

TUGAS AKHIR - TM184835

## STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN DIAMETER SILINDER PENGGANGGU DI DEPAN SISI RETURNING BLADE TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder  
Pengganggu  $S/D = 2,2$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D =$   
 $0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; pada  $Re =$   
 $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”

LAZUARDHI RAHIM YAMIN  
NRP 02111540000100

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020



**TUGAS AKHIR – TM184835**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN  
DIAMETER SILINDER PENGANGGU DI DEPAN SISI  
*RETURNING BLADE* TERHADAP KINERJA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2,2$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”

Lazuardhi Rahim Yamin  
0211154000100

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA  
SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020



**FINAL PROJECT – TM184835**

**EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND  
TURBINE PERFORMANCE IMPROVEMENT WITH  
PROVISION OF CIRCULAR CYLINDER IN FRONT OF  
RETURNING BLADE**

“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2,2$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”

Lazuardhi Rahim Yamin  
0211154000153

Advisory Lecturer  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM  
ENGINEERING  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA 2020

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN  
DIAMETER SILINDER PENGGANGGU DI DEPAN SISI  
RETURNING BLADE TERHADAP KINERJA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

**“Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2,2$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$  dan  $1,0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”**

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**Lazuardhi Rahim Yamin**  
NRP. 02111540000100

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)  
NIP. 196001291987011001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji 1)  
NIP. 197104051999031004
3. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD (Penguji 2)  
NIP. 198105292003122001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT (Penguji 3)  
NIP. 196202161995121001

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN  
DIAMETER SILINDER PENGGANGGU DI DEPAN SISI  
RETURNING BLADE TERHADAP KINERJA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

**“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu  
S/D = 2,2; y/D = 0.5; d/D = 0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6;0.7;0.8;0.9  
dan 1.0; pada Re =  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”**

**Nama Mahasiswa : Lazuardhi Rahim Yamin**  
**NRP : 02111540000100**  
**Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS**  
**Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**ABSTRAK**

Berdasarkan Statistik Ketenagalistrkan 2017 Edisi No. 31 Tahun Anggaran 2018, di akhir tahun 2017, sebanyak 70,48% energi yang dihasilkan berasal dari sumber energi tak terbarukan. Sedangkan sumber energi non-fosil seperti tenaga air, angin, surya, dan lainnya hanya sebesar 29,51%. Hal ini menunjukkan Indonesia masih sangat bergantung pada sumber energi tak terbarukan. Konsekuensi dari eksploitasi sumber energi tak terbarukan yaitu dapat merusak lingkungan. Sejak tahun 2013-2017 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) hanya menghasilkan energi listrik dengan kapasitas 0.43 MW tiap tahunnya. Indonesia mempunyai kecepatan angin yang relatif rendah yaitu sebesar 2-6 m/s. Turbin Savonius merupakan pilihan yang tepat untuk angin dengan kecepatan rendah. Selain dapat menghasilkan energi listrik, turbin angin juga memiliki potensi tinggi karena pembangkit jenis ini tidak menghasilkan polusi.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius yang memiliki sudu dengan diameter turbin (D) sebesar 167,1 mm, diameter *end plate* ( $D_o$ ) sebesar 320 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm, dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Silinder pengganggu

dipasang di depan *returning blade* dengan variasi diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0. Silinder pengganggu ini diletakkan dengan jarak terhadap diameter sudu turbin ( $S/D$ ) sebesar 2,2. Selain itu digunakan variasi bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Silinder pengganggu digunakan untuk mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*. Untuk sumber alirannya digunakan axial fan dan digunakan *honeycomb* untuk penyeragam aliran yang menuju turbin angin Savonius. Pada penelitian ini alat ukur yang digunakan adalah *anemometer* sebagai pengukur kecepatan aliran, *torque meter* sebagai pengukur torsi statis, *tachometer* sebagai pengukur kecepatan putar turbin, dan *brake dynamometer* sebagai pengukur torsi dinamis.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah bahwa pemberian silinder penghalang pada  $S/D = 2,2$ ;  $d/D = 0,5$  dan  $Re = 9,7 \times 10^4$  paling efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa penghalang. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 38,15% dengan nilai  $CoP_{max} = 0,21$  dan *coefficient of moment* maksimum sebesar 19,43% dengan nilai  $CM_{max} = 0,338$ . Selain itu, pemberian silinder penghalang pada  $S/D = 2,2$  dan semua variasi  $d/D$  dan  $Re$  mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius di semua posisi angular sudu turbin dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

**Kata Kunci : Turbin Angin Savonius, *coefficient of power*, *coefficient of moment*, torsi statis, torsi dinamis.**

# EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE IMPROVEMENT WITH PROVISION OF CIRCULAR CYLINDER IN FRONT OF RETURNING BLADE

“Study case  $S/D = 2,2$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; with  $Re = 9,7 \times 10^4$  and  $13,6 \times 10^4$ ”

**Student Name** : Lazuardhi Rahim Yamin  
**NRP** : 02111540000100  
**Department** : Mechanical Engineering FTIRS-ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

## ABSTRACT

*Based on Electricity Statistics 2017 Edition No. 31 Fiscal Year 2018, at the end of 2017, 70.48% of the energy produced came from non-renewable energy sources while non-fossil energy sources such as hydropower, wind, solar, and others amounted to only 29.51%. This report shows that Indonesia is still very dependent on non-renewable energy sources. The consequence of exploitation of non-renewable energy sources is that can damage the environment. From 2013 throughout 2017, wind power plant only has the capacity to produce electricity of 0.43 MW annually. Since Indonesia has a relatively low wind speed of 2-6 m / s, Savonius wind turbine is the right choice for this matter. Not only able to produce electricity, Savonius wind turbine also has high potential because this type of plant does not produce pollution.*

*In this research, two bladed Savonius wind turbine with a turbine diameter ( $D$ ) of 167.1 mm, end plate diameter ( $D_o$ ) of 320 mm, height ( $H$ ) of 298 mm, and shaft diameter ( $b$ ) of 19 mm. Circular cylinder was installed in front of the returning blade with variations in the diameter of the circular cylinder to the diameter*

*of the turbine blade ( $d / D$ ) of 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; and 1.0 respectively. This circular cylinder was placed with a distance ( $S/D$ ) of 2.2 and variations of Reynolds numbers of  $9,7 \times 10^4$  and  $13,6 \times 10^4$ . Circular cylinder was used to reduce the drag force that occurs on the returning blade. Axial fan was used as wind flow sources and honeycomb was used to uniform the flow to the Savonius wind turbine. In this study, the measurement instruments that were used were anemometer as a measure of flow velocity, torque meter as a gauge of static torque, tachometer as a gauge of turbine rotational speed, and brake dynamometer as a dynamic torque gauge.*

*The results obtained from this research were that the provision of a circular cylinder with  $S/D = 2.2$ ;  $d / D = 0.5$  and  $Re = 9,7 \times 10^4$  are most effective in improving the performance of Savonius wind turbine compared to the performance of Savonius wind turbine without circular cylinder. This statement was proven by the increased value of the maximum coefficient of power of 38.15% with  $CoP_{max} = 0.21$  and the maximum coefficient of moment of 19.43% with  $CM_{max} = 0.338$ . Moreover, the provision of circular cylinder in front of returning blade with  $S / D = 2.2$  and all variations of  $d/D$  and Reynolds numbers were able to improve the self-starting ability of Savonius wind turbines in all angular positions of turbine blades compared to Savonius wind turbines without circular cylinder.*

***Keywords: Savonius wind turbine, circular cylinder, coefficient of power, coefficient of moment, static torque, dynamic torque.***



## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT atas berkah, rahamat dan hidayah-Nya yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis, sehingga bisa menyelesaikan skripsi ini sebagai syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) Teknik Mesin FTIRS-ITS.

Dalam penyusunan skripsi ini banyak hambatan serta rintangan yang penulis hadapi namun pada akhirnya dapat melaluinya berkat adanya bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara moral maupun spiritual. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena telah memberikan kelancaran dan kesempatan untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orangtua, bapak Christiono Sulistianto dan ibu Ellynawati dan kedua kakak, Muhammad Ignas Prariyadi dan Adinda Amalia yang telah memberikan dukungan baik berupa doa, semangat, dan juga materi.
3. Bapak Prof. Triyogi Yuwono, DEA sebagai dosen pembimbing yang senantiasa sabar membimbing penulis mengerjakan Tugas Akhir.
4. Dinda Aprilia yang selalu memberi dukungan semenjak SMA sampai sekarang.
5. Teman-teman kelompok 6, Ardy, Ghiyats, Kiki, Prabasworo, Markus, Hilda dan Asri yang sudah bekerja sama dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman angkatan M58 terutama teman Generasi Sosialisasi
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis mohon maaf atas segala kesalahan yang pernah dilakukan. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat untuk mendorong penelitianpenelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Batasan Masalah .....	6
1.4. Tujuan Penelitian .....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1. Turbin Angin .....	7
2.2. Turbin Angin Savonius .....	9
2.3. Bilangan Reynolds .....	10
2.4. Gaya <i>Drag</i> .....	12
2.5. <i>Coefficient of Power</i> .....	13
2.6. <i>Coefficient of Moment</i> .....	14
2.7. Aliran Fluida Melewati Silinder Pejal .....	15
2.8. <i>Tip Speed Ratio</i> .....	17
2.9. Penelitian Terdahulu .....	18
2.10.1. Studi Eksperimen Peningkatan Daya Dari Turbin Savonius .....	19

2.10.2.	Pengurangan <i>Drag</i> Sebuah Silinder Sirkular pada Suatu Aliran Udara .....	25
2.10.3.	Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Penggangu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius .....	29
BAB III	METODOLOGI .....	35
3.1.	Analisa Parameter .....	35
3.2.	Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP) .....	37
3.3.	Analisa Dimensi Coefficient of Moment ( $C_M$ ) .....	40
3.4.	Peralatan Penelitian .....	43
3.4.1.	Axial Fan .....	43
3.4.2.	Honeycomb .....	44
3.4.3.	Turbin Savonius .....	45
3.4.4.	Silinder Penggangu .....	46
3.4.5.	Penyangga Turbin Angin Savonius .....	46
3.4.6.	Alat Ukur .....	47
3.5.	Prosedur Penelitian .....	53
3.5.1.	Torsi Dinamis .....	54
3.5.2.	Torsi Statis .....	56
3.6.	<i>Flowchart</i> Penelitian .....	57
3.6.1.	Torsi Dinamis .....	58
3.6.2.	Torsi Statis .....	61
3.7.	Perhitungan <i>Uncertainty</i> .....	62
3.8.	Hasil yang Diperoleh .....	65
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	67
4.1.	Contoh Perhitungan .....	67

4.1.1.	Perhitungan Bilangan Reynolds.....	67
4.1.2.	Perhitungan Tip Speed Ratio .....	69
4.1.3.	Perhitungan Coefficient of Power (CoP).....	70
4.1.4.	Perhitungan Coefficient of Moment.....	70
4.2.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	71
4.2.1.	Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	72
4.2.2.	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	73
4.2.3.	Analisa Nilai Torsi Statis (Ts <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	75
4.3.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu .....	77
4.3.1.	Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	77
4.3.2.	Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power Maximum</i> (CoP <sub>max</sub> ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP <sub>max</sub> /CoP <sub>0max</sub> ) Terhadap Fungsi variasi d/D pada Re = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	81
4.3.3.	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C <sub>M</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Re = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ...	83

4.3.4.	Analisa Nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	86
4.4.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu .....	88
4.4.1.	Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power maximum</i> ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	88
4.4.2.	Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power maximum</i> ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $S/D$ di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	91
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	93
5.1.	Kesimpulan .....	93
5.2.	Saran .....	94
DAFTAR PUSTAKA	.....	95
(Halaman ini sengaja dikosongkan)	.....	96
LAMPIRAN	.....	97
A.	<i>Uniformity Flow Test</i> .....	97
B.	Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	99
C.	Data Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu .....	101
BIODATA PENULIS	.....	121

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin angin sumbu horizontal.....	8
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012) .....	10
Gambar 2. 3 Skema Turbin Savonius .....	11
Gambar 2. 4 Skema FBD Brake Dynamometer .....	13
Gambar 2. 5 Aliran fluida melewati silinder (sumber : Blevins, R. D, 1990) .....	16
Gambar 2. 6 Grafik Nilai Coefficient of Power dengan Tip Speed Ratio untuk Berbagai Turbin Angin (Pritchard, 1998) .....	18
Gambar 2. 7 Skema alat eksperimen (oleh : Mahmoud et.al, 2012) .....	19
Gambar 2. 8 Hubungan antara Coefficient of Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius Dua, Tiga, dan Empat Blade (Mahmoud, et al., 2012) .....	21
Gambar 2. 9 Hubungan antara Specific Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius Single Stage dan Double Stage (Mahmoud, et al., 2012) .....	22
Gambar 2. 10 Hubungan antara Daya Aktual dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio (Mahmoud, et al., 2012).....	23
Gambar 2. 11 Hubungan antara Coefficient of Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio (Mahmoud, et al., 2012) .....	24
Gambar 2. 12 Hubungan antara Daya Aktual dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan End Plate (Mahmoud, et al., 2012).....	25
Gambar 2. 13 Geometri Aliran (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	26
Gambar 2. 14 Distribusi Tekanan di Dekat Silinder Sirkular. (a) Efek Re dan (b) Efek d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	27
Gambar 2. 15 Titik Separasi (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	28

Gambar 2. 16 Koefisien Drag (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	29
Gambar 2. 17 Skema Penelitian Pandangan Atas dan Samping (Rustam, 2018) .....	30
Gambar 2. 18 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	31
Gambar 2. 19 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	31
Gambar 2. 20 Grafik coefficient of powert turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	32
Gambar 2. 21 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	33
Gambar 2. 22 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	33
Gambar 2. 23 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	34
Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius .....	35
Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur .....	36
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18 .....	43
Gambar 3. 4 Honeycomb .....	44
Gambar 3. 5 Turbin Savonius.....	45
Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu .....	46
Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius .....	47
Gambar 3. 8 Anemometer Omega HHF141 .....	48
Gambar 3. 9 Tachometer .....	49
Gambar 3. 10 Skema metoda pengukuran torsi dinamis .....	50
Gambar 3. 11 Torque meter.....	51



Gambar 3. 12 Voltage Regulator .....	52
Gambar 3. 13 Neraca Pegas.....	53
Gambar 3. 14 Massa Pemberat .....	53
Gambar 3. 15 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis .....	60
Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Statis .....	62
Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	72
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment ( $CM_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	74
Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis ( $Ts_0$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	75
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; S/D = 2,2$ pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$ ....	78
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Coefficient of Power antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi diameter $d/D = 0,1 - 1,0$ .....	81
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CM$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; S/D = 2,2$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	83
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CM$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; S/D = 2,2$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	84

Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu ( $T_s$ ) dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $T_{s0}$ ) terhadap Fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan variasi (a) $d/D = 0,5$ ; $S/D = 2,2$ ; $Re = 9,7 \times 10^4$ (b) $d/D = 0,4$ ; $S/D = 2,2$ ; $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	87
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap $d/D = 0,1 - 1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	89
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap $d/D = 0,1 - 1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	90
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi $S/D$ di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	91
Gambar 4. 12 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi $S/D$ di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	92

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP .....	38
Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM.....	41
Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18 .....	43
Tabel 3. 4 Spesifikasi Honeycomb .....	44
Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius .....	45
Tabel 3. 6 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141 .....	48
Tabel 3. 7 Spesifikasi Tachometer.....	49
Tabel 3. 8 Spesifikasi torque meter.....	51
Tabel 3. 9 Spesifikasi Voltage Regulator .....	52
Tabel 4. 1 Tabel Perbandingan CoP turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	79
Tabel 4. 2 Tabel Uncertainty CoP.....	80
Tabel 4. 3 Tabel perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	85
Tabel 4. 4 Uncertainty CM.....	85

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Dewasa ini, energi listrik sudah menjadi kebutuhan sehari-hari. Energi listrik dapat dihasilkan dengan merubah energi lain seperti energi terbarukan dan energi tak terbarukan. Berdasarkan Statistik Ketenagalistrikan 2017 Edisi No. 31 Tahun Anggaran 2018, di akhir tahun 2017, sebanyak 70,48% energi yang dihasilkan berasal dari sumber energi tak terbarukan dengan kebutuhan batu bara sebanyak 54 juta ton, 710 ribu kilo liter minyak bumi, dan 447 ribu mmscf gas alam. Sedangkan sumber energi non-fosil seperti tenaga air, angin, surya, dan lainnya hanya sebesar 29,51%. Hal ini menunjukkan Indonesia masih sangat bergantung pada sumber energi tak terbarukan. Konsekuensi dari eksploitasi sumber energi tak terbarukan yaitu dapat merusak lingkungan.

Sejak tahun 2013-2017 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) hanya menghasilkan energi listrik dengan kapasitas 0.43 MW tiap tahunnya. Nilai ini merupakan nilai yang terkecil jika dibandingkan dengan energi non fosil lainnya. Tahun 2018 Sidrap, Sulawesi Selatan memiliki PLTB yang menggunakan *Horizontal Axis Wind Turbine* HAWT dengan kapasitas. 75 MW. Namun, HAWT hanya dapat beroperasi dengan baik apabila kecepatan udara di daerah tersebut tinggi. Kecepatan angin di Indonesia relatif rendah yaitu kisaran 2 – 6 m/s. Turbin Savonius merupakan pilihan yang tepat untuk angin dengan kecepatan rendah. Selain dapat menghasilkan energi listrik, turbin angin juga memiliki potensi tinggi karena pembangkit jenis ini tidak menghasilkan polusi.

Turbin angin Savonius adalah turbin angin dengan jenis axis vertikal (VAWT) yang berguna untuk mengubah gaya dari hembusan angin menjadi torsi pada poros yang berputar. Turbin Savonius terdiri dari dua buah sudu yang berbentuk setengah

silinder. Sudu-sudu tersebut terbagi menjadi *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* adalah sudu berbentuk cekung yang tegak lurus dari arah datangnya aliran dan *returning blade* adalah sudu berbentuk cembung yang tegak lurus dari arah datangnya aliran. Turbin Savonius memiliki kelebihan yaitu konstruksinya sederhana dan biayanya murah. Selain itu juga turbin Savonius tidak bergantung pada arah angin dan memiliki torsi yang besar untuk kecepatan angin rendah. Namun, Efisiensi dari turbin Savonius lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin berjenis HAWT dan juga turbin berjenis VAWT lainnya. Oleh karena itu, dilakukan banyak penelitian untuk meningkatkan efisiensi seperti memberi pengganggu aliran berupa silinder di depan *returning blade* yang bertujuan mengganggu aliran sehingga selisih *pressure drag* pada *returning blade* mengecil. Selisih *pressure drag* yang semakin kecil akan mengakibatkan torsi, daya, dan efisiensi pada turbin Savonius meningkat.

Salah satu penelitian yang dilakukan oleh N.H. Mahmoud et al (2012), efisiensi dari turbin Savonius dengan 2, 3, dan 4 *blades* serta turbin dengan 1 dan 2 *stage* dibandingkan. Selain itu juga dilakukan variasi terhadap *overlap ratio* ( $\beta$ ) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35 dan *aspect ratio* ( $\alpha$ ) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5 dengan ada tidaknya *end plates*. Dari penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa turbin dengan dua sudu menghasilkan efisiensi lebih besar daripada turbin dengan jumlah sudu tiga dan empat. Lalu turbin Savonius dengan *double stages* menghasilkan hasil yang lebih optimum daripada *single stage*. Lalu turbin Savonius dengan tanpa *overlap ratio* menghasilkan tenaga yang lebih tinggi. Lalu turbin Savonius dengan *aspect ratio* yang tinggi menghasilkan  $C_p$  yang lebih tinggi. Lalu turbin Savonius yang menggunakan *end plate* menghasilkan efisiensi lebih tinggi daripada tanpa *end plate*.

Pada studi eksperimen Rustam (2010) digunakan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk memperbesar selisih gaya *drag*. Hal tersebut dilakukan bertujuan untuk mengurangi gaya *drag* pada *returning blade*. Studi eksperimen ini dilakukan dengan variasi parameter  $d/D = 0.5$ ; jarak  $S/D = 2.0$ ; Bilangan

Reynolds ( $Re$ ) =  $9.7 \times 10^4$ ;  $14.5 \times 10^4$ ;  $17.8 \times 10^4$ ; dengan  $y/D = 0$ ; 0.25; 0.5. Hasil dari studi eksperimen ini menunjukkan bahwa peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya *coefficient of power*, *coefficient of moment*, dan torsi statis setelah diberikan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Namun penambahan silinder pengganggu  $d/D = 0.5$ ;  $S/D = 2.0$  di depan *returning blade* tidak efektif dalam meningkatkan putaran turbin angin Savonius untuk semua konfigurasi bilangan Reynolds dan rasio jarak  $y/D$  dikarenakan tidak terjadinya peningkatan nilai putaran pada turbin dengan pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu.

Penelitian yang dilakukan oleh Tsutsui & Igarashi (2002) dari *Department of Mechanical Engineering, The National Defense Academy, Japan* dalam rangka mengurangi *drag* dari silinder sirkular pada suatu aliran udara dengan menambahkan silinder pengganggu. Penelitian ini menggunakan diameter silinder sirkular ( $D$ ) sebesar 40 mm, diameter silinder pengganggu ( $d$ ) sebesar dari 1 sampai 10 mm. Jarak pusat axis silinder sirkular dengan silinder pengganggu ( $L$ ) sebesar dari 50 sampai 120 mm. Bilangan Reynolds diatur berdasarkan  $D$  dari  $1,5 \times 10^4$  sampai  $6,2 \times 10^4$ . Pada eksperimen ini, terjadi dua pola aliran yaitu dengan dan tanpa *vortex shedding* dari silinder pengganggu. Kondisi optimum dari pengurangan *drag* terjadi pada  $d/D = 0,25$ ,  $L/D = 1,75-2,0$ , pada kondisi ini, vortisitas tidak menyebar dari silinder pengganggu dan *shear layer* dari pengganggu *reattaches* pada bagian depan dari silinder sirkular. Pengurangan dari total *drag* termasuk *drag* dari silinder pengganggu sebesar 63% dibandingkan dengan silinder tunggal.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa penelitian tentang penghalang di depan *returning blade* untuk meningkatkan performa turbin Savonius belum banyak dilakukan oleh karena itu diperlukan penelitian lebih. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan pengganggu dengan bentuk silinder yang diletakkan di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan rasio jarak

antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonis (S/D) sebesar 2.2 dan variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0. Penelitian ini dilakukan dengan bilangan Reynolds sebesar 97.000, dan 136.000 lalu kecepatan angin 5 dan 7 m/s.

## 1.2. Perumusan Masalah

Turbin Savonius mempunyai dua *blades* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Masing-masing *blade* berbentuk setengah silinder. Angin yang mengalir ke arah *blades* akan menghasilkan gaya *drag* yang berbeda di masing-masing *blade*. Selisih dari gaya *drag* tersebut yang menghasilkan torsi dan memutar turbin angin Savonius. Apabila selisih gaya *drag* semakin besar, maka torsi yang dihasilkan semakin besar dan daya yang dihasilkan juga semakin besar. Dengan bertambahnya daya, *coeffisien of performace* (CoP) juga semakin besar. Ada dua cara untuk meningkatkan CoP, yaitu dengan menaikkan gaya *drag* pada *advancing blade* dan atau menurunkan gaya *drag* pada *returning blade*. Pada percobaan ini dipilih untuk mengurangi gaya *drag* pada *returning blade* dengan cara menurunkan tekanan pada aliran yang mengalir menuju *returning blade*. Pengganggu diletakkan di depan *returning blade* guna menghalangi aliran angin yang mengarah ke *returning blade* sehingga gaya *drag*-nya berkurang.

Pengganggu yang digunakan pada penelitian ini berbentuk silinder sirkular. Parameter yang diuji adalah variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter *blade* turbin Savonius (d/D). Hipotesa awal dari penelitian ini adalah:

1. Pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* menyebabkan tekanan pada *returning blade* menurun. Hal ini diakibatkan oleh *wake* yang ditimbulkan oleh silinder pengganggu di depan *returning blade*. Dengan



menurunnya tekanan di depan *returning blade* maka selisih *pressure drag* di depan dan di belakang *returning blade* akan menurun dan gaya *drag* juga menurun. Akibatnya selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade* meningkat sehingga mengakibatkan torsi dan daya dari turbin Savonius meningkat.

2. Aliran yang mengenai silinder pengganggu akan membentuk *wake* di belakang silinder pengganggu. *Shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan *returning blade*. *Boundary layer* pada permukaan *returning blade* terganggu dan memungkinkan *turbulent boundary layer* lebih cepat terbentuk. Hal tersebut mengakibatkan titik separasi pada permukaan *returning blade* akan mundur dan *wake* yang terbentuk di belakang *returning blade* menjadi sempit. Dengan *wake* yang lebih sempit maka gaya *drag* pada *returning blade* akan mengecil. Selisih gaya *drag* pada *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar sehingga torsi dan daya dari turbin Savonius meningkat.
3. Ukuran diameter silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* mempunyai variasi rasio ( $d/D$ ) sebesar 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0. Apabila rasio ( $d/D$ ) terlalu kecil maka diperkirakan variasi tersebut kurang efektif dalam menurunkan tekanan di depan *returning blade* dan dalam menunda titik separasi. Apabila rasio ( $d/D$ ) terlalu besar maka diperkirakan variasi tersebut dapat menyebabkan defleksi aliran dari silinder pengganggu yang akan menghalangi *free stream* yang menuju *advancing blade*. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh diameter silinder pengganggu sehingga didapatkan diameter optimum.

### 1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Menggunakan analisa aliran *external flow*
2. Aliran yang mengalir adalah *steady, incompressible, dan uniform flow*.
3. Percobaan dilakukan dengan perbandingan jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonis ( $S/D$ ) sebesar 2,2
4. Percobaan menggunakan variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0.
5. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah 97.000 untuk kecepatan angin 5 m/s dan 136.000 untuk kecepatan angin 7 m/s

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius dengan menguji variasi pada rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan cara:

1. Mengukur torsi statis dan dinamis pada turbin angin Savonius pada saat dialirkan udara
2. Mengukur kecepatan putaran dari turbin angin Savonius
3. Menghitung *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius
4. Menghitung *coefficient of moment* (CM) turbin angin Savonius

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah alat yang berupa kincir angin. Turbin angin berfungsi mengubah energi kinetik dari aliran angin menjadi energi mekanik pada poros turbin. Poros turbin dapat berputar karena timbulnya gaya *drag* saat angin mengenai sudu-sudu pada turbin. Energi mekanik dari putaran poros turbin digunakan untuk memutar generator sehingga menghasilkan listrik. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin. Namun, penggunaan turbin angin untuk menghasilkan listrik masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik yang menggunakan sumber tenaga fosil (Contoh : PLTU, PLTD, dll). Penelitian terhadap turbin angin masih terus dilakukan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak dapat diperbaharui (Contoh: batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. Berdasarkan bentuk rotor, kincir angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu horizontal (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*).

*Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan turbin angin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor agar rotor dapat berputar dengan baik. Biasanya *blade* turbin jenis ini berbentuk *airfoil*. Turbin angin ini sangat bergantung dengan arah angin dan biasanya digunakan di daerah yang berkecepatan angin tinggi. Daya yang dihasilkan turbin tipe ini lebih besar daripada turbin berjenis VAWT karena *blades* selalu bergerak tegak lurus dengan arah datangnya angin

sehingga semakin tinggi turbin angin sumbu vertikal ini dibuat maka semakin besar juga daya yang dihasilkan turbin karena semakin ke atas kecepatan angin semakin cepat. Namun, terdapat parameter-parameter yang harus diperhatikan dalam konstruksi turbin ini. Turbin berjenis HAWT membutuhkan biaya yang mahal dan memiliki konstruksi yang kompleks karena harus diletakkan di menara yang tinggi.



Gambar 2. 1 Turbin angin sumbu horizontal  
([https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Windmills\\_D1-D4\\_\(Thornton\\_Bank\).jpg](https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Windmills_D1-D4_(Thornton_Bank).jpg))

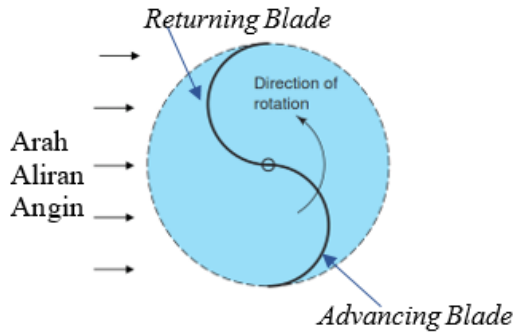
*Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin yang putaran poros utamanya sejajar dengan arah angin. Kelebihan dari turbin berjenis VAWT adalah turbin ini tidak bergantung pada arah angin sehingga dapat digunakan di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Ada berbagai jenis turbin VAWT yang sering digunakan, yaitu: Savonius, H-rotor,

dan Darrieus. Kelebihan dari turbin berjenis VAWT adalah konstruksinya sederhana dan biayanya tidak terlalu mahal karena tidak harus diletakkan di menara yang tinggi.

## 2.2. Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius adalah salah satu jenis turbin angin yang bertipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin angin Savonius pertama kali diperkenalkan oleh insinyur yang berasal dari Finlandia Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin ini dapat berputar tanpa memperdulikan arah angin serta dapat berputar dengan laju angin yang rendah sehingga cocok digunakan di daerah yang memiliki arah angin tidak menentu dan laju angin yang relatif rendah.

Turbin Savonius mempunyai sudu-sudu yang berbentuk dasar setengah silinder yang disatukan sehingga penampang turbin Savonius dari atas seperti huruf “S”. Sudu-sudu tersebut terbagi menjadi *advancing blade* dan *returning blade*. Aliran angin yang mengenai turbin Savonius mengakibatkan gaya *drag* pada kedua sudu. Perbedaan arah cekungan antara *advancing blade* dan *returning blade* menghasilkan perbedaan nilai gaya *drag*, karena nilai *coefficient of drag* dari *advancing blade* lebih besar daripada nilai dari *returning blade*, sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* lebih besar daripada gaya *drag* pada *returning blade*. Selisih gaya *drag* ini menghasilkan torsi yang memutar turbin Savonius. Torsi turbin yang dikalikan kecepatan angular dari turbin menghasilkan daya turbin. Sehingga, semakin besar selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade*, maka torsi dan daya yang dihasilkan akan semakin besar.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012)

### 2.3. Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah bilangan tak berdimensi untuk menentukan karakteristik dari sebuah aliran. Aliran dapat dikatakan laminar, transisi dan turbulen dari besarnya bilangan Reynolds. Persamaan dari Bilangan *Reynolds* adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.1)$$

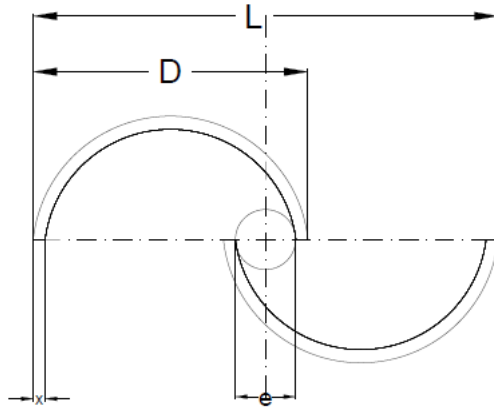
- Re : Bilangan *Reynolds*  
 $\rho$  : Densitas dari Fluida ( $\text{Kg/m}^3$ )  
 L : panjang karakteristik (m)  
 U : Kecepatan fluida (m/s)  
 $\mu$  : viskositas dinamik (Ns/m)

Klasifikasi dari bilangan Reynolds pada dua plat datar adalah sebagai berikut :

- $Re < 5 \times 10^5$ , aliran laminar
- $Re > 5 \times 10^5$  aliran turbulenta

Pada silinder bilangan Reynoldsnya adalah :

- $Re < 3 \times 10^5$  aliran laminar
- $Re > 3 \times 10^5$  aliran turbulen



Gambar 2. 3 Skema Turbin Savonius

Dalam penelitian ini, panjang karakteristik ( $L$ ) dapat dilihat seperti pada gambar 2.3 :

$$L = 2D - 2x - e \quad (2.2)$$

- $D$  : diameter sudu turbin Savonius (m)  
 $e$  : diameter poros (m)  
 $x$  : tebal sudu turbin Savonius (m)

maka persamaan bilangan Reynolds-nya menjadi:

$$Re = \rho U(2D - 2x - e)/\mu \quad (2.3)$$

## 2.4. Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya yang bekerja pada benda yang paralel dengan arah aliran fluida. Gaya ini timbul ketika benda bergerak dalam medan fluida *viscous*. Dalam kehidupan sehari-hari gaya *drag* dapat merugikan dan menguntungkan. Gaya *drag* menguntungkan pada saat aplikasi untuk memperlambat laju dari benda contohnya pada parasut. parasut digunakan untuk memperlambat jatuhnya orang atau benda agar dapat selamat sampai permukaan bumi. Gaya *drag* dapat merugikan ketika menahan laju dari benda. Salah satu contohnya adalah pada mobil. *drag force* dalam hal ini menahan mobil untuk melaju, hal ini menyebabkan *losses* pada energi.

Gaya drag dapat dihasilkan oleh hambatan tekanan dan hambatan gesekan. Untuk menghitung gaya drag dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$F_d = \frac{1}{2} \rho U^2 C_d A \quad (2.4)$$

- $F_d$  : Gaya drag
- $\rho$  : densitas fluida
- $U$  : kecepatan fluida
- $C_d$  : koefisien drag
- $A$  : luas bidang yang terkena aliran fluida

Dari persamaan diatas, gaya drag dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu. kecepatan fluida, koefisien drag dari benda dan luas bidang yang terkena fluida semakin cepat aliran fluidanya maka gaya drag yang dihasilkan akan semakin tinggi begitu juga



dengan luas bidangnya. semakin besar luas bidang yang terkena aliran akan semakin besar juga gaya dragnya.

## 2.5. *Coefficient of Power*

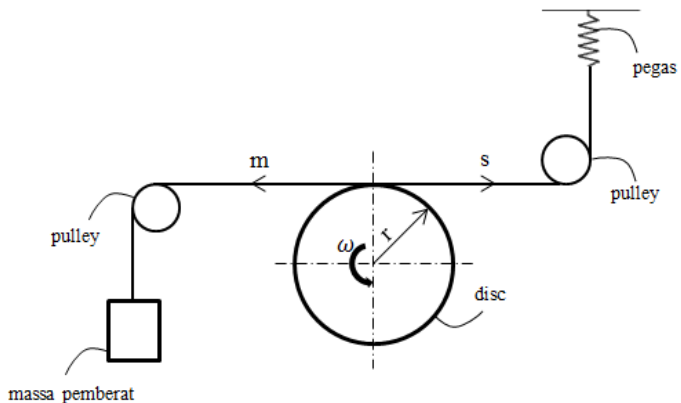
Untuk menentukan performa yang dihasilkan dari turbin dapat melakukan perhitungan *Coefficient of Power*. *Coefficient of Power* pada turbin angin adalah perbandingan dari daya yang dihasilkan oleh turbin angin terhadap daya yang diberikan oleh angin. Semakin besar nilai CoP maka semakin tinggi daya yang dihasilkan oleh turbin. persamaan dari CoP adalah sebagai berikut.

$$CoP = \frac{Pr}{Pt} \quad (2.5)$$

CoP : *coefficient of power*

Pr : Daya yang dihasilkan oleh turbin

Pt : Daya teoritis



Gambar 2. 4 Skema FBD Brake Dynamometer

$$T_D = \{(s - m)g\} \times r \quad (2.6)$$

- $T_D$  : Torsi Dinamis (N.m)
- $m$  : Massa Pembebanan
- $s$  : Pembacaan neraca pegas (Kg)
- $g$  : Percepatan Gravitasi ( $m/s^2$ )
- $r$  : Jari-jari poros Turbin (m)

Nilai dari CoP tidak akan melebihi nilai 1 dikarenakan daya yang dihasilkan tidak dapat melebihi daya teoritis. Persamaan dari daya teoritis adalah sebagai berikut:

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.7)$$

- $A$  : Luas permukaan ( $m^2$ )
- $\rho$  : Densitas fluida ( $Kg/m^3$ )
- $U$  : kecepatan fluida (m/s)

Sedangkan untuk persamaan daya aktual adalah

$$P_A = T \omega \quad (2.8)$$

- $T$  : adalah torsi dari pembacaan alat (N.m)
- $\omega$  : putaran poros turbin (Rad/s)

maka Persamaan CoP dapat menjadi :

$$CoP = \frac{T \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.9)$$

## 2.6. *Coefficient of Moment*

Coefficient of moment adalah perbandingan antara torsi yang dihasilkan dari turbin dan torsi dari hasil perhitungan torsi teoritis. Torsi dari turbin adalah hasil pembacaan dari alat torsi statis. Untuk torsi teoritis dapat didapatkan dari persamaan

$$T_{\infty} = \frac{1}{2} \rho A U^2 D \quad (2.10)$$

Dengan :

- $T_{\infty}$  : Torsi teoritis (N.m)
- $\rho$  : Densitas fluida ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $U$  : Kecepatan fluida (m/s)
- $D$  : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

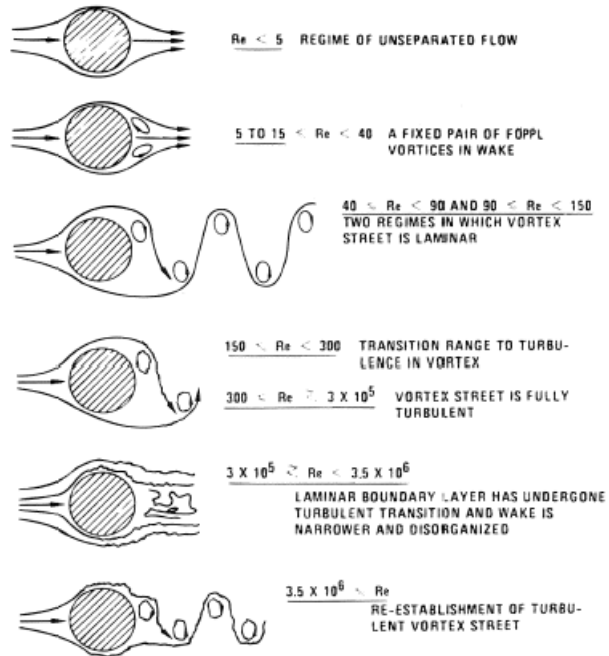
Dengan R sama dengan D. Dan persamaan Coefficient of Momentnya menjadi :

$$CM : \frac{T_D}{T_{\infty}} \quad (2.11)$$

- $T_D$  : Torsi dinamis.
- $CM$  : Coefficient of Moment

## 2.7. Aliran Fluida Melewati Silinder Pejal

Aliran fluida jika melewati suatu benda akan mengikuti kontur dari permukaan benda tersebut. Lajur yang dilalui oleh fluida dapat diprediksi jika benda tersebut merupakan benda yang sederhana seperti plat, silinder dan pipa. benda yang kompleks lebih susah untuk di prediksi. benda tersebut seperti airfoil, mobil gedung dan lainnya.



Gambar 2. 5 Aliran fluida melewati silinder (sumber : Blevins, R. D, 1990)

Karakteristik dari aliran akan berubah sesuai dengan bilangan Reynolds. Aliran Fluida melewati sebuah silinder jika aliran tersebut memiliki bilangan Reynolds kurang dari 1 maka aliran tersebut laminar, maka kontur alirannya tidak terjadi separasi dan *wake* yang terjadi laminar sedangkan drag yang timbul adalah *drag* friksi. Ketika aliran mempunyai karakteristik turbulen, maka akan timbul *wake* turbulent yang membesar ketika titik separasi bergerak dari belakang silinder menuju kedepan. *Wake* ini mempunyai tekanan yang rendah yang membuat drag tekanan yang tinggi. Pada saat  $Re \approx 1000$ , 95% total *drag* adalah *drag* tekanan.

Untuk Reynolds antara 1000 hingga 300.000 koefisien *drag*-nya relatif konstan.

## 2.8. *Tip Speed Ratio*

*Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) adalah perbandingan antara kecepatan putar poros terhadap kecepatan angin. Jika kecepatan putar poros turbin angin rendah maka daya yang diserap oleh turbin akan lebih sedikit tetapi jika kecepatan putar poros cepat maka sudu turbin seolah olah membentuk dinding dan sudu akan berputar dalam angin turbulen ratio dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot 0,5 L}{U} \quad (2.12)$$

keterangan:

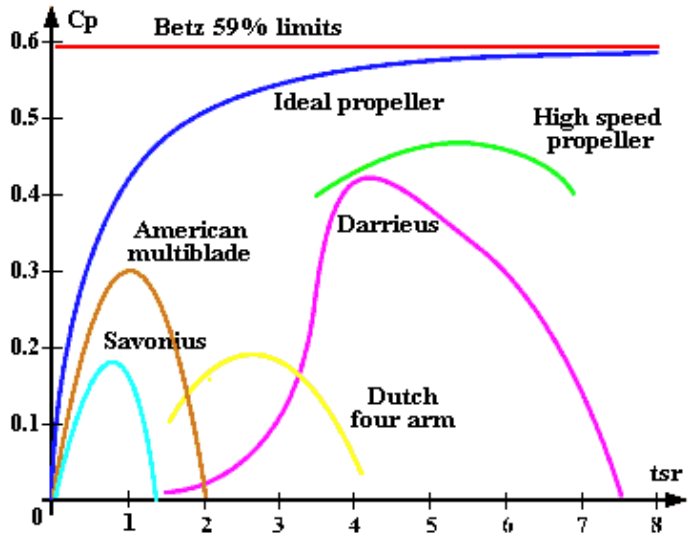
- $\lambda$  : *tip speed ratio*
- $\omega$  : kecepatan sudut turbin (rad/s)
- L : Panjang karakteristik turbin (m)
- U : kecepatan fluida (m/s)

Berdasarkan gambar 2.6 dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai TSR, *coefficient of power* akan meningkat hingga titik optimumnya, kemudian nilai *coefficient of power* akan turun seiring dengan meningkatnya nilai  $\lambda$ .

Menurut aturan Betz, *coefficient of power* maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin angin adalah 0,593. Aturan Betz Merupakan CoP maksimum yang dapat di terima oleh turbin secara perhitungan. Energy dari angin tidak dapat 100 persen diterima oleh turbin. Dikarenakan jika diterima 100% maka partikel udara akan terhenti di belakang turbin dan udara didepannya tidak dapat melewati.

Masing-masing turbin angin memiliki titik kerja awal yang berbeda. Apabila titik kerja awal suatu turbin terletak pada nilai  $\lambda$

yang rendah, artinya turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah.



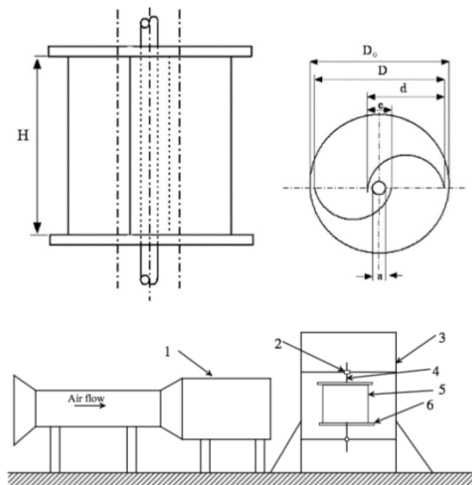
Gambar 2. 6 Grafik Nilai Coefficient of Power dengan Tip Speed Ratio untuk Berbagai Turbin Angin (Pritchard, 1998)

## 2.9. Penelitian Terdahulu

Untuk memudahkan dan memperoleh hasil yang valid dalam penelitian ini maka dibutuhkan studi referensi dari penelitian – penelitian terdahulu yang berkaitan dengan dengan penelitian yang akan dilakukan. Penelitian yang dicantumkan adalah sebagai berikut

### 2.10.1. Studi Eksperimen Peningkatan Daya Dari Turbin Savonius

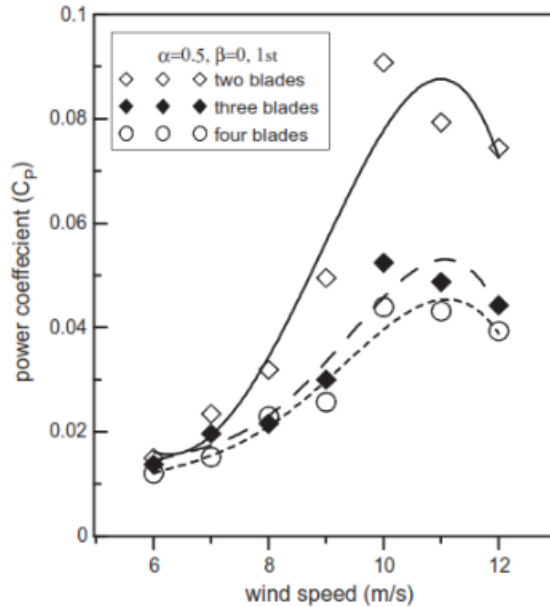
Studi Eksperimen yang dilakukan oleh N.H. Mahmoud. Tentang peningkatan daya yang di hasilkan oleh turbin Savonius dengan variasi penambahan sudu, jumlah stage, rasio overlap, diameter sudu, aspect ratio dan penambahan end plate. Pada eksperimen ini digunakan diameter sudu 0,3, 0,2, 0,1 dan 0,08 m serta rasio overlap sedangkan untuk jumlah stage yang dipakai adalah 1 dan 2 stage. Untuk jumlah sudu yang divariasikan adalah 2, 3 dan 4. Ketebalan dari end plate yang dipakai adalah 2,5 mm dengan diameter 10% lebih besar dengan lebar turbin Savonius. Dan variasi aspect ratio yang dipakai adalah 0,5, 1, 2, 4 dan 5. Variasi overlap ratio yang dipakai 0, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35.



Gambar 2. 7 Skema alat eksperimen (oleh : Mahmoud et.al, 2012)

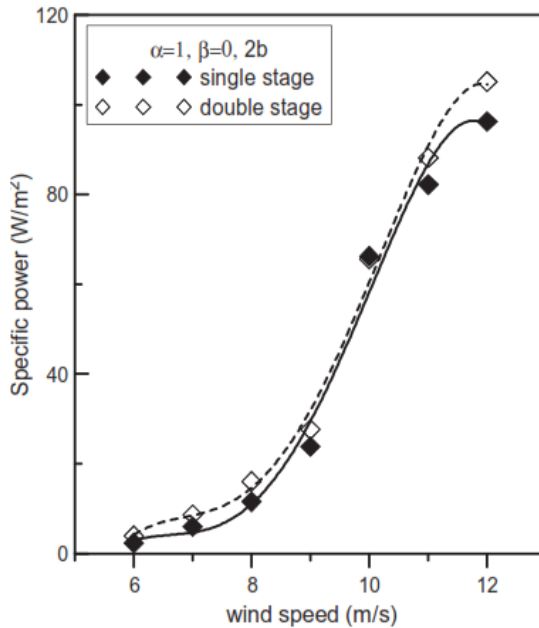
Penelitian ini menggunakan sumber angin yang keluar dari *wind tunnel* dengan jarak antara turbin dengan *exit wind tunnel* sebesar 125 cm. *Wind tunnel* yang digunakan berdiameter 49 cm dengan kecepatan antara 0 hingga 13 m/s. Turbin angin Savonius menggunakan sudu dengan material pipa PVC dengan besar diameter yang berbeda yaitu 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,08 m. *End plate* yang digunakan materialnya plat kayu dengan ketebalan 2,5 mm dan diameter *end plate* (D0) 10% lebih besar dari diameter turbin angin Savonius. Diameter poros turbin dari *steel* dengan diameter 14 mm dan panjang 62 cm untuk semua model. Geometri turbin dapat dilihat pada gambar 2.7. Berikut ini merupakan beberapa hasil yang didapat dari penelitian mengenai studi eksperimen peningkatan turbin angin Savonius.





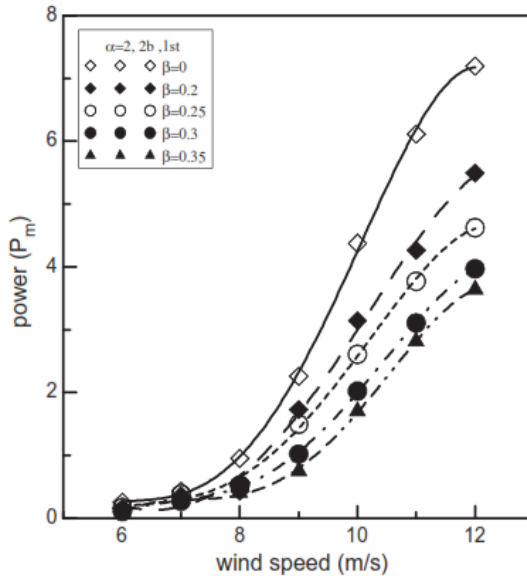
Gambar 2. 8 Hubungan antara Coefficient of Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius Dua, Tiga, dan Empat Blade (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *blade* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.8 menunjukkan hubungan nilai *coefficient of power* ( $C_p$ ) dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; dan *single stage*. *Coefficient of power* dari turbin dengan dua *blades* lebih tinggi dan efisien dari turbin dengan tiga dan empat *blades*.



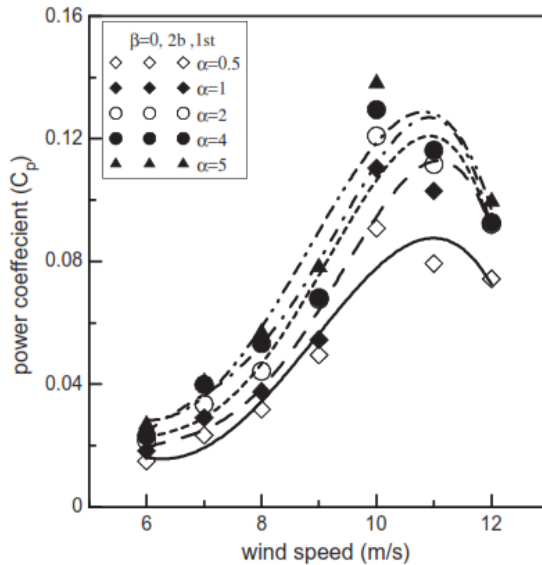
Gambar 2. 9 Hubungan antara Specific Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius Single Stage dan Double Stage (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *stage* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.9 menunjukkan hubungan nilai *specific power* dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0 dan turbin dua *blades* (2b). *Specific power* turbin dengan dua *stage* lebih tinggi daripada turbin dengan satu *stage*.



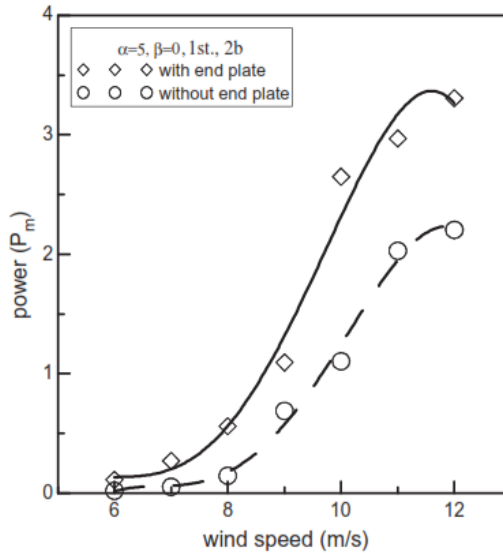
Gambar 2. 10 Hubungan antara Daya Aktual dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh *overlap ratio* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.10 menunjukkan hubungan nilai Daya aktual dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 2; turbin dua *blades* (2b); dan *single stage*. Daya aktual pada turbin dengan *overlap ratio* 0 (tanpa *overlap*) lebih tinggi daripada turbin dengan menggunakan *overlap* (0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35).



Gambar 2. 11 Hubungan antara Coefficient of Power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh *aspect ratio* 0,5 sampai 5 terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.11 menunjukkan hubungan nilai *coefficient of power* (CoP) dan kecepatan angin dengan *overlap ratio* 0; turbin dua *blades* (2b); dan *single stage*. *Coefficient of power* (CoP) semakin meningkat seiring dengan meningkatnya *aspect ratio*.



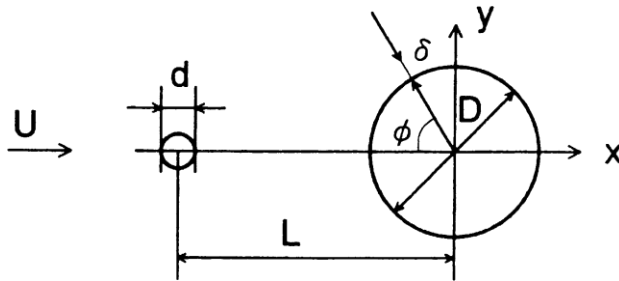
Gambar 2. 12 Hubungan antara Daya Aktual dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan End Plate (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh *end plate* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.12. menunjukkan hubungan nilai Daya aktual dan kecepatan angin dengan *overlap ratio* 0; *aspect ratio* 5; turbin dua *blades* (2b); dan *single stage*. Daya aktual pada turbin dengan menggunakan *end plate* lebih tinggi daripada turbin tanpa menggunakan *end plate*.

### 2.10.2. Pengurangan *Drag* Sebuah Silinder Sirkular pada Suatu Aliran Udara

Penelitian ini dilakukan oleh T. Tsutsui dan T. Igarashi (2002) mengenai penempatan sebuah silinder pengganggu pada sisi *upstream* dari sebuah silinder sirkular, seperti gambar 2.14

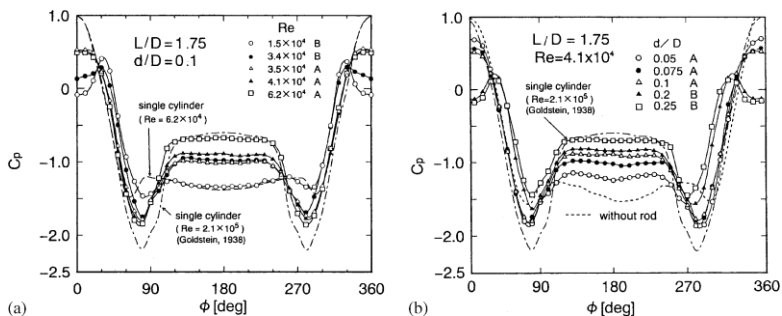
Eksperimen dilakukan di *low speed wind tunnel* dengan dimensi tinggi 400 mm, lebar 150 mm, dan panjang 800 mm. Diameter silinder sirkular ( $D$ ) sebesar 40 mm, dan diameter tongkat ( $d$ ) dengan rentang dari 1 sampai 10 mm. Jarak antara pusat silinder sirkular dengan pusat silinder pengganggu ( $L$ ) divariasikan dari 50 sampai 120 mm sehingga  $L/D$  yang digunakan adalah 1,25-3,0. Bilangan Reynolds diatur berdasarkan  $D$  dari  $1,5 \times 10^4$  sampai  $6,2 \times 10^4$ .



Gambar 2. 13 Geometri Aliran (Tsutsui & Igarashi, 2002)

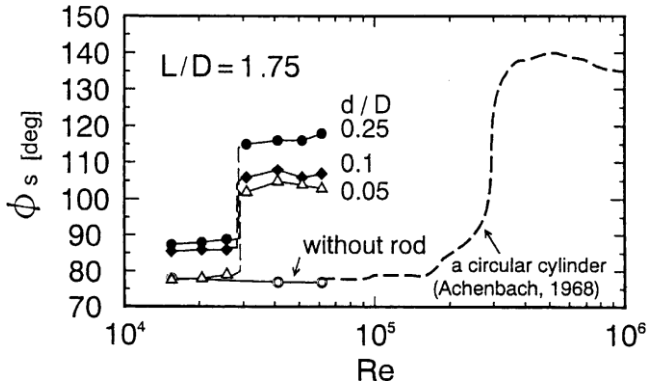
Dalam penelitian ini, diketahui ada 2 pola aliran yang terbentuk, yaitu pola aliran A dan pola aliran B. Pada pola aliran A terjadi *vortex shedding* dan pada pola aliran B terjadi *quasi-static vortex*. Pada gambar 2.14 (a) menunjukkan variasi distribusi tekanan dengan bilangan Reynolds pada  $L/D = 1,75$  dan  $d/D = 0,1$ . Pola aliran berubah dari B ke A pada rentang  $Re = (3,4 - 3,5) \times 10^4$ . Ada perbedaan yang mencolok antara pola A dan B pada bagian depan silinder sirkular. Untuk pola A, nilai  $C_P$  pada bagian depan silinder sirkular menurun sampai 0,5 karena penurunan kecepatan mendekati silinder sirkular. Untuk pola B, nilai  $C_P$  pada bagian depan silinder sirkular memiliki nilai negatif karena *quasi-static vortex* terbentuk diantara silinder pengganggu dan silinder sirkular, dan  $C_P$  maksimum pada 0,2-0,5 pada daerah *reattachment* dari *shear layer* yang terseparasi dari silinder pengganggu. Nilai minimum  $C_P$  pada  $\phi = 70 - 90^\circ$  ( $270 - 290^\circ$ ) menurun dan posisinya berpindah ke belakang seiring meningkatnya bilangan

Reynolds. *Base Pressure Coefficient* ( $C_{pb}$ ) naik seiring kenaikan bilangan Reynolds karena transisi dari laminar menjadi turbulen terjadi dan titik separasi mundur kebelakang seperti sebuah silinder tunggal pada daerah bilangan Reynolds kritis. Pada gambar 2.10 (b), didapatkan efek dari diameter silinder pengganggu di distribusi tekanan pada  $L/D = 1,75$  dan  $Re = 4,1 \times 10^4$ . Pola aliran A terjadi pada  $d/D \leq 0,05$  dan pola aliran B terjadi pada  $d/D \geq 0,75$ , nilai  $C_{pb}$  naik seiring kenaikan  $d/D$ .



Gambar 2. 14 Distribusi Tekanan di Dekat Silinder Sirkular. (a) Efek Re dan (b) Efek  $d/D$  (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Pergerakan titik separasi pada silinder sirkular ditunjukkan pada gambar 2.15. Garis putus-putus menunjukkan titik separasi dari silinder sirkular tunggal. Derajat dari  $\phi_s$  naik seiring dengan kenaikan  $d/D$ . Seiring bilangan Reynolds naik di atas  $3 \times 10^4$ , titik separasi berpindah ke belakang secara cepat, karena terbentuknya *separation bubble*.

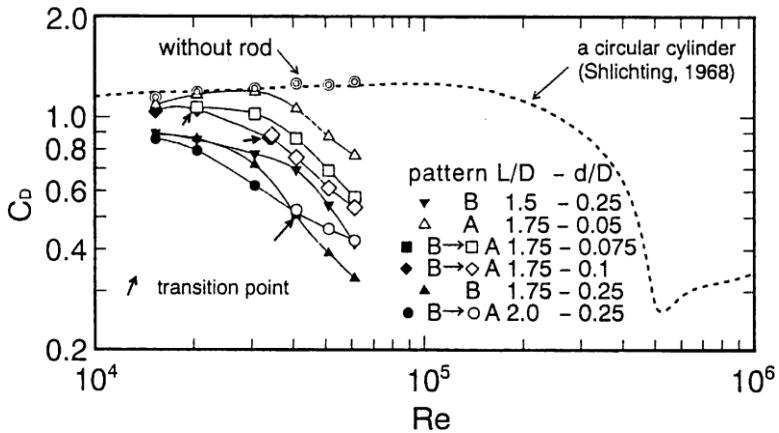


Gambar 2. 15 Titik Separasi (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Koefisien *pressure drag*  $C_D$  dari silinder sirkular ditunjukkan pada gambar 2.16. Garis putus-putus menunjukkan  $C_D$  pada silinder sirkular tunggal. Nilai  $C_D$  menurun seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds, khususnya, melebihi  $3 \times 10^4$  dengan cara yang sama seperti penurunan  $C_D$  dari silinder tunggal pada daerah bilangan Reynolds kritis. Nilai dari  $C_D$  menurun seiring meningkatnya  $d/D$  serta penurunan  $L/D$ . Saat ini penurunan drag tampaknya serupa dengan penurunan *drag* yang dapat di sebabkan oleh dimasukkannya turbulensi pada *free stream* atau dengan kekasaran permukaan yang menyebabkan transisi. Untuk kondisi  $L/D = 1,75$ ,  $d/D = 0,075$  ; 1 dan  $L/D = 2,0$ ,  $d/D = 0,25$ , aliran berubah dari pola B ke A. Penurunan *pressure drag* terjadi karena penurunan tekanan di depan permukaan silinder sirkular dan titik separasi berpindah ke belakang pada silinder sirkular. Oleh karena itu, pola B lebih efektif daripada pola A untuk mereduksi  $C_D$ . Kondisi optimum untuk penurunan *pressure drag coefficient* ( $C_D$ ) adalah  $d/D = 0,25$ ,  $L/D = 2,0$  untuk  $Re < 4,1 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,25$ ,  $L/D = 1,75$  untuk  $Re \geq 4,1 \times 10^4$  pada pola B. Sebagai contoh, nilai  $C_D$  pada  $d/D = 0,25$ ,  $L/D = 1,75$ ,  $Re = 6,2 \times 10^4$  adalah 0,33, pengurangan dari *pressure drag* kira-kira sebesar 73% dibandingkan dengan silinder sirkular tunggal. Pengurangan dari



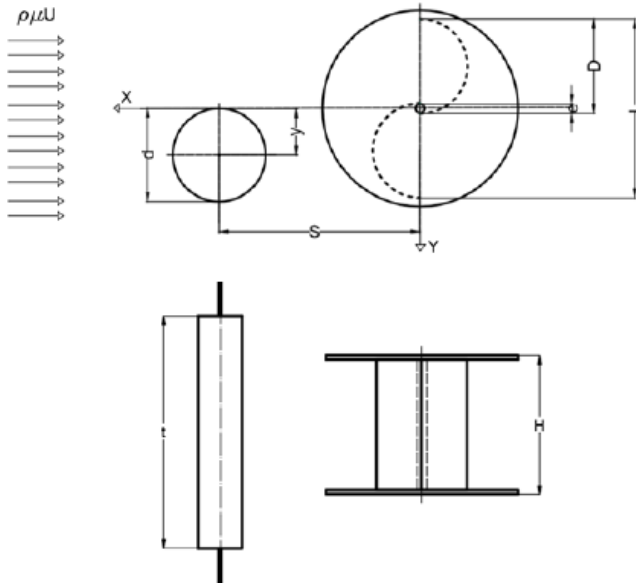
*total pressure drag coefficient* ( $C_D$ ) termasuk *drag* dari silinder pengganggu sebesar 63% dibandingkan dengan silinder tunggal.



Gambar 2. 16 Koefisien Drag (Tsutsui & Igarashi, 2002)

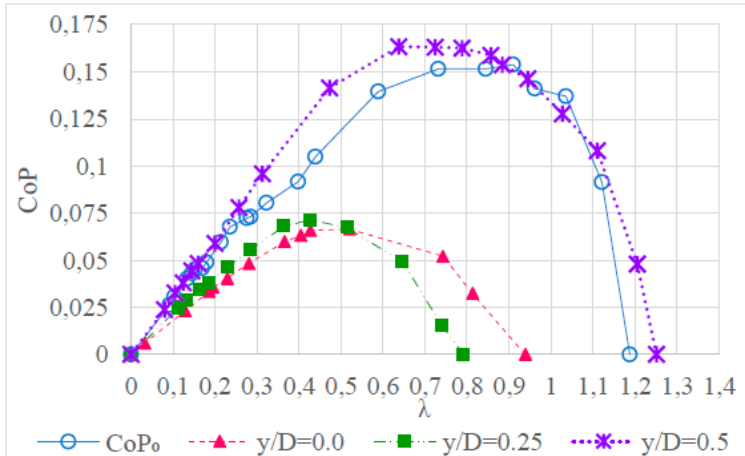
### 2.10.3. Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

Jasmi Aprilia Rustam (2018) melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan diameter ( $d$ ) sebesar 152 mm dan tinggi ( $h$ ) sebesar 400 mm. Turbin angin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua buah sudu dengan diameter sudu turbin ( $D$ ) sebesar 152,4 mm, tinggi ( $H$ ) sebesar 300,3 mm, diameter poros ( $e$ ) sebesar 19 mm, dan diameter end plate ( $D_0$ ) sebesar 321 mm.

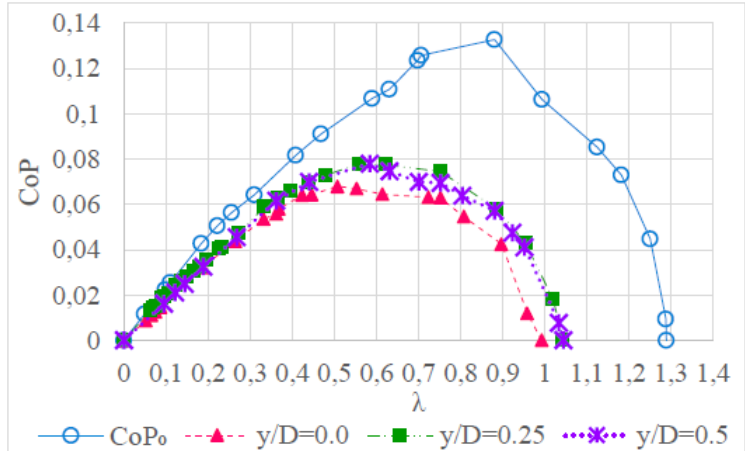


Gambar 2. 17 Skema Penelitian Pandangan Atas dan Samping  
(Rustam, 2018)

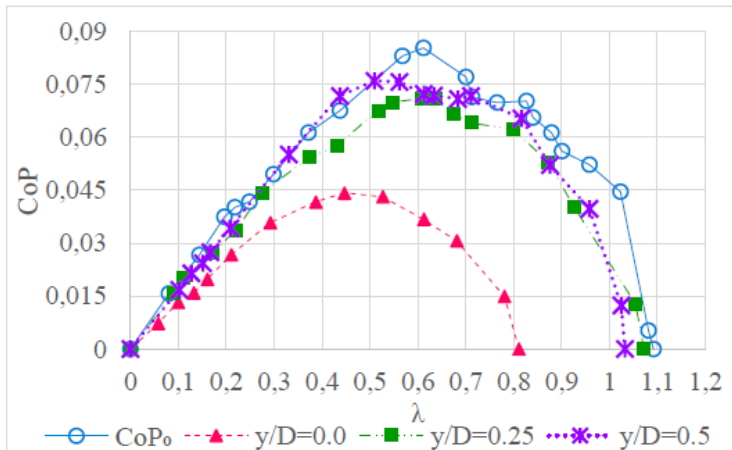
Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jarak  $S/D$  sebesar 2.0 dan rasio diameter silinder dengan diameter turbin  $d/D$  sebesar 0.5, dengan variasi bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$ ;  $14,5 \times 10^4$ ; dan  $17,8 \times 10^4$ , dan variasi  $y/D = 0,0$ ;  $0,25$ ;  $0,5$ . Berikut ini merupakan beberapa hasil dari penelitian yang didapat dari penelitian ini:



Gambar 2. 18 Grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada  $Re = 9.7 \times 10^4$  (Rustam, 2018)

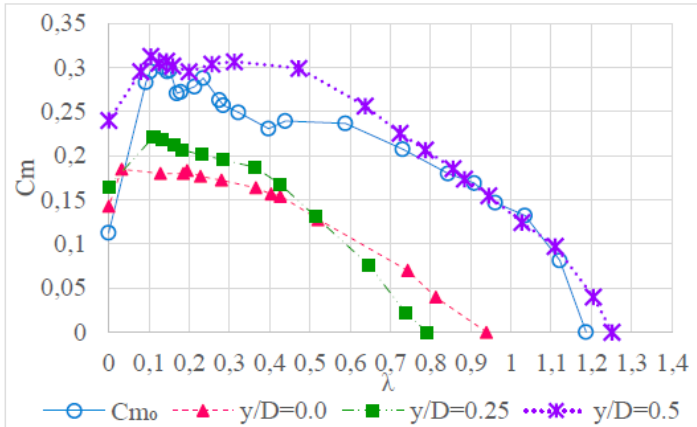


Gambar 2. 19 Grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada  $Re = 14.5 \times 10^4$  (Rustam, 2018)

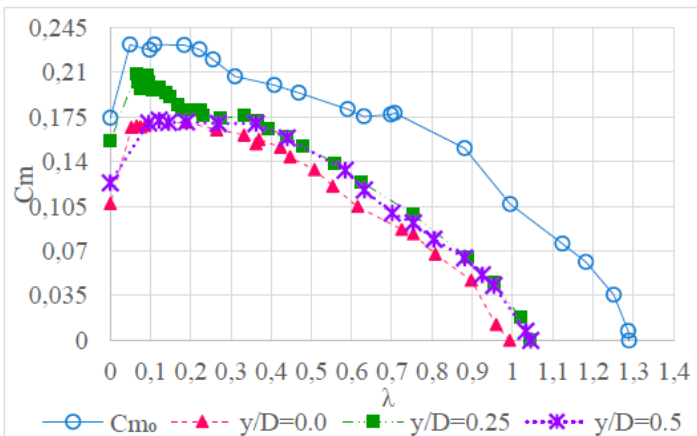


Gambar 2. 20 Grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada  $Re = 17.8 \times 10^4$  (Rustam, 2018)

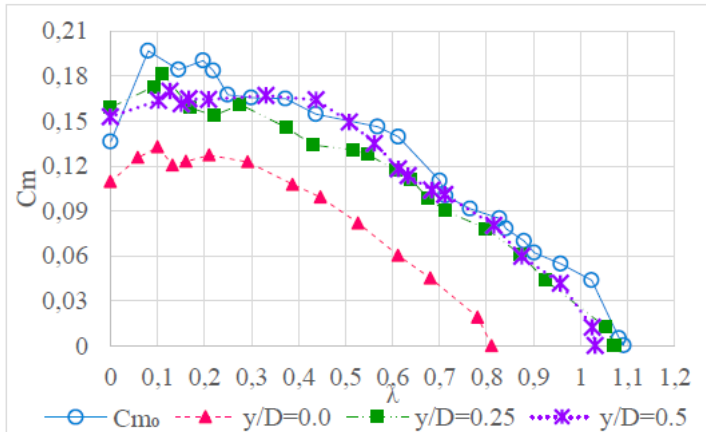
*Coefficient of power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi Reynolds number  $9.7 \times 10^4$ ,  $14.5 \times 10^4$ ,  $17.8 \times 10^4$  ditunjukkan oleh gambar 2.18, 2.19 dan 2.20. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi rasio jarak  $y/D = 0.5$  pada  $Re = 9.7 \times 10^4$  memiliki nilai *coefficient of power* maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *coefficient of power* turbin Savonius tanpa penghalang. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.062 kali. Sehingga dapat dikatakan pada variasi jarak  $y/D = 0.5$  untuk ketiga variasi Re diatas efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.



Gambar 2. 21 Grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada  $Re = 9.7 \times 10^4$  (Rustam, 2018)



Gambar 2. 22 Grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada  $Re = 14.5 \times 10^4$  (Rustam, 2018)



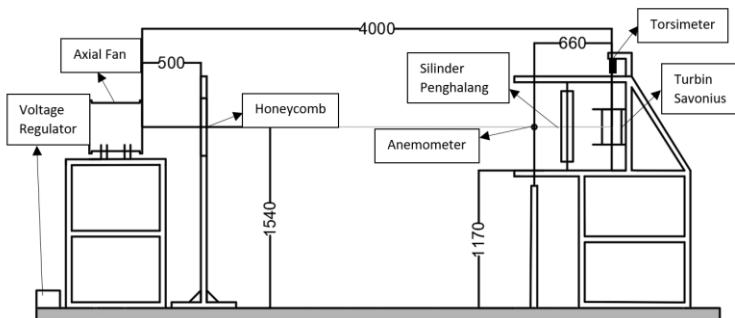
Gambar 2. 23 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada  $Re = 17.8 \times 10^4$  (Rustam, 2018)

*Coefficient of moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi Reynolds number  $9.7 \times 10^4$ ,  $14.5 \times 10^4$ ,  $17.8 \times 10^4$  ditunjukkan oleh gambar 2.21, 2.22 dan 2.23. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi rasio jarak  $y/D = 0.5$  memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *coefficient of moment* turbin Savonius tanpa penghalang. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.041 kali. Peningkatan nilai *coefficient of moment* ini mengindikasikan peningkatan nilai torsi dinamis turbin angina Savonius.

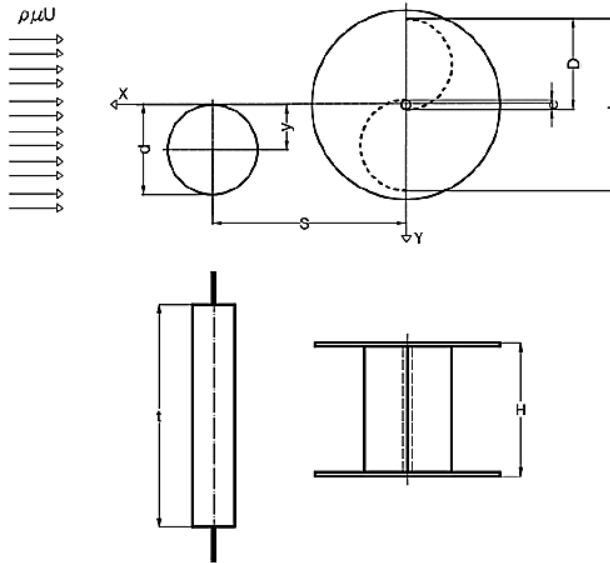
## BAB III METODOLOGI

### 3.1. Analisa Parameter

Skema penelitian dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini dapat dilihat dari gambar-gambar dibawah ini. Parameter-parameter yang mempengaruhi penelitian kali ini adalah densitas udara ( $\rho$ ), kecepatan fluida ( $v$ ), viskositas udara ( $\mu$ ), diameter penghalang ( $d$ ), diameter turbin ( $D$ ), dan letak penghalang terhadap *returning blade* ( $S/D$ ). Analisa ini dilakukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu penelitian yang akan dilakukan atau tidak. Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 dibawah ini merupakan skema dari penelitian, turbin, dan silinder penghalang.



Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius



Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur

- $D$  : Diameter sudu Turbin Savonius (m)  
 $S$  : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius paralel dengan datangnya angin (m)  
 $d$  : Diameter silinder pengganggu (m)  
 $H$  : Tinggi turbin Savonius (m)  
 $U$  : Diameter Turbin Savonius (m)  
 $V$  : Kecepatan aliran angin (m/s)  
 $\rho$  : Densitas udara ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\mu$  : Viskositas dinamik udara ( $\text{N.s/m}^2$ )  
 $y/D$  : 0,5  
 $d/D$  : 0,1; 0,2 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1,0.  
 $S/D$  : 2,2  
 $Re$  : 97.000 dan 134.000



### 3.2. Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP)

Untuk menganalisa dimensi nilai *coefficient of power* dalam penelitian ini digunakan pengaplikasian Teorema Phi Buckingham. Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisa dimensi nilai *coefficient of power* adalah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, U, D, d, n, h, y, S, H, e)$$

Jumlah parameter ( $n$ ) = 12 parameter, yaitu:

P	: <i>power</i> (watt)
$\rho$	: massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	: viskositas absolut udara ( $\text{N.s/m}^2$ )
U	: kecepatan aliran udara (m/s)
D	: diameter sudu turbin angin Savonius (m)
d	: diameter silinder pengganggu (m)
n	: putaran turbin (rpm)
h	: panjang silinder pengganggu (m)
y	: posisi silinder penghalang terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin
S	: jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
H	: tinggi turbin angin Savonius (m)
e	: diameter poros (m)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t
3. Menentukan dimensi primer yang akan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP

Parameter	P	$\rho$	$\mu$	U	D	d	n	h	y	S	H	e
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	$\frac{1}{t}$	L	L	L	L	L

4. Memilih *repeating parameter* (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan, yaitu:  $\rho$ , U, D sama dengan 3.
5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan =  $12 - 3 = 9$  grup tanpa dimensi. Grup tanpa dimensi tersebut antara lain :

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{P}{\rho U^3 D^2} & \pi_6 &= \frac{H}{D} \\ \pi_2 &= \frac{\mu}{\rho U D} & \pi_7 &= \frac{n D}{U} \\ \pi_3 &= \frac{D}{d} \\ \pi_4 &= \frac{S}{D} & \pi_8 &= \frac{h}{D} \\ \pi_5 &= \frac{e}{D} & \pi_9 &= \frac{y}{D} \end{aligned}$$

Dari analisa dimensi yang telah dilakukan, didapatkan grup tanpa dimensi sebagai berikut:

- $\pi_1$  : *Coefficient of Power*  
 $\pi_2$  : Bilangan Reynolds  
 $\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

- $\pi_4$  : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_5$  : Rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_6$  : Rasio tinggi dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_7$  : *Tip Speed Ratio*
- $\pi_8$  : Rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_9$  : Rasio jarak titik pusat silinder pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin dengan diameter sudu turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

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

Pada penelitian ini,  $\frac{S}{D}, \frac{h}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}$  dan  $\frac{e}{D}$  merupakan variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{n D}{U}$  dan  $\frac{d}{D}$  merupakan variabel yang divariasikan. Sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

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

Dalam penelitian ini nilai D sebanding dengan nilai L yaitu  $L = 2D - 2x - e$ , sehingga didapatkan persamaan:

$$\frac{P}{\rho U^3 L^2} = f_3\left(\frac{\mu}{\rho U L}, \frac{n D}{U}, \frac{d}{D}\right)$$

Atau dapat ditulis juga menjadi:

$$C_oP = f_4 \left( Re, \lambda, \frac{d}{D} \right)$$

### 3.3. Analisa Dimensi Coefficient of Moment ( $C_M$ )

Dalam menganalisa dimensi *coefficient of moment*, perlu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

$$T = f(\rho, \mu, U, D, d, n, h, y, S, H, e)$$

Jumlah parameter ( $n$ ) = 12 parameter, yaitu:

$T$	: Torsi (N.m)
$\rho$	: Massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	: Viskositas absolut udara ( $\text{N.s/m}^2$ )
$U$	: Kecepatan aliran udara (m/s)
$D$	: Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
$d$	: Diameter silinder pengganggu (m)
$n$	: Putaran turbin (rpm)
$h$	: Panjang silinder pengganggu (m)
$y$	: Posisi silinder penghalang terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
$S$	: Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
$H$	: Tinggi turbin angin Savonius (m)
$e$	: Diameter poros

2. Menentukan grup dimensi primer yang akan digunakan, yaitu M, L, t

3. Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM

Parameter	T	$\rho$	$\mu$	U	D	d	n	h	y	S	H	e
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	$\frac{1}{t}$	L	L	L	L	L

4. Memilih *repeating parameter* (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan, yaitu:  $\rho$ , U, D sama dengan 3.
5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan yaitu  $12 - 3 = 9$  grup tak berdimensi.

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

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

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

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

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

$$\pi_6 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_7 = \frac{n D}{U}$$

$$\pi_8 = \frac{h}{D}$$

$$\pi_9 = \frac{y}{D}$$

Dari analisa dimensi yang telah dilakukan, didapatkan grup tanpa dimensi sebagai berikut:

$\pi_1$  : *Coefficient of Moment*

$\pi_2$  : Bilangan Reynolds

$\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

$\pi_4$  : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius

- $\pi_5$  : Rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius  
 $\pi_6$  : Rasio tinggi dengan diameter sudu turbin Savonius  
 $\pi_7$  : *Tip Speed Ratio*  
 $\pi_8$  : Rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius  
 $\pi_9$  : Rasio jarak titik pusat silinder pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin dengan diameter sudu turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$

$$\frac{T}{\rho U^2 D^3} = f_1 \left( \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{e}{D}, \frac{H}{D}, \frac{nD}{U}, \frac{h}{D}, \frac{y}{D} \right)$$

Pada penelitian ini,  $\frac{S}{D}, \frac{e}{D}, \frac{h}{D}, \frac{y}{D}$  dan  $\frac{H}{D}$  merupakan variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{nD}{U}$  dan  $\frac{d}{D}$  merupakan variabel yang divariasikan. Sehingga persamannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{T}{\rho U^2 D^3} = f_2 \left( \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{nD}{U}, \frac{d}{D} \right)$$

Dalam penelitian ini nilai D sebanding dengan nilai L yaitu  $L = 2D - 2x - e$ , sehingga didapatkan persamaan:

$$\frac{T}{\rho U^2 L^3} = f_3 \left( \frac{\mu}{\rho U L}, \frac{nD}{U}, \frac{d}{D} \right)$$

Atau dapat juga ditulis menjadi:

$$CM = f_4 \left( Re, \lambda, \frac{d}{D} \right)$$

### 3.4. Peralatan Penelitian

Pada pelaksanaan penelitian ini, digunakan peralatan-peralatan penunjang agar didapatkan hasil penelitian yang baik. Berikut merupakan peralatan-peralatan yang dipakai

#### 3.4.1. Axial Fan

Pada penelitian ini *axial fan* digunakan sebagai sumber fluida angin yang digunakan untuk menghasilkan kecepatan angin guna memutar sudu turbin Savonius. Axial fan yang digunakan yaitu CKE SPV-18 seperti pada gambar 3.3 dan memiliki spesifikasi pada tabel 3.3.



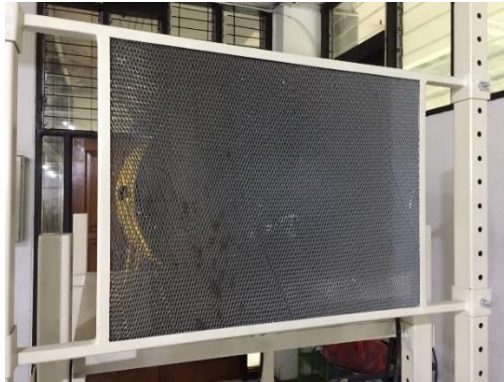
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18

Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18

Spesifikasi <i>Axial Fan</i>	
Diameter	450 mm
RPM	2850
Tekanan Statis	520 Pa
Tegangan	220 – 240 V
Air Flow	2,09 m <sup>3</sup> /s
Phase	1

### 3.4.2. Honeycomb

Honeycomb pada penelitian ini digunakan guna menyeragamkan fluida angin yang bergerak menuju turun Savonius. Alat ini diletakkan di antara axial fan dan turbin Savonius.



Gambar 3. 4 Honeycomb

Adapun spesifikasi *honeycomb* ditunjukkan pada tabel 3.4

Tabel 3. 4 Spesifikasi Honeycomb

Spesifikasi <i>Honeycomb</i>	
Panjang sisi <i>frame</i>	750 mm
Panjang sisi <i>honeycomb</i>	630 mm
Tebal <i>frame</i>	30 mm
Tebal <i>honeycomb</i>	20 mm
Lebar sisi <i>frame</i>	490 mm
Lebar sisi <i>honeycomb</i>	460 mm
<i>Meshing size</i>	0,0248 lubang/mm <sup>2</sup>



### 3.4.3. Turbin Savonius

Pada penelitian ini digunakan turbin angin tipe Savonius seperti pada gambar 3.5 dan spesifikasi pada tabel 3.5.



Gambar 3. 5 Turbin Savonius

Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

Spesifikasi Turbin Angin Savonius	
Diameter sudu turbin (D)	167,1 mm
Tinggi Turbin (H)	298 mm
Diameter Poros (e)	19 mm
Diameter <i>end plate</i> (Do)	320 mm
Tebal <i>end plate</i>	1,8 mm
Tebal sudu turbin (x)	2,95 mm

#### 3.4.4. Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini silinder penghalang seperti pada gambar 3.6 digunakan untuk mengurangi gaya *drag* pada turbin Savonius sehingga diharapkan torsi dari turbin Savonius meningkat. Silinder penghalang diletakkan didepan *returning blade* dari turbin Savonius. Silinder ini diletakkan didepan *returning blade* dengan rasio perbandingan jarak turbin dengan diameter turbin sebesar  $(S/D) = 2,2$ .



Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu

#### 3.4.5. Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini penyangga turbin angin digunakan untuk menopang turbin Savonius dan plat penghalang seperti gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius

### 3.4.6. Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur guna menunjang untuk mendapatkan nilai putaran serta torsi yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

#### a. Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer model Omega HHF141 seperti pada gambar 3.8 dengan *high resolution* sebesar

0,01 m/s. Spesifikasi dari anemometer ini dapat dilihat pada tabel 3.6.



Gambar 3. 8 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 6 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141

<b>Range</b>	2,75 inch Air Probe	: 40 to 7800 ft/min : 0.2 to 40.00 m/sec
	Air Probe AP100	: 300 to 6800 ft/min : 1.5 to 35.00 m/sec
<b>Accuracy</b>	Air Velocity	AP275: $\pm 1.0\%$ of reading $\pm 1$ digit AP100: $\pm(0.50\%$ of F.S. $+0.75\%$ of reading $+1$ digit
<b>Resolution</b>	1 ft/min or 0.01 m/sec	
<b>Operating Temperature</b>	Instrument	: 32° to 125°F (0° to 50°C)
	Probes	: -4° to 212°F (-20° to 100°C)
<b>Power Supply</b>	3 AA alkaline batteries	
<b>Battery Life</b>	Approx. 150 hours, without backlight	
<b>Battery Check</b>	Automatic Low Battery display	
<b>Display</b>	0.5" LCD, 4 digits, with LED backlight	

Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan seperti mph, ft/min, knots, m/s dan km/h. Selain itu pada alat ini juga dapat mengukur suhu udara dalam satuan °F maupun °C.

## b. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA HHT12* seperti pada gambar 3.9 dengan akurasi pembacaan sebesar 0,01%. Spesifikasi tachometer dapat dilihat pada tabel 3.7



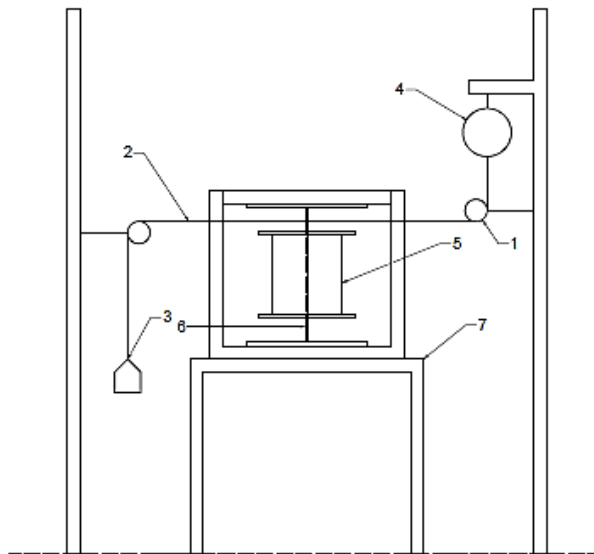
Gambar 3. 9 Tachometer

Tabel 3. 7 Spesifikasi Tachometer

<b>SPESIFIKASI</b>	
<b>Range</b>	5 to 99.999 rpm
<b>Accuracy</b>	0,01 % of reading or $\pm 1$ digit
<b>Resolution</b>	0,001 to 1,0 rpm
<b>Display</b>	5-digit alphanumeric LCD
<b>Memory</b>	Max, min and last
<b>Power</b>	2 "AA" 1,5 V dc batteries
<b>Environmental</b>	5 to 40° C

### c. *Brake Dynamometer*

*Brake dynamometer* digunakan untuk pengukuran torsi dinamis pada penelitian ini dengan timbangan sebagai spring balance. Skema pemasangan brake dynamometer adalah sebagai berikut



Gambar 3. 10 Skema metoda pengukuran torsi dinamis

Keterangan:

1. Sistem *pulley*
2. Benang nilon LAZER
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

#### d. Torque meter

*Torque meter* merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi dari suatu objek. *Torque meter* yang digunakan dalam penelitian ini adalah torque meter LUTRON model TQ-8800 seperti pada gambar 3.11 dengan *high resolution* sebesar 0,1 Newton-cm. Spesifikasi torque meter ini dapat dilihat pada tabel 3.9.



Gambar 3. 11 Torque meter

Tabel 3. 8 Spesifikasi torque meter

<i>Display Unit/ Resolution</i>				
<i>Unit</i>	<i>Max. range</i>	<i>High resolution</i>	<i>Low resolution</i>	<i>Over load protection range</i>
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. Voltage Regulator

*Voltage Regulator* merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar dari fan. *Voltage regulator* yang digunakan adalah Ling Bridge TDGC 2J-3 seperti pada gambar 3.12 untuk mengatur kecepatan fan, perlu mengubah *voltage output* dari regulator. Untuk spesifikasi lengkapnya dapat dilihat di tabel 3.9.



Gambar 3. 12 Voltage Regulator

Tabel 3. 9 Spesifikasi Voltage Regulator

TDGC <sub>2</sub>				
Capacity	Phase	Input	Ouput	Frekuensi
3 KVa	$\Phi$ 1	220 V	0-250 V	50-60 Hz

### f. Neraca Pegas

Neraca pegas pada penelitian ini digunakan untuk mengukur nilai S (gram) guna mendapatkan nilai torsi dinamis pada brake dynamometer. Neraca pegas yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.13.





Gambar 3. 13 Neraca Pegas

### g. Massa Pemberat

Pada penelitian ini digunakan pemberat untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dan variasi *tip speed ratio* pada brake dynamometer. Pemberat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Massa Pemberat

### 3.5. Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 3.5.1. Torsi Dinamis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan tachometer.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu 97.000.
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros turbin tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *tachometer*.
7. Mengukur torsi dinamis tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *brake dynamometer*.
8. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu untuk  $Re = 97.000$  sebesar 5 gr dan 10 gr;  $Re = 136.000$  sebesar 10 gr dan 20 gr;
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
10. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 – 10 hingga turbin Savonius berhenti berputar atau sampai mendapatkan *tip speed ratio* = 0.
12. Mengulangi langkah 5 – 11 dengan mengubah bilangan  $Reynolds = 136.000$
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur diameter turbin Savoius dan diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) sebesar 0,1.

14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada bilangan Reynolds 97.000.
15. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *tachometer*.
16. Mengukur torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan *brake dynamometer*.
17. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu untuk  $Re = 97.000$  sebesar 5 gr dan 10 gr;  $Re = 136.000$  sebesar 10 gr dan 20 gr; Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
18. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
19. Mengulangi langkah 17 – 19 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
20. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah bilangan Reynolds = 136.000
21. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi  $d/D$  menjadi 0,1 ; 0,2 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1,0.
22. Mematikan *axial fan*.
23. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran ( $n$ ) terhadap  $\lambda$  serta bilangan Reynolds, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ .

### 3.5.2. Torsi Statis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan menggunakan *voltage regulator* sehingga mendapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu 97.000.
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan *torque meter*.
7. Mematikan *axial fan*.
8. Mengulangi langkah 3 - 7 dengan variasi sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
9. Mengulangi langkah 3 - 8 dengan mengubah bilangan *Reynolds* menjadi 136.000
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur diameter turbin Savoius dan diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) sebesar 0,5.
11. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer pada bilangan *Reynolds* = 97.000.
13. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur

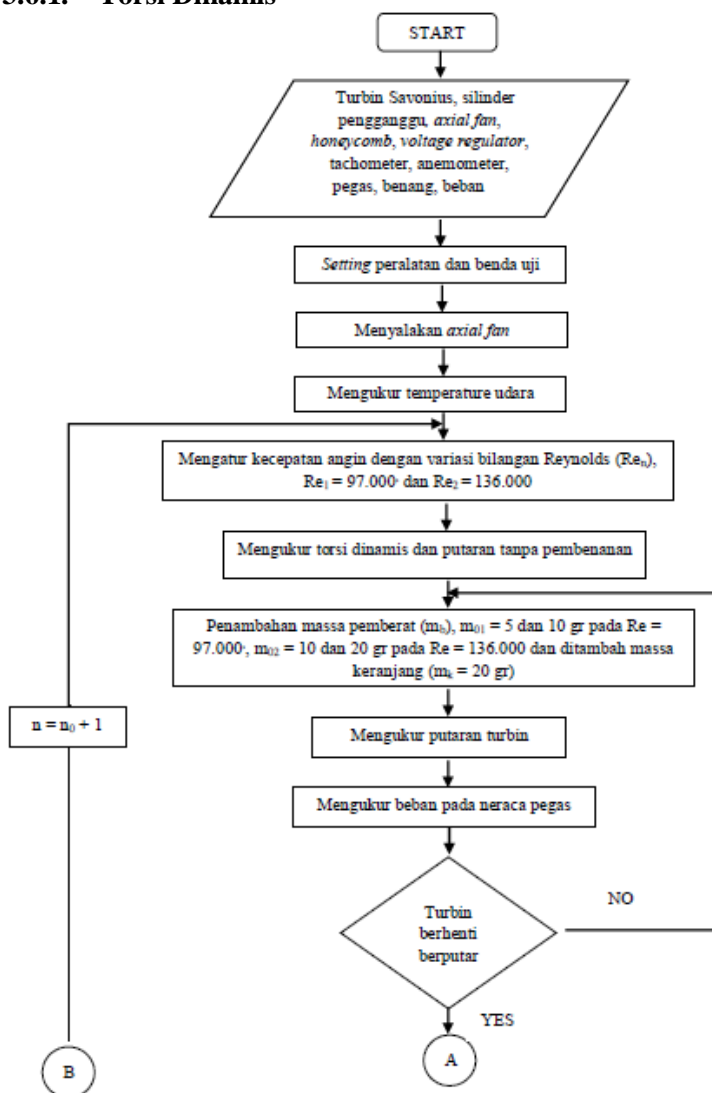
torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.

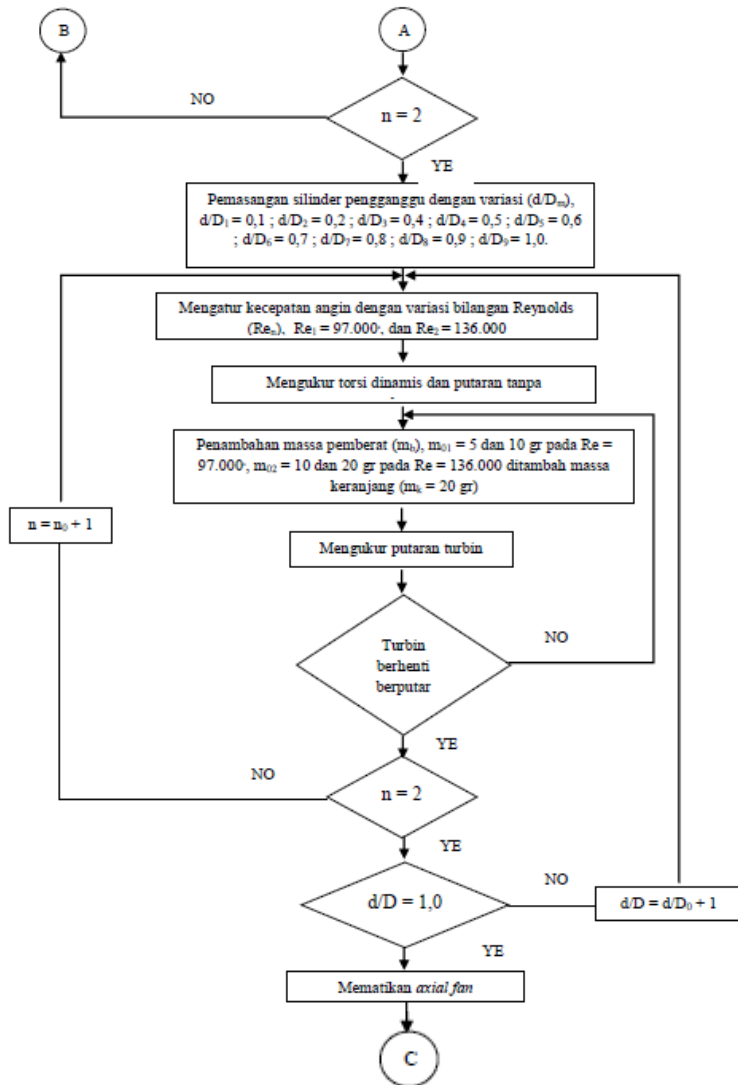
14. Mematikan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 11 - 14 dengan mengubah sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
16. Mengulangi langkah 11 - 15 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi 136.000
17. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting* grafik perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\theta$ .

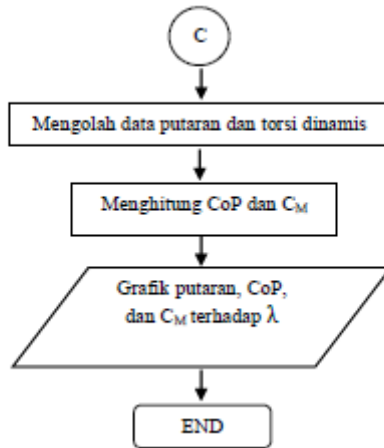
### **3.6. *Flowchart* Penelitian**

*Flowchart* yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

### 3.6.1. Torsi Dinamis



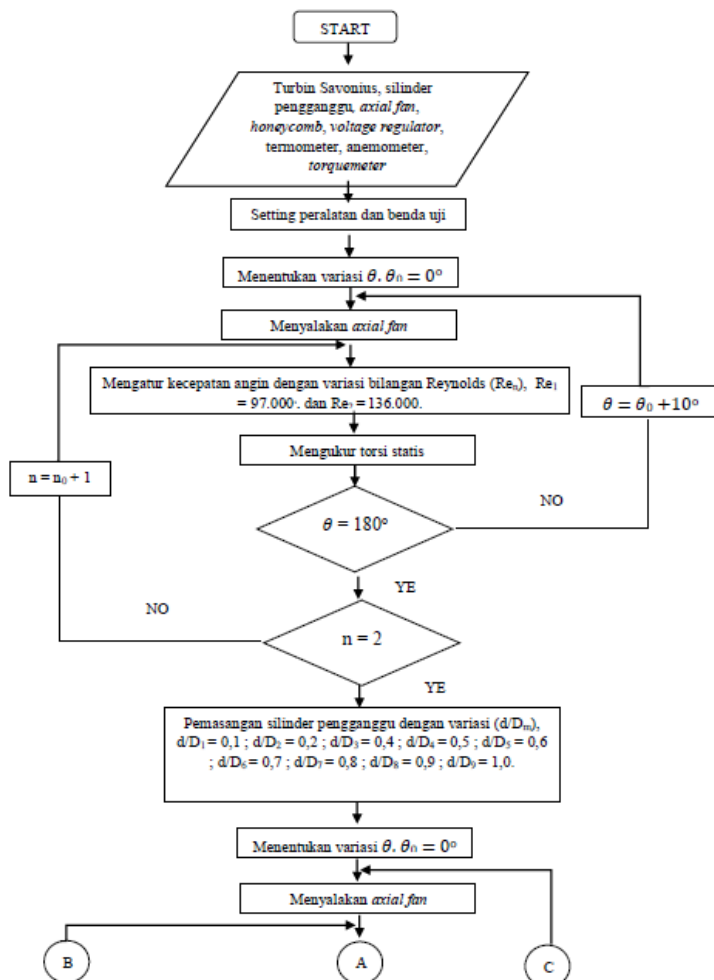


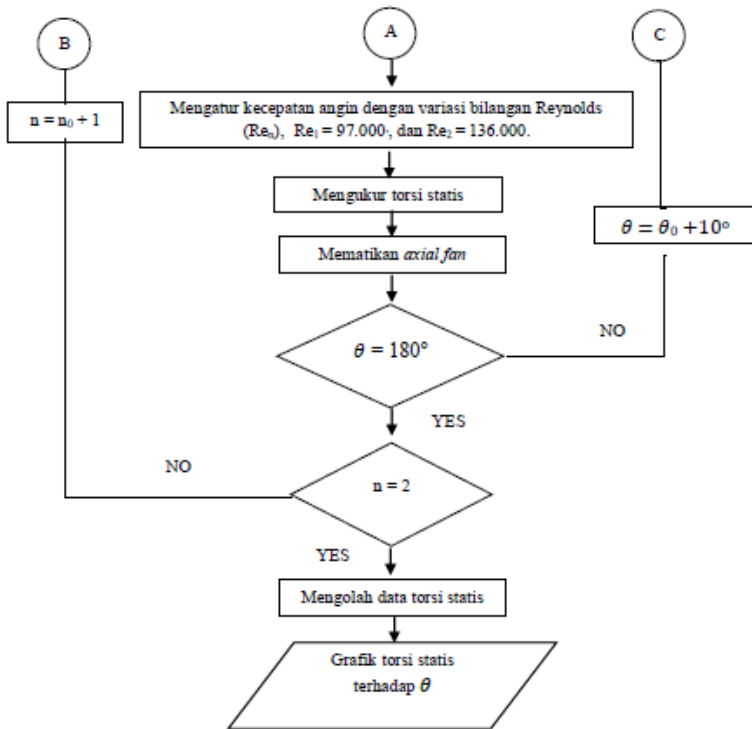


Gambar 3. 15 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis



### 3.6.2. Torsi Statis





Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Statis

### 3.7. Perhitungan *Uncertainty*

Pada suatu eksperimen, perhitungan *uncertainty* (ketidakpastian) penting untuk di analisis. Perhitungan *uncertainty* ini berfungsi untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam suatu eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan *uncertainty*, diambil dari data *coefficient of power* di titik maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di  $d/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,2$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Berikut ini merupakan contoh

perhitungan *uncertainty tip speed ratio* ( $\lambda$ ) pada titik maksimum *coefficient of power*.

- *Uncertainty* pada pembacaan *tip speed ratio* ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{\omega R}{U}$$

$$\lambda = \omega R U^{-1}$$

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} + \frac{\partial \lambda}{\partial R} + \frac{\partial \lambda}{\partial U}$$

$$d\lambda = R u^{-1} d\omega + \omega U^{-1} dR + (-U^{-2} \omega R) dU$$

$$u_{\lambda, \omega} = \frac{\delta \lambda \omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} u_{\omega} = u_{\omega}$$

$$u_{\lambda, R} = \frac{\delta \lambda R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R} u_R = u_R$$

$$u_{\lambda, U} = \frac{\delta \lambda U}{\lambda} = \frac{U}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial U} u_U = u_U$$

$$u_{\lambda} = \pm \{ [u_{\omega}]^2 + [u_R]^2 + [-u_U]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\lambda} = \pm \{ u_{\omega}^2 + u_R^2 + u_U^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

*Uncertainty* pada pembacaan putaran ( $\omega$ )

$$u_{\omega} = \pm \frac{0,1}{26,481} = \pm 3,77 \times 10^{-3}$$

*Uncertainty* pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{0,5}{154,5} = \pm 3,23 \times 10^{-3}$$

*Uncertainty* pada pembacaan kecepatan (U)

$$u_U = \pm \frac{0,01}{5} = \pm 0,002$$

Selanjutnya substitusi hasil *uncertainty*  $\omega$ , R, dan U ke persamaan 3.1 sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

$$u_\lambda = \pm \{ u_\omega^2 + u_R^2 + u_U^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm \{ (3,77 \times 10^{-3})^2 + (3,23 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 5,36 \times 10^{-3}$$

$$u_\lambda = \pm 0,54\%$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *coefficient of power* (CoP)

$$u_{CoP} = \pm \{ u_{Td}^2 + u_\omega^2 + u_\rho^2 + u_U^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,046)^2 + (3,77 \times 10^{-3})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2$$

$$+ (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0469$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *coefficient of moment* (C<sub>M</sub>)

$$u_{CM} = \pm \{ u_{Td}^2 + u_\rho^2 + u_U^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm \{ (0,046)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 +$$

$$(2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 0,0472$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

$$u_{RE} = \pm \{ u_\rho^2 + u_U^2 + u_L^2 + (-u_\mu)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm \{ (3,32 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,62 \times 10^{-3})^2 +$$

$$(-1,24 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 4,51 \times 10^{-3}$$

Berikut nilai dari *uncertainty* yang didapatkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada CoP maksimum turbin angin Savonius dengan penempatan silinder pada ukuran diameter  $d/D = 0,5$  dan jarak  $S/D = 2,2$  sebagai berikut.

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<b><i>Tip Speed Ratio (<math>\lambda</math>)</i></b>	0,54%
<b><i>Coefficient of Power (CoP)</i></b>	4,69%
<b><i>Coefficient of Moment (<math>C_M</math>)</i></b>	4,72%
<b><i>Reynolds Number (Re)</i></b>	0,451%

### 3.8. Hasil yang Diperoleh

Pada penelitian ini, hasil yang akan diperoleh adalah:

1. Grafik torsi statis ( $T_s$  dan  $T_{s_0}$ ) sebagai fungsi sudut ( $\theta$ ).
2. Grafik *Coefficient of Power* ( $CoP$  dan  $CoP_0$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).
3. Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_m$  dan  $C_{m_0}$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Contoh Perhitungan

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data dengan menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan beberapa hal yang diasumsikan seperti aliran *steady* dan *incompressible* yang memiliki nilai sebagai berikut:

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar ( $P_{\text{std}}$ ) =  $1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .
2. Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_{\text{std}}$ ) = 288,2 K.
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_{\text{std}}$ ) =  $1,225 \text{ kg/m}^3$ .

Data diatas merupakan data standar yang akan digunakan untuk contoh perhitungan dan perhitungan pada penelitian ini.

#### 4.1.1. Perhitungan Bilangan Reynolds

- **Massa Jenis Udara ( $\rho$ )**

Perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai massa jenis udara dalam menghitung besar gaya *drag* pada penelitian ini dapat

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

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

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

Keadaan 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga  $P_1 = P_2$  dan massa udara pada keadaan 1 dan 2 maka

$m_1 = m_2$ . Berdasarkan batasan tersebut, maka persamaan 4.2 menjadi:

$$\rho = \frac{T_1 \rho_1}{T_2} \quad (4.3)$$

$$\rho_2 = \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{301,5 \text{ K}}$$

$$\rho_2 = 1,17 \text{ kg/m}^3$$

- **Viskositas Udara**

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

$$\mu = \frac{b T^{3/2}}{S+T} \quad (4.4)$$

$$b = 1,458 \times 10^{-6}$$

$$S = 110,4 \text{ K}$$

$$T = \text{temperatur saat penelitian} = 301,5 \text{ K}$$

Dari nilai-nilai tersebut, kemudian dimasukkan kedalam persamaan 4.4, sehingga didapatkan:

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{1/2}} (301,5 \text{ K})^{3/2}}{(110,4 + 301,5) \text{ K}}$$

$$\mu = 1,86 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

- **Reynolds Number**

Berdasarkan persamaan 2.1, maka kecepatan pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4.5)$$



dimana:

$$\begin{aligned}
 L &= \text{panjang karakteristik yang diukur dari medan aliran, dalam kasus ini adalah diameter turbin} \\
 &= 2D - e - 2x \\
 &= (2 \times 167,1) - 19 - (2 \times 2,95) \\
 &= 309,3 \text{ mm} = 0,309 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Setelah mendapatkan nilai panjang karakteristik, nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan 4.5, sehingga untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  didapatkan :

$$Re = \frac{1,17 \text{ kg/m}^3 \times 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,309}{(1,86 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}})} = 97185 \approx 9,7 \times 10^4$$

#### 4.1.2. Perhitungan Tip Speed Ratio

Persamaan untuk mendapatkan nilai *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (4.6)$$

dimana :

$n$  = jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm) pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \pi (176,34)}{60} = 18,457 \text{ rad/s}$$

$R$  = jari-jari turbin angin Savonius

$$\begin{aligned}
 &= \frac{L}{2} = \frac{(2D - e - 2x)}{2} = \frac{(2 \times 167,1) - 19 - (2 \times 2,95)}{2} \\
 &= 154,5 \text{ mm} = 0,154 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$V$  = kecepatan pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  yaitu 5 m/s

Sehingga didapatkan nilai:

$$\lambda = \frac{18,547 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,154 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,573$$

#### 4.1.3. Perhitungan Coefficient of Power (CoP)

Persamaan untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{|m - s| g r \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

dimana:

$A$  = Luas penampang pada turbin angin Savonius yang ditabrak oleh angin

$$= L \cdot H = 0,309 \text{ m} \times 0,283 \text{ m} = 0,092 \text{ m}^2$$

$r$  = Jari-jari silinder yang menerima beban

$$= 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$$

$\omega$  = Kecepatan sudut turbin angin Savonius =  $18,457 \text{ rad/s}$

$m$  = Beban yang diberikan =  $29 \text{ g}$

$s$  = Pembacaan beban pada neraca pegas =  $210 \text{ g}$

Sehingga didapatkan nilai CoP:

$$CoP = \frac{\left| \frac{29 - 210}{1000} \right| \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,009 \text{ m} \cdot 18,457 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,065 \text{ m}^2 \cdot \left( 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3} = 0,062$$

#### 4.1.4. Perhitungan Coefficient of Moment

Berdasarkan persamaan 2.9 dan 2.10 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah sebagai berikut :

$$C_M = \frac{T_D}{T_\infty} \quad (2.9)$$

$$C_M = \frac{(m-s) g \cdot r}{T_\infty} \quad (2.10)$$

dimana:

$T_\infty$  = torsi teoritis (N.m) = 20,38 N.cm = 0,2038 N.m

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ) = 9,81  $m/s^2$

$m$  = massa pembebanan (kg) = 6 gr = 0,006 kg

$r$  = jari-jari silinder yang menerima beban

= 12,5 mm = 0,0125 m

$s$  = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 0,15 kg

Sehingga didapatkan nilai  $C_M$ :

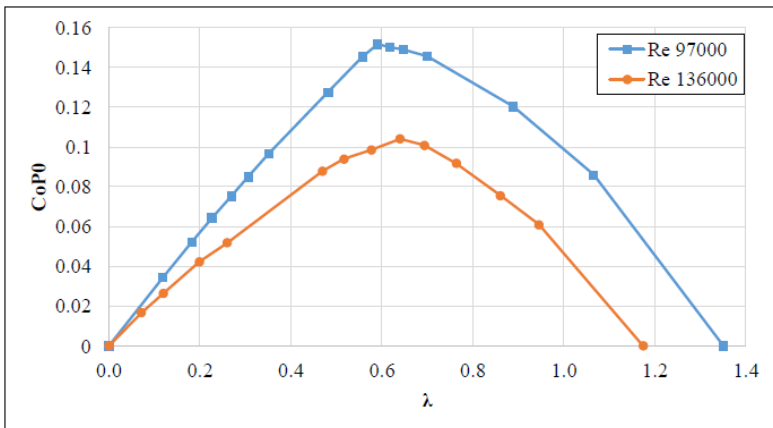
$$C_M = \frac{(0,006-0,15) \cdot 9,81 \cdot 0,0125}{0,2038} = 0,8663$$

#### 4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pengukuran performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bertujuan untuk mengetahui kondisi awal performa turbin angin Savonius yang diuji. Hasil performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini akan dianalisis perbandingan performa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu. Analisis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dilakukan dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s dan 7 m/s sesuai dengan bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Analisis yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan Torsi Statis yang dihasilkan turbin.

#### 4.2.1. Analisa Nilai *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $CoP$  terhadap  $TSR$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran ini dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.1



Gambar 4. 1 Grafik *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

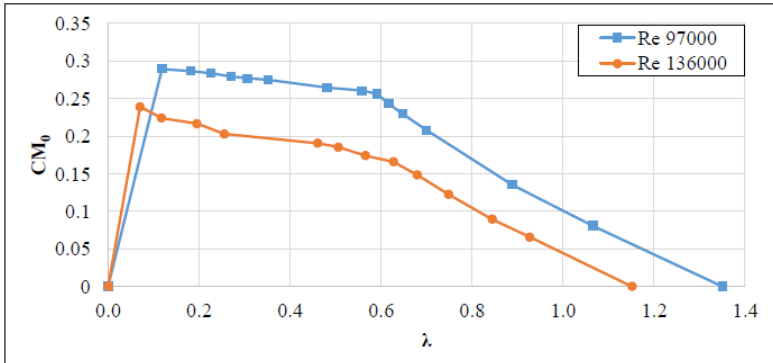
Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai  $CoP$  pada setiap bilangan Reynolds akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai  $TSR$ . Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari  $CoP$  dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan bahwa

nilai CoP maksimum sebesar 0,152 pada  $TSR = 0,591$ . Lalu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai CoP maksimum sebesar 0,104 pada  $TSR = 0,628$ . Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa nilai CoP maksimum tertinggi terjadi pada saat bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan nilai CoP maksimum terendah terjadi pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ .

Dapat dilihat dari grafik bahwa nilai  $CoP_0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  lebih tinggi dari  $13,6 \times 10^4$ . Jika dilihat dari grafik tersebut, semakin tingginya bilangan Reynolds tidak berbanding lurus dengan peningkatan CoP yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin yang tinggi akan membuat putaran turbin berputar dengan cepat dan turbin akan membentuk *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna, sehingga daya turbin yang dihasilkan akan rendah. Hal ini dapat dibuktikan pada eksperimen yang dilakukan oleh Mahmoud, et. al. 2012 pada gambar 2.12 yang menunjukkan grafik nilai CoP turbin angin Savonius terhadap kecepatan angin. Pada grafik tersebut didapatkan grafik berbentuk parabolik dan mempunyai kecepatan angin optimum. Sehingga dapat diartikan peningkatan kecepatan angin tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan CoP.

#### **4.2.2. Analisa Nilai Coefficient of Moment ( $CM_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu**

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $C_M$  terhadap TSR pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran ini dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.2.



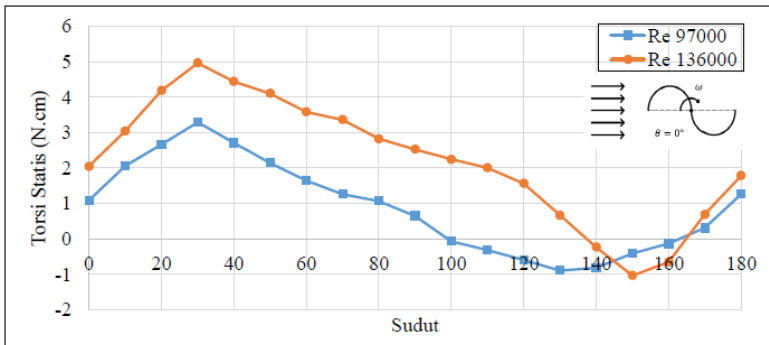
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment ( $CM_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.2 dapat dilihat dari grafik  $CM$  terhadap TSR memiliki *trendline* yang cenderung turun seiring meningkatnya TSR. Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari  $CM_0$  dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai  $CM_0$  maksimum didapatkan pada saat torsi dinamis maksimum dimana pada saat turbin akan berhenti berputar. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai  $C_M$  maksimum yang terjadi adalah sebesar 0,283 pada TSR = 0,121. Lalu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai  $CM_0$  maksimum yang terjadi sebesar 0,234 pada TSR = 0,072.

Hal ini menunjukkan bahwa selain torsi dinamis, variasi dari bilangan Reynolds juga mempengaruhi kecepatan aliran fluida yang kemudian akan mempengaruhi nilai *coefficient of moment* turbin angin Savonius.

#### 4.2.3. Analisa Nilai Torsi Statis ( $T_{s0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Dari penelitian yang sudah dilakukan didapatkan nilai torsi statis terhadap sudut pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran torsi statis ini dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur *torque* meter untuk mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius. Pengambilan data torsi statis ini dilakukan saat kondisi turbin angin Savonius diam yang kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds tertentu. Pengukuran ini dilakukan pada turbin angin Savonius berada pada sudut  $0^\circ$  searah dengan aliran udara hingga  $180^\circ$  dengan kenaikan sebesar  $10^\circ$ . Data hasil penelitian ini dapat dilihat dari gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis ( $T_{s0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada setiap bilangan Reynolds. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai torsi statis mengalami peningkatan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ . Lalu nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  mengalami

penurunan hingga sudut  $130^\circ$  sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  mengalami penurunan hingga sudut  $150^\circ$ . Lalu nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds tersebut mengalami kenaikan hingga sudut  $180^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar  $3,28$  Ncm pada sudut  $30^\circ$  dan nilai torsi statis minimum sebesar  $-0,9$  pada sudut  $130^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar  $4,96$  Ncm pada sudut  $30^\circ$  dan nilai torsi statis minimum sebesar  $-1,04$  pada sudut  $150^\circ$ . Torsi statis negatif didapatkan pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  pada sudut  $100^\circ$  sampai  $160^\circ$ , bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  pada sudut  $140^\circ$  sampai  $160^\circ$ . Torsi statis maksimum dan minimum terjadi pada saat bilangan Reynolds sebesar  $13,6 \times 10^4$  karena semakin besar bilangan Reynolds semakin besar pula kecepatan dan gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu mempunyai *no-self starting* sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut  $30^\circ$  dan torsi negatif terbesar pada sudut  $130^\circ$  untuk  $Re$   $9,7 \times 10^4$  dan  $150^\circ$  untuk  $Re$   $13,6 \times 10^4$ . Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut  $30^\circ$  sampai dengan sudut  $130^\circ$  dan  $150^\circ$  dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekat datangnya angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua *blades* akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga. Pada sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$  dan pada sudut  $130^\circ$  sampai  $180^\circ$  dan sudut  $150^\circ$  sampai  $180^\circ$  terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga



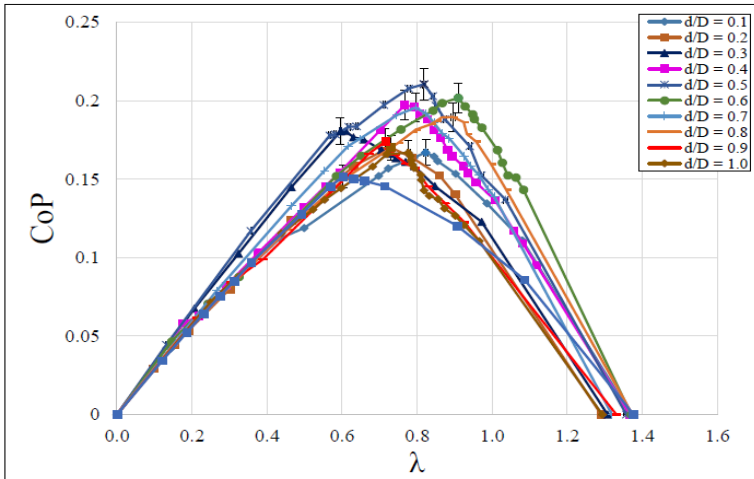
selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut  $30^\circ$  merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis maksimum.

### **4.3. Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu**

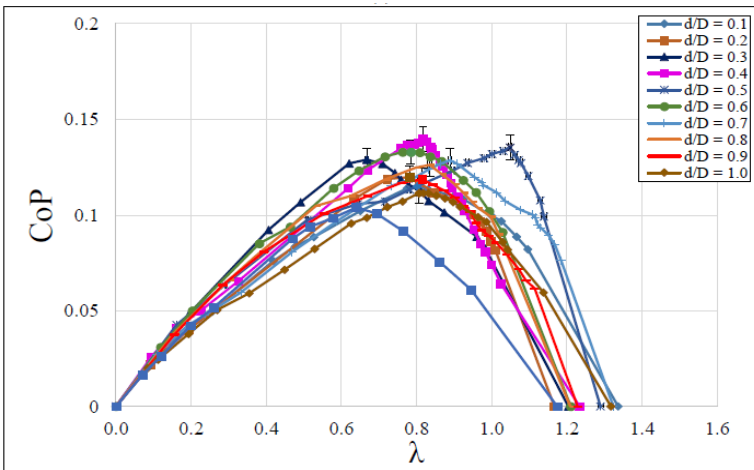
Analisa ini dilakukan dengan peletakan silinder pengganggu di depan *returning* blade turbin angin Savonius dengan variasi  $(S/D) = 2,2$  dan  $(d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ . Analisa yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan torsi statis yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu.

#### **4.3.1. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$**

Pada penelitian ini didapatkan nilai CoP terhadap TSR pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu  $S/D = 2,2$  yang diletakkan di depan *returnning blade* dengan variasi  $d/D$  dari 0,1 sampai dengan 1,0. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Pada penelitian dilakukan analisis perbandingan antara performa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu (CoP) dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>o</sub>). Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.4.



(a)



(b)

Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan variasi  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9;$  dan  $1,0; S/D = 2,2$  pada (a)  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan (b)  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.4 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai CoP akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR. Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari CoP dari turbin angin Savonius pada  $d/D$  optimum. Berikut merupakan setiap titik puncak pada setiap  $d/D$  pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  yang dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4. 1 Tabel Perbandingan CoP turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re$   $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				% kenaikan CoP	
	Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$	Re = $13,6 \times 10^4$
	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$		
0.1	0.152	0.591	0.104	0.628	0.166	0.823	0.115	0.802	9.210	10.576
0.2					0.170	0.730	0.119	0.782	11.842	14.423
0.3					0.180	0.596	0.129	0.668	18.421	23.076
0.4					0.197	0.767	0.139	0.818	29.605	33.653
0.5					0.210	0.818	0.135	1.049	38.157	29.807
0.6					0.201	0.909	0.132	0.770	32.236	26.923
0.7					0.195	0.796	0.128	0.872	28.289	23.076
0.8					0.189	0.896	0.126	0.818	24.346	21.153
0.9					0.174	0.716	0.118	0.800	14.473	13.461
1.0					0.166	0.777	0.111	0.791	9.210	6.730

Pada tabel 4.1 menunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds memiliki nilai CoP yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di seluruh variasi  $d/D$  sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif meningkatkan CoP turbin. Dari seluruh variasi  $d/D$  dan bilangan Reynolds, nilai CoP maksimum tertinggi terjadi pada  $d/D = 0,5$  dan bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$  yaitu sebesar 0,210 atau 21,07% pada TSR 0,818.

Pada kedua bilangan Reynolds, dengan diletakkannya silinder pengganggu pada semua variasi  $d/D$  diduga efektif mengganggu boundary layer pada *returning blade* sehingga

mempercepat transisi dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Dikarenakan aliran turbulen membuat momentum aliran di dekat dinding *returning blade* meningkat dan dapat menahan gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, akibatnya titik separasi pada *returning blade* mundur dan wake yang terjadi mengecil. Hal ini menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* menurun yang mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Selain itu, pemberian silinder pengganggu pada semua  $d/D$  diduga efektif menyebabkan tekanan di depan *returning blade* menurun dan tekanan di belakang *returning blade* diasumsikan tetap. Hal ini menyebabkan selisih tekanan antara di depan dan di belakang *returning blade* akan menurun sehingga *pressure drag* juga akan menurun. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat. Pada penelitian ini penambahan silinder pengganggu dengan variasi  $d/D = 0,5$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  mampu menaikkan CoP maksimum sebesar 38,15% dengan nilai  $CoP_{max} = 0,21$ . Selain itu juga pada variasi  $d/D = 0,4$  dan  $Re = 13,6 \times 10^4$  mampu menaikkan CoP maksimum sebesar 33,65% dengan nilai  $CoP_{max} = 0,139$ .

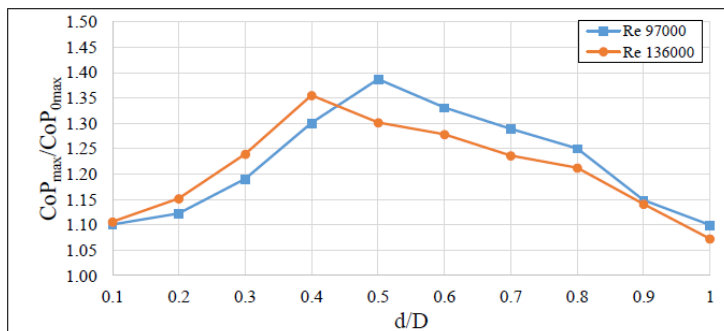
Tabel 4. 2 Tabel *Uncertainty* CoP

d/D	Bilangan Reynolds			
	$9,7 \times 10^4$		$13,6 \times 10^4$	
	Uncertainty %	$CoP_{max}$	Uncertainty %	$CoP_{max}$
0.1	5.02	0.157 – 0.174	4.6	0.109 – 0.120
0.2	4.81	0.161 – 0.178	4.54	0.113 – 0.124
0.3	4.54	0.171 – 0.188	4.38	0.123 – 0.134
0.4	4.69	0.187 – 0.206	4.45	0.132 – 0.145
0.5	4.69	0.201 – 0.219	4.72	0.128 – 0.141
0.6	4.87	0.191 – 0.210	4.45	0.126 – 0.137
0.7	4.74	0.185 – 0.204	4.57	0.122 – 0.133
0.8	4.94	0.179 – 0.198	4.5	0.120 – 0.131
0.9	4.75	0.165 – 0.182	4.57	0.112 – 0.123
1.0	4.92	0.157 – 0.171	4.62	0.105 – 0.116

Pada penelitian ini, perhitungan CoP memiliki *uncertainty* seperti pada tabel 4.2 diatas. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang artinya setiap nilai CoP yang diukur pada penelitian ini memiliki batas toleransi. Batas toleransi pada CoP ini juga dapat dilihat pada Gambar 4.4, *error bars* pada beberapa variasi d/D saling berdekatan hingga masuk ke dalam batas toleransi tersebut. Oleh karena itu, kedepannya pemilihan variasi d/D dapat diminimalisirkan sesuai *range* yang didapat dari perhitungan *uncertainty*. Adapun variasi d/D yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi adalah 0,3; 0,6; dan 1,0.

#### 4.3.2. Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power Maximum* ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi variasi d/D pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap d/D pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  dengan S/D 2,2. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5.



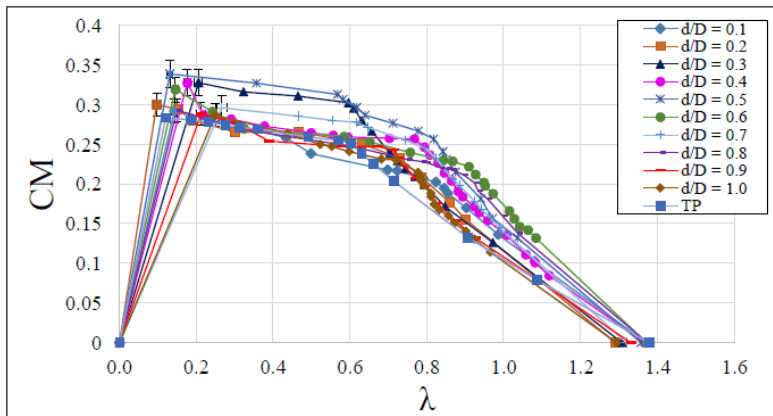
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Coefficient of Power antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa

Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi diameter  
 $d/D = 0.1 - 1.0$

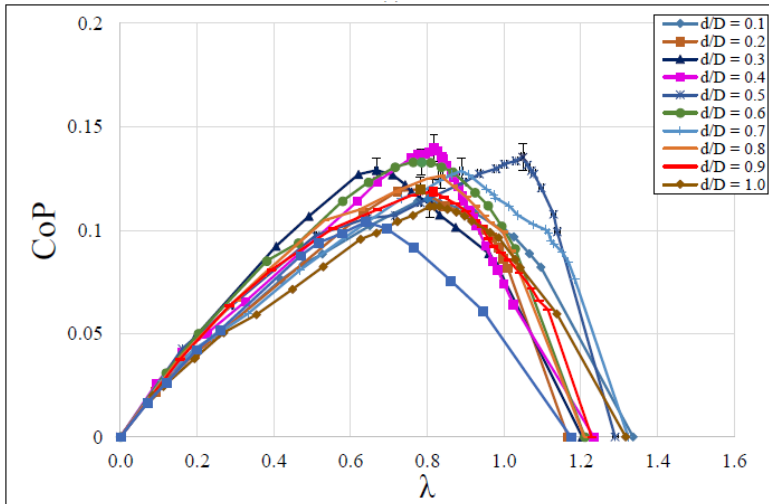
Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa kedua grafik tersebut memiliki *trendline* parabolik dimana nilai perbandingan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya ukuran diameter silinder pengganggu sehingga puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai tertinggi dari  $CoP_{max}/CoP_{0max}$ . Pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D = 0,5$  yaitu sebesar 1,386 yang artinya nilai  $CoP$  turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,151 menjadi 0,210. Pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D = 0,4$  juga yaitu sebesar 1,355 yang artinya nilai  $CoP$  turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,104 menjadi 0,139. Dari hasil-hasil tersebut didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius karena nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$  di seluruh variasi  $d/D$  sehingga dapat dikatakan bahwa variasi ukuran diameter silinder pengganggu mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Dari hasil-hasil tersebut didapatkan bahwa peningkatan terbesar berada pada  $d/D = 0,5$  untuk bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$  untuk bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin dapat menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat yang mengakibatkan daya turbin meningkat. Hal ini juga sesuai dengan hipotesa bahwa ukuran diameter silinder pengganggu yang terlalu kecil/besar akan memperkecil pengaruh dari penambahan pengganggu tersebut.

#### 4.3.3. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $C_M$  terhadap TSR pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran  $C_M$  turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu  $S/D = 2,2$  yang diletakkan di depan *returning blade* dengan variasi  $d/D$  0,1 sampai dengan 1,0. Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; \text{ dan } 1,0;$   $S/D = 2,2$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CM) dan tanpa silinder pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$ ;  $S/D = 2,2$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Dapat dilihat pada gambar 4.6 dan 4.7 bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) terhadap *tip speed ratio* (TSR) mempunyai *trendline* yang cenderung turun hingga mencapai TSR maksimum. Nilai CM maksimum didapat saat turbin akan berhenti berputar karena pada saat itu didapatkan torsi dinamis maksimal.



Tabel 4. 3 Tabel perbandingan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re\ 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				% kenaikan $C_M$	
	$Re = 9,7 \times 10^4$		$Re = 13,6 \times 10^4$		$Re = 9,7 \times 10^4$		$Re = 13,6 \times 10^4$			
	$C_{M_{max}}$	$\lambda$	$C_{M_{max}}$	$\lambda$	$C_{M_{max}}$	$\lambda$	$C_{M_{max}}$	$\lambda$	$Re = 9,7 \times 10^4$	$Re = 13,6 \times 10^4$
0,1	0.283	0.121	0.234	0.072	0.297	0.143	0.240	0.127	4.947	2.564
0,2					0.300	0.097	0.243	0.091	6.007	3.846
0,3					0.327	0.206	0.248	0.196	15.548	5.983
0,4					0.328	0.177	0.274	0.093	15.901	17.094
0,5					0.338	0.129	0.264	0.161	19.435	12.821
0,6					0.319	0.145	0.260	0.119	12.721	4.701
0,7					0.296	0.266	0.252	0.108	4.594	7.692
0,8					0.293	0.150	0.246	0.155	3.534	5.128
0,9					0.289	0.213	0.241	0.155	2.120	2.991
1.0					0.286	0.249	0.237	0.084	1.060	1.282

Torsi dinamis maksimal didapat saat turbin angin Savonius akan berhenti, akibatnya disaat tersebut didapatkan nilai *coefficient of moment* maksimum. Dapat dilihat juga pada tabel 4.2 bahwa nilai  $C_M$  maksimum tertinggi pada turbin dengan silinder pengganggu  $d/D = 0,5$  untuk  $Re\ 9,7 \times 10^4$  yaitu sebesar 0.338 dengan kenaikan 19,43% dan  $d/D = 0,4$  untuk  $Re\ 13,6 \times 10^4$  yaitu sebesar 0.274 dengan kenaikan 17,09%.

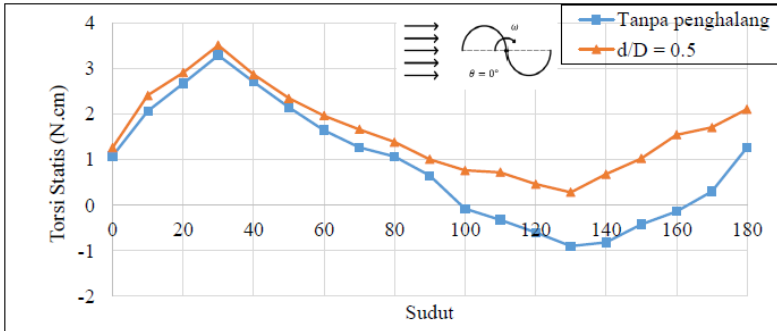
Tabel 4. 4 *Uncertainty CM*

d/D	Bilangan Reynolds			
	$9,7 \times 10^4$		$13,6 \times 10^4$	
	Uncertainty %	$C_{M_{max}}$	Uncertainty %	$C_{M_{max}}$
0.1	5.06	0.281 – 0.312	4.63	0.228 – 0.251
0.2	4.84	0.285 – 0.314	4.57	0.231 – 0.254
0.3	4.58	0.312 – 0.341	4.41	0.237 – 0.258
0.4	4.72	0.312 – 0.343	4.48	0.261 – 0.286
0.5	4.72	0.322 – 0.353	4.74	0.251 – 0.276
0.6	4.9	0.303 – 0.334	4.47	0.248 – 0.271
0.7	4.77	0.281 – 0.310	4.6	0.240 – 0.263
0.8	4.97	0.278 – 0.307	4.53	0.234 – 0.257
0.9	4.79	0.275 – 0.302	4.59	0.229 – 0.252
1.0	4.96	0.271 – 0.300	4.64	0.226 – 0.248

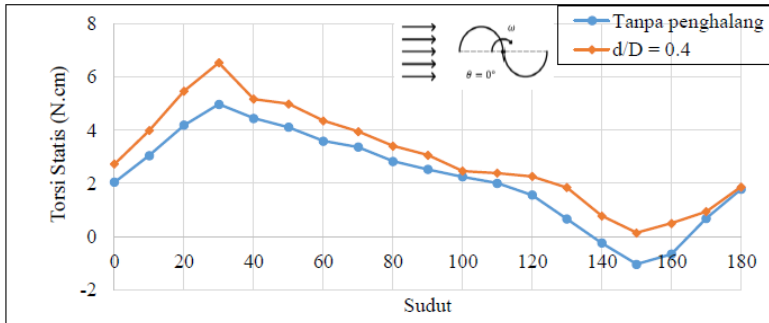
Pada penelitian ini, perhitungan CM memiliki *uncertainty* seperti pada tabel 4.2 diatas. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang artinya setiap nilai CM yang diukur pada penelitian ini memiliki batas toleransi. Batas toleransi pada CM ini juga dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7, *error bars* pada beberapa variasi  $d/D$  saling berdekatan hingga masuk ke dalam batas toleransi tersebut. Oleh karena itu, kedepannya pemilihan variasi  $d/D$  dapat diminimalisirkan sesuai *range* yang didapat dari perhitungan *uncertainty*. Adapun variasi  $d/D$  yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi adalah 0,1; 0,5; dan 0,8

#### **4.3.4. Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$**

Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi statis terhadap sudut ( $\theta$ ). Pengukuran  $T_s$  turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu  $d/D = 0,5$  untuk  $Re\ 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$  untuk  $Re\ 13,6 \times 10^4$  diletakkan di depan *returnning blade* dengan  $S/D = 2,2$ . Pada penelitian dilakukan analisis perbandingan antara torsi statis turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu ( $T_s$ ) dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $T_{s_0}$ ). Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur *torque meter* untuk mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius. Pengambilan data torsi statis ini dilakukan saat kondisi turbin angin Savonius diam yang kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds tertentu. Pengukuran ini dilakukan pada turbin angin Savonius berada pada sudut  $0^\circ$  searah dengan aliran udara hingga  $180^\circ$  dengan kenaikan sebesar  $10^\circ$ . Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.8 (a) dan (b).



(a)



(b)

Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu ( $T_s$ ) dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $T_{s0}$ ) terhadap Fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan variasi (a)  $d/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,2$ ;  $Re = 9,7 \times 10^4$  (b)  $d/D = 0,4$ ;  $S/D = 2,2$ ;  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.8 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa penambahan silinder pengganggu dengan  $d/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,2$  dan  $Re = 9,7 \times 10^4$  efektif meningkatkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 3,28 N.cm menjadi 3,34 N.cm pada sudut  $30^\circ$  dan efektif meningkatkan nilai torsi statis minimum yaitu dari -0,9 N.cm menjadi 0,28 N.cm pada sudut  $130^\circ$ . Pada variasi  $d/D = 0,4$ ;

$S/D = 2,2$  dan  $Re = 13,6 \times 10^4$  juga efektif meningkatkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 4,96 N.cm menjadi 6,52 N.cm pada sudut  $30^\circ$  dan efektif meningkatkan nilai torsi statis minimum yaitu dari -1,04 N.cm menjadi 0,14 N.cm pada sudut  $140^\circ$ .

Dapat dilihat bahwa semua nilai torsi statis pada  $d/D = 0,5$ ;  $Re 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$ ;  $Re 13,6 \times 10^4$  memiliki nilai positif. Hal ini membuktikan bahwa kehadiran silinder pengganggu efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius sehingga kemampuan *self-starting* pada turbin angin Savonius semakin baik karena mampu menangkap angin dari semua posisi angular sudu. Kehadiran silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,2$ ;  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$  untuk  $Re 13,6 \times 10^4$  di depan *returning blade* efektif menyebabkan turbin angin Savonius mempunyai *self starting* di semua posisi angular sudu.

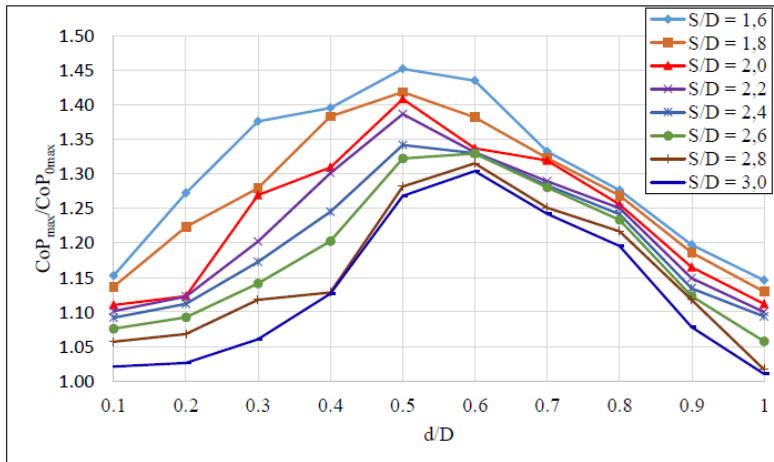
#### **4.4. Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu**

Pada penelitian yang dilakukan oleh Lazuardhi Rahim Yamin ( $S/D = 2,2$ ), Muhammad Rizky Ramadhan ( $S/D = 1,6$ ), Markus Sarsanto ( $S/D = 1,8$ ), Muhammad Ghiyats Humam ( $S/D = 1,8$ ), Prabasworo Drestanto ( $S/D = 2,4$ ), Ardy Makarim ( $S/D = 2,6$ ), Hilda Mailil Haq ( $S/D = 2,8$ ), dan Asri Melati ( $S/D = 3,0$ ) didapatkan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  dengan  $d/D = 0,1-1,0$ .

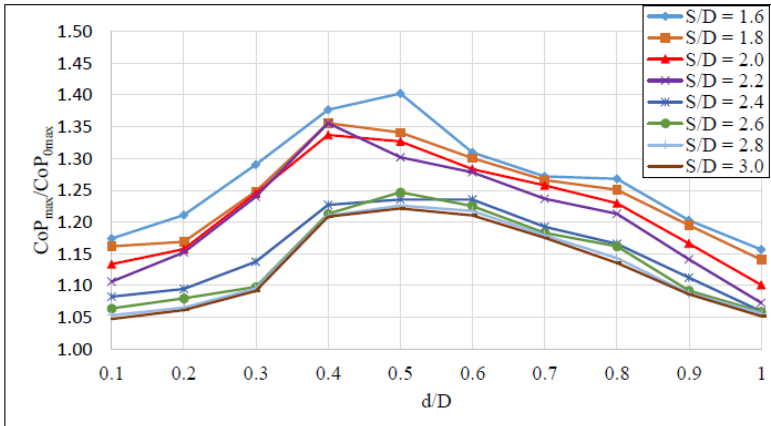
##### **4.4.1. Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .**

Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai  $CoP_{max}$  antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder

pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D$  di  $S/D = 1,6$  s.d  $3,0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10 dibawah dalam bentuk grafik.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$



Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Dapat dilihat dari Gambar 4.9 dan 4.10 bahwa pada setiap bilangan Reynolds mempunyai CoP maksimum pada  $S/D = 1,6$ . Pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,5$  CoP maksimum meningkat sebesar 45,17%. Pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,5$  CoP maksimum meningkat sebesar 40,21%.

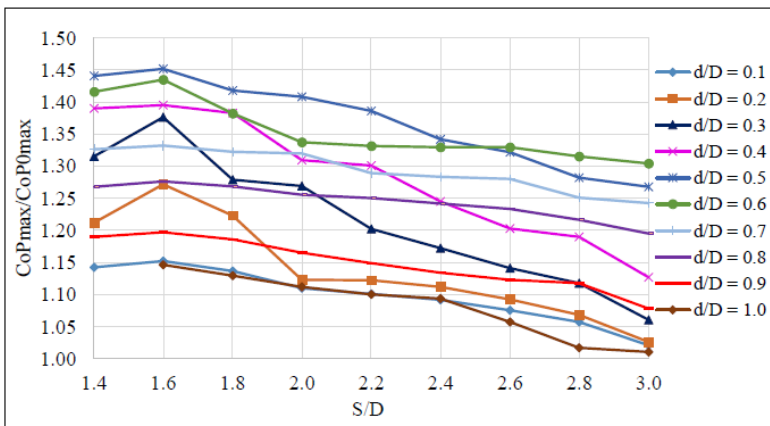
Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu pada semua variasi  $S/D$  efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$ . Berdasarkan gambar 4.9 dan 4.10 variasi  $S/D$  berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dari analisa ini didapatkan bahwa variasi  $S/D$  yang paling efektif untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah pada  $S/D = 1,6$  dan  $d/D = 0,5$ .

Grafik pada Gambar 4.9 dan 4.10 berbentuk parabolik, hal tersebut masih sesuai dengan hipotesa bahwasannya ukuran

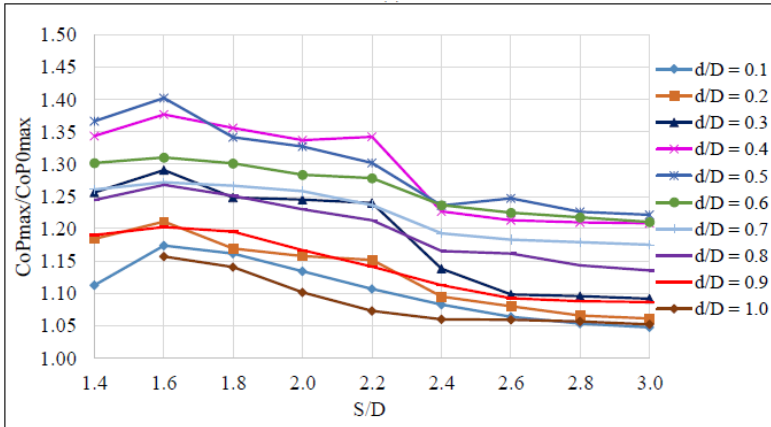
diameter silinder pengganggu yang terlalu besar/kecil akan memperkecil pengaruh dari penambahan pengganggu tersebut.

#### 4.4.2. Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi S/D di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai  $CoP_{max}$  antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap S/D di  $d/D = 0,1$  s.d  $1,0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11 (a) dan (b) dibawah dalam bentuk grafik.



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi S/D di  $d/D = 0,1$  s.d  $1,0$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$



Gambar 4. 12 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $S/D$  di  $d/D = 0,1$  s.d  $1,0$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Dapat dilihat dari gambar 4.11 dan 4.12 bahwa pada setiap bilangan Reynolds, CoP mengalami kenaikan dari  $S/D$  1,4 sampai dengan 1,6 lalu mengalami penurunan dari  $S/D$  1,6 - 3,0. Pada grafik tersebut didapatkan *trendline* yang menurun. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin jauh peletakkan silinder pengganggu, maka semakin kecil pengaruh keberadaan silinder pengganggu terhadap peningkatan nilai CoP.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu pada semua bilangan efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$ . Berdasarkan gambar 4.11 dan 4.12 variasi  $d/D$  berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dari analisa ini didapatkan bahwa variasi  $d/D$  yang paling efektif untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah pada  $d/D = 0,5$  dan  $S/D = 1,6$ .



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari adanya silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan menempatkan silinder sirkular dengan variasi ukuran  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; S/D = 2,2$  dan  $y/D = 0,5$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* di semua variasi  $d/D$  dan juga variasi bilangan Reynolds efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* maksimum. Pada  $d/D = 0,5$  dan  $Re = 9,7 \times 10^4$  terjadi kenaikan sebesar 38,15% dari nilai *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan nilai  $CoP_{max} = 0,21$ . Pada  $d/D = 0,4$  dan  $Re = 13,6 \times 10^4$  terjadi kenaikan sebesar 33,65% dari nilai *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan nilai  $CoP_{max} = 0,139$ .
2. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* di semua variasi  $d/D$  dan juga variasi bilangan Reynolds efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* maksimum. Pada  $d/D = 0,5$  dan  $Re = 9,7 \times 10^4$  terjadi kenaikan sebesar 19,43% dari nilai *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan nilai  $CM_{max} = 0,338$ . Pada  $d/D = 0,4$  dan  $Re = 13,6 \times 10^4$  terjadi kenaikan sebesar 17,09% dari nilai *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan nilai  $CM_{max} = 0,274$ .
3. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $d/D = 0,5; Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4; Re =$

$13,6 \times 10^4$  menyebabkan turbin angin Savonius mempunyai kemampuan *self starting* di setiap posisi angular sudu. Hal ini dibuktikan dengan nilai torsi statis bernilai positif di setiap sudut.

4. Turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini memiliki karakteristik bahwa performa yang dihasilkan lebih baik pada saat  $Re = 9,7 \times 10^4$  dibandingkan dengan  $Re = 13,6 \times 10^4$

## 5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya agar didapatkan data yang lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi dari semua alat ukur yang digunakan sebelum melakukan penelitian.
2. Melakukan pelumasan pada *bearing* secara berkala agar gesekan pada *bearing* tidak besar.
3. Menggunakan neraca pegas dengan ketelitian tinggi agar data lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

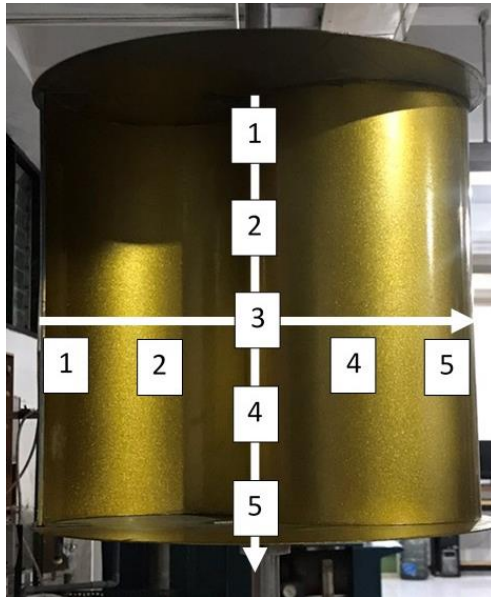
- Badan Pusat Statistik (BPT). 2018. “Proyeksi Penduduk Indonesia 2015 – 2045 Hasil SUPAS 2015. Jakarta.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. “Introduction to Fluid Mechanics”. 8th penyunt. USA: John Willey & Sons Inc.
- Hemami, Ahmad, 2012. “Wind Turbine Technology”. USA: Cengage Learning.
- Mahmoud, N.H., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2010, “An experimental study on improvement of Savonius rotor performance”. Mesir: Alexandria university
- Rustam, J.A. 2018.”Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Triboesono, A., 2018. “STATISTIK KETENAGALISTRIKAN 2017 Edisi No.31 Tahun Anggaran 2018”. Jakarta.
- Tsutsui, T. & Igarashi, T., 2002, “Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air- Stream”. Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Issue 90, pp. 527-541.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

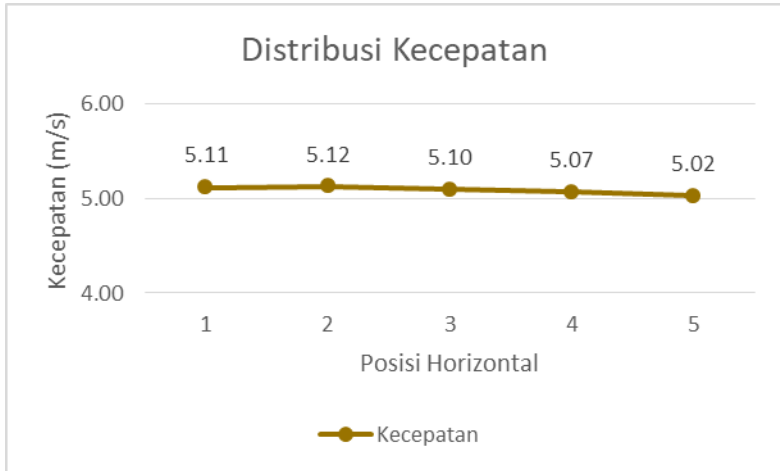
## LAMPIRAN

### A. *Uniformity Flow Test*

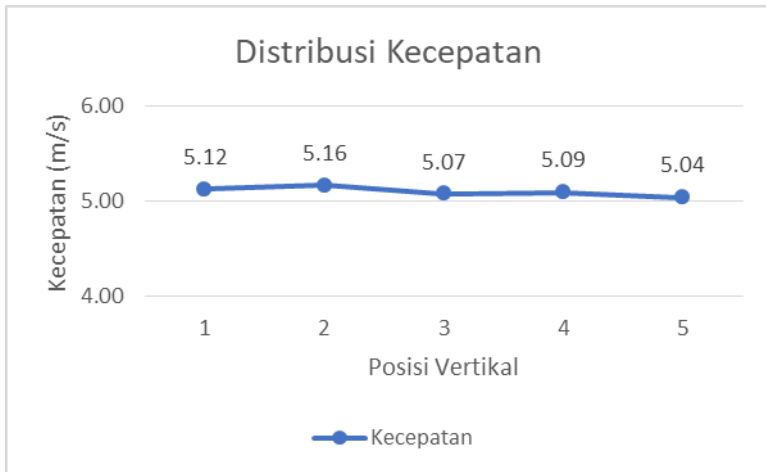
*Uniformity flow test* (Pengetesan keseragaman aliran) dibutuhkan dalam sebuah penelitian agar didapatkan hasil yang paling ideal. Dalam penelitian ini digunakan sebuah *honeycomb* yang berfungsi untuk menyeragamkan aliran karena penelitian dilakukan di kondisi terbuka. Pengetesan ini dilakukan untuk memastikan bahwa fluida yang mengalir menuju turbin angin Savonius sama di setiap titik. *Uniformity test* aliran udara dilakukan pada sisi *upstream* turbin angin Savonius dengan melakukan pengukuran kecepatan aliran fluida udara pada 5 titik vertikal dan 5 titik horizontal.



Gambar A. 1 Posisi titik pengambilan uniformity test



Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal



Gambar A. 3 Grafik distribusi kecepatan vertical

Tabel A 1 Data keseragaman kecepatan angin

Data	(Horizontal)					(Vertikal)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Kec. 5 m/s										
1	4.98	5.02	5.14	4.89	4.92	4.94	5.09	5.22	5.14	4.96
2	5.00	5.13	5.30	5.02	4.90	5.05	5.19	4.90	4.99	5.12
3	5.25	5.06	5.03	5.00	5.09	5.18	5.25	5.03	5.25	5.27
4	5.14	5.15	5.14	5.20	4.98	4.99	5.10	5.14	5.05	5.03
5	5.27	5.26	5.04	5.17	5.07	5.27	4.93	5.28	5.18	5.06
6	5.03	5.08	4.92	5.06	5.20	5.25	5.50	4.92	5.10	5.00
7	5.02	5.05	5.09	5.28	5.16	5.23	5.25	4.82	5.20	4.91
8	5.10	5.33	5.00	4.91	4.94	5.17	4.95	5.31	4.90	5.17
9	5.23	5.09	5.21	5.10	4.96	4.86	5.19	5.00	5.16	5.02
10	5.11	5.07	5.08	5.02	5.01	5.29	5.17	5.12	4.93	4.82
Rata-rata tiap titik	5.11	5.12	5.10	5.07	5.02	5.12	5.16	5.07	5.09	5.04
Rata-rata semua data	5.08					5.10				
SD Sampel	0.11					0.15				
Batas bawah	4.89					4.82				
Batas atas	5.33					5.50				

## B. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Tabel B 1 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	C <sub>oP<sub>0</sub></sub>	C <sub>m<sub>0</sub></sub>
28,5	5	426	44.58	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,378	0	0	0
28,5	5	336.1	35.17	6	140	0,0125	0,092	1,17	1,087	0,0164	0,0859	0,079
28,5	5	280.38	29.34	15.3	240	0,0125	0,092	1,17	0,907	0,0275	0,1201	0,1325
28,5	5	220.74	23.10	24.6	370	0,0125	0,092	1,17	0,714	0,0423	0,1454	0,2037
28,5	5	203.98	21.35	27.7	410	0,0125	0,092	1,17	0,660	0,0468	0,1487	0,2255
28,5	5	194.6	20.36	30.8	435	0,0125	0,092	1,17	0,629	0,0495	0,1500	0,2384
28,5	5	186.4	19.51	33.9	460	0,0125	0,092	1,17	0,603	0,0522	0,1515	0,2513
28,5	5	175.86	18.40	37	470	0,0125	0,092	1,17	0,569	0,0531	0,1452	0,2554
28,5	5	151.96	15.90	40.1	480	0,0125	0,092	1,17	0,491	0,0539	0,1275	0,2594
28,5	5	110.84	11.60	43.2	500	0,0125	0,092	1,17	0,358	0,0560	0,0966	0,2694
28,5	5	96.58	10.10	49.4	510	0,0125	0,092	1,17	0,312	0,0564	0,0848	0,2717
28,5	5	85.06	8.90	55.6	520	0,0125	0,092	1,17	0,275	0,0569	0,0753	0,2739
28,5	5	71.4	7.47	68	540	0,0125	0,092	1,17	0,231	0,0578	0,0642	0,2784
28,5	5	57.5	6.01	83.5	560	0,0125	0,092	1,17	0,186	0,0584	0,0522	0,2810
28,5	5	37.36	3.91	99	580	0,0125	0,092	1,17	0,121	0,0589	0,0342	0,2837
28,5	5	0	0.00	130	560	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,0527	0	0

Tabel B 2 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoPo	Cmo
28,5	7	508.4	53.213	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,174	0	0	0
28,5	7	409.2	42.830	6	220	0,0125	0,092	1,17	0,945	0,02624	0,0608	0,0644
28,5	7	372.66	39.005	18.4	310	0,0125	0,092	1,17	0,861	0,03576	0,0755	0,0877
28,5	7	330.54	34.597	30.8	430	0,0125	0,092	1,17	0,764	0,04895	0,0917	0,1201
28,5	7	300.26	31.427	37	520	0,0125	0,092	1,17	0,694	0,05923	0,1008	0,1453
28,5	7	277.08	29.001	40.1	580	0,0125	0,092	1,17	0,640	0,06621	0,1040	0,1624
28,5	7	249.9	26.156	43.2	610	0,0125	0,092	1,17	0,577	0,0695	0,0984	0,1705
28,5	7	223.6	23.403	46.3	650	0,0125	0,092	1,17	0,517	0,07403	0,0938	0,1816
28,5	7	203.46	21.295	49.4	670	0,0125	0,092	1,17	0,470	0,0761	0,0877	0,1867
28,5	7	112.74	11.800	58.7	720	0,0125	0,092	1,17	0,260	0,08109	0,0518	0,1990
28,5	7	86.14	9.016	74.2	780	0,0125	0,092	1,17	0,199	0,08655	0,0422	0,2124
28,5	7	51.8	5.422	89.7	820	0,0125	0,092	1,17	0,120	0,08955	0,0263	0,2197
28,5	7	30.96	3.240	120.7	900	0,0125	0,092	1,17	0,072	0,09556	0,0167	0,2345
28,5	7	0	0.000	151.7	950	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,09789	0	0

Tabel B 3 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

Sudut (θ)	T <sub>s0</sub> (N.cm)	
	Re = 9,7x10 <sup>4</sup>	Re = 13,6x10 <sup>4</sup>
0	1.08	2.04
10	2.06	3.04
20	2.66	4.18
30	3.28	4.96
40	2.7	4.44
50	2.14	4.1
60	1.64	3.58
70	1.26	3.36
80	1.06	2.82
90	0.64	2.52
100	-0.08	2.24
110	-0.32	2
120	-0.6	1.56
130	-0.9	0.66
140	-0.82	-0.24
150	-0.42	-1.04
160	-0.14	-0.66
170	0.3	0.68
180	1.26	1.78



### C. Data Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

Tabel C 1 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	423.78	44.356	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.371	0	0	0
28.5	5	334	34.959	6	180	0.0125	0.092	1.17	1.080	0.0213	0.1109	0.1026
28.5	5	305.04	31.928	9.1	240	0.0125	0.092	1.17	0.987	0.0283	0.1344	0.1362
28.5	5	279.04	29.206	12.2	300	0.0125	0.092	1.17	0.902	0.0353	0.1532	0.1698
28.5	5	264.38	27.672	15.3	335	0.0125	0.092	1.17	0.855	0.0392	0.1613	0.1886
28.5	5	261.3	27.349	18.4	348	0.0125	0.092	1.17	0.845	0.0404	0.1643	0.1944
28.5	5	254.58	26.646	21.5	365	0.0125	0.092	1.17	0.823	0.0421	0.1668	0.2026
28.5	5	244.72	25.614	24.6	375	0.0125	0.092	1.17	0.791	0.0430	0.1636	0.2067
28.5	5	223.66	23.410	27.7	395	0.0125	0.092	1.17	0.723	0.0450	0.1567	0.2167
28.5	5	215.82	22.589	30.8	400	0.0125	0.092	1.17	0.698	0.0453	0.1520	0.2178
28.5	5	154.24	16.144	46.3	450	0.0125	0.092	1.17	0.499	0.0495	0.1188	0.2381
28.5	5	134.04	14.030	61.8	500	0.0125	0.092	1.17	0.434	0.0537	0.1121	0.2585
28.5	5	77.36	8.097	92.8	570	0.0125	0.092	1.17	0.250	0.0585	0.0704	0.2815
28.5	5	44.26	4.633	123.8	620	0.0125	0.092	1.17	0.143	0.0608	0.0419	0.2927
28.5	5	0	0.000	154.8	650	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0607	0	0

Tabel C 2 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,2$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	398.98	41.760	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.290	0	0	0
28.5	5	278.6	29.160	6	270	0.0125	0.092	1.17	0.901	0.03237	0.1403	0.1557
28.5	5	265.6	27.799	9.1	310	0.0125	0.092	1.17	0.859	0.0369	0.1525	0.1775
28.5	5	243.2	25.455	12.2	365	0.0125	0.092	1.17	0.787	0.04326	0.1637	0.2081
28.5	5	225.8	23.634	15.3	410	0.0125	0.092	1.17	0.730	0.0484	0.1700	0.2328
28.5	5	218.9	22.912	18.4	420	0.0125	0.092	1.17	0.708	0.04925	0.1677	0.2369
28.5	5	194.88	20.397	24.6	450	0.0125	0.092	1.17	0.630	0.05216	0.1582	0.2509
28.5	5	143.66	15.036	33.9	485	0.0125	0.092	1.17	0.465	0.05532	0.1236	0.2661
28.5	5	92.86	9.719	49.4	500	0.0125	0.092	1.17	0.300	0.05525	0.0798	0.2658
28.5	5	58.84	6.159	64.9	540	0.0125	0.092	1.17	0.190	0.05826	0.0533	0.2803
28.5	5	46.88	4.907	80.4	580	0.0125	0.092	1.17	0.152	0.06126	0.0447	0.2947
28.5	5	30.1	3.150	111.4	620	0.0125	0.092	1.17	0.097	0.06237	0.0292	0.3000
28.5	5	0	0	142.4	690	0.0125	0.092	1.17	0	0.06715	0	0

Tabel C 3 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	404.46	42.333	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.308	0	0	0
28.5	5	300.66	31.469	6	220	0.0125	0.092	1.17	0.972	0.02624	0.1228	0.1262
28.5	5	261.94	27.416	9.1	300	0.0125	0.092	1.17	0.847	0.03567	0.1454	0.1716
28.5	5	245.2	25.664	12.2	350	0.0125	0.092	1.17	0.793	0.04142	0.1580	0.1993
28.5	5	237.84	24.894	15.3	370	0.0125	0.092	1.17	0.769	0.0435	0.1609	0.2092
28.5	5	230.1	24.084	18.4	390	0.0125	0.092	1.17	0.744	0.04557	0.1631	0.2192
28.5	5	223.98	23.443	21.5	410	0.0125	0.092	1.17	0.724	0.04764	0.1660	0.2292
28.5	5	217.98	22.815	24.6	430	0.0125	0.092	1.17	0.705	0.04971	0.1686	0.2391
28.5	5	203.1	21.258	27.7	480	0.0125	0.092	1.17	0.657	0.05546	0.1753	0.2668
28.5	5	195.08	20.418	30.8	505	0.0125	0.092	1.17	0.631	0.05815	0.1765	0.2797
28.5	5	188.76	19.757	33.9	535	0.0125	0.092	1.17	0.610	0.06145	0.1805	0.2956
28.5	5	184.28	19.288	37	550	0.0125	0.092	1.17	0.596	0.06291	0.1804	0.3026
28.5	5	143.76	15.047	52.5	580	0.0125	0.092	1.17	0.465	0.06468	0.1447	0.3112
28.5	5	99.98	10.465	83.5	620	0.0125	0.092	1.17	0.323	0.06579	0.1023	0.3165
28.5	5	63.66	6.663	114.5	670	0.0125	0.092	1.17	0.206	0.06812	0.0675	0.3277
28.5	5	0	0.000	145.5	740	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0729	0	0

Tabel C 4 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,4$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	422.62	44.234	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.367	0	0	0
28.5	5	345.88	36.202	6	150	0.0125	0.092	1.17	1.119	0.01766	0.0950	0.0849
28.5	5	334.46	35.007	9.1	180	0.0125	0.092	1.17	1.082	0.02096	0.1090	0.1008
28.5	5	327.16	34.243	12.2	200	0.0125	0.092	1.17	1.058	0.02303	0.1172	0.1108
28.5	5	311.7	32.625	15.3	245	0.0125	0.092	1.17	1.008	0.02817	0.1366	0.1355
28.5	5	296.06	30.988	18.4	280	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.03208	0.1478	0.1543
28.5	5	289.58	30.309	21.5	300	0.0125	0.092	1.17	0.937	0.03415	0.1539	0.1643
28.5	5	285.42	29.874	24.6	315	0.0125	0.092	1.17	0.923	0.03561	0.1581	0.1713
28.5	5	276.18	28.907	27.7	340	0.0125	0.092	1.17	0.893	0.0383	0.1646	0.1842
28.5	5	272.52	28.524	30.8	355	0.0125	0.092	1.17	0.881	0.03976	0.1686	0.1912
28.5	5	267	27.946	33.9	380	0.0125	0.092	1.17	0.864	0.04244	0.1763	0.2042
28.5	5	261.4	27.360	37	400	0.0125	0.092	1.17	0.845	0.04451	0.1810	0.2141
28.5	5	256.2	26.816	40.1	425	0.0125	0.092	1.17	0.829	0.0472	0.1881	0.2270
28.5	5	249.78	26.144	43.2	445	0.0125	0.092	1.17	0.808	0.04927	0.1915	0.2370
28.5	5	245.16	25.660	46.3	465	0.0125	0.092	1.17	0.793	0.05134	0.1958	0.2470
28.5	5	237.22	24.829	49.4	485	0.0125	0.092	1.17	0.767	0.05342	0.1971	0.2570
28.5	5	217.12	22.725	52.5	490	0.0125	0.092	1.17	0.702	0.05365	0.1812	0.2581
28.5	5	183.84	19.242	55.6	495	0.0125	0.092	1.17	0.595	0.05388	0.1541	0.2592
28.5	5	171.94	17.996	61.8	505	0.0125	0.092	1.17	0.556	0.05435	0.1454	0.2614
28.5	5	154.1	16.129	71.1	520	0.0125	0.092	1.17	0.498	0.05505	0.1320	0.2648
28.5	5	116.58	12.202	86.6	550	0.0125	0.092	1.17	0.377	0.05682	0.1031	0.2734
28.5	5	89.8	9.399	102.1	580	0.0125	0.092	1.17	0.290	0.0586	0.0819	0.2819
28.5	5	67.56	7.071	133.1	620	0.0125	0.092	1.17	0.219	0.05971	0.0628	0.2872
28.5	5	54.7	5.725	164.1	720	0.0125	0.092	1.17	0.177	0.06817	0.0580	0.3279
28.5	5	0	0.000	195.1	800	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.07418	0	0

Tabel C 5 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	419.86	43.960	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.358	0	0	0
28.5	5	320.32	33.493	6	230	0.0125	0.092	1.17	1.035	0.02747	0.1368	0.13213
28.5	5	300.3	31.400	9.1	275	0.0125	0.092	1.17	0.970	0.03261	0.1522	0.15685
28.5	5	290.9	30.353	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	0.938	0.03774	0.1703	0.18157
28.5	5	270.34	28.260	15.3	380	0.0125	0.092	1.17	0.873	0.04472	0.1879	0.21513
28.5	5	263.14	27.527	18.4	410	0.0125	0.092	1.17	0.851	0.04802	0.1965	0.2310
28.5	5	260.24	27.213	21.5	430	0.0125	0.092	1.17	0.841	0.05009	0.2026	0.2410
28.5	5	253.14	26.481	24.6	460	0.0125	0.092	1.17	0.818	0.05339	0.2102	0.25684
28.5	5	240.58	25.120	27.7	480	0.0125	0.092	1.17	0.776	0.05546	0.2071	0.2668
28.5	5	220.22	23.027	30.8	500	0.0125	0.092	1.17	0.712	0.05754	0.1969	0.27677
28.5	5	197.72	20.682	33.9	520	0.0125	0.092	1.17	0.639	0.05961	0.1833	0.28674
28.5	5	190.88	19.970	37	540	0.0125	0.092	1.17	0.617	0.06168	0.1831	0.29671
28.5	5	179.96	18.840	40.1	560	0.0125	0.092	1.17	0.582	0.06375	0.1785	0.30668
28.5	5	175.62	18.317	49.4	580	0.0125	0.092	1.17	0.566	0.06506	0.1771	0.3130
28.5	5	110.5	11.513	64.9	620	0.0125	0.092	1.17	0.356	0.06807	0.1165	0.32744
28.5	5	40.52	4.187	95.9	670	0.0125	0.092	1.17	0.129	0.0704	0.0438	0.33865
28.5	5	0	0.000	126.9	770	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.07886	0	0

Tabel C 6 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,6$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	424	44.379	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.371	0	0	0
28.5	5	335	35.063	6	230	0.0125	0.092	1.17	1.083	0.02747	0.1432	0.1321
28.5	5	328.72	34.406	9.1	250	0.0125	0.092	1.17	1.063	0.02954	0.1511	0.1421
28.5	5	322.12	33.715	12.2	260	0.0125	0.092	1.17	1.042	0.03039	0.1523	0.1461
28.5	5	317.54	33.236	15.3	280	0.0125	0.092	1.17	1.027	0.03246	0.1604	0.1561
28.5	5	313.46	32.809	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	1.014	0.03453	0.1684	0.1661
28.5	5	300.62	31.465	21.5	340	0.0125	0.092	1.17	0.972	0.03906	0.1827	0.1878
28.5	5	294.36	30.810	24.6	360	0.0125	0.092	1.17	0.952	0.04113	0.1884	0.1978
28.5	5	293.04	30.672	27.7	370	0.0125	0.092	1.17	0.948	0.04197	0.1914	0.2019
28.5	5	286.66	30.004	30.8	390	0.0125	0.092	1.17	0.927	0.04405	0.1964	0.2118
28.5	5	281.12	29.424	33.9	410	0.0125	0.092	1.17	0.909	0.04612	0.2017	0.2218
28.5	5	267.94	28.044	37	425	0.0125	0.092	1.17	0.867	0.04758	0.1983	0.2288
28.5	5	260.36	27.251	40.1	430	0.0125	0.092	1.17	0.842	0.04781	0.1937	0.2300
28.5	5	234.08	24.500	43.2	450	0.0125	0.092	1.17	0.757	0.04988	0.1817	0.2400
28.5	5	201.4	21.080	46.3	475	0.0125	0.092	1.17	0.651	0.05257	0.1647	0.2528
28.5	5	180.76	18.920	49.4	490	0.0125	0.092	1.17	0.585	0.05403	0.1519	0.2599
28.5	5	100.36	10.504	52.5	510	0.0125	0.092	1.17	0.325	0.0561	0.0876	0.2698
28.5	5	74.96	7.846	55.6	550	0.0125	0.092	1.17	0.242	0.06063	0.0707	0.2916
28.5	5	44.9	4.700	58.7	600	0.0125	0.092	1.17	0.145	0.06638	0.0464	0.3193
28.5	5	0	0.000	61.8	650	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.07213	0	0

Tabel C 7 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,7$  pada bilangan  
 Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	408.04	42.708	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.320	0.0000	0	0
28.5	5	310.9	32.541	6	240	0.0125	0.092	1.17	1.006	0.0287	0.1388	0.1380
28.5	5	305.84	32.011	9.1	255	0.0125	0.092	1.17	0.989	0.0302	0.1435	0.1451
28.5	5	298.3	31.222	12.2	280	0.0125	0.092	1.17	0.965	0.0328	0.1524	0.1580
28.5	5	291.58	30.519	15.3	300	0.0125	0.092	1.17	0.943	0.0349	0.1584	0.1679
28.5	5	286.16	29.951	18.4	320	0.0125	0.092	1.17	0.925	0.0370	0.1647	0.1779
28.5	5	273.8	28.658	21.5	358	0.0125	0.092	1.17	0.886	0.0413	0.1758	0.1985
28.5	5	267.92	28.042	24.6	375	0.0125	0.092	1.17	0.867	0.0430	0.1791	0.2067
28.5	5	261.44	27.364	27.7	400	0.0125	0.092	1.17	0.846	0.0457	0.1857	0.2196
28.5	5	254.9	26.680	30.8	425	0.0125	0.092	1.17	0.824	0.0483	0.1917	0.2325
28.5	5	246.1	25.758	33.9	450	0.0125	0.092	1.17	0.796	0.0510	0.1954	0.2455
28.5	5	230.62	24.138	37	470	0.0125	0.092	1.17	0.746	0.0531	0.1905	0.2554
28.5	5	200.12	20.946	40.1	500	0.0125	0.092	1.17	0.647	0.0564	0.1756	0.2713
28.5	5	190.58	19.947	49.4	520	0.0125	0.092	1.17	0.616	0.0577	0.1711	0.2776
28.5	5	171.32	17.931	64.9	540	0.0125	0.092	1.17	0.554	0.0583	0.1553	0.2803
28.5	5	143.84	15.055	95.9	580	0.0125	0.092	1.17	0.465	0.0594	0.1328	0.2856
28.5	5	82.4	8.625	126.9	629	0.0125	0.092	1.17	0.266	0.0616	0.0789	0.2962
28.5	5	0	0.000	157.9	670	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0628	0	0

Tabel C 8 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan  
 Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	424.86	44.469	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.374	0	0	0
28.5	5	320.68	33.565	6	240	0.0125	0.092	1.17	1.037	0.02869	0.1432	0.1380
28.5	5	308.42	32.281	9.1	280	0.0125	0.092	1.17	0.997	0.03322	0.1594	0.1598
28.5	5	296.04	30.986	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	0.957	0.03774	0.1738	0.1816
28.5	5	288.42	30.188	15.3	340	0.0125	0.092	1.17	0.933	0.03982	0.1787	0.1915
28.5	5	285.7	29.903	18.4	360	0.0125	0.092	1.17	0.924	0.04189	0.1862	0.2015
28.5	5	276.96	28.988	21.5	380	0.0125	0.092	1.17	0.896	0.04396	0.1894	0.2115
28.5	5	267.78	28.028	24.6	395	0.0125	0.092	1.17	0.866	0.04542	0.1892	0.2185
28.5	5	263.56	27.586	27.7	400	0.0125	0.092	1.17	0.852	0.04565	0.1872	0.2196
28.5	5	258.84	27.092	30.8	405	0.0125	0.092	1.17	0.837	0.04589	0.1848	0.2207
28.5	5	246.24	25.773	33.9	420	0.0125	0.092	1.17	0.796	0.04735	0.1814	0.2278
28.5	5	243.5	25.486	43.2	430	0.0125	0.092	1.17	0.788	0.04743	0.1797	0.2282
28.5	5	231.54	24.235	58.7	450	0.0125	0.092	1.17	0.749	0.04798	0.1729	0.2308
28.5	5	186.56	19.527	89.7	510	0.0125	0.092	1.17	0.603	0.05154	0.1496	0.2479
28.5	5	140.62	14.718	120.7	560	0.0125	0.092	1.17	0.455	0.05387	0.1179	0.2591
28.5	5	94.56	9.897	151.7	610	0.0125	0.092	1.17	0.306	0.05620	0.0827	0.2703
28.5	5	46.5	4.867	182.7	680	0.0125	0.092	1.17	0.150	0.06098	0.0441	0.2933
28.5	5	0	0.000	213.7	720	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06209	0	0

Tabel C 9 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,9$  pada bilangan  
 Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	411.56	43.077	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.331	0	0	0
28.5	5	286.56	29.993	6	230	0.0125	0.092	1.17	0.927	0.0275	0.1225	0.1321
28.5	5	270.32	28.293	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	0.874	0.0320	0.1346	0.1539
28.5	5	256.16	26.811	12.2	310	0.0125	0.092	1.17	0.828	0.0365	0.1455	0.1757
28.5	5	245.9	25.738	15.3	350	0.0125	0.092	1.17	0.795	0.0410	0.1570	0.1974
28.5	5	238.14	24.925	18.4	370	0.0125	0.092	1.17	0.770	0.0431	0.1597	0.2074
28.5	5	229.22	23.992	21.5	400	0.0125	0.092	1.17	0.741	0.0464	0.1655	0.2233
28.5	5	224.28	23.475	24.6	420	0.0125	0.092	1.17	0.725	0.0485	0.1692	0.2332
28.5	5	221.3	23.163	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.716	0.0506	0.1741	0.2432
28.5	5	207.68	21.737	30.8	450	0.0125	0.092	1.17	0.672	0.0514	0.1661	0.2473
28.5	5	177.54	18.583	40.1	460	0.0125	0.092	1.17	0.574	0.0515	0.1422	0.2477
28.5	5	120.3	12.591	49.4	480	0.0125	0.092	1.17	0.389	0.0528	0.0988	0.2540
28.5	5	93.8	9.818	64.9	535	0.0125	0.092	1.17	0.303	0.0576	0.0841	0.2773
28.5	5	65.76	6.883	95.9	585	0.0125	0.092	1.17	0.213	0.0600	0.0614	0.2885
28.5	5	0	0.000	126.9	620	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0605	0	0

Tabel C 10 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 1,0$  pada bilangan  
 Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	400.08	41.875	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.2939	0	0	0
28.5	5	298.62	31.256	6	200	0.0125	0.092	1.17	0.9658	0.0238	0.1105	0.1144
28.5	5	285.98	29.933	9.1	230	0.0125	0.092	1.17	0.9249	0.0271	0.1205	0.1303
28.5	5	278.78	29.179	12.2	250	0.0125	0.092	1.17	0.9016	0.0292	0.1265	0.1403
28.5	5	269.8	28.239	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	0.8726	0.0312	0.1311	0.1502
28.5	5	264.76	27.712	18.4	290	0.0125	0.092	1.17	0.8563	0.0333	0.1372	0.1602
28.5	5	257.38	26.939	21.5	305	0.0125	0.092	1.17	0.8324	0.0348	0.1392	0.1672
28.5	5	253.22	26.504	24.6	320	0.0125	0.092	1.17	0.8190	0.0362	0.1427	0.1743
28.5	5	250.76	26.246	27.7	340	0.0125	0.092	1.17	0.8110	0.0383	0.1494	0.1842
28.5	5	250.56	26.225	30.8	350	0.0125	0.092	1.17	0.8104	0.0391	0.1526	0.1883
28.5	5	244.9	25.633	33.9	370	0.0125	0.092	1.17	0.7921	0.0412	0.1570	0.1983
28.5	5	243.5	25.486	37	380	0.0125	0.092	1.17	0.7875	0.0421	0.1593	0.2023
28.5	5	242.52	25.384	40.1	390	0.0125	0.092	1.17	0.7844	0.0429	0.1619	0.2064
28.5	5	241.86	25.315	43.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.7822	0.0438	0.1646	0.2105
28.5	5	240.24	25.145	46.3	410	0.0125	0.092	1.17	0.7770	0.0446	0.1667	0.2145
28.5	5	222.58	23.297	49.4	440	0.0125	0.092	1.17	0.7199	0.0479	0.1659	0.2304
28.5	5	210.76	22.060	52.5	445	0.0125	0.092	1.17	0.6816	0.0481	0.1578	0.2315
28.5	5	184.88	19.351	61.8	470	0.0125	0.092	1.17	0.5979	0.0501	0.1440	0.2408
28.5	5	171.08	17.906	71.1	490	0.0125	0.092	1.17	0.5533	0.0514	0.1367	0.2471
28.5	5	161.66	16.920	86.6	510	0.0125	0.092	1.17	0.5228	0.0519	0.1306	0.2498
28.5	5	135.46	14.178	117.6	565	0.0125	0.092	1.17	0.4381	0.0549	0.1156	0.2639
28.5	5	77.06	8.066	148.6	635	0.0125	0.092	1.17	0.2492	0.0596	0.0715	0.2869
28.5	5	0	0.000	179.6	680	0.0125	0.092	1.17	0.0000	0.0614	0	0

Tabel C 11 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	590	61.753	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.337	0	0	0
28.5	7	483.84	50.642	6	250	0.0125	0.092	1.17	1.096	0.0299	0.0821	0.0749
28.5	7	471	49.298	9.1	280	0.0125	0.092	1.17	1.067	0.0332	0.0887	0.0831
28.5	7	452.94	47.408	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	1.026	0.0377	0.0969	0.0945
28.5	7	441.6	46.221	15.3	340	0.0125	0.092	1.17	1.000	0.0398	0.0997	0.0997
28.5	7	408.22	42.727	18.4	400	0.0125	0.092	1.17	0.925	0.0468	0.1083	0.1171
28.5	7	396.52	41.502	21.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.0489	0.1099	0.1223
28.5	7	366.82	38.394	24.6	470	0.0125	0.092	1.17	0.831	0.0546	0.1136	0.1367
28.5	7	354.22	37.075	27.7	495	0.0125	0.092	1.17	0.802	0.0573	0.1151	0.1434
28.5	7	341.84	35.779	30.8	510	0.0125	0.092	1.17	0.774	0.0588	0.1139	0.1471
28.5	7	287.48	30.090	33.9	545	0.0125	0.092	1.17	0.651	0.0627	0.1022	0.1569
28.5	7	232.7	24.356	43.2	590	0.0125	0.092	1.17	0.527	0.0671	0.0885	0.1678
28.5	7	210.28	22.009	58.7	630	0.0125	0.092	1.17	0.476	0.0701	0.0835	0.1753
28.5	7	185.02	19.365	89.7	680	0.0125	0.092	1.17	0.419	0.0724	0.0759	0.1812
28.5	7	113.32	11.861	120.7	750	0.0125	0.092	1.17	0.257	0.0772	0.0496	0.1931
28.5	7	55.92	5.853	182.7	965	0.0125	0.092	1.17	0.127	0.0959	0.0304	0.2401
28.5	7	0	0.000	244.7	980	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0902	0	0

Tabel C 12 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,2$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	515	53.903	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.167	0	0	0
28.5	7	445.86	46.667	6	270	0.0125	0.092	1.17	1.010	0.0324	0.0818	0.0810
28.5	7	440.56	46.112	9.1	290	0.0125	0.092	1.17	0.998	0.0344	0.0860	0.0862
28.5	7	435.36	45.568	12.2	315	0.0125	0.092	1.17	0.986	0.0371	0.0917	0.0929
28.5	7	428.3	44.829	15.3	340	0.0125	0.092	1.17	0.970	0.0398	0.0967	0.0997
28.5	7	417.02	43.648	18.4	365	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.0425	0.1005	0.1064
28.5	7	405.16	42.407	21.5	400	0.0125	0.092	1.17	0.918	0.0464	0.1066	0.1162
28.5	7	373.7	39.114	24.6	455	0.0125	0.092	1.17	0.847	0.0528	0.1118	0.1321
28.5	7	356.1	37.272	27.7	500	0.0125	0.092	1.17	0.807	0.0579	0.1169	0.1450
28.5	7	345.2	36.131	30.8	530	0.0125	0.092	1.17	0.782	0.0612	0.1198	0.1532
28.5	7	319.06	33.395	33.9	570	0.0125	0.092	1.17	0.723	0.0657	0.1189	0.1645
28.5	7	279.98	29.305	43.2	600	0.0125	0.092	1.17	0.634	0.0683	0.1084	0.1709
28.5	7	85.86	8.987	74.2	749	0.0125	0.092	1.17	0.194	0.0827	0.0403	0.2071
28.5	7	40	4.187	105.2	900	0.0125	0.092	1.17	0.091	0.0975	0.0221	0.2439
28.5	7	0	0.000	105.2	890	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.0962	0	0

Tabel C 13 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	531.84	55.666	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.205	0	0	0
28.5	7	433.8	45.404	6	280	0.0125	0.092	1.17	0.983	0.0336	0.0826	0.0841
28.5	7	423.98	44.377	9.1	310	0.0125	0.092	1.17	0.960	0.0369	0.0887	0.0924
28.5	7	385.92	40.393	12.2	390	0.0125	0.092	1.17	0.874	0.04633	0.1014	0.1160
28.5	7	367.62	38.478	15.3	435	0.0125	0.092	1.17	0.833	0.05147	0.1073	0.1288
28.5	7	357.64	37.433	18.4	470	0.0125	0.092	1.17	0.810	0.05538	0.1123	0.1386
28.5	7	334.98	35.061	21.5	530	0.0125	0.092	1.17	0.759	0.06235	0.1184	0.1561
28.5	7	327.94	34.324	24.6	560	0.0125	0.092	1.17	0.743	0.06565	0.1221	0.1643
28.5	7	313.26	32.788	27.7	610	0.0125	0.092	1.17	0.710	0.0714	0.1268	0.1787
28.5	7	294.78	30.854	30.8	660	0.0125	0.092	1.17	0.668	0.07716	0.1290	0.1931
28.5	7	274.3	28.710	33.9	700	0.0125	0.092	1.17	0.621	0.08168	0.1270	0.2044
28.5	7	217.12	22.725	43.2	750	0.0125	0.092	1.17	0.492	0.08667	0.1067	0.2169
28.5	7	179.12	18.748	58.7	800	0.0125	0.092	1.17	0.406	0.0909	0.0923	0.2275
28.5	7	86.5	9.054	89.7	900	0.0125	0.092	1.17	0.196	0.09936	0.0487	0.2487
28.5	7	0	0.000	120.7	1000	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10782	0	#DIV/0!



Tabel C 14 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,4$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	545.04	57.048	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.235	0	0	0
28.5	7	452.2	47.330	6	210	0.0125	0.092	1.17	1.024	0.0250	0.0641	0.0626
28.5	7	441.68	46.229	9.1	250	0.0125	0.092	1.17	1.001	0.0295	0.0740	0.0739
28.5	7	434.2	45.446	12.2	280	0.0125	0.092	1.17	0.984	0.0328	0.0808	0.0822
28.5	7	428.66	44.866	15.3	300	0.0125	0.092	1.17	0.971	0.0349	0.0848	0.0874
28.5	7	420.1	43.970	18.4	335	0.0125	0.092	1.17	0.952	0.0388	0.0925	0.0972
28.5	7	409.8	42.892	21.5	380	0.0125	0.092	1.17	0.928	0.0440	0.1021	0.1100
28.5	7	405.68	42.461	24.6	400	0.0125	0.092	1.17	0.919	0.0460	0.1059	0.1152
28.5	7	402.06	42.082	27.7	420	0.0125	0.092	1.17	0.911	0.0481	0.1097	0.1204
28.5	7	395.4	41.385	30.8	445	0.0125	0.092	1.17	0.896	0.0508	0.1139	0.1271
28.5	7	393.54	41.191	33.9	460	0.0125	0.092	1.17	0.891	0.0523	0.1166	0.1308
28.5	7	389.32	40.749	37	485	0.0125	0.092	1.17	0.882	0.0549	0.1213	0.1375
28.5	7	383.92	40.184	40.1	510	0.0125	0.092	1.17	0.870	0.0576	0.1254	0.1442
28.5	7	381.08	39.886	43.2	525	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.0591	0.1277	0.1479
28.5	7	374.98	39.248	46.3	550	0.0125	0.092	1.17	0.849	0.0618	0.1313	0.1546
28.5	7	371.16	38.848	49.4	570	0.0125	0.092	1.17	0.841	0.0638	0.1343	0.1598
28.5	7	369.88	38.714	52.5	580	0.0125	0.092	1.17	0.838	0.0647	0.1357	0.1619
28.5	7	365.82	38.289	55.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.829	0.0668	0.1385	0.1671
28.5	7	360.9	37.774	58.7	615	0.0125	0.092	1.17	0.818	0.0682	0.1396	0.1707
28.5	7	355.26	37.184	61.8	620	0.0125	0.092	1.17	0.805	0.0684	0.1379	0.1713
28.5	7	351.42	36.782	64.9	625	0.0125	0.092	1.17	0.796	0.0687	0.1368	0.1719
28.5	7	343.08	35.909	68	640	0.0125	0.092	1.17	0.777	0.0701	0.1364	0.1756
28.5	7	335.08	35.072	71.1	650	0.0125	0.092	1.17	0.759	0.0710	0.1349	0.1777
28.5	7	296.3	31.013	80.4	680	0.0125	0.092	1.17	0.671	0.0735	0.1235	0.1840
28.5	7	272.76	28.549	89.7	690	0.0125	0.092	1.17	0.618	0.0736	0.1138	0.1842
28.5	7	143.7	15.041	105	760	0.0125	0.092	1.17	0.326	0.0803	0.0654	0.2010
28.5	7	99.52	10.416	136	860	0.0125	0.092	1.17	0.225	0.0888	0.0501	0.2222
28.5	7	70.72	7.402	145.3	980	0.0125	0.092	1.17	0.160	0.1024	0.0410	0.2562
28.5	7	41.24	4.316	154.6	1050	0.0125	0.092	1.17	0.093	0.1098	0.0257	0.2748
28.5	7	0	0.000	185.6	1200	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.1244	0	0

Tabel C 15 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan  
 Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	569.6	59.618	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.290	0	0	0
28.5	7	502.92	52.639	6	290	0.0125	0.092	1.17	1.139	0.0348	0.0993	0.0872
28.5	7	498.58	52.185	9.1	320	0.0125	0.092	1.17	1.129	0.0381	0.1078	0.0954
28.5	7	484.46	50.707	12.2	370	0.0125	0.092	1.17	1.097	0.0439	0.1205	0.1098
28.5	7	475.76	49.796	15.3	400	0.0125	0.092	1.17	1.078	0.0472	0.1273	0.1181
28.5	7	473	49.507	18.4	410	0.0125	0.092	1.17	1.071	0.0480	0.1288	0.1202
28.5	7	468.56	49.043	21.5	425	0.0125	0.092	1.17	1.061	0.0495	0.1314	0.1238
28.5	7	463.22	48.484	24.6	445	0.0125	0.092	1.17	1.049	0.0516	0.1354	0.1290
28.5	7	455.06	47.630	27.7	450	0.0125	0.092	1.17	1.031	0.0518	0.1336	0.1296
28.5	7	441.98	46.261	30.8	460	0.0125	0.092	1.17	1.001	0.0526	0.1319	0.1317
28.5	7	432.78	45.298	33.9	465	0.0125	0.092	1.17	0.980	0.0529	0.1297	0.1323
28.5	7	413.06	43.234	37	480	0.0125	0.092	1.17	0.936	0.0543	0.1272	0.1360
28.5	7	396.54	41.505	52.5	500	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.0549	0.1234	0.1373
28.5	7	345.18	36.129	68	540	0.0125	0.092	1.17	0.782	0.0579	0.1133	0.1449
28.5	7	316.52	33.129	83.5	570	0.0125	0.092	1.17	0.717	0.0597	0.1071	0.1493
28.5	7	284.2	29.746	114.5	650	0.0125	0.092	1.17	0.644	0.0657	0.1058	0.1644
28.5	7	224.45	23.492	145.5	770	0.0125	0.092	1.17	0.508	0.0766	0.0975	0.1917
28.5	7	128.02	13.399	176.5	890	0.0125	0.092	1.17	0.290	0.0875	0.0635	0.2190
28.5	7	71.12	7.444	207.5	1070	0.0125	0.092	1.17	0.161	0.1058	0.0426	0.2647
28.5	7	0	0.000	238.5	1150	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.1118	0	0

Tabel C 16 Data turbin angin Savonius dengan silinder  
 pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,6$  pada bilangan  
 Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	524	54.845	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.211	0	0	0
28.5	7	445.52	46.631	6	300	0.0125	0.092	1.17	1.029	0.0360	0.0910	0.0884
28.5	7	430.12	45.019	9.1	350	0.0125	0.092	1.17	0.994	0.0418	0.1019	0.1026
28.5	7	414.9	43.426	12.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.0475	0.1118	0.1167
28.5	7	400.2	41.888	15.3	440	0.0125	0.092	1.17	0.925	0.0520	0.1181	0.1278
28.5	7	375.02	39.252	18.4	510	0.0125	0.092	1.17	0.866	0.0602	0.1281	0.1479
28.5	7	362.28	37.919	21.5	540	0.0125	0.092	1.17	0.837	0.0635	0.1306	0.1560
28.5	7	350.16	36.650	24.6	570	0.0125	0.092	1.17	0.809	0.0668	0.1327	0.1641
28.5	7	339.94	35.580	27.7	590	0.0125	0.092	1.17	0.785	0.0689	0.1329	0.1692
28.5	7	330.08	34.548	30.8	610	0.0125	0.092	1.17	0.763	0.0710	0.1329	0.1743
28.5	7	310.02	32.449	33.9	640	0.0125	0.092	1.17	0.716	0.0743	0.1306	0.1824
28.5	7	279.88	29.294	37	670	0.0125	0.092	1.17	0.647	0.0776	0.1231	0.1905
28.5	7	250.82	26.252	46.3	700	0.0125	0.092	1.17	0.579	0.0801	0.1140	0.1967
28.5	7	200.68	21.005	61.8	735	0.0125	0.092	1.17	0.464	0.0825	0.0939	0.2026
28.5	7	165.04	17.274	92.8	835	0.0125	0.092	1.17	0.381	0.0910	0.0851	0.2233
28.5	7	88.12	9.223	123.8	940	0.0125	0.092	1.17	0.204	0.1000	0.0500	0.2456
28.5	7	0	0.000	154.8	1076	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.1129	0	0

Tabel C 17 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,7$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	573.16	59.991	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.324	0	0	0
28.5	7	512.84	53.677	6	220	0.0125	0.092	1.17	1.185	0.0262	0.0763	0.0644
28.5	7	505.42	52.901	9.1	250	0.0125	0.092	1.17	1.168	0.0295	0.0847	0.0725
28.5	7	498.78	52.206	12.2	270	0.0125	0.092	1.17	1.152	0.0316	0.0894	0.0776
28.5	7	489.32	51.215	15.3	290	0.0125	0.092	1.17	1.130	0.0337	0.0935	0.0827
28.5	7	485.82	50.849	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	1.122	0.0345	0.0951	0.0848
28.5	7	483.44	50.600	21.5	315	0.0125	0.092	1.17	1.117	0.0360	0.0987	0.0883
28.5	7	480	50.240	24.6	325	0.0125	0.092	1.17	1.109	0.0368	0.1003	0.0904
28.5	7	465.94	48.768	27.7	345	0.0125	0.092	1.17	1.076	0.0389	0.1028	0.0955
28.5	7	448.2	46.912	30.8	375	0.0125	0.092	1.17	1.035	0.0422	0.1073	0.1036
28.5	7	438.92	45.940	33.9	400	0.0125	0.092	1.17	1.014	0.0449	0.1117	0.1102
28.5	7	423.24	44.299	37	430	0.0125	0.092	1.17	0.978	0.0482	0.1156	0.1183
28.5	7	421.26	44.092	40.1	440	0.0125	0.092	1.17	0.973	0.0490	0.1171	0.1204
28.5	7	413.24	43.252	43.2	460	0.0125	0.092	1.17	0.955	0.0511	0.1198	0.1254
28.5	7	393.26	41.161	46.3	510	0.0125	0.092	1.17	0.908	0.0569	0.1268	0.1396
28.5	7	384.94	40.290	49.4	530	0.0125	0.092	1.17	0.889	0.0589	0.1286	0.1446
28.5	7	373.84	39.129	52.5	540	0.0125	0.092	1.17	0.864	0.0598	0.1267	0.1467
28.5	7	360.46	37.728	55.6	550	0.0125	0.092	1.17	0.833	0.0606	0.1239	0.1488
28.5	7	341.28	35.721	58.7	560	0.0125	0.092	1.17	0.788	0.0615	0.1189	0.1509
28.5	7	317.38	33.219	68	590	0.0125	0.092	1.17	0.733	0.0640	0.1152	0.1571
28.5	7	254.18	26.604	83.5	630	0.0125	0.092	1.17	0.587	0.0670	0.0966	0.1645
28.5	7	203.26	21.275	99	670	0.0125	0.092	1.17	0.470	0.0700	0.0807	0.1718
28.5	7	143.84	15.055	114.5	710	0.0125	0.092	1.17	0.332	0.0730	0.0596	0.1792
28.5	7	102.18	10.695	130	800	0.0125	0.092	1.17	0.236	0.0822	0.0476	0.2016
28.5	7	82.4	8.625	161	900	0.0125	0.092	1.17	0.190	0.0906	0.0423	0.2224
28.5	7	46.64	4.882	192	1030	0.0125	0.092	1.17	0.108	0.1028	0.0272	0.2522
28.5	7	0	0.000	223	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.1075	0	0

Tabel C 18 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	530.86	55.563	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.226	0	0	0
28.5	7	439.98	46.051	6	300	0.0125	0.092	1.17	1.016	0.036052	0.0899	0.0885
28.5	7	429.98	45.005	9.1	340	0.0125	0.092	1.17	0.993	0.040577	0.0989	0.0996
28.5	7	416.98	43.644	12.2	370	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.043875	0.1037	0.1077
28.5	7	409.98	42.911	15.3	390	0.0125	0.092	1.17	0.947	0.045948	0.1068	0.1128
28.5	7	399.98	41.865	18.4	420	0.0125	0.092	1.17	0.924	0.049246	0.1117	0.1209
28.5	7	389.98	40.818	21.5	450	0.0125	0.092	1.17	0.901	0.052545	0.1162	0.1290
28.5	7	374.98	39.248	24.6	490	0.0125	0.092	1.17	0.866	0.05707	0.1213	0.1401
28.5	7	361.18	37.804	27.7	530	0.0125	0.092	1.17	0.834	0.061595	0.1261	0.1512
28.5	7	344.98	36.108	30.8	550	0.0125	0.092	1.17	0.797	0.063667	0.1245	0.1563
28.5	7	309.98	32.445	40.1	590	0.0125	0.092	1.17	0.716	0.067431	0.1185	0.1655
28.5	7	269.98	28.258	55.6	640	0.0125	0.092	1.17	0.624	0.071662	0.1097	0.1759
28.5	7	229.98	24.071	86.6	740	0.0125	0.092	1.17	0.531	0.080123	0.1045	0.1966
28.5	7	159.98	16.745	117.6	820	0.0125	0.092	1.17	0.370	0.086132	0.0781	0.2114
28.5	7	129.98	13.605	148.6	880	0.0125	0.092	1.17	0.300	0.089688	0.0661	0.2201
28.5	7	66.98	7.011	179.6	1000	0.0125	0.092	1.17	0.155	0.100602	0.0382	0.2469
28.5	7	0	0.000	210.6	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.109063	0	0

Tabel C 19 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 0,9$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	532.1	55.693	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.229	0	0	0
28.5	7	482.38	50.449	6	190	0.0125	0.092	1.17	1.113	0.0226	0.0617	0.0554
28.5	7	472.12	49.403	9.1	210	0.0125	0.092	1.17	1.090	0.0246	0.0659	0.0605
28.5	7	464.02	48.565	12.2	235	0.0125	0.092	1.17	1.072	0.0273	0.0719	0.0671
28.5	7	450.02	47.100	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	1.040	0.0312	0.0797	0.0767
28.5	7	438	45.844	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	1.012	0.0345	0.0858	0.0848
28.5	7	429.84	45.007	21.5	320	0.0125	0.092	1.17	0.993	0.0366	0.0892	0.0898
28.5	7	421.02	44.065	24.6	340	0.0125	0.092	1.17	0.973	0.0387	0.0923	0.0949
28.5	7	415	43.437	27.7	360	0.0125	0.092	1.17	0.959	0.0407	0.0959	0.1000
28.5	7	408.12	42.704	30.8	390	0.0125	0.092	1.17	0.943	0.0440	0.1019	0.1081
28.5	7	400.06	41.867	33.9	410	0.0125	0.092	1.17	0.924	0.0461	0.1046	0.1132
28.5	7	390.1	40.820	37	440	0.0125	0.092	1.17	0.901	0.0494	0.1093	0.1213
28.5	7	377.96	39.564	40.1	470	0.0125	0.092	1.17	0.873	0.0527	0.1130	0.1294
28.5	7	365.04	38.203	43.2	500	0.0125	0.092	1.17	0.843	0.0560	0.1159	0.1375
28.5	7	353.1	36.947	46.3	530	0.0125	0.092	1.17	0.815	0.0593	0.1187	0.1456
28.5	7	329	34.435	49.4	560	0.0125	0.092	1.17	0.760	0.0626	0.1168	0.1537
28.5	7	290.08	30.353	64.9	610	0.0125	0.092	1.17	0.670	0.0668	0.1099	0.1641
28.5	7	239.84	25.120	95.9	700	0.0125	0.092	1.17	0.554	0.0741	0.1008	0.1818
28.5	7	170.3	17.825	126.9	810	0.0125	0.092	1.17	0.393	0.0838	0.0809	0.2056
28.5	7	123.2	12.895	157.9	900	0.0125	0.092	1.17	0.285	0.0910	0.0636	0.2233
28.5	7	67.3	7.044	188.9	990	0.0125	0.092	1.17	0.155	0.0982	0.0375	0.2411
28.5	7	0	0.000	219.9	1200	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.1202	0	0

Tabel C 20 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,2$  dan  $d/D = 1,0$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_0$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	570.28	59.689	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.317	0	0	0
28.5	7	492.74	51.573	6	180	0.0125	0.092	1.17	1.138	0.02134	0.0596	0.0524
28.5	7	451.5	47.257	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	1.043	0.0320	0.0819	0.0785
28.5	7	445.32	46.610	12.2	290	0.0125	0.092	1.17	1.029	0.03407	0.0860	0.0836
28.5	7	426.92	44.684	15.3	340	0.0125	0.092	1.17	0.986	0.03982	0.0964	0.0977
28.5	7	417.06	43.652	18.4	360	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.04189	0.0991	0.1028
28.5	7	396.32	41.481	21.5	400	0.0125	0.092	1.17	0.916	0.04641	0.1043	0.1139
28.5	7	388.58	40.671	24.6	420	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.04849	0.1068	0.1190
28.5	7	379.12	39.681	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.876	0.05056	0.1087	0.1241
28.5	7	369.3	38.653	30.8	460	0.0125	0.092	1.17	0.853	0.05263	0.1102	0.1292
28.5	7	359.7	37.649	33.9	480	0.0125	0.092	1.17	0.831	0.0547	0.1116	0.1343
28.5	7	354.24	37.077	37	490	0.0125	0.092	1.17	0.818	0.05555	0.1116	0.1363
28.5	7	349.04	36.533	40.1	500	0.0125	0.092	1.17	0.806	0.0564	0.1116	0.1384
28.5	7	330.22	34.563	43.2	510	0.0125	0.092	1.17	0.763	0.05724	0.1072	0.1405
28.5	7	312.9	32.750	46.3	525	0.0125	0.092	1.17	0.723	0.0587	0.1041	0.1441
28.5	7	289.22	30.272	49.4	540	0.0125	0.092	1.17	0.668	0.06016	0.0987	0.1477
28.5	7	271.1	28.375	52.5	560	0.0125	0.092	1.17	0.626	0.06223	0.0957	0.1527
28.5	7	194.42	20.349	71.1	600	0.0125	0.092	1.17	0.449	0.06486	0.0715	0.1592
28.5	7	153.58	16.075	86.6	640	0.0125	0.092	1.17	0.355	0.06786	0.0591	0.1666
28.5	7	83.875	8.779	148.6	800	0.0125	0.092	1.17	0.194	0.07988	0.0380	0.1960
28.5	7	48.84	5.112	179.6	900	0.0125	0.092	1.17	0.113	0.08834	0.0245	0.2168
28.5	7	36.5	3.820	210.6	1000	0.0125	0.092	1.17	0.084	0.0968	0.0200	0.2376
28.5	7	0	0.000	241.6	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10526	0	0

Tabel C 21 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,6$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

Sudut ( $\theta$ )	$T_{s0}$ (N.cm)	
	$Re = 9,7 \times 10^4$	$Re = 13,6 \times 10^4$
0	2.04	2.72
10	3.04	3.98
20	4.18	5.46
30	4.96	6.52
40	4.44	5.16
50	4.1	4.98
60	3.58	4.34
70	3.36	3.94
80	2.82	3.40
90	2.52	3.06
100	2.24	2.46
110	2.00	2.38
120	1.56	2.26
130	0.66	1.84
140	-0.24	0.78
150	-1.04	0.14
160	-0.66	0.5
170	0.68	0.94
180	1.78	1.7

### D. Uncertainty

Uncertainty A ( $u_A$ ):

$$A = L \times H$$

$$dA = \frac{\partial A}{\partial L} + \frac{\partial A}{\partial H}$$

$$dA = \frac{\partial(L \times H)}{\partial L} + \frac{\partial(L \times H)}{\partial H}$$

$$dA = H + L$$

$$u_{A,L} = \frac{\delta A, L}{A} = \frac{L}{A} \frac{\partial A}{\partial L} u_L$$

$$= \frac{L}{(L \times H)} \cdot H \cdot u_L$$

$$= u_L$$

$$u_{A,H} = \frac{\delta A, H}{A} = \frac{H}{A} \frac{\partial A}{\partial H} u_H$$

$$= \frac{H}{(L \times H)} \cdot L \cdot u_H$$

$$= u_H$$

$$u_A = \pm \{[u_L]^2 + [u_H]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_A = \pm \{(1,618 \times 10^{-3})^2 + (1,678 \times 10^{-3})^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_A = \pm 2,331 \times 10^{-3}$$

$$u_A = \pm 0,233\%$$

Uncertainty  $\rho$  ( $u_\rho$ ):

$$\rho = \rho(C, T) = CT^{-1}$$

$$u_{\rho(T)} = \pm \frac{\delta \rho}{\rho} = \pm \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} (\pm \delta T)$$

$$\frac{d\rho}{dT} \approx \frac{\Delta \rho}{\Delta T} = \frac{\rho(30^\circ\text{C}) - \rho(27^\circ\text{C})}{(30 - 27)^\circ\text{C}} = \frac{(1,1768 - 1,1651) \text{ kg/m}^3}{3^\circ\text{C}}$$

$$= 3,9 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\text{C}$$

$$u_{\rho(T)} = \pm \frac{1}{1,1710 \text{ kg/m}^3} (3,9 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3\text{C}) (\pm 1^\circ\text{C})$$

$$u_{\rho(T)} = \pm 3,3317 \times 10^{-3} = \pm 0,332\%$$

*Uncertainty  $T_d$  ( $u_{T_d}$ ):*

$$T_d = (s-m) \times g \times r$$

$$dT_d = \frac{\partial T_d}{\partial (s-m)} + \frac{\partial T_d}{\partial r}$$

$$dT_d = \frac{\partial((s-m) \times r)}{\partial (s-m)} + \frac{\partial((s-m) \times r)}{\partial r}$$

$$dT_d = r + (s-m)$$

$$\begin{aligned} u_{T_d(s-m)} &= \frac{\delta T_d(s-m)}{T_d} \\ &= \frac{(s-m)}{T_d} \frac{\partial T_d}{\partial (s-m)} u_{(s-m)} \\ &= \frac{(s-m)}{((s-m) \times r)} \cdot r \cdot u_{(s-m)} \\ &= u_{(s-m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{T_d,r} &= \frac{\delta T_d,r}{T_d} \\ &= \frac{r}{T_d} \frac{\partial T_d}{\partial r} u_r \\ &= \frac{r}{((s-m) \times r)} \cdot (s-m) \cdot u_r \\ &= u_r \end{aligned}$$

$$u_{T_d} = \pm \left\{ [u_{(s-m)}]^2 + [u_r]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{T_d} = \pm \left\{ [0,0229]^2 + [0,04]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{T_d} = \pm 0,0461$$

$$u_{T_d} = \pm 4,61\%$$



*Uncertainty Coefficient of Power ( $u_{CoP}$ ):*

$$CoP = \frac{T_d \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$CoP = \frac{2 T_d \omega}{\rho A V^3}$$

$$CoP = 2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}$$

$$dCoP = \frac{\partial CoP}{\partial T_d} + \frac{\partial CoP}{\partial \omega} + \frac{\partial CoP}{\partial \rho} + \frac{\partial CoP}{\partial A} + \frac{\partial CoP}{\partial V}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial T_d} = 2 \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial \omega} = 2 T_d \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial \rho} = -2 T_d \omega \rho^{-2} V^{-3} A^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial A} = -2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-2}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial V} = -6 T_d \omega \rho^{-1} V^{-4} A^{-1}$$

$$u_{CoP, T_d} = \frac{\delta CoP, T_d}{CoP}$$

$$u_{CoP, T_d} = \frac{T_d}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta T_d} u_{T_d}$$

$$u_{CoP, T_d} = \frac{T_d}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (2 \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) u_{T_d}$$

$$u_{CoP, T_d} = u_{T_d}$$

$$u_{CoP, \omega} = \frac{\delta CoP, \omega}{CoP}$$

$$u_{CoP, \omega} = \frac{\omega}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta \omega} u_{\omega}$$

$$u_{CoP, \omega} = \frac{\omega}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (2 T_d \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) u_{\omega}$$

$$u_{CoP, \omega} = u_{\omega}$$

$$u_{CoP, \rho} = \frac{\delta CoP, \rho}{CoP}$$

$$u_{CoP, \rho} = \frac{\rho}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta \rho} u_{\rho}$$

$$u_{CoP, \rho} = \frac{\rho}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (-2 T_d \omega \rho^{-2} V^{-3} A^{-1}) u_{\rho}$$

$$u_{CoP, \rho} = -u_{\rho}$$

$$u_{CoP, A} = \frac{\delta CoP, A}{CoP}$$

$$u_{CoP, A} = \frac{A}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta A} u_A$$

$$u_{CoP, A} = \frac{A}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (-2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-2}) u_A$$

$$u_{CoP, A} = -u_A$$

$$u_{CoP,V} = \frac{\delta CoP,V}{CoP}$$

$$u_{CoP,V} = \frac{V}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta V} u_V$$

$$u_{CoP,V} = \frac{V}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (-6 T_d \omega \rho^{-1} V^4 A^{-1}) u_V$$

$$u_{CoP,V} = -3 u_V$$

$$u_{CoP} = \pm \{ u_{T_d}^2 + u_{\omega}^2 + u_{\rho}^2 + u_V^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,046)^2 + (3,77 \times 10^{-3})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0469$$

- *Uncertainty pada pembacaan coefficient of moment (C<sub>M</sub>)*

$$C_m = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R}$$

$$C_m = 2 T_D \rho^{-1} A^{-1} V^{-2} R^{-1}$$

$$dC_m = \frac{\partial C_m}{\partial T_D} + \frac{\partial C_m}{\partial \rho} + \frac{\partial C_m}{\partial A} + \frac{\partial C_m}{\partial v} + \frac{\partial C_m}{\partial R}$$

$$\begin{aligned} &> \frac{\partial C_m}{\partial T_D} = (2 \rho^{-1} A^{-1} V^{-2} R^{-1}) \\ &> \frac{\partial C_m}{\partial \rho} = (-2 \rho^{-2} T_D A^{-1} V^{-2} R^{-1}) \\ &> \frac{\partial C_m}{\partial A} = (-2 A^{-2} T_D \rho^{-1} V^{-2} R^{-1}) \\ &> \frac{\partial C_m}{\partial v} = (-4 V^{-3} T_D \rho^{-1} A^{-1} R^{-1}) \\ &> \frac{\partial C_m}{\partial R} = (-2 R^{-2} T_D \rho^{-1} A^{-1} V^{-2}) \end{aligned}$$

$$u_{C_m, T_D} = \frac{\delta C_m, T_D}{C_m} = \frac{T_D}{C_m} \frac{\delta C_m}{\delta T_D} u_{T_D} = u_{T_D}$$

$$u_{C_m, \rho} = \frac{\delta C_m, \rho}{C_m} = \frac{\rho}{C_m} \frac{\delta C_m}{\delta \rho} u_{\rho} = -u_{\rho}$$

$$u_{C_m, A} = \frac{\delta C_m, A}{C_m} = \frac{A}{C_m} \frac{\delta C_m}{\delta A} u_A = -u_A$$

$$u_{C_m, V} = \frac{\delta C_m, V}{C_m} = \frac{V}{C_m} \frac{\delta C_m}{\delta V} u_V = -2 u_V$$

$$u_{C_M} = \pm \{ u_{T_d}^2 + u_{\rho}^2 + u_V^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm \{ (0,046)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,0472$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

$$Re = \rho V L \mu^{-1}$$

$$dRe = \frac{\partial Re}{\partial \rho} + \frac{\partial Re}{\partial V} + \frac{\partial Re}{\partial L} + \frac{\partial Re}{\partial \mu}$$

$$\triangleright \frac{\partial Re}{\partial \rho} = (VL\mu^{-1})$$

$$\triangleright \frac{\partial Re}{\partial V} = (\rho L\mu^{-1})$$

$$\triangleright \frac{\partial Re}{\partial L} = (\rho V\mu^{-1})$$

$$\triangleright \frac{\partial Re}{\partial \mu} = (-\mu^{-2}\rho VL)$$

$$u_{Re,\rho} = \frac{\delta Re,\rho}{Re} = \frac{\rho}{Re} \frac{\delta Re}{\delta \rho} u_\rho = \frac{\rho}{Re} (VL\mu^{-1}) u_\rho = u_\rho$$

$$u_{Re,V} = \frac{\delta Re,V}{Re} = \frac{V}{Re} \frac{\delta Re}{\delta V} u_V = \frac{V}{Re} (\rho L\mu^{-1}) u_V = u_V$$

$$u_{Re,L} = \frac{\delta Re,L}{Re} = \frac{L}{Re} \frac{\delta Re}{\delta L} u_L = \frac{L}{Re} (\rho V\mu^{-1}) u_L = u_L$$

$$u_{Re,\mu} = \frac{\delta Re,\mu}{Re} = \frac{\mu}{Re} \frac{\delta Re}{\delta \mu} u_\mu = \frac{\mu}{Re} (-\mu^{-2}\rho VL) u_\mu = -u_\mu$$

$$u_{RE} = \pm \{u_\rho^2 + u_V^2 + u_L^2 + (-u_\mu)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

Maka:

$$u_{RE} = \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,6 \times 10^{-3})^2 + (-1,24 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 4,51 \times 10^{-3}$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BIODATA PENULIS



**Lazuardhi Rahim Yamin**, anak ketiga dari tiga bersaudara ini adalah putra kandung dari pasangan Bapak Christiono Sulistianto dan Ibu Ellynawati. Lahir di Tangerang pada 15 April 1996. Penulis memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Islamic Village pada tahun 2002, kemudian melanjutkan ke jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMPN 4 Tangerang pada tahun 2008-2011 dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 7 Tangerang pada tahun 2011-2014. Penulis melanjutkan ke jenjang Perguruan Tinggi di Departemen Teknik Mesin ITS pada tahun 2015 melalui jalur SBMPTN.

Semasa kuliah, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi. Penulis pernah menjadi pengurus di dalam organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin dan juga menjadi panitia dari beberapa *event* yang diadakan oleh organisasi maupun departemen Teknik Mesin.

Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis, dapat melalui email: [lazuardhi.ry@gmail.com](mailto:lazuardhi.ry@gmail.com)