonius diatur dengan posisi awal 0° sampai 180° dengan kenaikan 10° . Setelah sudut diatur kemudian dialiri angin dan diambil data torsi statis. Data yang didapatkan adalah pada Reynolds number



Gambar 4.4 Grafik Torsi Statis (T_{s0}) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang Sebagai Fungsi posisi sudut *blade*

Gambar 4.4 menunjukkan trendline grafik berbentuk sinusoidal. Sudut 0° pada pengujian yang dilakukan mempunyai posisi *blade* turbin 0° searah terhadap arah datangnya angin. Pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ saat sudut 0° memiliki nilai torsi statis 1,5 N.cm kemudian naik sampai nilai maksimumnya sebesar 2,3 N.cm pada sudut 30° kemudian turun sampai nilai minimumnya - 0,78 N.cm pada posisi sudut 160° kemudian naik lagi sampai

sudut 180° yang mempunyai nilai torsi statis sebesar 1,15. Pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ saat sudut 0° memiliki nilai torsi statis sebesar 3,7 N.cm kemudian naik sampai nilainya maksimum sebesar 6,56 N.cm pada sudut 30° . Kemudian torsi statis nilainya turun sampai nilai minimumnya sebesar -1,61 pada sudut 150° kemudian naik lagi sampai sudut 180° dengan nilai 3,65. Pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$, torsi statis pada sudut 0° sebesar 3,22 N.cm kemudian nilainya naik sampai titik maksimumnya sebesar 7,88 pada sudut 30° . Nilai torsi statis turun sampai nilai minimumnya sebesar -2,03 N.cm pada sudut 150° dan naik lagi sampai sudut 180° dengan nilai sebesar 3,34 N.cm

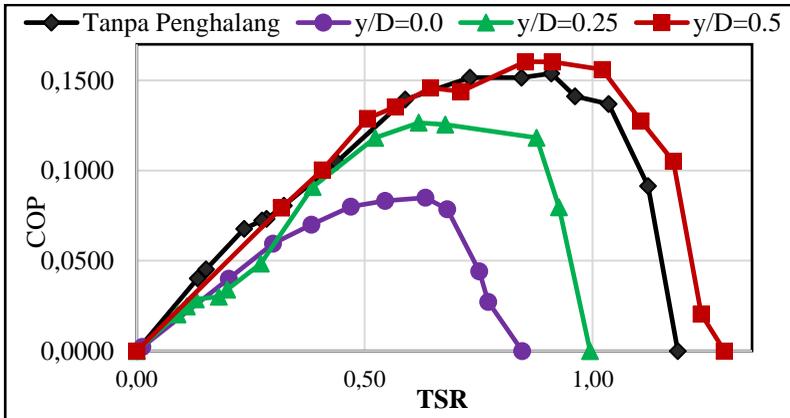
Torsi statis maksimum yang didapatkan dari pengujian adalah pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ karena pada nilai Reynolds number ini memiliki kecepatan yang paling besar yaitu sebesar 9,2 m/s dibandingkan dengan nilai Reynolds number $9,7 \times 10^4$ dan $1,45 \times 10^5$. Semakin tinggi kecepatan angin semakin banyak pula aliran fluida udara yang menabrak sudu sudu turbin sehingga dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk menahan turbin sehingga nilai torsi statisnya pun semakin tinggi.

Didapatkan torsi statis maksimum masing masing nilai Reynolds number adalah pada sudut 30° hal ini menunjukkan bahwa pada sudut ini turbin memiliki nilai self starting yang paling tinggi dibandingkan sudut lainnya karena advancing blade menerima gaya drag lebih besar. Sedangkan torsi minimal berada di posisi sudut 150° dengan nilai torsi statis negatif, artinya pada posisi itu *advancing blade* menerima gaya drag dari angin lebih rendah daripada *returning blade* sehingga harus diberikan gaya luar pada *blade* agar dapat mulai berputar dari keadaan diam dengan kata lain nilai torsi statis yang bernilai negatif tidak mempunyai kemampuan *selfstarting*.

4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

4.3.1 *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$*

Coefficient of Power (CoP) merupakan rasio antara daya mekanik turbin ketika mendapat aliran fluida (P_t) yaitu *power output* turbin dengan daya kinetik dari angin itu sendiri (P_w) yaitu *power input*. Jadi, ada dua faktor utama yang mempengaruhi nilai dari CoP, yaitu daya mekanik dari turbin atau daya keluaran dari turbin yang disebabkan oleh angin, dan daya kinetik dari angin itu sendiri sebagai daya input yang dikenakan ke turbin dengan dimensi tertentu. *Coefficient of Power (CoP)* menentukan performa dari suatu turbin angin Savonius.



Gambar 4.5 Grafik *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$.*

Gambar 4.5 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius masing-masing dengan dan tanpa silinder penghalang pada Reynolds *number* sebesar $9,7 \times 10^4$. Variasi posisi penghalang yang digunakan adalah $y/D=0,0;0,25$ dan $0,5$. Variasi TSR didapatkan dengan variasi massa pemberat hingga didapatkan variasi TSR sebesar 0 sampai 1,167 sesuai data pada grafik. Pengujian ini dilakukan pada Reynolds *number* $=9,7 \times 10^4$ yaitu pada kecepatan 5,01 m/s. Grafik yang dihasilkan pada gambar 4.3 mempunyai trendline nilai CoP berbentuk parabolik yang naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimum.

Pada turbin angin tanpa diberi penghalang didapatkan nilai CoP maksimum yaitu sebesar 0,1539 pada $TSR= 0,91$. Turbin dengan penghalang posisi $y/D= 0,0$ mempunyai nilai CoP maks sebesar 0,0849 pada $TSR= 0,63$. Nilai CoP maksimum pada turbin angin yang diberi silinder penghalang posisi $y/D= 0,25$ adalah sebesar 0,1265 pada $TSR= 0,62$. Nilai CoP maksimum pada turbin angin yang diberi silinder penghalang posisi $y/D= 0,5$ adalah sebesar 0,1604 pada $TSR= 0,85$.

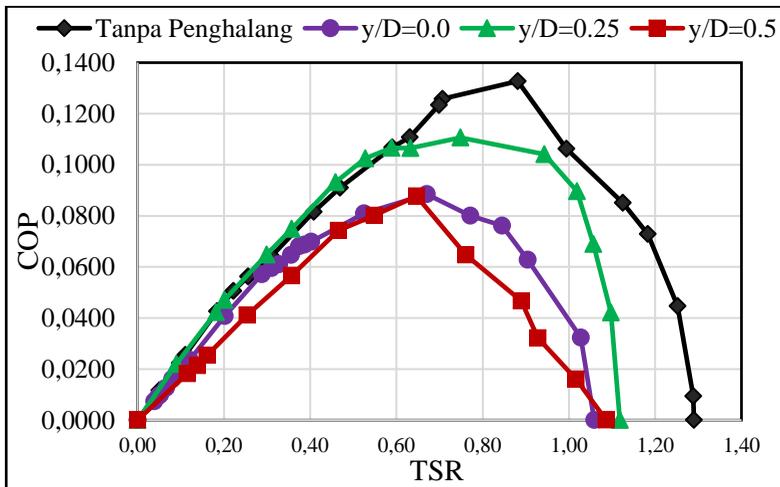
Dari data tersebut, turbin memiliki nilai peningkatan CoP yang paling tinggi pada pemberian silinder penghalang dengan posisi $y/D=0,5$ dibandingkan tanpa menggunakan silinder penghalang saat Reynolds *number* $9,7 \times 10^4$. Silinder yang diletakkan pada posisi $y/D=0,5$ memiliki posisi tepat menghalangi gaya drag pada titik stagnasi dari *returning blade* saat *blade* pada posisi 90° sehingga akan mengurangi gaya drag yang mengenai *returning* tepat pada posisi itu (Tsutsui,2002). selain itu penempatan silinder pengganggu didepan *returning blade* diduga dapat menyebabkan tekanan didepan *returning blade* turun, sedangkan tekanan dibelakang *returning blade* diasumsikan sama seperti tidak menggunakan silinder pengganggu yang akan menyebabkan *pressure drag* yang menyebabkan selisih tekanan didepan dan dibelakang *returning blade* menurun (menurunnya *coefficient of pressure* tekanan pada titik stagnasi karena adanya silinder pengganggu triyogi, 2009). Akibatnya selisih gaya drag

didepan dan dibelakang *returning blade* akan meningkat. Hal ini akan memperbesar nilai torsi dan meningkatkan Coefficient of Power (CoP). Hal ini menyebabkan putaran turbin angin Savonius lebih tinggi karena selisih gaya drag dari kedua sudu semakin besar karena gaya drag *returning blade* bernilai minimum. Hal ini menjadikan gaya drag yang diterima *returning blade* lebih kecil dari pada tanpa diberikan silinder penghalang.

Pada posisi $y/D = 0$ setengah dari sisi silinder berada didepan *advancing blade* sehingga hal ini menyebabkan jumlah angin yang menabrak *advancing blade* terhambat silinder pengganggu yang mengakibatkan gaya drag *advancing blade* berkurang sehingga menyebabkan nilai CoP lebih rendah. Pada silinder pengganggu posisi $y/D = 0,25$ dengan kecepatan angin 5,02 m/s tidak dapat meningkatkan peforma turbin angin Savonius karena wake dari silinder pengganggu yang diharapkan dapat mempercepat daerah transisi dari boundary layer tidak dapat terjadi sehingga hanya akan menghambat aliran angin menuju ke *advancing blade* menyebabkan peforma menurun.

Sehingga dengan menggunakan silinder penghalang pada posisi $y/D = 0,5$ didepan *returning blade* turbin angin Savonius pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ dapat memberikan peningkatan CoP sebesar 1,042 kali. Kenaikan peforma tidak terlalu signifikan dikarenakan silinder pengganggu dengan ratio $d/D = 0,5$ masih relatif terlalu besar untuk dipasang didepan *returning blade* sehingga tidak terlalu efektif dalam menunda titik separasi dan mempercepat turbulensi pada *returning blade* sehingga tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap peningkatan nilai CoP.

4.3.2 *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$*



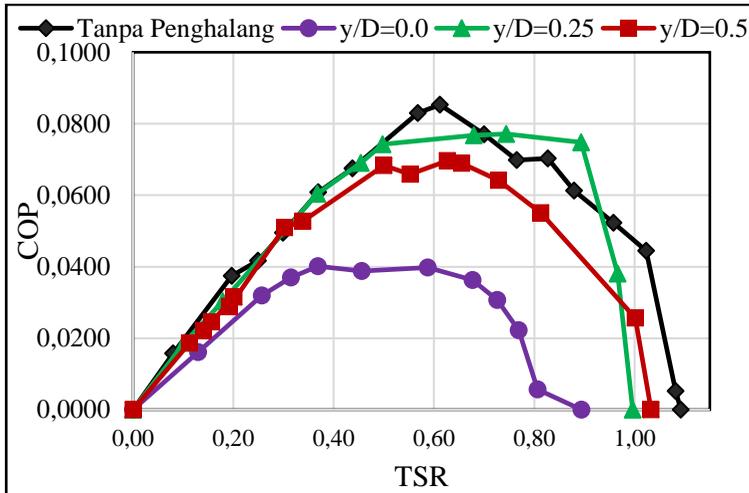
Gambar 4.6 Grafik *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$*

Gambar 4.6 menunjukkan grafik *Coefficient of Power (CoP)* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder penghalang sebagai fungsi TSR. Grafik yang dihasilkan pada gambar 4.6 mempunyai trendline CoP berbentuk parabolik yang naik hingga titik optimal pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik optimalnya. Posisi penghalang divariasikan pada nilai $y/D=0,0;0,25;0,5$ pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ atau pada kecepatan 7,5 m/s. Range TSR didapatkan dari variasi massa pemberat dengan range dari TSR=0 sampai TSR=1,22 seperti yang bisa dilihat pada grafik.

Nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa penghalang pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ adalah sebesar 0,1328 pada $TSR=0,88$. Nilai CoP maksimum pada turbin dengan silinder penghalang posisi $y/D=0,0$ adalah sebesar 0,0885 pada $TSR=0,67$. CoP pada turbin dengan silinder penghalang posisi $y/D=0,25$ adalah sebesar 0,1106 pada $TSR=0,75$. CoP pada turbin dengan silinder penghalang posisi $y/D=0,5$ mempunyai nilai CoP maksimum pada 0,0877 pada $TSR=0,65$.

Peforma turbin angin Savonius pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ dengan diberikannya penghalang tidak terlalu baik. Nilai CoP maksimum turbin angin Savonius dengan menggunakan penghalang lebih rendah dibandingkan CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa menggunakan penghalang pada semua posisi y/D dengan Reynolds number $1,45 \times 10^5$. Hal ini dikarenakan pemberian penghalang pada semua posisi $y/D=0,5$ relatif terlalu besar untuk diletakkan didepan *returning blade* sehingga kurang efektif dalam mempercepat turbulensi dikarenakan shear layer yang mengenai *returning blade* sudah jatuh didaerah yang turbulen bukan di daerah laminer sehingga tidak memberikan peningkatan peforma yang signifikan. Selain itu pemberian penghalang dengan posisi $y/D=0$ dapat menghalangi aliran angin ke *advancing blade* sehingga pemberian penghalang tidak efektif meningkatkan nilai CoP turbin pada kecepatan sebesar 7,5 m/s karena setengah dari sisi silinder berada pada sisi yang mengenai *advancing blade* sehingga hal ini menyebabkan aliran dan jumlah angin yang akan mengenai *advancing blade* terhambat silinder pengganggu yang mengakibatkan gaya drag *advancing blade* berkurang sehingga menyebabkan nilai CoP rendah. Sehingga turbin angin dengan silinder pengganggu didepan *returning blade* tidak bekerja dengan efektif pada kecepatan sedang. Dengan diberikan silinder penghalang maka penurunan CoP yang paling kecil sebesar 0,83 kali pada $y/D=0,25$.

4.3.3 *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Penghangu pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$*



Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi Tip Speed Ratio (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Penghangu pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$.*

Gambar 4.7 menunjukkan grafik *Coefficient of Power (CoP)* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder penghangu sebagai fungsi Nilai TSR. Variasi posisi penghangu yang digunakan adalah $y/D=0,0;0,25;0,5$ pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$. Range TSR didapatkan dengan memvarasikan massa pemberat hingga didapatkan range $TSR=0$ sampai $TSR=1,051$ seperti yang bisa dilihat pada grafik. Pengujian ini dilakukan pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ yaitu pada kecepatan 9,2 m/s. Grafik yang dihasilkan pada gambar 4.7 mempunyai trendline CoP berbentuk parabolik yang naik hingga titik optimal pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik optimalnya.

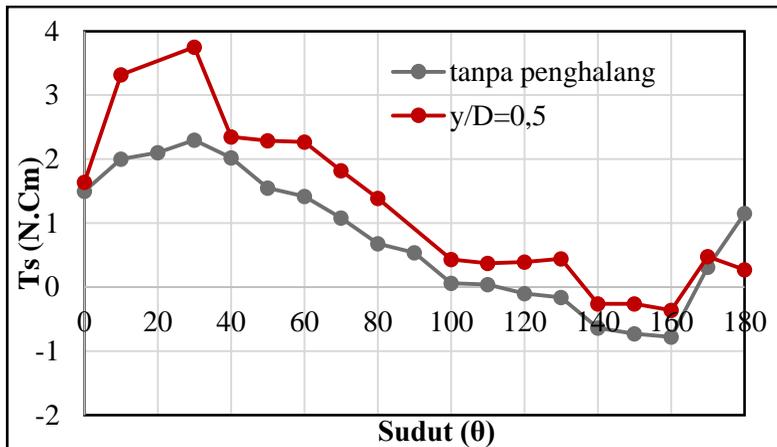
Dari grafik tersebut didapatkan nilai CoP maksimum pada turbin angin tanpa penghalang sebesar 0,0853 pada TSR=0,61. Nilai CoP maksimum pada turbin angin dengan diberikan penghalang posisi $y/D=0,0$ adalah sebesar 0,0401 pada TSR=0,0,37. Nilai CoP maksimum pada turbin angin dengan penghalang posisi $y/D=0,025$ sebesar 0,0771 pada TSR=0,74. Dan yang terakhir Nilai CoP maksimum pada turbin angin dengan penghalang posisi $y/D=0,5$ sebesar 0,0696 pada TSR=0,63 .

Pemberian silinder pengganggu posisi $y/D=0; 0,25; 0,5$ didepan *returning blade* pada Reynolds number sebesar $1,78 \times 10^5$ atau pada kecepatan 9,2 m/s tidak efektif meningkatkan CoP dari turbin angin Savonius. Hal ini dibuktikan dari data yang didapatkan bahwa nilai CoP turbin angin Savonius tanpa diberi penghalang lebih tinggi daripada CoP turbin angin yang diberikan penghalang pada posisi $y/D=0;0,25;0,5$. Pada $y/D =0$ setengah dari sisi silinder berada pada sisi yang mengenai *advancing blade* sehingga hal ini menyebabkan aliran dan jumlah angin yang akan mengenai *advancing blade* terhambat silinder pengganggu yang mengakibatkan gaya drag *advancing blade* berkurang sehingga menyebabkan nilai CoP nya rendah. Pada $y/D=0,25$ dan $0,5$ shear layer yang diharapkan jatuh pada daerah laminar jatuh di daerah sudah turbulen sehingga tidak memberikan pengaruh dalam mempercepat daerah transisi *returning blade* pada silinder pengganggu untuk menunda titik separasi. yang akan menyebabkan performanya lebih rendah. Sehingga turbin angin Savonius tidak bekerja dengan efektif pada kecepatan tinggi. Dengan diberikan silinder penghalang maka penurunan CoP maksimum yang paling kecil sebesar 0,903 pada $y/D=0,25$.

4.3.4 Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$

Pengujian diawali dengan posisi *blade* turbin pada sudut 0° searah arah angin, kemudian *blade* diubah posisi dengan

kenaikan sudut 10° sampai dengan sudut 180° dengan menggunakan alat *torquemeter digital*. Data yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$

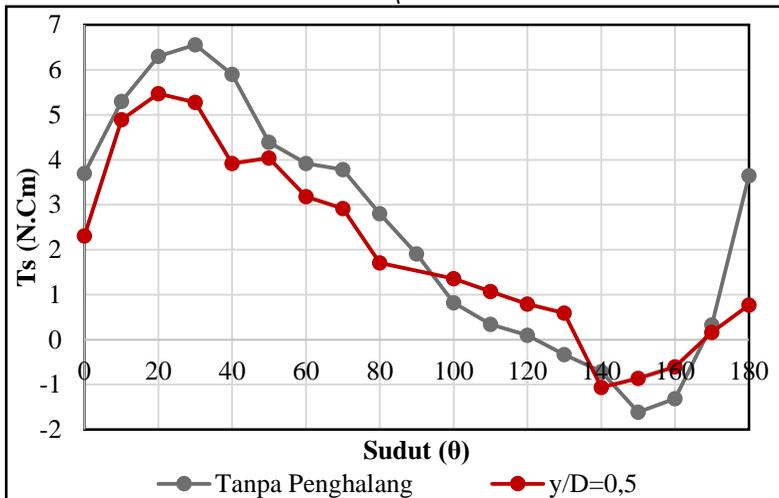
Gambar 4.8 Menunjukkan perbandingan torsi statis tanpa silinder penghalang dan dengan silinder penghalang sebagai fungsi posisi sudut *blade* pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ atau pada kecepatan 5,01 m/s. Posisi silinder penghalang adalah y/D sebesar 0,5 karena pada posisi ini nilai performa turbin dengan menggunakan silinder penghalang memiliki peningkatan performa yang paling besar.

Pada data torsi statis awal dengan menggunakan silinder penghalang mengalami fluktuatif namun secara garis besar kedua grafik tersebut mempunyai trendline dari grafik tersebut adalah sinusoidal dimana akan membentuk grafik seperti grafik sinus. Torsi statis tanpa menggunakan penghalang mempunyai nilai maksimum sebesar 2,3 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimal - 0,78 N.cm pada sudut 160° . Torsi statis dengan menggunakan

silinder penghalang didepan *returning blade* mempunyai nilai maksimum sebesar 3,75 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimal - 0,36 N.cm pada sudut 160° .

Nilai maksimum torsi statis dengan menggunakan silinder penghalang lebih besar daripada tanpa menggunakan penghalang pada kecepatan 5,01 m/s dikarenakan penghalang efektif mengurangi gaya drag pada sisi *returning* dimana menghambat aliran udara pada sisi *returning*. Selain itu penghalang menimbulkan wake yang merubah posisi transisi *returning blade* maju ke depan sehingga turbulensi terjadi lebih cepat pada *returning blade* dan menyebabkan wake dibelakang *returning blade* menyempit. Dengan menyempitnya wake dari *returning blade* maka gaya drag yang diterima *returning blade* semakin kecil. Pemberian silinder penghalang menyebabkan selisih gaya drag semakin besar menyebabkan gaya untuk menahan turbin semakin besar sehingga torsi statis turbin angin yang diberi penghalang menjadi lebih besar. Pada turbin angin yang tidak diberikan penghalang aliran angin langsung mengenai *returning blade* sehingga gaya drag pada *returning blade*nya tidak mengalami penurunan apapun yang menyebabkan selisih gaya drag lebih kecil. Sedangkan torsi minimal berada di posisi sudut 160° bernilai negatif dengan nilai torsi statis turbin menggunakan penghalang lebih besar daripada torsi statis turbin tanpa menggunakan penghalang. Nilai negatif menunjukkan bahwa pada posisi itu *advancing blade* menerima gaya drag dari angin lebih rendah dari pada *returning blade*. Torsi statis yang bernilai negatif tidak mempunyai kemampuan *self starting* atau *zero selfstarting* sehingga untuk dapat berputar dari keadaan diam harus diberikan bantuan gaya dari luar selain dari gaya yang dihasilkan angin. Pemberian silinder penghalang didepan *returning blade* dengan $y/D=0,5$ terbukti efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ dengan kenaikan maksimal sebesar 1,63 kali pada posisi sudut 30° .

4.3.5 Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$

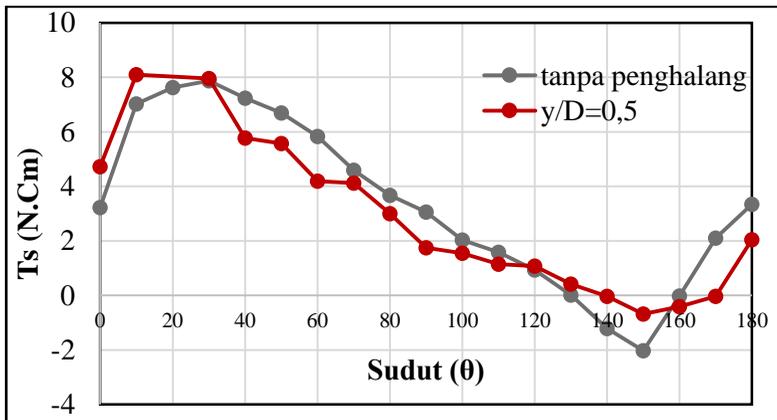
Pada gambar 4.9 menunjukkan grafik mempunyai trendline berbentuk sinusoidal dari posisi sudut 0° sampai 180° dengan kenaikan 10° . Pengujian dilakukan untuk mengetahui perbandingan torsi statis tanpa silinder penghalang dan dengan menggunakan silinder penghalang sebagai fungsi posisi sudut *blade* pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ atau pada kecepatan 7,5 m/s. Posisi silinder penghalang adalah y/D sebesar 0,5.

Nilai torsi statis pada sudut 0° naik hingga nilai maksimumnya pada sudut 30° kemudian turun hingga titik maksimumnya pada masing masing pada sudut 140° dan 150° . Kemudian torsi statis naik lagi sampai 180° Nilai torsi statis tanpa menggunakan penghalang mempunyai nilai maksimum

sebesar 6,56 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimal -1,61 N.cm pada sudut 150°. Torsi statis tanpa menggunakan silinder penghalang didepan *returning blade* mempunyai nilai maksimum sebesar 5,47 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimal -1,06 N.cm pada sudut 140°.

Nilai torsi statis maksimum dengan menggunakan silinder penghalang lebih rendah daripada tanpa menggunakan penghalang pada posisi sudut 30°. Namun torsi statis minimal dengan menggunakan silinder penghalang lebih besar daripada tanpa menggunakan penghalang. Selain itu torsi statis dengan menggunakan penghalang memiliki nilai lebih tinggi daripada torsi statis turbin tanpa penghalang pada sudut 100 ° sampai 130° dan pada sudut 150° sampai 160°. Sehingga pemberian silinder penghalang $y/D=0,5$ pada Reynolds *number* sebesar $1,45 \times 10^5$ hanya meningkatkan nilai torsi statisnya pada beberapa posisi sudut *blade* saja dan tidak meningkatkan nilai torsi statis maksimum dibandingkan tanpa menggunakan penghalang. Hal ini dikarenakan silinder penghalang kurang efektif dalam mengarahkan aliran ke *advancing blade* pada Reynolds *number* $1,45 \times 10^5$.

4.3.6 Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut *Blade* Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$.

Gambar 4.8 Menunjukkan perbandingan torsi statis tanpa silinder penghalang dan dengan silinder penghalang sebagai fungsi penghalang fungsi posisi sudut *blade* pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ atau pada kecepatan 7,5 m/s. Posisi silinder penghalang adalah y/D sebesar 0,5 karena pada posisi ini nilai performa turbin dengan menggunakan silinder penghalang memiliki peningkatan performa sehingga dilakukan pengujian pada posisi ini untuk mengetahui posisi kemampuan self starting turbin.

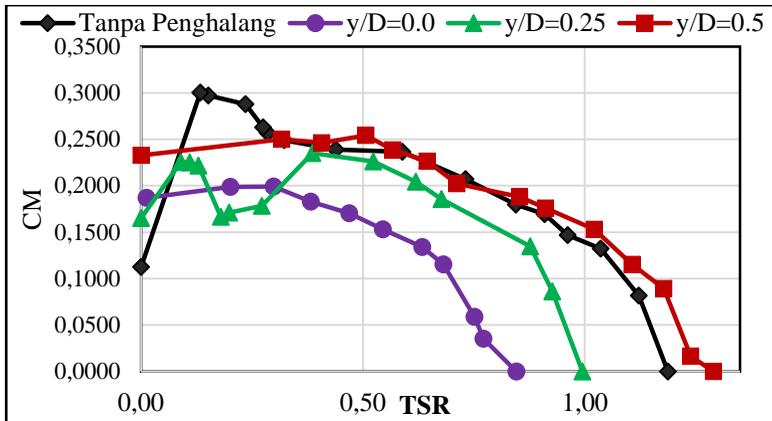
Pada data torsi statis awal dengan menggunakan silinder penghalang mengalami fluktuatif namun secara garis besar kedua grafik tersebut mempunyai trendline dari grafik tersebut adalah sinusoidal dimana akan membentuk grafik seperti grafik sinus. Torsi statis tanpa menggunakan penghalang mempunyai nilai maksimum sebesar 7,88 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimal -

2,03 N.cm pada sudut 150°. Torsi statis dengan menggunakan silinder penghalang didepan *returning blade* mempunyai nilai maksimum sebesar 8,1 N.cm pada sudut 20 ° dan nilai minimal - 0,68 N.cm pada sudut 150 °.

Nilai maksimum torsi statis dengan menggunakan silinder penghalang lebih tinggi daripada tanpa menggunakan penghalang pada kecepatan 9,2 m/s yaitu pada posisi sudut 20° dengan peningkatan sebesar 1,03 kali. Torsi statis dengan menggunakan silinder penghalang mempunyai nilai lebih besar daripada tanpa menggunakan penghalang pada sudut 130°,140° dan 150°. Sehingga Pemberian silinder penghalang posisi $y/D=0,5$ pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ dapat meningkatkan nilai torsi statis maksimumnya dan meningkatkan torsi statis minimalnya walaupun besar peningkatan Torsi statisnya tidak terlalu signifikan.

4.3.7 Perbandingan *Coefficient of Moment (Cm)* Turbin Angin Savonius Dengan Dan Tanpa Penghalang Fungsi *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$

Coefficient of Moment (Cm) merupakan perbandingan antara torsi *real* yang dimiliki oleh rotor dengan torsi teoritis oleh angin yang mengenai turbin angin Savonius yang besarnya dapat dirumuskan dengan rumus $(C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R})$.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* (Cm) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $9,7 \times 10^4$

Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan penghalang $y/D=0;0,25;0,5$ terhadap TSR pada Reynold number $9,7 \times 10^4$ yaitu pada kecepatan angin 5,01 m/s. Trendline grafik naik dari TSR 0 sampai nilai maksimum tertentu, kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya namun kurva tidak berbentuk parabolik.

Cm maksimum pada variasi tanpa penghalang adalah sebesar 33,2 %. Pada turbin angin Savonius dengan penghalang dengan $y/D=0,0$ mempunyai nilai Cm maksimum sebesar 22% pada $TSR=0,28$ Pada turbin angin dengan penghalang $y/D=0,25$ memiliki nilai Cm maksimum sebesar 24,9 % pada $TSR=0,103$. Pada turbin angin dengan penghalang $y/D=0,5$ memiliki nilai Cm maksimum sebesar 28,1 % pada $TSR=0,477$. Pada $TSR=0,8$ sampai $TSR=1,11$ nilai Cm turbin angin Savonius dengan menggunakan penghalang $y/D=0,5$ memiliki nilai lebih tinggi dari pada tanpa penghalang seperti yang bisa dilihat pada grafik diatas dan pada $TSR=0,29$ sampai $TSR=0,8$ memiliki grafik

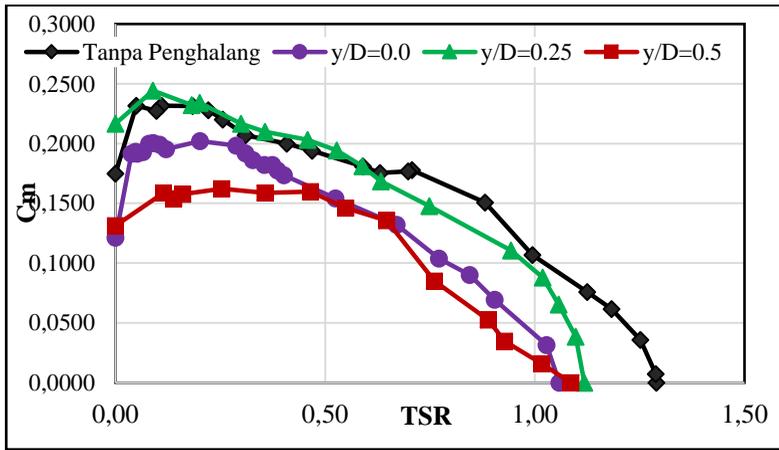
dengan nilai C_m yang hampir sama sehingga posisi grafik berdekatan.

Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan diletakkannya silinder penghalang posisi $y/D=0,5$ pada kecepatan 5,01 dapat meningkatkan C_m turbin angin Savonius pada TSR 0,8 sampai 1,11 dengan kenaikan yang tidak terlalu signifikan. Dengan diletakkannya silinder penghalang didepan *returning blade* pada posisi $y/D=0,0$ dan $y/D=0,25$ dapat menurunkan C_m dari turbin angin Savonius. Turbin angin dengan $y/D=0$ memiliki nilai C_m maksimum dibawah turbin angin tanpa penghalang dikarenakan pada posisi ini sebagian daerah *advancing blade* yang harusnya menerima aliran angin tertutupi oleh silinder penghalang. Dimana nilai *Coefficient drag* dari *advancing blade* lebih besar dari pada *returning blade*, sehingga dengan area yang sama maka pengurangan gaya drag pada *advancing blade* lebih besar daripada pada *returning blade*. Hal ini membuat C_m lebih rendah daripada tanpa menggunakan penghalang. Selain itu pada silinder penghalang posisi 0,25 juga tidak efektif meningkatkan nilai C_m . Hal ini dikarenakan Shear layer yang diharapkan dapat mempercepat daerah transisi *returning blade* pada silinder pengganggu pada kecepatan tinggi kurang efektif untuk memberi gangguan dan mempercepat transisi boundary layer pada *returning blade* sehingga tidak ada pengurangan yang signifikan pada gaya drag di *returning blade*. Sehingga tidak dapat meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. Maka diberikannya silinder penghalang pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ tidak dapat meningkatkan nilai C_m maksimum secara signifikan.

4.3.8 Perbandingan *Coefficient of Moment (C_m)* Turbin Angin Savonius Dengan Dan Tanpa Penghalang Fungsi *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$

Coefficient of Moment (C_m) merupakan perbandingan antara torsi *real* yang dimiliki oleh rotor dengan torsi teoritis oleh

angin yang mengenai turbin angin Savonius yang besarnya dapat dirumuskan dengan rumus ($C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R}$).



Gambar 4.12 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* (C_m) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $1,45 \times 10^5$.

Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan penghalang $y/D=0;0,25;0,5$ terhadap TSR pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ yaitu pada kecepatan angin 7,5 m/s. Trendline grafik naik dari TSR 0 sampai nilai maksimumnya, kemudian turun sampai TSR maksimumnya namun grafik tidak berbentuk parabolik.

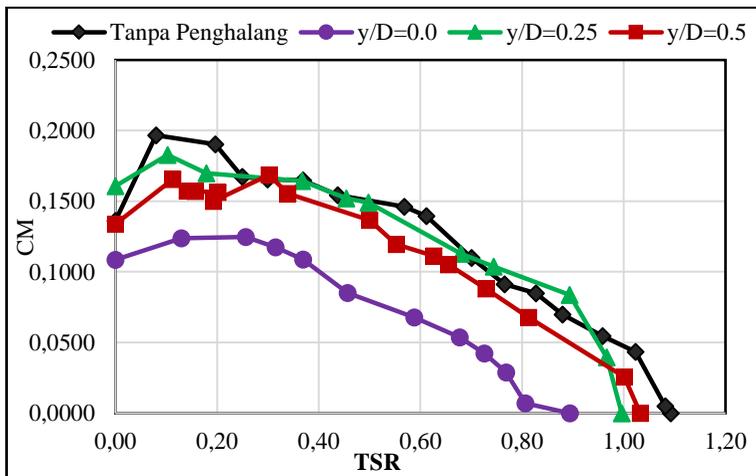
C_m maksimum pada variasi tanpa penghalang adalah sebesar 25,64 %. Pada turbin angin Savonius dengan penghalang dengan $y/D = 0,0$ mempunyai nilai C_m maksimum sebesar 21,6 % pada $TSR=0,085$ Pada turbin angin dengan penghalang $y/D=0,25$ memiliki nilai C_m maksimum sebesar 26,32 % pada $TSR=0,1$. Pada turbin angin dengan penghalang $y/D=0,5$ memiliki nilai C_m maksimum sebesar 17,4 % pada $TSR=0,238$. Pada $TSR= 0,2$ sampai 0,6 nilai C_m turbin angin Savonius dengan menggunakan

penghalang $y/D=0,25$ mempunyai nilai C_m lebih besar daripada nilai C_m tanpa penghalang. Namun peningkatannya tidak signifikan.

Hasil yang didapatkan pada kecepatan sedang atau 7,5 m/s pemberian silinder penghalang dengan $d/D = 0,25$ dapat meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan pemberian penghalang pada semua posisi $y/D=0,5$ wake dari *returning blade* yang diharapkan dapat menunda titik separasi tidak dapat mempercepat transisi boundary layer sehingga pemberian penghalang tidak efektif meningkatkan nilai C_m turbin. Pada $y/D = 0$ setengah dari sisi silinder berada pada sisi yang mengenai *advancing blade* sehingga hal ini menyebabkan aliran dan jumlah angin yang akan mengenai *advancing blade* terhambat silinder pengganggu yang mengakibatkan gaya drag *advancing blade* berkurang sehingga menyebabkan nilai C_m lebih rendah daripada tanpa penghalang. Sehingga turbin angin dengan silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat meningkatkan nilai C_m maksimal sebesar 1,026 kali dengan posisi silinder penghalang $y/D=0,25$ pada kecepatan sedang.

4.3.9 Perbandingan *Coefficient of Moment* (C_m) Terhadap *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$.

Coefficient of Moment (C_m) merupakan perbandingan antara torsi *real* yang dimiliki oleh rotor dengan torsi teoritis oleh angin yang mengenai turbin angin Savonius yang besarnya dapat dirumuskan dengan rumus ($C_m = \frac{2.Td}{\rho.A.U^2.R}$).



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* (C_m) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang fungsi *Tip Speed Ratio* Pada Reynolds Number $1,78 \times 10^5$

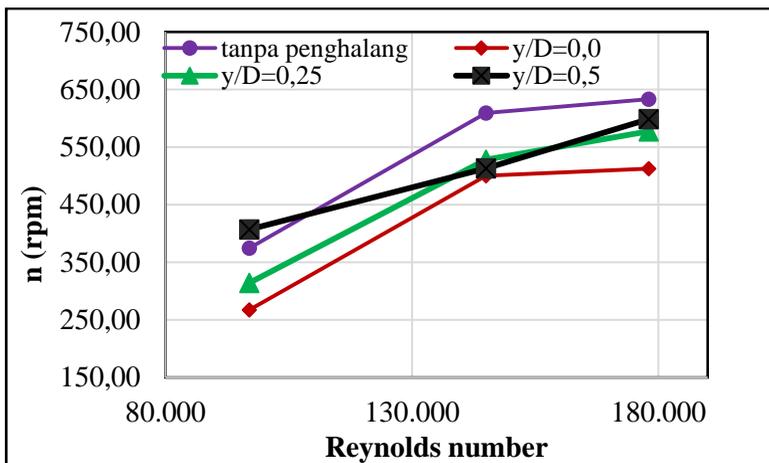
Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa dan dengan penghalang $y/D=0;0,25;0,5$ terhadap TSR pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ yaitu pada kecepatan angin 9,2 m/s. Trendline grafik naik dari TSR=0 sampai nilai maksimumnya, kemudian turun sampai TSR maksimumnya namun grafik tidak berbentuk parabolik.

C_m maksimum pada variasi tanpa penghalang terdapat pada $TSR= 0,077$ dengan nilai sebesar 21,3 %. Pada turbin angin dengan penghalang posisi $y/D= 0,0$ memiliki nilai C_m maksimum sebesar 13,35% pada $TSR= 0,269$. Pada turbin angin dengan penghalang $y/D= 0,25$ memiliki nilai C_m sebesar 19,67% pada $TSR= 0,097$. Turbin angin dengan penghalang posisi $y/D= 0,5$ memiliki nilai C_m maksimum sebesar 18,18% pada $TSR=0,1075$. Nilai C_m maksimum paling tinggi dimiliki oleh turbin angin tanpa silinder penghalang. Pada $TSR=0,7$ sampai 0,84 nilai C_m turbin angin Savonius dengan menggunakan penghalang memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan tanpa penghalang namun peningkatannya tidak signifikan.

Dari data yang telah didapatkan terlihat bahwa turbin angin savonius tidak memiliki peforma yang baik karena tidak dapat meningkatkan nilai C_m secara signifikan. Pada turbin angin dengan penghalang $y/D=0$ tidak efektif meningkatkan nilai C_m turbin angin Savonius karena setengah dari sisi silinder berada pada sisi yang mengenai *advancing blade* sehingga hal ini menyebabkan aliran dan jumlah angin yang akan mengenai *advancing blade* terhambat silinder pengganggu yang mengakibatkan gaya drag *advancing blade* berkurang sehingga menyebabkan nilai C_m lebih rendah. Shear layer yang diharapkan dapat mempercepat daerah transisi *returning blade* pada silinder pengganggu pada kecepatan tinggi kurang efektif untuk memberi gangguan dan mempercepat transisi boundary layer pada *returning blade* sehingga tidak ada pengurangan yang signifikan pada gaya drag di *returning blade*. Semakin tinggi kecepatan angin maka turbin tidak bisa bekerja dengan peforma yang lebih baik. Namun tidak dapat meningkatkan nilai C_m pada semua nilai TSR . Sehingga tidak dapat meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. Maka diberikannya silinder penghalang pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ tidak dapat meningkatkan nilai C_m maksimum secara signifikan.

4.3.10 Perbandingan Putaran Fungsi Reynolds Number Pada Turbin Angin Savonius Tanpa Dan Dengan Silinder Penghalang Posisi $y/D=0,0;0,25;0,5$.

Pengambilan data putaran pada grafik dibawah ini masing masing dengan tanpa menggunakan massa pemberat. Masing masing grafik adalah tanpa dan dengan menggunakan penghalang $y/D=0$.



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan kecepatan putaran fungsi Reynolds number pada turbin angin Savonius tanpa penghalang dan dengan silinder penghalang posisi $y/D=0,0;0,25;0,5$.

Gambar 4.14 menunjukkan nilai putaran fungsi Reynolds number pada turbin angin tanpa penghalang dan dengan penghalang posisi $y/D=0,0$. Dapat dilihat trendline grafik seiring meningkatnya nilai Reynolds number. Nilai putaran tanpa penghalang lebih besar daripada nilai putaran dengan diberikannya penghalang. Pada Reynold number $9,7 \times 10^4$ nilai $n_0=374,566$ rpm dan $n=266,853$ rpm. Pada Reynolds number

$1,45 \times 10^5$ nilai $n_0=609,2$ dan $n=500,01$ rpm. Pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ nilai $n_0=632,86$ rpm dan $n= 512,43$ rpm.

Pada $y/D=0,25$ nilai putaran tanpa penghalang lebih besar daripada nilai putaran dengan diberikannya penghalang. Pada Reynold number $9,7 \times 10^4$ nilai $n_0=374,566$ rpm dan $n= 313,85$ rpm. Pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ nilai $n_0=609,2$ dan $n=528,045$ rpm. Pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ nilai $n_0=632,86$ rpm dan $n=577,22$ rpm. Didapatkan semua nilai putaran turbin dengan penghalang lebih rendah daripada dengan penghalang $y/D=0,25$.

Pada $y/D=0,5$, nilai putaran tanpa penghalang lebih besar daripada nilai putaran dengan diberikannya penghalang pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$. namun pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ putaran turbin dengan diberikan penghalang lebih tinggi daripada tanpa penghalang. Berikut adalah nilai putaran dengan variasi Reynolds number tanpa menggunakan massa pemberat. Pada Reynold number $9,7 \times 10^4$ nilai $n_0=374,566$ rpm dan $n= 406,86$ rpm. Pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ nilai $n_0=609,2$ dan $n=513,14$ rpm. Pada Reynolds number $1,78 \times 10^5$ nilai $n_0=632,86$ rpm dan $n=598,5$ rpm.

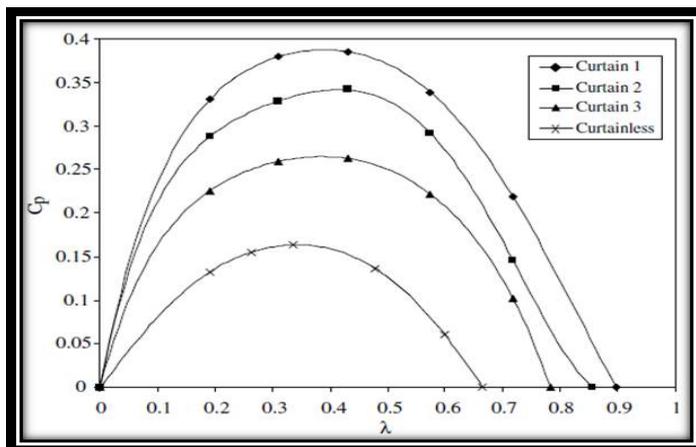
Hasil grafik diatas menunjukkan bahwa pemberian penghalang $y/D=0,0$ tidak mampu untuk meningkatkan nilai putaran turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan oleh posisi penghalang menghalangi aliran angin yang akan masuk ke *advancing blade* sehingga angin yang masuk ke *advancing blade* lebih sedikit dengan diberikannya penghalang dibandingkan tanpa penghalang. Sehingga pemberian penghalang di posisi $y/D=0$ tidak efektif meningkatkan nilai putarannya.

Pemberian penghalang posisi $y/D=0,25$ tidak mampu untuk meningkatkan nilai putaran turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan oleh posisi ujung penghalang yang paling dekat dengan garis sejajar poros turbin bersinggungan sehingga mengganggu angin yang akan mengenai *advancing blade*. Pemberian penghalang di posisi $y/D=0,25$ dapat menghalangi aliran angin ke arah *advancing blade* sehingga nilai kecepatan

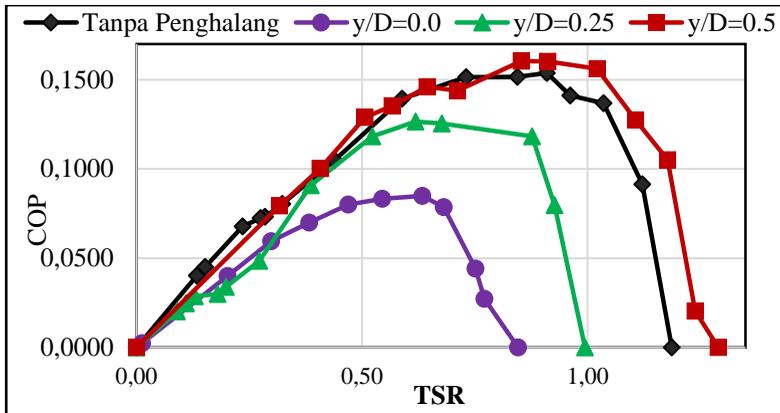
putaran (n) lebih rendah daripada turbin angin Savonius tanpa penghalang.

Hasil grafik diatas menunjukkan bahwa pemberian penghalang posisi $y/D=0,5$ hanya mampu meningkatkan nilai putaran turbin angin Savonius pada kecepatan rendah atau pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$. Hal ini dikarenakan turbin angin Savonius mempunyai kemampuan yang baik saat bekerja di kecepatan rendah dan penghalang dapat mempercepat transisi boundary layer pada *returning blade* sehingga wake dari *returning blade* menjadi lebih sempit menyebabkan nilai kecepatan putarannya lebih tinggi. Namun pada Reynolds number $1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$ kurang efektif dalam meningkatkan nilai kecepatan putaran turbin angin Savonius. Sehingga dengan turbin angin dengan Reynolds number sebesar $9,7 \times 10^4$ dan $y/D=0,5$ efektif meningkatkan nilai kecepatan putarnya sebesar 1,086 kali.

4.3.11 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu



Gambar 4.15 Grafik Pengaruh Cop Turbin terhadap Besar Sudut Plat ($\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$) pada Pengganggu 1 (Altan et al, 2008)

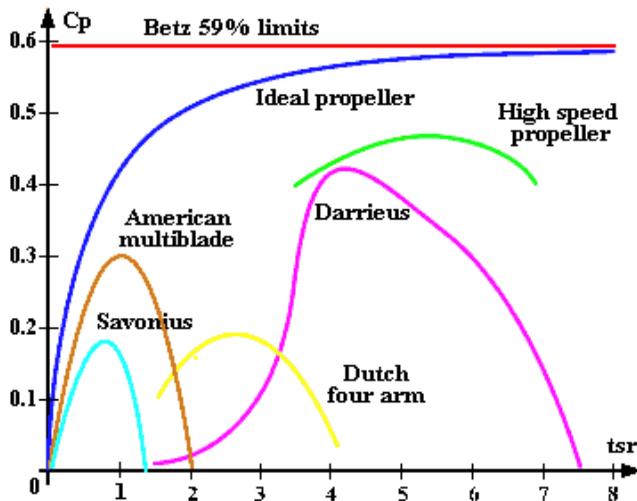


Gambar 4.16 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR) Dengan Dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$.

Gambar 4.15 adalah grafik CoP fungsi TSR pada kecepatan angin 7 m/s pada turbin angin dengan plat penghalang yang menutupi returning blade dan mengarahkan lebih banyak angin ke arah advancing blade pada variasi besar sudut plat ($\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15^\circ$). Nilai CoP maksimum yaitu sebesar 38,5%. Didapatkan peningkatan CoP seiring bertambahnya nilai TSR maksimum dari turbin angin. Hal ini dikarenakan dengan diberikan plat penghalang terbukti lebih mengarahkan dengan meningkatnya nilai putaran pada turbin yang meningkatkan nilai TSR maksimum nya.

Gambar 4.16 adalah grafik CoP fungsi TSR pada kecepatan angin 5,01 m/s dengan menggunakan silinder pengganggu didepan returning blade pada $y/D=0,0;0,25;0,5$. Nilai CoP maksimum adalah pada $y/D=0,5$. Didapatkan nilai TSR maksimum meningkat dari pada tanpa menggunakan silinder penghalang. Diduga dengan diberikan plat penghalang terbukti lebih mengarahkan dengan meningkatnya nilai putaran pada turbin yang meningkatkan nilai TSR maksimum nya.

Jika dibandingkan, hasil pada gambar 4.15 dan gambar 4.16 nilai CoP maksimum dengan menggunakan plat penghalang lebih besar dari pada menggunakan silinder penghalang diduga plat penghalang lebih efektif dalam menghalangi seluruh area returning blade. Pada turbin angin dengan menggunakan silinder penghalang masih ada angin yang mengenai langsung returning blade sehingga pengurangan gaya drag pada *returning blade* tidak lebih besar dari pada jika menggunakan plat datar.



Gambar 4.17 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power* Dengan *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Pritchard, 1998)

Jika dibandingkan dengan grafik pada gambar 4.17 nilai CoP maksimum turbin angin Savonius pada nilai sekitar 18% dan TSR maksimumnya sekitar 1,4. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan nilai CoP pada kondisi Tanpa Silinder Pengganggu pada Reynolds number $9,7 \times 10^4$ yaitu sebesar 15,39 %. Dan TSR sebesar 1,19. Nilai CoP dan TSR tidak sama persis karena dalam penelitian ini merupakan studi eksperimen dan kondisi yang berbeda saat pengambilan data dapat mempengaruhi nilai

peforma yang didapatkan seperti kondisi poros turbin dan gesekan antara poros turbin dan bearing.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, penempatan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 0,5$ di depan sudu *returning blade* Turbin Angin Savonius pada variasi $y/D=0,0;0,25;0,5$ untuk variasi $Re=9,7 \times 10^4$, $1,45 \times 10^5$ dan $1,78 \times 10^5$ dan TSR diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penggunaan silinder pengganggu sirkular pada posisi $y/D=0,5$ di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius dapat meningkatkan CoP maksimal sebesar 1,042 kali dari pada tanpa menggunakan silinder penghalang dengan Reynolds *number* sebesar $9,7 \times 10^4$ sehingga pemberian silinder penghalang tidak efektif meningkatkan CoP turbin angin Savonius karena tidak memberikan peningkatan yang signifikan.
2. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ kenaikan terbesar dari torsi statis maksimal pada turbin angin dengan menggunakan penghalang posisi $y/D=0,5$ dibandingkan turbin angin tanpa penghalang adalah sebesar 1,63 pada sudut 30° . Sehingga Pemberian silinder penghalang pada $y/D=0,5$ efektif meningkatkan kemampuan self starting Turbin angin Savonius pada Reynolds *number*= $9,7 \times 10^4$.
3. Pada $Re = 1,45 \times 10^5$ kenaikan terbesar dari *Coefficient of Moment* (C_m) maksimal pada turbin angin dengan menggunakan penghalang posisi $y/D=0,25$ dibandingkan turbin angin tanpa penghalang adalah sebesar 1,026 kali.
4. Kenaikan putaran paling tinggi adalah pada $Re=9,7 \times 10^4$ dengan posisi $y/D=0,5$ yaitu sebesar 1,086 kali.

5.2 Saran

Adapun saran agar penelitian ini menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Lebih memperhatikan cara pembacaan alat ukur berdasarkan instruksi yang diberikan pada masing – masing alat ukur serta pengecekan kondisi poros turbin.
2. Pengambilan data sebaiknya dilakukan pada satu kondisi dan waktu yang sama agar suhu dan kelembapan udara tetap pada nilai yang konstan, pengambilan data dapat dikondisikan dalam suatu ruangan yang ber-AC.
3. Lebih memperhatikan dan meminimalkan getaran pada poros dan *Bearing* karena akan berpengaruh pada performa turbin angin dengan memperbaiki desain dan konstruksi turbin, bearing dan penyangga.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

1. Altan, B.D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A. 2008. “*An Experimental Study On Improvement of a Savonius Rotor Performance With Curtaining*”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008) 1673–1678.
2. Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi. 2017. ***Outlook Energi Indonesia***. Pusat Teknologi Sumber Daya Energi Dan Industri Kimia.
3. Fernando, Daniel. 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi *Returning blade* Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius**, “Studi Kasus (d/D) = 0,75; Jarak S/D = $1,5 \leq S/D \leq 2,4$; dengan Bilangan Reynolds = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$ ” Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
4. Fox, Robert W. dan Mc. Donald, Alan T. 1998. ***Introduction to fluid Mechanics, 5th edition, John Wiley and Son, Inc.***
5. J.F. Manwell, J.G. McGowan. A.L. Rogers. 2002. ***Wind Energy Explained Theory, Design And Application***. ISBN 0470846127
6. Khaligh, Alireza. Omer C. Onar. 2010. ***Energy Harvesting Solar, Wind and Ocean Energy Conversion System***. ISBN 9781439815083
7. M. H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, dan D. Thevenin. 2010. ***Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade***. *Renewable Energy*; 35 (2010) 2618-2626.
8. Munson, Bruce R., Theodore H.Okiishi., Wade W. Huebsch., Alric P. Rothmayer. 1940. ***Fundamental of***

- fluid mechanics 7th edition*. New York City: John Willey & Sons Inc.
9. N.H. Mahmoud, EL-Haroun, A.A, Wahba, E, dan Nasef, M.H. 2010. ***An experimental study on improvement of Savonius rotor performance***. *Renewable Energy* 35 (2010) 2618-2626
 10. Spera, David. A. 2009. ***Wind Turbine Technology, Fundamental of Wind Concept of Turbine Engineering***, ASME. New York. *Second Edition*.
 11. Triyogi Y., Abdul L., Nabila P.P dkk.2017. **Numerical Study On The Effect Of Width Of Single Curtain On The Performance Of Savonius Wind Turbine**. MMatec Web of Conference, Vol 154 01110 (2018), pp.1-3
 12. Triyogi Y., Abdul L., Nabila P.P dkk.2017. **The Effect Of Width Of Single Curtain On The Performance Of Savonius Wind Turbine**. AIP Conference proceeding, vol 1983, issue 1,2018,pp.020023-1-020023-5
 13. Tsutsui, T dan Igarashi, T. 2002. ***“Drag Reduction on Circular Cylinder in an Air-Stream”***, *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamic*, Vol 90.
 14. Yuwono, Triyogi., D.Suprayogi., E Spirda. 2009. ***Reducing drag on a circular cylinder by upstream instalationof an I type bluff body as passive control***. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Tabel A. 1 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang $Re=9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	374,57	39,20	0	0,00	1,1772	1,19	0,0000	0,0000	0,0000
28,2	353,90	37,04	15	190,00	1,1772	1,12	0,0163	0,0914	0,0815
28,2	326,70	34,19	16	300,00	1,1772	1,04	0,0265	0,1369	0,1322
28,2	303,35	31,75	18	333,33	1,1772	0,96	0,0294	0,1411	0,1468
28,2	287,01	30,04	20	383,33	1,1772	0,91	0,0339	0,1539	0,1691
28,2	266,39	27,88	25	410,67	1,1772	0,84	0,0359	0,1516	0,1795
28,2	230,75	24,15	35	480,00	1,1772	0,73	0,0415	0,1515	0,2072
28,2	185,89	19,46	45	553,33	1,1772	0,59	0,0474	0,1394	0,2367
28,2	138,47	14,49	50	563,33	1,1772	0,44	0,0478	0,1049	0,2390
28,2	101,94	10,67	65	600,00	1,1772	0,32	0,0499	0,0805	0,2491
28,2	89,92	9,41	75	626,67	1,1772	0,28	0,0514	0,0732	0,2568
28,2	86,85	9,09	85	650,00	1,1772	0,28	0,0527	0,0724	0,2630
28,2	74,29	7,78	95	713,33	1,1772	0,24	0,0576	0,0678	0,2879
28,2	47,95	5,02	135	773,33	1,1772	0,15	0,0595	0,0452	0,2972
28,2	42,27	4,42	155	800,00	1,1772	0,13	0,0601	0,0402	0,3003
28,2	0,00	0,00	185	426,67	1,1772	0,00	0,0225	0,0000	0,1125

Tabel A. 2 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang $Re=1,45 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	S (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	609,20	63,76	0	0,00	1,1772	1,29	0,0000	0,0000	0,0000
28,2	608,43	63,68	15	50,00	1,1772	1,29	0,0033	0,0094	0,0073
28,2	591,25	61,88	35	206,67	1,1772	1,25	0,0160	0,0446	0,0357

28,2	558,83	58,49	55	351,33	1,1772	1,18	0,0276	0,0728	0,0616
28,2	531,25	55,60	75	439,33	1,1772	1,12	0,0340	0,0851	0,0757
28,2	469,69	49,16	95	609,33	1,1772	0,99	0,0479	0,1062	0,1068
28,2	416,36	43,58	115	840,00	1,1772	0,88	0,0676	0,1328	0,1506
28,2	333,97	34,96	135	991,33	1,1772	0,71	0,0798	0,1258	0,1779
28,2	329,83	34,52	155	1006,00	1,1772	0,70	0,0793	0,1234	0,1768
28,2	298,18	31,21	175	1020,00	1,1772	0,63	0,0787	0,1108	0,1755
28,2	278,75	29,18	195	1066,00	1,1772	0,59	0,0812	0,1068	0,1809
28,2	221,57	23,19	215	1148,67	1,1772	0,47	0,0870	0,0910	0,1940
28,2	192,91	20,19	235	1197,00	1,1772	0,41	0,0897	0,0816	0,1998
28,2	146,65	15,35	255	1250,67	1,1772	0,31	0,0928	0,0642	0,2068
28,2	120,78	12,64	275	1334,67	1,1772	0,26	0,0988	0,0563	0,2201
28,2	104,76	10,96	295	1392,00	1,1772	0,22	0,1022	0,0505	0,2279
28,2	87,07	9,11	315	1428,67	1,1772	0,18	0,1038	0,0426	0,2313
28,2	52,07	5,45	335	1451,00	1,1772	0,11	0,1040	0,0256	0,2318
28,2	46,34	4,85	355	1450,00	1,1772	0,10	0,1020	0,0223	0,2275
28,2	23,66	2,48	375	1490,00	1,1772	0,05	0,1039	0,0116	0,2316
28,2	0,00	0,00	385	1226,67	1,1772	0,00	0,0784	0,0000	0,1748

Tabel A. 3 Data Hasil Eksperiment Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Penghalang $Re=1,78 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,2	632,86	66,24	0	0,00	1,1772	1,09	0,0000	0,0000	0,0000
28,2	626,90	65,62	15	50,00	1,1772	1,08	0,0033	0,0052	0,0048
28,2	592,91	62,06	35	350,00	1,1772	1,02	0,0294	0,0445	0,0435
28,2	555,20	58,11	55	450,00	1,1772	0,96	0,0368	0,0523	0,0545
28,2	509,67	53,35	95	600,00	1,1772	0,88	0,0471	0,0613	0,0697
28,2	479,37	50,17	135	750,00	1,1772	0,83	0,0573	0,0702	0,0849
28,2	443,43	46,41	155	816,00	1,1772	0,77	0,0616	0,0698	0,0913
28,2	405,77	42,47	195	991,67	1,1772	0,70	0,0742	0,0770	0,1100
28,2	354,57	37,11	215	1225,00	1,1772	0,61	0,0941	0,0853	0,1394
28,2	329,16	34,45	235	1293,33	1,1772	0,57	0,0986	0,0830	0,1461
28,2	253,45	26,53	255	1373,33	1,1772	0,44	0,1042	0,0675	0,1544
28,2	213,88	22,39	275	1468,33	1,1772	0,37	0,1112	0,0608	0,1647
28,2	173,35	18,14	295	1493,33	1,1772	0,30	0,1117	0,0495	0,1654
28,2	144,34	15,11	315	1526,67	1,1772	0,25	0,1129	0,0417	0,1673
28,2	113,89	11,92	355	1733,33	1,1772	0,20	0,1285	0,0374	0,1903
28,2	46,35	4,85	395	1820,00	1,1772	0,08	0,1328	0,0157	0,1967
28,2	0,00	0,00	415	1400,00	1,1772	0,00	0,0918	0,0000	0,1360

Tabel A. 4 Data Hasil Eksperiment Turbin Angin Savonius Degan Silinder Penghalang $y/D=0,0$ $Re=9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
32	266,85	27,93	0	0,00	1,1651	0,85	0,0000	0,0000	0,0000
32	243,41	25,48	15	90,00	1,1651	0,77	0,0070	0,0272	0,0353

32	237,21	24,83	25	150,00	1,1651	0,75	0,0116	0,0442	0,0588
32	215,03	22,51	45	290,00	1,1651	0,68	0,0228	0,0785	0,1152
32	199,95	20,93	55	340,00	1,1651	0,63	0,0266	0,0849	0,1341
32	171,97	18,00	65	390,00	1,1651	0,55	0,0303	0,0833	0,1529
32	148,17	15,51	75	437,00	1,1651	0,47	0,0337	0,0800	0,1703
32	120,81	12,65	85	473,67	1,1651	0,38	0,0362	0,0700	0,1828
32	94,30	9,87	105	528,00	1,1651	0,30	0,0394	0,0595	0,1990
32	63,65	6,66	115	537,67	1,1651	0,20	0,0394	0,0401	0,1988
32	3,88	0,41	125	522,67	1,1651	0,01	0,0371	0,0023	0,1871

Tabel A. 5 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius
Degan Silinder Penghalang $y/D=0,0$ $Re=1,45 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
31	500,01	52,33	0	0,00	1,1686	1,06	0,0000	0,0000	0,0000
31	485,37	50,80	15	150,00	1,1686	1,03	0,0140	0,0323	0,0314
31	427,16	44,71	35	352,00	1,1686	0,90	0,0309	0,0628	0,0695
31	399,04	41,77	55	471,00	1,1686	0,84	0,0402	0,0762	0,0902
31	364,35	38,13	75	556,00	1,1686	0,77	0,0462	0,0801	0,1038
31	316,61	33,14	95	710,67	1,1686	0,67	0,0588	0,0885	0,1320
31	248,03	25,96	115	836,33	1,1686	0,53	0,0686	0,0809	0,1541
31	189,90	19,88	135	949,67	1,1686	0,40	0,0773	0,0698	0,1736
31	182,75	19,13	155	988,67	1,1686	0,39	0,0791	0,0687	0,1776
31	176,65	18,49	175	1030,33	1,1686	0,37	0,0811	0,0681	0,1821
31	167,93	17,58	195	1050,00	1,1686	0,36	0,0811	0,0647	0,1821
31	154,92	16,21	215	1090,00	1,1686	0,33	0,0829	0,0611	0,1862
31	146,59	15,34	235	1136,33	1,1686	0,31	0,0854	0,0595	0,1918

31	136,03	14,24	255	1187,67	1,1686	0,29	0,0883	0,0571	0,1983
31	95,24	9,97	275	1226,00	1,1686	0,20	0,0900	0,0408	0,2021
31	57,05	5,97	295	1213,00	1,1686	0,12	0,0870	0,0236	0,1952
31	49,76	5,21	315	1252,00	1,1686	0,11	0,0887	0,0210	0,1992
31	42,77	4,48	335	1278,33	1,1686	0,09	0,0893	0,0182	0,2005
31	37,84	3,96	355	1295,67	1,1686	0,08	0,0891	0,0160	0,2000
31	31,00	3,24	375	1282,33	1,1686	0,07	0,0860	0,0127	0,1930
31	24,69	2,58	395	1295,67	1,1686	0,05	0,0853	0,0100	0,1916
31	22,88	2,39	415	1322,67	1,1686	0,05	0,0860	0,0094	0,1931
31	18,31	1,92	435	1335,00	1,1686	0,04	0,0853	0,0074	0,1915
31	0,00	0,00	455	1020,00	1,1686	0,00	0,0541	0,0000	0,1214

Tabel A.6 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Degan
Silinder Penghalang $y/D=0,0$ $Re=1,78 \times 10^5$

T	n (rpm) Rata2	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28,3	512,43	53,63	0	0,00	1,17805	0,89	0,0000	0,0000	0,0000
28,3	462,15	48,37	15	50,00	1,17805	0,81	0,0047	0,0057	0,0071
28,3	440,61	46,12	35	225,00	1,17805	0,77	0,0191	0,0222	0,0289
28,3	416,08	43,55	65	350,00	1,17805	0,73	0,0280	0,0307	0,0423
28,3	388,19	40,63	95	460,00	1,17805	0,68	0,0354	0,0363	0,0536
28,3	336,69	35,24	135	600,00	1,17805	0,59	0,0447	0,0398	0,0677
28,3	261,55	27,38	175	763,33	1,17805	0,46	0,0562	0,0388	0,0851
28,3	211,35	22,12	205	961,67	1,17805	0,37	0,0719	0,0401	0,1088
28,3	180,53	18,90	245	1063,33	1,17805	0,31	0,0777	0,0370	0,1175
28,3	147,03	15,39	275	1144,00	1,17805	0,26	0,0824	0,0320	0,1246

28,3	74,40	7,79	395	1258,33	1,17805	0,13	0,0819	0,0161	0,1239
28,3	0,00	0,00	495	1250,00	1,17805	0,00	0,0718	0,0000	0,1086

Tabel A.7 Data Hasil Eksperiment Turbin Angin Savonius
Degan Silinder Penghalang $y/D=0,25$ $Re=9,7 \times 10^4$

T (C)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28	313,85	32,85	0	0,00	1,1791	0,99	0,0000	0,0000	0,0000
28	292,38	30,60	15	200,00	1,1791	0,93	0,0172	0,0797	0,0860
28	276,73	28,96	35	325,00	1,1791	0,88	0,0270	0,1182	0,1348
28	213,59	22,36	45	444,00	1,1791	0,68	0,0372	0,1255	0,1855
28	195,31	20,44	55	494,67	1,1791	0,62	0,0410	0,1265	0,2044
28	165,08	17,28	65	551,33	1,1791	0,52	0,0453	0,1183	0,2260
28	121,89	12,76	75	581,00	1,1791	0,39	0,0472	0,0909	0,2352
28	85,86	8,99	185	568,33	1,1791	0,27	0,0357	0,0485	0,1782
28	62,69	6,56	205	573,00	1,1791	0,20	0,0343	0,0340	0,1710
28	56,81	5,95	225	583,33	1,1791	0,18	0,0334	0,0300	0,1666
28	40,81	4,27	125	601,67	1,1791	0,13	0,0444	0,0287	0,2216
28	34,71	3,63	145	629,67	1,1791	0,11	0,0452	0,0248	0,2253
28	28,23	2,96	165	650,00	1,1791	0,09	0,0452	0,0202	0,2254
28	0,00	0,00	195	550,00	1,1791	0,00	0,0331	0,0000	0,1650

Tabel A.8 Data hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius
Degan Silinder Penghalang $y/D=0,25$ $Re=1,45 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28	528,05	55,27	0	0,00	1,1791	1,12	0,0000	0,0000	0,0000
28	518,32	54,25	15	200,00	1,1791	1,10	0,0172	0,0421	0,0384
28	499,14	52,24	35	350,00	1,1791	1,06	0,0294	0,0690	0,0653
28	481,29	50,38	55	479,00	1,1791	1,02	0,0395	0,0896	0,0879
28	445,42	46,62	65	597,67	1,1791	0,94	0,0496	0,1042	0,1105
28	353,54	37,00	95	807,67	1,1791	0,75	0,0664	0,1106	0,1478
28	298,93	31,29	115	926,67	1,1791	0,63	0,0756	0,1065	0,1683
28	278,13	29,11	135	1008,33	1,1791	0,59	0,0814	0,1067	0,1811
28	249,28	26,09	155	1091,67	1,1791	0,53	0,0873	0,1025	0,1943
28	216,67	22,68	175	1155,00	1,1791	0,46	0,0913	0,0932	0,2033
28	168,58	17,64	195	1206,67	1,1791	0,36	0,0943	0,0749	0,2098
28	141,32	14,79	215	1260,00	1,1791	0,30	0,0974	0,0648	0,2167
28	94,89	9,93	315	1443,33	1,1791	0,20	0,1052	0,0470	0,2340
28	86,03	9,00	345	1465,33	1,1791	0,18	0,1044	0,0423	0,2324
28	42,39	4,44	735	1913,33	1,1791	0,09	0,1098	0,0219	0,2444
28	0,00	0,00	1155	2200,00	1,1791	0,00	0,0974	0,0000	0,2167

Tabel A. 9 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Degan
Silinder Penghalang $y/D=0,25$ $Re=1,78 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
29,3	577,22	60,42	0	0,00	1,17455	1,00	0,0000	0,0000	0,0000
29,3	559,87	58,60	15	300,00	1,17455	0,97	0,0266	0,0381	0,0394
29,3	517,75	54,19	45	650,00	1,17455	0,89	0,0564	0,0748	0,0837

29,5	431,01	45,11	105	854,00	1,17385	0,74	0,0698	0,0771	0,1037
29,8	393,69	41,21	135	950,00	1,1728	0,68	0,0760	0,0767	0,1129
30,1	288,44	30,19	225	1300,00	1,17175	0,50	0,1002	0,0742	0,1491
30,2	263,13	27,54	255	1350,00	1,1714	0,45	0,1020	0,0690	0,1519
30,2	212,67	22,26	265	1450,00	1,1714	0,37	0,1104	0,0603	0,1644
30,5	103,67	10,85	335	1557,33	1,17035	0,18	0,1139	0,0304	0,1697
31,1	59,39	6,22	455	1768,00	1,16825	0,10	0,1224	0,0187	0,1827
31,1	0,00	0,00	645	1800,00	1,16825	0,00	0,1076	0,0000	0,1607

Tabel A.10 Data hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Degan
Silinder Penghalang $y/D=0,5$ $Re=9,7 \times 10^4$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
31,7	406,86	42,58	0	0,00	1,16615	1,29	0,0000	0,0000	0,0000
31,7	390,87	40,91	15	50,00	1,16615	1,24	0,0033	0,0204	0,0164
31,8	371,59	38,89	35	225,00	1,1658	1,18	0,0177	0,1052	0,0893
32	349,07	36,54	55	300,00	1,1651	1,11	0,0228	0,1275	0,1152
32	322,17	33,72	75	400,00	1,1651	1,02	0,0303	0,1561	0,1529
31,8	287,71	30,11	95	469,00	1,1658	0,91	0,0349	0,1603	0,1758
31,8	269,11	28,17	100	500,00	1,1658	0,85	0,0373	0,1604	0,1880
31,8	224,54	23,50	115	545,00	1,1658	0,71	0,0401	0,1438	0,2021
31,8	203,36	21,29	125	606,67	1,1658	0,64	0,0449	0,1459	0,2264
31,7	178,94	18,73	165	673,00	1,16615	0,57	0,0473	0,1354	0,2387
31,8	159,83	16,73	185	726,00	1,1658	0,51	0,0504	0,1288	0,2543
32	128,53	13,45	205	728,33	1,1651	0,41	0,0488	0,1003	0,2462
32	100,13	10,48	225	756,33	1,1651	0,32	0,0495	0,0793	0,2499
32	0	0	235	730,00	1,1651	0,00	0,0461	0,0000	0,2328

Tabel A. 11 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius
Degan Silinder Penghalang $y/D=0,5$ $Re=1,45 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
32,1	513,14	53,71	0	0,00	1,16475	1,09	0,0000	0,0000	0,0000
32,1	480,09	50,25	15	90,00	1,16475	1,02	0,0070	0,0160	0,0157
32,1	438,25	45,87	35	200,00	1,16475	0,93	0,0154	0,0321	0,0346
32,1	420,03	43,96	55	305,00	1,16475	0,89	0,0233	0,0467	0,0525
32,1	359,33	37,61	95	500,00	1,16475	0,76	0,0377	0,0647	0,0850
32	305,59	31,98	115	761,00	1,1651	0,65	0,0602	0,0877	0,1356
31,8	259,26	27,14	135	831,33	1,1658	0,55	0,0649	0,0802	0,1461
32,1	219,71	23,00	175	936,00	1,16475	0,47	0,0709	0,0743	0,1598
32,3	168,65	17,65	195	950,67	1,16405	0,36	0,0704	0,0567	0,1588
32,3	119,81	12,54	215	987,33	1,16405	0,25	0,0720	0,0412	0,1623
32,3	76,01	7,96	235	985,00	1,16405	0,16	0,0699	0,0254	0,1576
32	65,62	6,87	255	988,33	1,1651	0,14	0,0683	0,0214	0,1539
32,1	54,27	5,68	265	1021,67	1,16475	0,11	0,0705	0,0183	0,1589
32,1	0,00	0,00	275	900,00	1,16475	0,00	0,0582	0,0000	0,1312

Tabel A. 62 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius
Degan Silinder Penghalang $Y/D=0,5$ $Re=1,78 \times 10^5$

T	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	S (gr)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
30,1	598,50	62,64	0	0,00	1,17175	1,03	0,0000	0,0000	0,0000
30,1	580,06	60,71	15	200,00	1,17175	1,00	0,0172	0,0257	0,0257
30,1	470,92	49,29	45	533,33	1,17175	0,81	0,0455	0,0550	0,0677
30,1	422,23	44,19	75	710,00	1,17175	0,73	0,0592	0,0642	0,0881

29,9	379,75	39,75	105	863,67	1,17245	0,66	0,0707	0,0689	0,1052
29,9	362,95	37,99	155	957,00	1,17245	0,63	0,0747	0,0696	0,1112
29,9	319,97	33,49	185	1046,00	1,17245	0,55	0,0802	0,0659	0,1193
29,9	289,81	30,33	215	1200,00	1,17245	0,50	0,0918	0,0683	0,1365
29,9	196,37	20,55	225	1346,67	1,17245	0,34	0,1045	0,0527	0,1555
29,9	175,12	18,33	245	1461,67	1,17245	0,30	0,1134	0,0510	0,1686
29,9	111,48	11,67	265	1346,67	1,17245	0,19	0,1008	0,0288	0,1499
29,9	116,67	12,21	285	1413,33	1,17245	0,20	0,1052	0,0315	0,1564
29,9	90,72	9,50	305	1438,33	1,17245	0,16	0,1056	0,0246	0,1571
29,9	81,52	8,53	335	1470,00	1,17245	0,14	0,1058	0,0221	0,1573
29,9	65,31	6,84	405	1598,33	1,17245	0,11	0,1112	0,0186	0,1654
29,9	0,00	0,00	485	1450,00	1,17245	0,00	0,0899	0,0000	0,1338

Tabel A.13. Data Hasil Eksperimen Torsi Statis Turbin Angin Savonius

θ	Torsi statis (N.cm) TANPA PENGHALANG			Torsi statis (N.cm) $y/D=0,5$		
	$Re=9,7 \times 10^4$	$Re=1,45 \times 10^5$	$Re=1,78 \times 10^5$	$Re=9,7 \times 10^4$	$Re=1,45 \times 10^5$	$Re=1,78 \times 10^5$
0	1,5	3,7	3,22	1,64	2,31	4,72
10	2	5,3	7,02	3,32	4,89	8,1
20	2,1	6,3	7,63	2,68	5,47	6,66
30	2,3	6,56	7,88	3,75	5,28	7,96
40	2,02	5,9	7,24	2,18	3,92	5,77
50	1,55	4,39	6,7	2,29	4,04	5,57
60	1,42	3,92	5,83	2,27	3,18	4,19
70	1,08	3,78	4,59	1,82	2,92	4,12
80	0,68	2,8	3,67	1,39	1,71	3
90	0,54	1,91	3,06	-0,25	0,26	1,75
100	0,06	0,82	2,03	0,43	1,36	1,55

110	0,04	0,34	1,58	0,37	1,07	1,15
120	-0,1	0,1	0,93	0,39	0,79	1,07
130	-0,16	-0,33	0,01	0,44	0,59	0,42
140	-0,64	-0,71	-1,22	-0,26	-1,06	-0,04
150	-0,73	-1,61	-2,03	-0,26	-0,86	-0,68
160	-0,78	-1,31	-0,02	-0,36	-0,6	-0,41
170	0,31	0,33	2,1	0,48	0,16	-0,04
180	1,15	3,65	3,34	0,27	0,77	2,04

Tabel A. 14. Data Putaran Turbin Angin Savonius

Re	n tanpa Silinder Pengganggu (rpm)	n/n0		
		y/D = 0	y/D = 0,25	y/D = 0,5
$9,7 \times 10^4$	374,567	Tidak ada peningkatan	Tidak ada peningkatan	1,104
$1,45 \times 10^5$	609,2	Tidak ada peningkatan	Tidak ada peningkatan	Tidak ada peningkatan
$1,78 \times 10^5$	632,86	Tidak ada peningkatan	Tidak ada peningkatan	Tidak ada peningkatan

Tabel A.15 Data *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius

Re	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu					
	CoP	TSR	y/D = 0		y/D = 0,25		y/D = 0,5	
			CoP/CoP ₀	TSR	CoP/CoP ₀	TSR	CoP/CoP ₀	TSR
$9,7 \times 10^4$	16,03%	0,857	-	0,59	-	0,583	1,042	0,8033
$1,45 \times 10^5$	13,83%	0,830	-	0,63	-	0,705	-	0,61
$1,78 \times 10^5$	8,89%	0,589	-	0,35	-	0,7	-	0,59

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis, Eka Cahyanti merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, yang lahir pada tanggal 28 Oktober 1995 di Mojokerto. Penulis memulai pendidikannya di TK Dharma Wanita Meri (2000 - 2002). Kemudian melanjutkan pendidikan di SDN Meri II Mojokerto (2002-2008), SMPN 1 Mojokerto (2008-2011), SMAN 1 Sooko (2011-2014). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2014, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi di S1 Teknik Mesin ITS (2014-2018) melalui SNMPTN Undangan.

Semasa SMA penulis aktif dalam Organisasi Sooko's Computer Student (SCS) SMAN 1 Sooko sebagai Bendahara Umum (2012-2013). Sedangkan semasa kuliah, Penulis aktif di BEMFTI ITS sebagai Wakil Kepala Departemen PILTEK, Mechanical Engineering English Community sebagai staff. Prestasi yang pernah diraih semasa kuliah yang pernah diraih penulis yaitu sebagai *Student Exchange Participant* di Universiti Teknikal Malaysia Melaka (Utem) (2017), Beasiswa YPKAAI (2017-2018). Penulis dapat dihubungi melalui email ekacahyanti14.me@gmail.com