



**TUGAS AKHIR - TM184835**

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

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

**PRABASWORO DRESTANTO  
NRP. 0211154000118**

**Dosen Pembimbing:  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
NIP. 196001291987011001**

**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 PENGGANGGU DI DEPAN SISI  
*RETURNING BLADE* TERHADAP KINERJA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

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

**Prabasworo Drestanto**  
NRP. 02111540000118

Dosen Pembimbing  
**Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**  
NIP. 196001291987011001

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





**TUGAS AKHIR – TM184835**

***EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF TURBINE RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE***

***“Study Case of Ratios Variation  $S/D = 2.4$ ,  $y/D = 0.5$ ,  $d/D = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ , and  $1.0$ , with  $Re = 9.7 \times 10^4$  and  $13.6 \times 10^4$ ”***

**Prabasworo Drestanto**  
NRP. 02111540000118

*Advisor*

**Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**  
NIP. 196001291987011001

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEMS  
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 Variasi Rasio  $S/D = 2,4$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1; 0,2;$   
 $0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; 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:

**Prabasworo Drestanto**

NRP. 02111540000118

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)  
NIP. 196001291987011001
2. Dr. Wawan Aries Widada, ST, MT (Penguji 1)  
NIP. 197104051997021001
3. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD (Penguji 2)  
NIP. 198105292003122001
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto (Penguji 3)  
NIP. 196202161995121001

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**





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

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

**Nama Mahasiswa** : Prabasworo Drestanto  
**NRP** : 02111540000118  
**Departemen** : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

**ABSTRAK**

Saat ini, energi fosil merupakan sumber yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Padahal pemanfaatan energi fosil dapat menimbulkan polusi dan secara jangka panjang sumber energi ini juga akan habis. Energi terbarukan untuk menghasilkan listrik sudah mulai dikembangkan karena tidak menimbulkan polusi dan sumbernya tidak akan habis. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia adalah  $3,5 \text{ m/s} - 6,1 \text{ m/s}$  berdasarkan *Global Wind Atlas*, kecepatan tersebut dapat terbilang cukup rendah. Hal tersebut membuat turbin Savonius yang memiliki kelebihan untuk dapat berputar pada kecepatan angin rendah sangat cocok untuk diaplikasikan di Indonesia.

Studi eksperimen dilakukan menggunakan turbin angin Savonius dengan 2 sudu yang memiliki ukuran diameter sudu ( $D$ ) sebesar  $167,1 \text{ mm}$ ; tinggi ( $H$ )  $298 \text{ mm}$ ; diameter poros ( $e$ )  $19,3 \text{ mm}$ ; diameter *end plate* ( $D_0$ )  $320 \text{ mm}$ ; tebal *end plate*  $1,8 \text{ mm}$ ; dan tebal sudu turbin  $2,95 \text{ mm}$ . Silinder sirkular pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* untuk mengurangi gaya *drag*

yang terjadi pada bagian *returning blade* turbin. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki variasi rasio 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; 1,0 yang ditempatkan dengan rasio jarak silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin ( $S/D$ ) sebesar 2,4. Peralatan lain yang digunakan adalah *axial fan*, *voltage regulator*, *honeycomb*, anemometer, *brake dynamometer*, dan *tachometer*. Penelitian ini juga menggunakan variasi bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

Hasil yang didapat dari eksperimen ini adalah penempatan silinder pengganggu dengan  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  merupakan yang paling efektif untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius; dimana nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin meningkat 34,2% dari 0,152 menjadi 0,203; dan *Coefficient of Moment* maksimum turbin meningkat 29,1% dari 0,284 menjadi 0,366. Selain itu, penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$  dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius di semua posisi angular sudu turbin.

**Kata Kunci:** Turbin angin Savonius, silinder pengganggu, *coefficient of power*, *coefficient of moment*, torsi statis

# **EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF TURBINE RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE**

*“Study Case of Ratios Variation  $S/D = 2.4$ ,  $y/D = 0.5$ ,  $d/D = 0.1$ ,  $0.2$ ,  $0.3$ ,  $0.4$ ,  $0.5$ ,  $0.6$ ,  $0.7$ ,  $0.8$ ,  $0.9$ , and  $1.0$ , with  $Re = 9.7 \times 10^4$  and  $13.6 \times 10^4$ ”*

**Student Name** : Prabasworo Drestanto  
**NRP** : 02111540000118  
**Department** : Mechanical Engineering FTIRS-ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

## **ABSTRACT**

*Nowadays, fossil energy is widely used as the main source of electricity. However, the use of fossil energy is exhaustible and pose environmental threat through its pollution. The idea of using renewable sources to produce electricity has begun to be developed because renewable energy does not cause pollution and the resources are sustainable. According to Global Wind Atlas, the average wind speed in Indonesia is  $3.5 \text{ m/s}$  -  $6.1 \text{ m/s}$ , which is fairly low. This makes the Savonius turbine, which has the advantage of being able to spin at low wind speeds, is very suitable for application in Indonesia.*

*An experimental study has been done by using a Savonius wind turbine with 2 blades which had a blade diameter ( $D$ ) of  $167.1 \text{ mm}$ ; height ( $H$ )  $298 \text{ mm}$ ; shaft diameter ( $e$ )  $19.3 \text{ mm}$ ; end plate diameter ( $D_0$ )  $320 \text{ mm}$ ; end plate thickness  $1.8 \text{ mm}$ ; and turbine blade thickness  $2.95 \text{ mm}$ . A circular cylinder was placed in front of the returning blade to reduce the drag force that occurs on the returning blade of the turbine. The cylinders were used with variation in the diameter ratio of the cylinder to the diameter of the turbine blade ( $d / D$ ) of  $0.1$ ;  $0.2$ ;  $0.3$ ;  $0.4$ ;  $0.5$ ;  $0.6$ ;  $0.7$ ;  $0.8$ ;  $0.9$ ;*

*1.0 which were placed with the ratio of cylinder distance to turbine blade diameter ( $S / D$ ) of 2.4. Other devices that were used are axial fan, voltage regulator, honeycomb, anemometer, brake dynamometer, and tachometer. This study was also conducted with variations of Reynolds number =  $9.7 \times 10^4$  and  $13.6 \times 10^4$ .*

*The results from this experiment are the placement of the cylinder with  $d / D = 0.5$  for  $Re = 9.7 \times 10^4$  is the most effective treatment to improve the performance of Savonius wind turbines; where the maximum Coefficient of Power value of the turbine increased 34.2% from 0,152 to 0.203; and the maximum Coefficient of Moment of the turbine increased 29.1% from 0,284 to 0.366. In addition, the placement of the cylinder in front of the returning blade with  $d / D = 0.5$  for  $Re = 9.7 \times 10^4$  and  $d / D = 0.6$  for  $Re = 13.6 \times 10^4$  was able to improve the self-starting ability of Savonius wind turbines in every angular position of the turbine blade.*

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

## **KATA PENGANTAR**

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya laporan tugas akhir ini. Tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa S1 jurusan Teknik Mesin FTIRS-ITS yang sesuai dengan kurikulum yang sudah ditetapkan. Atas dukungan moral dan materil yang diberikan dalam penyusunan laporan ini, maka penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena telah memberikan kesehatan dan kesempatan untuk dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.
2. Orangtua dan keluarga besar atas doa dan dukungannya.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA. Selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
4. Pitra Kinasih atas doa dan dukungannya selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
5. Seluruh rekan tugas akhir bimbingan pak Triyogi.
6. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin FTIRS-ITS yang membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis memohon maaf apabila terdapat kekurangan dalam laporan Tugas Akhir ini, karena ketidaksempurnaan dalam laporan ini bukanlah sesuatu yang disengaja. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca, dan masyarakat luas.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xix
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan 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 .....	8
2.3    Gaya <i>Drag</i> .....	10
2.4    Aliran Melintasi Sebuah Silinder .....	13
2.5    Bilangan Reynolds .....	14
2.6    Torsi Statis.....	16
2.7    Perhitungan Daya dan <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	17
2.7.1    Perhitungan Daya Turbin Teoritis .....	17
2.7.2    Perhitungan Daya Turbin Aktual.....	18
2.7.3 <i>Coefficient of Power</i> (CoP) .....	20
2.8 <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ).....	20

2.9	<i>Coefficient of Moment</i> .....	22
2.10	Penelitian Terdahulu.....	22
2.10.1	Studi Eksperimen untuk Mengembangkan Performa Turbin Savonius.....	23
2.10.2	Pengurangan <i>Drag</i> Sebuah Silinder Sirkular pada Suatu Aliran Udara.....	31
2.10.3	Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius.....	34
BAB III METODOLOGI .....		45
3.1	<i>Setting</i> Eksperimental.....	45
3.1.1	Parameter yang Diukur.....	45
3.1.2	Analisa Dimensi .....	47
3.2	Peralatan .....	55
3.2.1	<i>Axial Fan</i> .....	55
3.2.2	Turbin Savonius.....	56
3.2.3	Silinder Pengganggu.....	56
3.2.4	Penyangga Turbin Angin Savonius .....	57
3.2.5	Honeycomb.....	58
3.3	Alat Ukur .....	58
3.3.1	Anemometer .....	59
3.3.2	Tachometer .....	60
3.3.3	<i>Voltage Regulator</i> .....	61
3.3.4	<i>Torquemeter</i> Statis.....	61
3.3.5	<i>Brake Dynamometer</i> .....	62
3.4	Prosedur Penelitian .....	65



3.4.1	Torsi Dinamis .....	65
3.4.2	Torsi Statis.....	66
3.5	<i>Flowchart</i> Penelitian .....	68
3.5.1	Torsi Dinamis .....	68
3.5.2	Torsi Statis.....	70
3.6	Perhitungan <i>Uncertainty</i> .....	72
3.7	Hasil yang akan Diperoleh .....	74
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		77
4.1	Contoh Perhitungan.....	77
4.1.1	Perhitungan Bilangan Reynolds .....	77
4.1.2	Perhitungan Tip Speed Ratio.....	80
4.1.3	Perhitungan <i>Coefficient of Power (CoP)</i> .....	80
4.1.4	Perhitungan <i>Coefficient of Moment (C<sub>M</sub>)</i> .....	81
4.2	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	82
4.2.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power (CoP<sub>0</sub>)</i> Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio (λ)</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	82
4.2.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment (C<sub>M0</sub>)</i> Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio (λ)</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	84
4.2.3	Analisis Nilai Torsi Statis (T <sub>s0</sub> ) Terhadap Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	85
4.3	Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu.....	87

4.3.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu .....	87
4.3.1.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	88
4.3.1.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	91
4.3.1.3	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> <i>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 $13,6 \times 10^4$ .....	95
4.3.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C <sub>M</sub> ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu .....	97
4.3.2.1	Analisis 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 $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	97
4.3.2.2	Analisis 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 $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	101
4.3.3	Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu .....	105
4.3.3.1	Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	105

4.3.3.2	Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	107
4.4	Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu.....	108
4.4.1	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ dengan $S/D = 1,4$ s.d $3,0$ .....	109
4.4.1.1	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ dengan $S/D = 1,4$ s.d $3,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	109
4.4.1.2	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ dengan $S/D = 1,4$ s.d $3,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	111
4.4.2	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $S/D$ dengan $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ .....	113
4.4.2.1	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $S/D$ dengan $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	113
4.4.2.2	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $S/D$ dengan $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	115
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		117

5.1.	Kesimpulan.....	117
5.2	Saran.....	118
DAFTAR PUSTAKA.....		121
LAMPIRAN .....		123
BIODATA PENULIS.....		145

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Horizontal axis wind turbine dan vertical axis wind turbine (Al-Shemmeri, 2010) .....	8
Gambar 2. 2 Desain Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012) .....	9
Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012).....	10
Gambar 2. 4 Skema Sederhana Penguraian Gaya Drag (Rustam, 2018).....	11
Gambar 2. 5 (a) Aliran inviscid, (b) Aliran viscous (Fox, et al., 2011).....	14
Gambar 2. 6 Skema turbin angin Savonius .....	15
Gambar 2. 7 Free body diagram dari brake dynamometer (Rustam, 2018) .....	19
Gambar 2. 8 Grafik hubungan antara Coefficient Of Power dengan Tip Speed Ratio untuk berbagai jenis turbin angin (Al-Shemmeri, 2011) .....	21
Gambar 2. 9 Skema dari alat uji (Mahmoud, et al., 2012) .....	24
Gambar 2. 10 Hubungan antara power coefficient dan kecepatan angin dengan variasi jumlah blades (Mahmoud, et al., 2012) .....	24
Gambar 2. 11 Hubungan antara static torque coefficient dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi dua, tiga, dan empat blade untuk (a) aspect ratio = 0,5 dan (b) aspect ratio = 5. (Mahmoud, et al., 2012) .....	25
Gambar 2. 12 Hubungan antara power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi dua, tiga, dan empat blades (a) aspect ratio = 0,5; single stage; (b) aspect ratio = 5; single stage; (c) aspect ratio = 1; double stages. (Mahmoud, et al., 2012) .....	26
Gambar 2. 13 Hubungan antara specific power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan single dan double stages (Mahmoud, et al., 2012) .....	27

Gambar 2. 14 Hubungan antara koefisien torsi statis dengan kecepatan angin dengan variasi single dan double stages (Mahmoud, et al., 2012) .....	28
Gambar 2. 15 Hubungan antara power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi overlap ratio (Mahmoud, et al., 2012).....	28
Gambar 2. 16 Hubungan antara power coefficient dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi aspect ratio (Mahmoud, et al., 2012) .....	29
Gambar 2. 17 Hubungan antara power dengan kecepatan angin pada turbin Savonius menggunakan end plate dan tanpa end plate (Mahmoud, et al., 2012) .....	30
Gambar 2. 18 Skema silinder utama dan silinder pengganggu (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	31
Gambar 2. 19 Distribusi tekanan di dekat silinder sirkular. (a) Efek Re dan (b) Efek d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	32
Gambar 2. 20 Titik separasi (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	33
Gambar 2. 21 Koefisien drag (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	33
Gambar 2. 22 Skema turbin dan silinder pengganggu (Dwidiyanto, 2018).....	35
Gambar 2. 23 Grafik Nilai Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 90.000$ (Dwidiyanto, 2018) .....	36
Gambar 2. 24 Grafik Nilai Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 138.000$ (Dwidiyanto, 2018).....	37
Gambar 2. 25 Grafik Nilai Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 168.000$ (Dwidiyanto, 2018).....	38
Gambar 2. 26 Grafik Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 90.000$ (Dwidiyanto, 2018) .....	39

Gambar 2. 27 Grafik Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 138.000$ (Dwidianto, 2018).....	40
Gambar 2. 28 Grafik Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Tip Speed Ratio pada $Re = 168.000$ (Dwidianto, 2018).....	41
Gambar 2. 29 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada $Re = 90.000$ (Dwidianto, 2018) .....	42
Gambar 2. 30 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada $Re = 138.000$ (Dwidianto, 2018) .....	43
Gambar 2. 31 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada $Re = 168.000$ (Dwidianto, 2018) .....	44
Gambar 3. 1 Skema penelitian .....	45
Gambar 3. 2 Skema turbin angin Savonius tampak atas dan samping .....	46
Gambar 3. 3 Axial fan .....	55
Gambar 3. 4 Turbin angin Savonius.....	56
Gambar 3. 5 Silinder Pengganggu.....	57
Gambar 3. 6 Penyangga.....	57
Gambar 3. 7 Honeycomb.....	58
Gambar 3. 8 Anemometer Omega HHF141.....	59
Gambar 3. 9 Tachometer Omega HHT12 .....	60
Gambar 3. 10 Voltage regulator .....	61
Gambar 3. 11 Torquemeter LUTRON model TQ-8800.....	62
Gambar 3. 12 Skema brake dynamometer .....	63
Gambar 3. 13 Neraca pegas Nagata tipe C-5 .....	64
Gambar 3. 14 Pemberat .....	64
Gambar 3. 15 Flowchart pengukuran torsi dinamis .....	70
Gambar 3. 16 Flowchart pengukuran torsi statis.....	72

Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power ( $CoP_0$ ) terhadap fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	83
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment ( $C_{M0}$ ) terhadap fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	84
Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis ( $T_{s0}$ ) terhadap fungsi sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	85
Gambar 4. 4 Grafik perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan $S/D = 2,4$ ; $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	88
Gambar 4. 5 Grafik perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan $S/D = 2,4$ ; $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	92
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Power antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ .....	96
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan $S/D = 2,4$ ; $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	98
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan	



S/D = 2,4; d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada Re = 13,6x10 <sup>4</sup> .....	102
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (T <sub>so</sub> ) terhadap fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan S/D = 2,4; d/D = 0,5; pada Re = 9,7x10 <sup>4</sup> .....	106
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (T <sub>so</sub> ) terhadap fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan S/D = 2,4; d/D = 0,6 pada Re = 13,6x10 <sup>4</sup> .....	107
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>max</sub> /CoP <sub>0max</sub> ) terhadap variasi d/D 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada Re = 9,7x10 <sup>4</sup> .....	110
Gambar 4. 12 Grafik perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>max</sub> /CoP <sub>0max</sub> ) terhadap variasi d/D 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada Re = 13,6x10 <sup>4</sup> .....	112
Gambar 4. 13 Grafik perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>max</sub> /CoP <sub>0max</sub> ) terhadap variasi S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0 pada Re = 9,7x10 <sup>4</sup> .....	114
Gambar 4. 14 Grafik perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>max</sub> /CoP <sub>0max</sub> ) terhadap variasi S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0 pada Re = 13,6x10 <sup>4</sup> .....	115

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Coefficient Drag (Fox, et al., 2011) .....	13
Tabel 3. 1 Dimensi untuk setiap parameter CoP .....	48
Tabel 3. 2 Dimensi untuk setiap parameter CM.....	52
Tabel 3. 3 Spesifikasi anemometer Omega HHF141 .....	59
Tabel 3. 4 Spesifikasi Tachometer Omega HHT12.....	60
Tabel 3. 5 Spesifikasi voltage regulator .....	61
Tabel 3. 6 Spesifikasi torquemeter LUTRON model TQ-8800 ..	62
Tabel 3. 7 Spesifikasi neraca pegas Nagata tipe C-5.....	64
Tabel 3. 8 Uncertainty .....	74
Tabel 4. 1 Tabel perbandingan CoP turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	89
Tabel 4. 2 Uncertainty CoP maksimum pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	90
Tabel 4. 3 Tabel perbandingan CoP turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	93
Tabel 4. 4 Uncertainty CoP maksimum pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	94
Tabel 4. 5 Tabel perbandingan $C_M$ turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	99
Tabel 4. 6 Uncertainty $C_M$ maksimum pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	100
Tabel 4. 7 Tabel perbandingan $C_M$ turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	103
Tabel 4. 8 Uncertainty $C_M$ maksimum pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	104

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Listrik menjadi salah satu sumber energi yang sangat diperlukan oleh masyarakat dunia. Bahkan suatu daerah dapat dikatakan sangat jauh dari peradaban modern jika tidak ada listrik. Untuk saat ini, pemanfaatan energi fosil merupakan sumber yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Padahal pemanfaatan energi fosil dapat menimbulkan polusi dan secara jangka panjang sumber energi ini juga akan habis. Pemanfaatan energi terbarukan untuk menghasilkan listrik juga sudah mulai dikembangkan dikarenakan tidak menimbulkan polusi dan sumbernya tidak akan habis. Salah satu energi terbarukan itu dapat diperoleh dari aliran udara. Berdasarkan data Statistik Ketenagalistrikan 2017 Edisi no.31 tahun 2018 dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, sebesar 41.720,96 MW dihasilkan dari Pembangkit PLN untuk sarana penyediaan tenaga listrik PLN pada tahun 2017. Pembangkit tersebut terdiri dari PLTU, PLTG, PLTGU, PLTM-G, PLTD, PLTA, PLTM, PLTMH, PLTP, PLT Bayu, PLTS, dan PLTGB. PLTU memiliki nilai tertinggi dengan menyediakan 16.897 MW tenaga listrik, sedangkan PLT Bayu (memanfaatkan tenaga angin) memiliki nilai terendah dengan hanya menyediakan 0,43 MW listrik. Dapat dilihat bahwa pemanfaatan tenaga angin di Indonesia masih sangat rendah.

Pemanfaatan energi angin untuk menghasilkan energi listrik dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin merupakan alat yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik berupa putaran poros yang akan memutar dinamo atau generator untuk menghasilkan listrik. Turbin angin terbagi menjadi 2 jenis berdasarkan bentuk rotornya, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Untuk *Vertical Axis Wind Turbine* sendiri

memiliki 3 model rotor yaitu Savonius, Darrieus, dan H-rotor. Kecepatan angin rata-rata di Indonesia adalah 3,5 m/s – 6,1 m/s berdasarkan *Global Wind Atlas*, kecepatan tersebut dapat terbilang cukup rendah. Hal tersebut membuat turbin savonius yang memiliki kelebihan untuk dapat berputar pada kecepatan angin rendah sangat cocok untuk diaplikasikan di Indonesia. Selain itu, untuk biaya pembuatan dan proses instalasi turbin jenis ini juga sangat murah dan mudah sehingga dapat digunakan untuk memasok listrik di rumah-rumah penduduk.

Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk mengembangkan potensi dari turbin Savonius. Penelitian yang dilakukan oleh **N.H. Mahmoud et al (2012)** bertujuan untuk mencari variasi yang paling efektif untuk meningkatkan performa turbin. Dilakukan beberapa variasi seperti variasi jumlah *blade* turbin, ada atau tidaknya *end plates*, jumlah *stage*, nilai *aspect ratio*, dan *overlap ratio*. Variasi *blade* yang diteliti adalah 2 *blades*, 3 *blades*, dan 4 *blades*. Untuk variasi nilai *aspect ratios* yang digunakan adalah 0,5; 1; 2; 3; 4; dan 5. Sedangkan untuk *overlap ratios* menggunakan variasi 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35. Variasi untuk jumlah *stages* sendiri adalah *single stage* dan *double stages*. Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah turbin Savonius dengan 2 *blades* lebih efisien daripada menggunakan 3 dan 4 *blades*. Lalu turbin dengan menggunakan *end plates* memberikan efisiensi yang lebih tinggi dari turbin tanpa *end plates*. Turbin dengan *double stages* juga memberikan performa yang lebih tinggi daripada *single stage*. Dengan tidak adanya *overlap ratios*, turbin Savonius juga dapat bekerja lebih baik dan nilai  $C_p$  akan meningkat apabila nilai *aspect ratio* juga meningkat.

Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** yang menempatkan silinder pengganggu pada sisi *upstream* dari silinder sirkular. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan *low speed wind tunnel* yang memiliki dimensi panjang 800 mm, lebar 150 mm, serta tinggi 400 mm. Untuk silinder sirkular yang digunakan memiliki ukuran diameter ( $D$ ) 40 mm, dan untuk pengganggu menggunakan tongkat dengan

variasi diameter ( $d$ ) 1 sampai 10 mm. Variasi yang dilakukan juga ada pada rasio pusat silinder sirkular dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter silinder sirkular ( $L/D$ ) yaitu 1,25 – 3,0; dimana jarak  $L$  yang digunakan antara 50 mm – 120 mm. Variasi bilangan Reynolds juga dilakukan yaitu  $1,5 \cdot 10^4$  –  $6,2 \cdot 10^4$ . Kesimpulan dari penelitian tersebut adalah dengan penambahan silinder sirkular, variasi bilangan Reynolds yang meningkat akan menyebabkan *wake* di belakang silinder sirkular semakin menyempit. Lalu dengan ditambahkan silinder pengganggu, variasi diameter silinder pengganggu yang meningkat akan membuat *wake* di bagian belakang silinder sirkular semakin menyempit.

Studi eksperimen pengaruh silinder pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius juga pernah dilakukan oleh **Ignatius Yudhistira Dwidianto (2018)** dari Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember menggunakan perbandingan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius pararel dengan datangnya angin terhadap diameter turbin Savonius ( $S/D$ ) sebesar 2,2; perbandingan diameter silinder pengganggu dan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 1,0; serta variasi perbandingan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius tegak lurus dengan datangnya angin ( $y/D$ ) sebesar 0; 0,25; 0,5. Bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini ada 3, yaitu sebesar 90.000, 138.000, dan 168.000. Kesimpulan yang didapat pada penelitian tersebut adalah peningkatan *Coefficient of Power* terjadi hanya pada  $Re=168000$ , dimana  $y/D=0,5$  memiliki nilai *CoP* yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu; peningkatan *Coefficient of Moment* terjadi hanya pada  $Re=168000$ ; serta dengan adanya silinder pengganggu dan variasi *Reynolds Number* tidak menaikkan nilai torsi statis maksimum turbin namun menaikkan nilai torsi statis minimumnya.

Dari penelitian-penelitian terdahulu, masih diperlukannya penelitian lebih lanjut untuk dapat meningkatkan performa turbin

angin Savonius. Pada penelitian ini menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Untuk nilai (S/D) yang digunakan sebesar 2,4; dan variasi (d/D) adalah 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0. Kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini adalah 5m/s dan 7m/s. Sedangkan untuk bilangan Reynolds pada penelitian ini adalah  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

## 1.2 Rumusan Masalah

*Vertical axis wind turbine* (VAWT) memiliki beberapa jenis turbin, salah satunya adalah turbin angin Savonius. Pada turbin ini, terdapat 2 *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade* yang berbentuk setengah lingkaran dimana *advancing blade* berbentuk cekung dan *returning blade* berbentuk cembung. Turbin Savonius bekerja dengan prinsip gaya *drag*, *advancing blade* berbentuk cekung menyebabkan koefisien *drag* pada *advancing blade* lebih besar daripada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* juga lebih besar. Perbedaan gaya *drag* ini akan menghasilkan nilai torsi dan apabila nilai torsi tersebut dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin Savonius, akan didapatkan daya dari turbin Savonius. Jumlah daya yang dihasilkan tersebutlah yang akan menentukan performa turbin. Dengan semakin besarnya selisih gaya *drag* pada turbin Savonius, maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan. Untuk dapat memperbesar selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade*, dapat diberikan pengganggu di depan *returning blade* sehingga gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* akan semakin kecil.

Penelitian ini menggunakan pengganggu yang berbentuk silinder sirkular, dengan variasi rasio ukuran diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Pengganggu berupa silinder yang ditempatkan di depan *returning blade* diduga akan menurunkan tekanan di



daerah antara silinder pengganggu dan *returning blade*. Akibatnya, selisih tekanan antara bagian depan dan belakang *returning blade* akan menurun, sehingga *pressure drag* yang terjadi pada *returning blade* juga menurun. Hal tersebut menyebabkan selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin besar, sehingga nilai torsi dan daya yang dihasilkan turbin semakin tinggi.

2. Aliran fluida akan mengenai silinder pengganggu dan membentuk *wake* di bagian belakang silinder pengganggu. *Shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan *returning blade*. Akibatnya, *boundary layer* pada permukaan *returning blade* terganggu dan memungkinkan *turbulent boundary layer* lebih cepat terbentuk. Aliran turbulen lebih tahan terhadap *shear force* sehingga titik separasi pada permukaan *returning blade* semakin mundur. Akibat dari hal tersebut, *wake* yang terbentuk pada bagian belakang *returning blade* semakin sempit dan menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* juga semakin kecil.
3. Variasi rasio dari ukuran diameter 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; 1,0 digunakan pada penelitian ini demi mengetahui ukuran diameter silinder pengganggu yang dapat menghasilkan performa turbin yang paling optimum. Apabila diameter pengganggu terlalu kecil, diduga kurang efektif dalam menurunkan tekanan di depan *returning blade* dan dalam menunda titik separasi. Apabila diameter pengganggu terlalu besar, diduga kurang efektif juga karena dapat menyebabkan defleksi aliran dari silinder pengganggu dan akan dapat menghalangi *free stream* yang menuju *advancing blade*.

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk penelitian ini, beberapa batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Aliran yang digunakan adalah aliran eksternal.
2. Variasi rasio antara diameter pengganggu dengan diameter sudu ( $d/D$ ) adalah 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.
3. Perpindahan panas akibat gesekan udara dengan komponen alat diabaikan
4. Perbandingan jarak antara titik pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius terhadap diameter sudu turbin ( $S/D$ ) adalah 2,4.
5. Kecepatan angin yang digunakan adalah 5m/s dan 7m/s.
6. Aliran fluida adalah udara dengan kondisi *steady*, *incompressible*, dan *uniform flow*.
7. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah  $9,7 \times 10^4$ , dan  $13,6 \times 10^4$ .

### 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan silinder pengganggu berupa silinder yang diletakkan di depan *returning blade* dengan variasi perbandingan diameter silinder pengganggu dan diameter sudu ( $d/D$ ) terhadap performa turbin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengukur:

1. Mengukur kecepatan putaran poros turbin Savonius.
2. Mengukur torsi statis dan torsi dinamis pada turbin Savonius.
3. Menghitung *coefficient of power* (CoP) turbin Savonius.
4. Menghitung *coefficient of moment* ( $C_M$ ) turbin Savonius.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

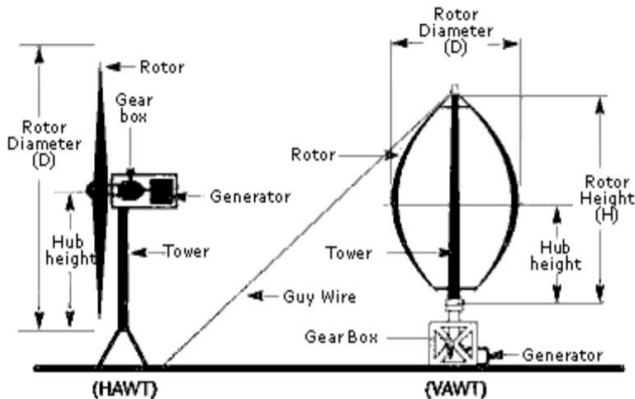
### 2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah salah satu alat untuk mengkonversi energi, dimana energi kinetik udara yang menabrak sudu akan menyebabkan perputaran pada sudu-sudu turbin yang terhubung dengan poros. Poros ini juga terhubung pada generator sehingga energi kinetik dari angin akan diubah menjadi energi mekanik sebelum akhirnya menghasilkan energi listrik oleh generator. Energi listrik inilah yang nantinya digunakan untuk keperluan sehari-hari. Pada umumnya, turbin angin dengan jumlah sudu yang banyak akan menghasilkan torsi yang besar. Turbin angin dengan jumlah sudu banyak ini sering digunakan untuk keperluan mekanikal seperti pengolahan hasil pertanian, pemompaan air, dan aerasi tambak. Untuk turbin angin yang memiliki jumlah sudu sedikit (misal 2 atau 3), digunakan sebagai pembangkit listrik. Ada dua jenis turbin angin yaitu *vertical axis wind turbine* (VAWT) dan *horizontal axis wind turbine* (HAWT)

Perbedaan utama dari dua jenis turbin tersebut adalah pada posisi porosnya. Pada *vertical axis wind turbine* (VAWT), poros yang digunakan adalah tegak lurus terhadap arah aliran angin yang datang. Ada 2 tipe pada turbin jenis ini yaitu *lift type* dan *drag type*. Untuk *lift type* VAWT, turbin menggunakan gaya angkat aerodinamis untuk menggerakkan sudu-sudunya. *Lift* yang dimaksud adalah total gaya aerodinamis tegak lurus terhadap arah gaya (aliran angin). Tipe *lift* ini menggunakan *blade* dengan bentuk penampang aerofoil. Untuk *drag type* VAWT, menggunakan gaya *drag* untuk menggerakkan sudu-sudu turbin. *Drag* yang dimaksud adalah total gaya aerodinamis paralel terhadap arah gaya (aliran angin). Tipe *drag* ini dapat menggunakan sudu dengan *non-aerofoil profile*, sehingga biaya pembuatannya lebih murah. *Vertical axis wind turbine* memiliki beberapa kelebihan dibanding *horizontal axis wind turbine* antara lain ruang yang dibutuhkan

lebih kecil, dapat beroperasi dengan arah angin dari berbagai arah, pembuatan dan pemasangannya juga lebih mudah.

*Horizontal axis wind turbine* atau yang biasa disebut turbin HAWT memiliki posisi poros yang *horizontal* atau sejajar dengan arah angin. Berbeda dengan *vertical axis wind turbine* yang memiliki posisi *gearbox* dan *generator* di bawah, turbin HAWT menempatkan *gearbox* dan *generator* di atas *tower* turbin. Turbin jenis ini memerlukan biaya yang lebih besar dan lahan yang lebih luas dibandingkan dengan turbin VAWT. Diperlukan *tower* dan *blade* yang cukup besar, serta biaya transportasi untuk instalasi turbin ini juga tidak murah. Proses instalasi untuk turbin HAWT ini juga tidak mudah, sehingga diperlukan pekerja yang terampil untuk pemasangannya. Tetapi kelebihan turbin HAWT ini adalah efisiensi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan *vertical axis wind turbine*. Turbin jenis ini sangat cocok digunakan untuk daerah seperti pantai, puncak bukit atau pegunungan, dan lain-lain.

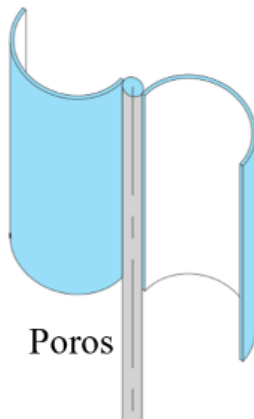


Gambar 2. 1 *Horizontal axis wind turbine* dan *vertical axis wind turbine* (Al-Shemmeri, 2010)

## 2.2 Turbin Angin Savonius

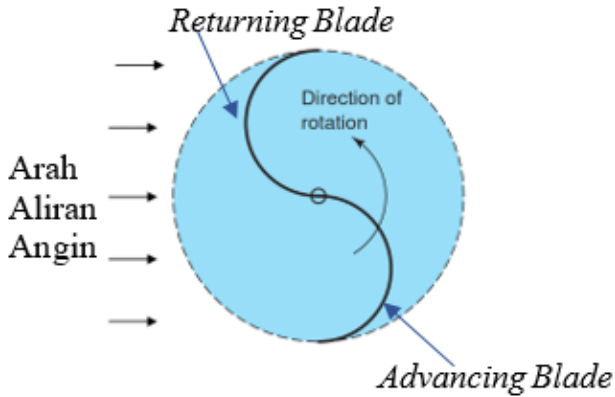
Pada tahun 1929, seorang insinyur asal Finlandia bernama Sigurd J. Savonius memperkenalkan salah satu tipe turbin VAWT,

turbin itu adalah turbin angin Savonius yang memanfaatkan gaya drag pada *blade*-nya untuk menggerakkan turbin. Turbin Savonius memiliki kelebihan dimana tidak memerlukan torsi awal untuk memutarnya dan dapat bekerja dengan kecepatan angin yang rendah. Rotor pada turbin ini mempunyai konstruksi yang arahnya tegak lurus dengan sumbu vertikal. Plat silinder digunakan pada turbin Savonius konvensional dengan cara membelah plat tersebut menjadi dua bagian simetri. Setelah itu, kedua bagian tersebut disatukan sehingga penampang akan membentuk huruf “S” seperti pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Desain Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012)

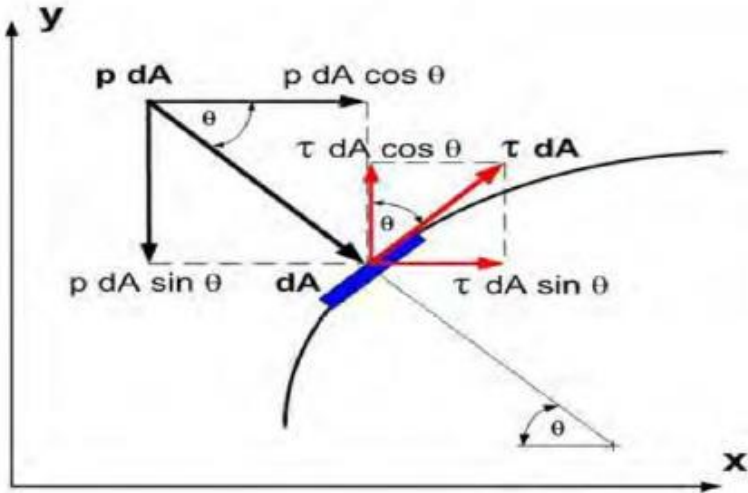
Pada turbin ini, ada dua jenis *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*, dimana pada kedua *blade* tersebut akan timbul gaya *drag* yang berbeda. Hal tersebut dikarenakan kedua *blade* tersebut memiliki *coefficient of drag* yang berbeda. Pada *advancing blade*, nilai *coefficient of drag* lebih besar dari *returning blade*. Perbedaan nilai gaya *drag* ini akan menimbulkan torsi, dan jika torsi tersebut dikalikan dengan kecepatan angular, maka daya turbin dapat dihasilkan. Dengan kata lain, jika daya yang dihasilkan ingin semakin besar, maka perbedaan gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* harus diperbesar.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius (Hemami, 2012)

### 2.3 Gaya Drag

Gaya *drag* dan gaya *lift* merupakan gaya-gaya aerodinamika yang dihasilkan oleh tekanan dan gaya geser pada permukaan tekanan saat sebuah benda dialiri aliran viscous. Timbulnya gaya-gaya tersebut diakibatkan oleh adanya tekanan ( $P$ ) dan *skin friction* atau tegangan geser ( $\tau$ ). Gaya *lift* ( $L$ ) memiliki arah tegak lurus dengan arah aliran sedangkan gaya *drag* ( $D$ ) memiliki arah sejajar (horizontal) dengan arah aliran. *Skin friction drag* ( $F_{Df}$ ) merupakan gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda), sedangkan *pressure drag* ( $F_{Dp}$ ) merupakan gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *skin friction drag* dan *pressure drag* disebut sebagai *total drag*, seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. 4 Skema Sederhana Penguraian Gaya Drag (Rustam, 2018)

Pada gambar 2.4,  $dA$  merupakan elemen luasan pada *body* yang dikenai gaya drag. *Skin friction drag* ( $F_{Df}$ ) merupakan integrasi dari seluruh permukaan *body* terhadap gaya  $\tau dA$ , sedangkan *pressure drag* ( $F_{Dp}$ ) merupakan integrasi dari seluruh permukaan *body* terhadap gaya  $p dA$ . Dari penjelasan tersebut, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_{Df} = \int_A \tau dA \sin \theta \dots\dots\dots (2.1)$$

$$F_{Dp} = \int_A p dA \cos \theta \dots\dots\dots (2.2)$$

Gaya drag total yang terbentuk berdasarkan persamaan,an 2.1 dan 2.2 dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D = F_{Df} + F_{Dp} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$F_D = \int_A \tau dA \sin \theta + \int_A p dA \cos \theta \dots\dots\dots (2.4)$$

Persamaan gaya *drag* total secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \dots\dots\dots (2.5)$$

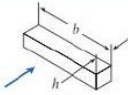






Dimana:

- $F_D$  : Gaya *drag* (N)
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $U$  : kecepatan aliran fluida (m/s)
- $A$  : luas bidang turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida ( $\text{m}^2$ )
- $C_D$  : *coefficient drag*

Pada persamaan 2.5 terdapat *coefficient drag* ( $C_D$ ) yang merupakan bilangan tidak berdimensi untuk menunjukkan gaya *drag*. Perbedaan nilai *coefficient drag* ( $C_D$ ) dapat terjadi karena pengaruh dari geometri benda itu sendiri. *Coefficient drag* ( $C_D$ ) *advancing blade* pada turbin Savonius lebih besar daripada *coefficient drag* ( $C_D$ ) *returning blade*, hal tersebut dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut ini.



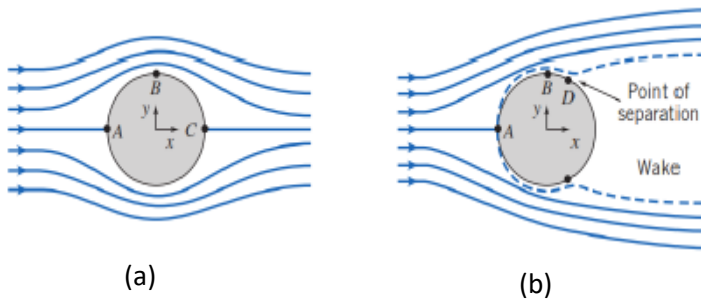
Tabel 2. 1 *Coefficient Drag* (Fox, et al., 2011)

Drag Coefficient Data for Selected Objects ( $Re \geq 10^3$ ) <sup>a</sup>			
Object	Diagram		$C_D(Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$	2.05
		$b/h = 1$	1.05
Disk			1.17
Ring			1.20 <sup>b</sup>
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

<sup>a</sup>Data from Hoerner [16].<sup>b</sup>Based on ring area.

## 2.4 Aliran Melintasi Sebuah Silinder

Aliran fluida yang melalui suatu benda dipengaruhi oleh viskositas fluida. Viskositas sendiri merupakan sifat dari fluida untuk menentukan besar daya tahannya terhadap gaya geser. Aliran fluida terbagi menjadi dua berdasarkan viskositasnya, yaitu aliran *inviscid* dan aliran *viscous*. Pada aliran *inviscid* tegangan geser tidak akan mempengaruhi aliran fluida, sehingga pada aliran ini viskositas fluida dianggap nol. Sedangkan aliran *viscous* merupakan kondisi aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh, sehingga dapat menyebabkan tegangan geser pada dinding benda yang bersentuhan langsung dengan fluida. Aliran *inviscid* dan aliran *viscous* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 (a) Aliran *inviscid*, (b) Aliran *viscous* (Fox, et al., 2011)

Gambar 2.5 (a) menunjukkan aliran *inviscid* tidak menimbulkan *boundary layer edge* sehingga *wake* tidak timbul. Gambar 2.5 (b) menunjukkan aliran *viscous* yang memiliki beberapa titik. Titik A merupakan titik stagnasi yang menunjukkan aliran menabrak benda secara langsung sehingga menyebabkan kecepatan menjadi nol dan tekanan maksimum. *Boundary layer edge* muncul pada titik A ini, yaitu garis yang memisahkan antara daerah *viscous* dan *inviscid*. Pada titik B, nilai tekanan minimum dan kecepatan maksimum karena nilai tekanan akan semakin menurun dan kecepatan semakin meningkat sepanjang pergerakan aliran dari A ke B. Titik C merupakan titik separasi dimana momentum aliran tidak mampu menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga menimbulkan *back flow*. Titik separasi ini mengakibatkan munculnya daerah yang disebut *wake*. Pada daerah *wake*, tekanan bernilai rendah. Titik separasi yang menimbulkan terjadinya *wake* ini bisa ditunda dengan aliran yang bilangannya lebih besar atau geometri benda diubah menjadi lebih aerodinamis.

## 2.5 Bilangan Reynolds

Osborne Reynolds yang merupakan seorang ilmuwan dari Inggris mengidentifikasi tipe aliran pada aliran *incompressible* di

dalam sebuah pipa berdasarkan bilangan tak berdimensi, yaitu *Reynolds Number*. Bilangan Reynolds sendiri adalah bilangan tak berdimensi untuk menentukan karakteristik dari sebuah aliran. Bilangan Reynolds pada aliran *incompressible* membedakan aliran menjadi dua, yaitu aliran laminar dan turbulen. Berikut ini adalah persamaan dari *Reynolds Number*:

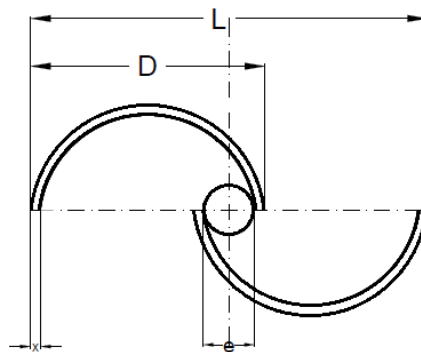
$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

- Re : *Reynolds Number*
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{Kg/m}^3$ )
- L : panjang karakteristik (m)
- U : kecepatan aliran fluida (m/s)
- $\mu$  : viskositas (Ns/m)

Berikut ini adalah klasifikasi dari bilangan Reynolds pada silinder dan plat datar:

- $Re < 3 \times 10^5$  aliran laminar (silinder)
- $Re > 3 \times 10^5$  aliran turbulen (silinder)
- $Re < 5 \times 10^5$  aliran laminar (plat datar)
- $Re > 5 \times 10^5$  aliran turbulen (plat datar)



Gambar 2. 6 Skema turbin angin Savonius

Untuk panjang karakteristik ( $L$ ) yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$L = 2D - e - 2x \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana:

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

## 2.6 Torsi Statis

Besar torsi yang terjadi pada turbin dipengaruhi oleh gaya *drag* dan jari-jari sudu turbin. Torsi sendiri adalah ukuran gaya yang dapat menyebabkan gerak rotasi pada suatu benda. Untuk torsi yang tidak menimbulkan percepatan sudut sehingga turbin memiliki kecepatan sudut yang konstan disebut dengan torsi statis, berikut ini adalah rumusnya:

$$T_S = F_D \cdot R \dots\dots\dots (2.8)$$

Jika disubstitusikan dengan persamaan 2.5, maka torsi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_S = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A R \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana:

- $T_S$  : Torsi statis (N.m)
- $F_D$  : Gaya *drag* (N)
- $C_D$  : *coefficient drag*
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $U$  : kecepatan aliran fluida (m/s)
- $A$  : luas bidang turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida ( $\text{m}^2$ )
- $R$  : jari-jari sudu turbin (m)

## 2.7 Perhitungan Daya dan *Coefficient of Power* (CoP)

Energi kinetik dari aliran angin dikonversi oleh turbin angin menjadi energi mekanik. Lalu energi mekanik yang dikonversi untuk menghasilkan daya menjadi indikator dari performa turbin angin.

### 2.7.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Aliran angin yang mengenai sudu turbin dengan kecepatan sebesar  $U$  bereaksi menjadi putaran poros turbin. Energi kinetik diperlukan untuk menentukan daya kinetik, energi kinetik tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_K = \frac{1}{2} m U^2 \dots\dots\dots (2.10)$$

Daya teoritis ( $P_w$ ) didapat dari besarnya energi kinetik yang dibawa terhadap waktu dan dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_w = \frac{E_K}{t} = \frac{1}{2} \dot{m} U^2 \dots\dots\dots (2.11)$$

Untuk *mass flow rate* dapat ditentukan dengan rumus berikut ini:

$$\dot{m} = \rho Q = \rho U A \dots\dots\dots (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.12 ke 2.11, maka didapat persamaan daya sebagai berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \dots\dots\dots (2.13)$$

Luas penampang aliran merupakan luas permukaan turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida yaitu:

$$A = L \cdot H \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana:

- $P_w$  : Daya teoritis turbin (Watt)
- $E_K$  : Energi kinetik (Joule)
- $\rho$  : Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A$  : Luas bidang turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida ( $\text{m}^2$ )
- $U$  : Kecepatan aliran fluida ( $\text{m/s}$ )
- $L$  : Panjang karakteristik turbin (m)
- $H$  : tinggi turbin angin Savonius (m)

### 2.7.2 Perhitungan Daya Turbin Aktual

Pada penelitian ini, digunakan *brake dynamometer* untuk mengukur besarnya torsi dinamis. Torsi dinamis inilah yang digunakan untuk perhitungan daya aktual dari turbin angin Savonius ( $P_T$ ). Berikut ini merupakan rumus untuk menghitung daya aktual turbin angin Savonius ( $P_T$ ):

$$P_T = T_D \omega \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana

- $P_T$  : Daya aktual turbin (Watt)
- $T_D$  : Torsi dinamis turbin (Nm)
- $\omega$  : Kecepatan sudut turbin angin Savonius ( $\text{rad/s}$ )

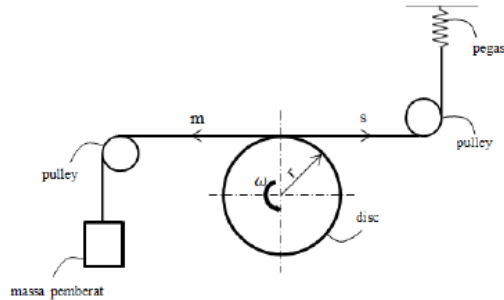
Untuk kecepatan sudut turbin angin Savonius dapat ditentukan dengan rumus berikut:

$$\omega = \frac{2 \pi n}{60} \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana

- $n$  : Jumlah putara poros (rpm)

Pengukuran pada *brake dynamometer* adalah pengukuran massa pemberat ( $m$ ) dan massa yang terbaca pada pegas ( $s$ ). Berikut ini merupakan *free body diagram* dari *brake dynamometer*:



Gambar 2. 7 *Free body diagram* dari *brake dynamometer*  
(Rustam, 2018)

Rumus yang digunakan untuk menghitung torsi dinamis adalah sebagai berikut:

$$T_D = F \cdot r \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana

$r$  : jari-jari poros turbin (m)

Sedangkan untuk menentukan gaya yang bekerja ( $F$ ) adalah dengan menggunakan rumus berikut:

$$F = |m - s|g \dots\dots\dots (2.18)$$

Dimana

$m$  : massa pemberat (kg)

$s$  : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)

$g$  : gaya gravitasi ( $m/s^2$ )

Apabila persamaan 2.17 dan 2.18 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.15, maka rumus untuk menentukan daya aktual turbin adalah sebagai berikut:

$$P_T = |m - s|g.r.\omega \dots\dots\dots (2.19)$$

**2.7.3 Coefficient of Power (CoP)**

Salah satu parameter untuk mengetahui performa dari turbin angin Savonius adalah dengan menentukan nilai *Coefficient of power* (CoP). Nilai CoP sendiri dapat ditentukan dengan perbandingan antara daya aktual ( $P_T$ ) dengan daya teoritis ( $P_W$ ). Berikut ini adalah persamaan untuk menentukan nilai *coefficient of power*:

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \dots\dots\dots (2.20)$$

Dengan memasukkan persamaan 2.19 dan 2.13, maka persamaan nilai *coefficient of performance* adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{|m-s|g.r.\omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \dots\dots\dots (2.21)$$

**2.8 Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )**

*Tip Speed Ratio* atau yang biasa disingkat TSR merupakan salah satu aspek penting dalam mendesain generator turbin angin. Jika rotor turbin angin bergerak terlalu pelan, maka banyak udara yang akan melewati celah antar sudu turbin. Tetapi jika rotor turbin bergerak terlalu cepat, *blade* turbin akan tampak seperti dinding bagi angin. Maka dari itu, turbin angin didesain dengan *tip speed ratio* optimal untuk mengekstrak daya dari angin sebanyak mungkin. *Tip speed ratio* merupakan perbandingan antara

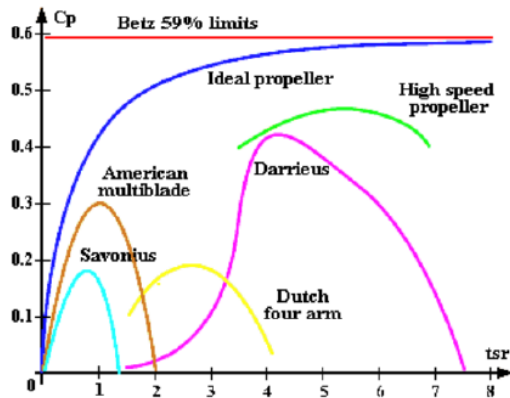


kecepatan putar poros terhadap kecepatan angin, berikut ini adalah persamaannya:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot 0,5 L}{U} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

- $\lambda$  : *Tip Speed Ratio*
- $L$  : panjang karakteristik turbin (m)
- $\omega$  : kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
- $U$  : kecepatan aliran fluida (m/s)



Gambar 2. 8 Grafik hubungan antara *Coefficient Of Power* dengan *Tip Speed Ratio* untuk berbagai jenis turbin angin (Al-Shemmeri, 2011)

Dapat dilihat pada gambar 2.8, *coefficient of power* suatu turbin akan terus meningkat seiring bertambahnya *tip speed ratio* hingga titik optimumnya. Setelah mencapai titik optimumnya, nilai CoP akan menurun seiring bertambahnya nilai TSR. Menurut aturan Betz, turbin angin hanya mampu menghasilkan *coefficient of power* maksimum sebesar 0,593. Turbin angin tidak dapat menerima 100% energi angin. Apabila energi angin diterima

100%, maka partikel udara di belakang turbin akan terhenti dan udara di depan turbin tidak dapat lewat. Setiap turbin angin memiliki titik kerja awal yang berbeda. Suatu turbin dapat bekerja pada kecepatan angin rendah apabila titik kerja awal turbin tersebut bernilai TSR yang rendah.

## 2.9 *Coefficient of Moment*

Untuk menentukan nilai *coefficient of moment* ( $C_M$ ), dilakukan perbandingan torsi dinamis terhadap torsi teoritis. Berikut ini merupakan rumus *coefficient of moment*

$$C_M = \frac{T_D}{T_\infty} \dots\dots\dots (2.23)$$

Dimana torsi dinamis dapat dilihat pada persamaan 2.17 dan 2.18 dan untuk persamaan torsi teoritis sebagai berikut:

$$T_\infty = \frac{1}{2} \rho A U^2 D \dots\dots\dots (2.24)$$

Dimana:

- $T_D$  : torsi dinamis turbin (N.m)
- $T_\infty$  : torsi teoritis turbin (N.m)
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg.m}^3$ )
- $A$  : luas bidang turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida ( $\text{m}^2$ )
- $U$  : kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s)
- $D$  : diameter sudu turbin angin Savonius (m)

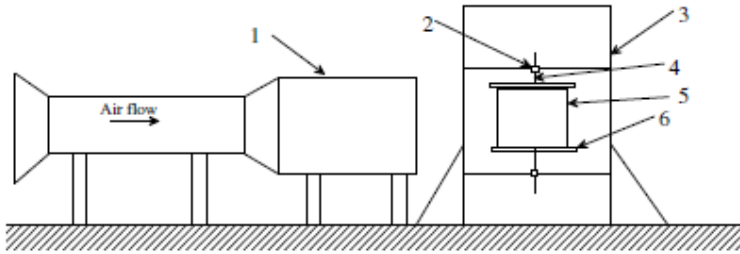
## 2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian terdahulu terkait turbin angin Savonius diperlukan sebagai referensi untuk memudahkan penelitian ini. Penelitian terdahulu yang akan dibahas adalah

penelitian dari N.H. Mahmoud et al, Tsutsui & Igarashi, serta Ignatius Yudhistira Dwidianto.

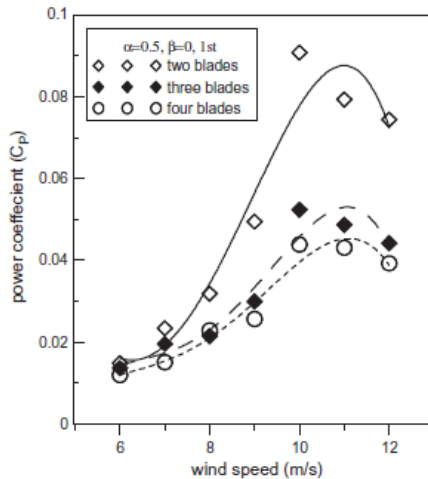
### **2.10.1 Studi Eksperimen untuk Mengembangkan Performa Turbin Savonius**

Tujuan dari penelitian yang dilakukan oleh **N.H Mahmoud et al** adalah untuk mencari variasi yang paling efektif untuk meningkatkan performa turbin. Penelitian ini menggunakan *wind tunnel* berdiameter 49 cm dengan kecepatan angin 0-13m/s di bagian *tunnel exit*. Jarak antara turbin dengan *exit wind tunnel* adalah 125 cm, dimana *vertical axis* dari *rotating rotor* sejajar dengan *centre line* dari *wind tunnel exit area*. Variasi yang digunakan adalah seperti variasi jumlah *blade* turbin, ada atau tidaknya *end plates*, jumlah *stage*, nilai *aspect ratio*, dan *overlap ratio*. Variasi *blade* yang diteliti adalah 2 *blades*, 3 *blades*, dan 4 *blades*, untuk jumlah *stages* sendiri adalah *single stage* dan *double stages*, nilai *overlap ratios* menggunakan variasi 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35, sedangkan untuk *aspect ratios* yang digunakan adalah 0,5; 1; 2; 3; 4; dan 5 untuk kondisi ada dan tidak adanya *end plates* pada turbin. Rotor Savonius ditempatkan di posisi yang tepat menggunakan *structure housing* yang terbuat dari *mild steel plates*. Digunakan 2 *ball bearing* (SKF) yang dipasang pada *mild steel plates* untuk menyangga rotor Savonius. *Blades* yang digunakan terbuat dari pipa plastic ringan (PVC) dengan diameter yang berbeda-beda yaitu 0,3 m; 0,2 m; 0,1 m; dan 0,08 m. *End plates* yang digunakan terbuat dari plat kayu ringan dengan ketebalan 2,5 mm, diameternya juga lebih besar 10% dari diameter rotor agar mempunyai performa yang baik. Poros besi yang digunakan memiliki diameter sebesar 14 mm dan Panjang 62 cm untuk semua model.



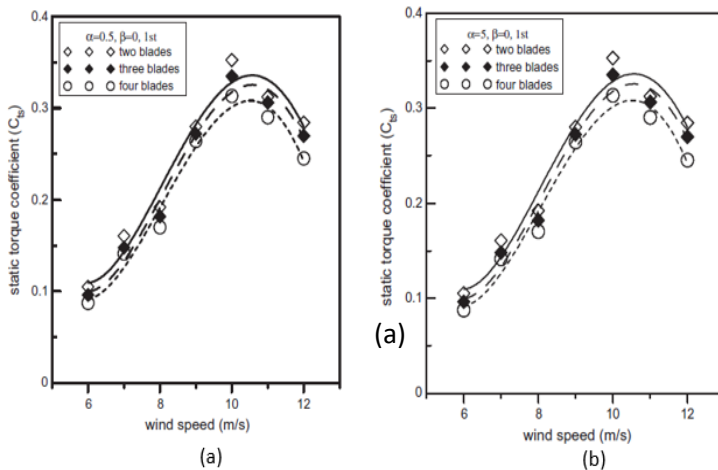
Gambar 2. 9 Skema dari alat uji (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.9 merupakan skema dari alat uji yang digunakan oleh Mahmoud et al. Nomor 1 menunjukkan gambar *subsonic wind tunnel*, nomor 2 merupakan *ball bearing*, nomor 3 adalah *steel housing*, nomor 4 adalah *steel shaft*, nomor 5 adalah *blades*, dan nomor 6 adalah *end plates*.



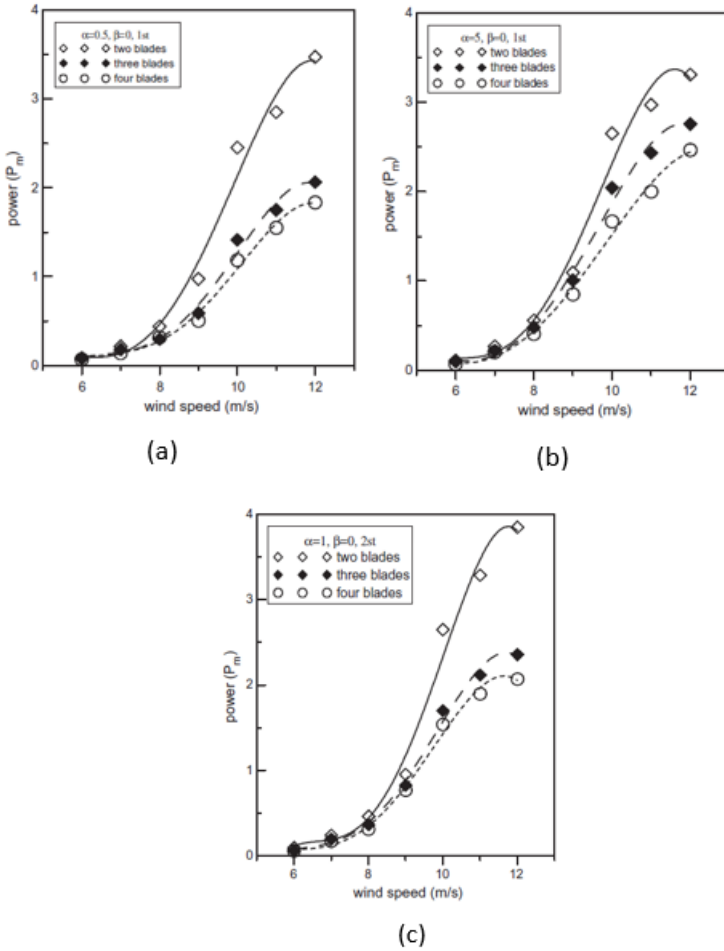
Gambar 2. 10 Hubungan antara *power coefficient* dan kecepatan angin dengan variasi jumlah blades (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.10 menunjukkan hubungan antara *power coefficient* dan kecepatan angin dengan variasi jumlah *blade* menggunakan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; serta *single stage*. Dapat dilihat bahwa turbin dengan dua *blades* menghasilkan *power coefficient* lebih tinggi dibandingkan dengan tiga dan empat *blades*.



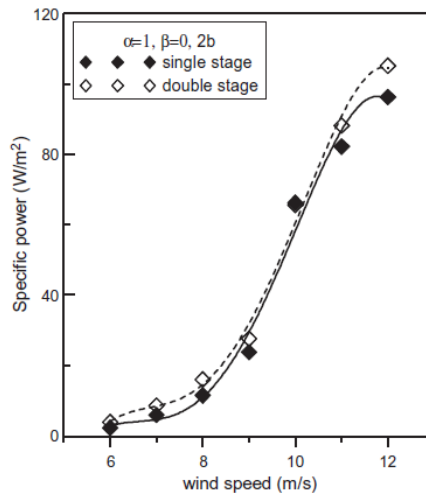
Gambar 2. 11 Hubungan antara *static torque coefficient* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi dua, tiga, dan empat *blade* untuk (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5. (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.11 menunjukkan hubungan antara koefisien torsi statis dengan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5 dan 5; *overlap ratio* 0; dan kondisi rotor *single stage*. Hasil yang didapat adalah pada variasi *aspect ratio* 0,5 maupun 5; torsi statis turbin Savonius dengan dua *blade* lebih tinggi daripada torsi statis turbin Savonius dengan tiga dan empat *blade*.



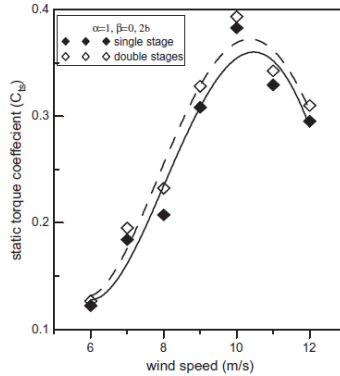
Gambar 2. 12 Hubungan antara *power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi dua, tiga, dan empat *blades* (a) *aspect ratio* = 0,5; *single stage*; (b) *aspect ratio* = 5; *single stage*; (c) *aspect ratio* = 1; *double stages*. (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.12 menunjukkan hubungan antara *power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi dua, tiga, dan empat *blades*. Hasil yang didapat adalah performa turbin lebih baik menggunakan dua *blade* dibandingkan dengan jumlah *blade* lainnya pada semua variasi *aspect ratio* dan variasi *single* ataupun *double stages*.



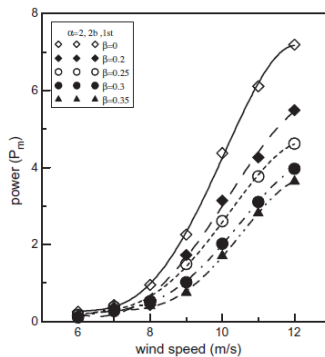
Gambar 2. 13 Hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan *single* dan *double stages* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius menggunakan variasi *single* dan *double stages*. Hasil yang didapat adalah nilai *specific power* turbin Savonius dengan *double stages* lebih tinggi dibandingkan dengan yang menggunakan *single stage*.



Gambar 2. 14 Hubungan antara koefisien torsi statis dengan kecepatan angin dengan variasi *single* dan *double stages* (Mahmoud, et al., 2012)

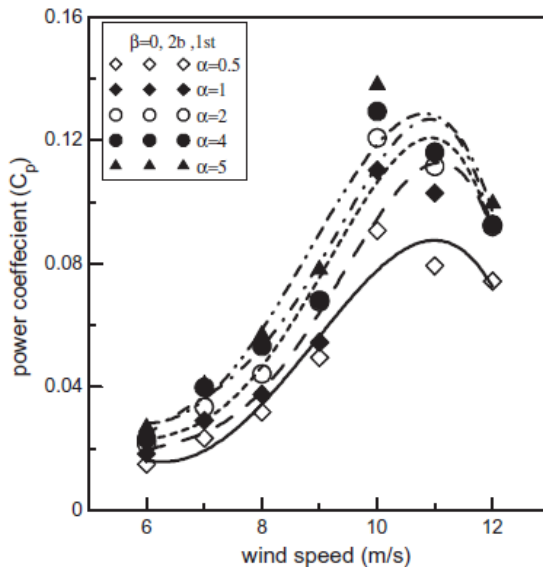
Gambar 2.14 menunjukkan grafik nilai koefisien torsi statis terhadap kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi *single* dan *double stages*. Hasil yang didapat adalah turbin Savonius dengan *double stages* menghasilkan nilai torsi statis lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan *single stage*.



Gambar 2. 15 Hubungan antara *power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi *overlap ratio* (Mahmoud, et al., 2012)

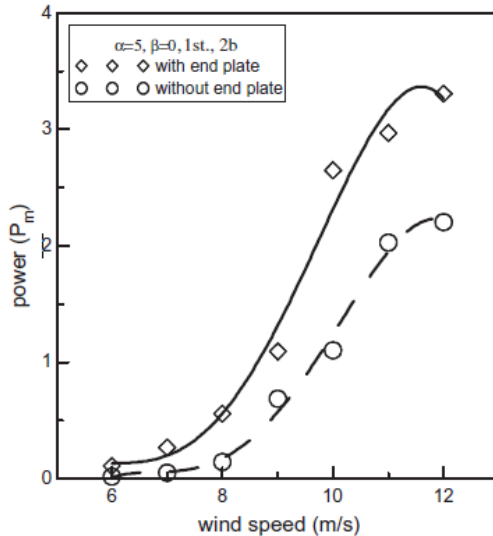


Gambar 2.15 menunjukkan grafik hubungan antara *power* dengan kecepatan angin pada turbin Savonius menggunakan variasi *overlap ratio*. Hasil yang didapat adalah dengan meningkatnya nilai *overlap ratio* yang digunakan, nilai *power* yang dihasilkan akan semakin turun.



Gambar 2. 16 Hubungan antara *power coefficient* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi *aspect ratio* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.16 menunjukkan grafik hubungan antara *power coefficient* dengan kecepatan angin pada turbin Savonius menggunakan variasi *aspect ratio*. Hasil yang didapat adalah seiring meningkatnya *aspect ratio* yang digunakan, nilai *power coefficient* yang dihasilkan turbin juga meningkat.



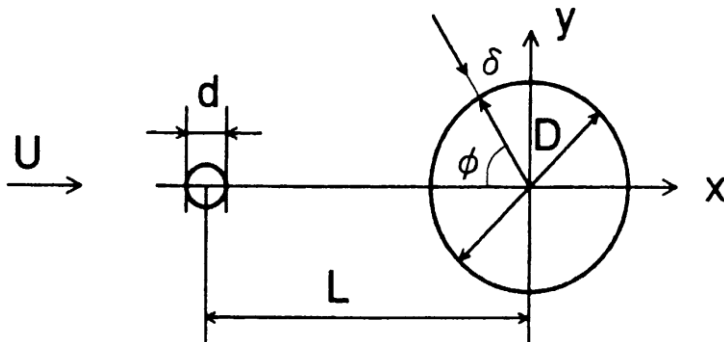
Gambar 2. 17 Hubungan antara *power* dengan kecepatan angin pada turbin Savonius menggunakan *end plate* dan tanpa *end plate* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.17 menunjukkan grafik hubungan *power* dengan kecepatan angin pada turbin Savonius yang menggunakan variasi tanpa *end plate* dan dengan *end plate*. Hasil yang didapat adalah *power* pada turbin yang menggunakan *end plate* lebih tinggi dibandingkan dengan yang tanpa *end plate*.

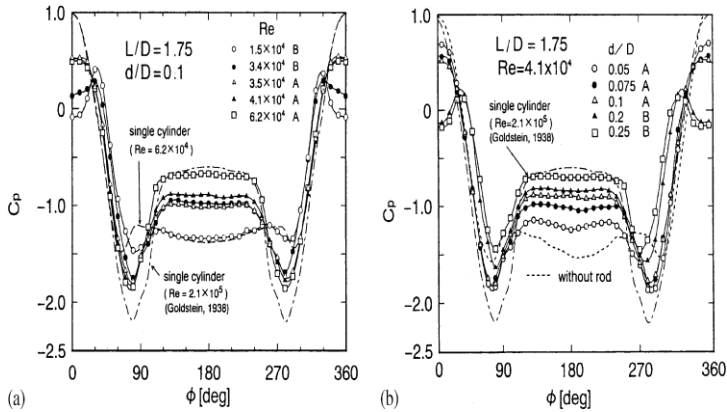
Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah turbin Savonius dengan 2 *blades* lebih efisien daripada menggunakan 3 dan 4 *blades*. Lalu turbin dengan menggunakan *end plates* memberikan efisiensi yang lebih tinggi dari turbin tanpa *end plates*. Turbin dengan *double stages* juga memberikan performa yang lebih tinggi daripada *single stage*. Dengan tidak adanya *overlap ratios*, turbin Savonius juga dapat bekerja lebih baik dan nilai  $C_p$  akan meningkat apabila nilai *aspect ratio* juga meningkat.

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

Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** yang menempatkan silinder pengganggu pada sisi *upstream* dari silinder sirkular. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan *low speed wind tunnel* yang memiliki dimensi panjang 800 mm, lebar 150 mm, serta tinggi 400 mm. Untuk silinder sirkular yang digunakan memiliki ukuran diameter ( $D$ ) 40 mm, dan untuk penggangguanya menggunakan tongkat dengan variasi diameter ( $d$ ) 1 sampai 10 mm. Variasi yang dilakukan juga ada pada rasio pusat silinder sirkular dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter silinder sirkular ( $L/D$ ) yaitu 1,25 – 3,0; dimana jarak  $L$  yang digunakan antara 50 mm – 120 mm. Variasi bilangan Reynolds juga dilakukan yaitu  $1,5 \cdot 10^4 - 6,2 \cdot 10^4$  serta skema dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2. 18 Skema silinder utama dan silinder pengganggu (Tsutsui & Igarashi, 2002)

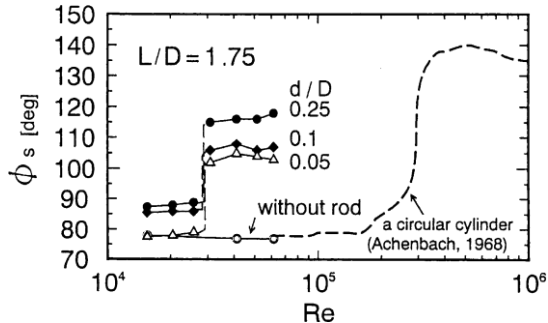


Gambar 2. 19 Distribusi tekanan di dekat silinder sirkular. (a) Efek  $Re$  dan (b) Efek  $d/D$  (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Gambar 2.19 menunjukkan distribusi tekanan di dekat silinder sirkular dimana terjadi 2 pola aliran yang terbentuk yaitu aliran A dan B. Aliran A terjadi *vortex shedding* sedangkan pola aliran B terjadi *quasi-static vortex*. Gambar 2.19(a) menunjukkan grafik perbandingan *pressure coefficient* terhadap sudut pada  $L/D = 1,75$  dan  $d/D = 0,1$  dengan menggunakan variasi nilai  $Re$  dimana pola aliran B berubah menjadi A pada  $Re = 3,4 \times 10^4$  sampai  $3,5 \times 10^4$ . Dari grafik tersebut terlihat bahwa dengan dilakukannya penambahan silinder pengganggu akan menurunkan nilai  $C_p$  di bagian depan silinder sirkular. Pada bagian depan silinder sirkular tersebut, nilai  $C_p$  menurun menjadi 0,5 pada pola aliran A dan pada pola aliran B nilai  $C_p$  menjadi negatif. Dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder sirkular, variasi bilangan Reynolds yang meningkat akan menyebabkan *wake* di belakang silinder sirkular semakin menyempit.

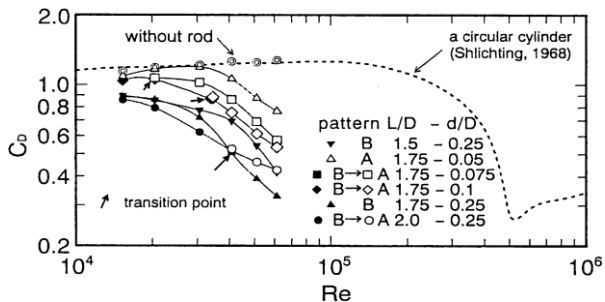
Gambar 2.19(b) menunjukkan grafik perbandingan *pressure coefficient* terhadap sudut dengan variasi  $d/D$  pada  $L/D = 1,75$  dan bilangan Reynolds  $= 4.1 \times 10^4$ . Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya ukuran diameter silinder pengganggu yang digunakan maka semakin menurun pula nilai  $C_p$  di bagian depan silinder sirkular. Dari grafik tersebut dapat

disimpulkan bahwa dengan ditambahkannya silinder pengganggu, variasi diameter silinder pengganggu yang meningkat akan membuat *wake* di bagian belakang silinder sirkular semakin menyempit.



Gambar 2. 20 Titik separasi (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Gambar 2.20 menunjukkan pergerakan titik separasi silinder sirkular dimana garis putus-putus menunjukkan titik separasi pada silinder sirkular tanpa pengganggu. Derajat sudut  $\phi_s$  meningkat seiring naiknya nilai  $d/D$ . Titik separasi juga berpindah ke belakang dengan cepat seiring dengan naiknya bilangan Reynolds di atas  $3 \times 10^4$ .



Gambar 2. 21 Koefisien *drag* (Tsutsui & Igarashi, 2002)

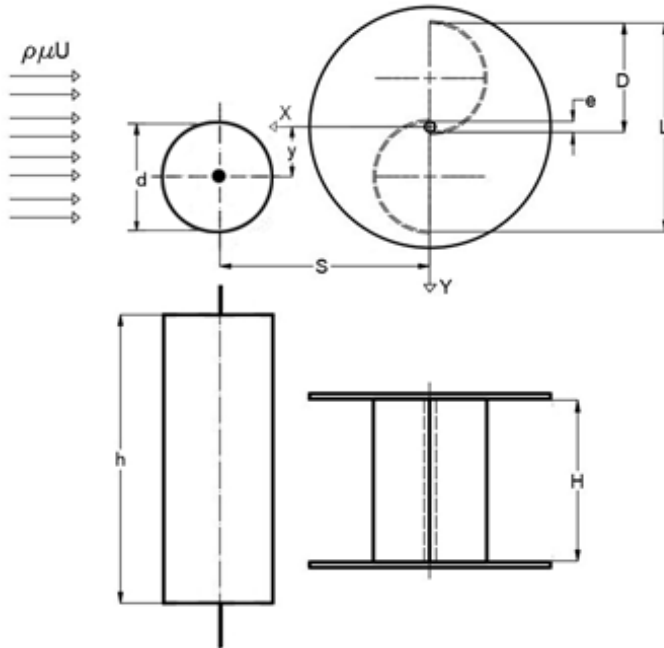
Gambar 2.21 menunjukkan hubungan koefisien *drag* dengan bilangan Reynolds dari silinder sirkular. Garis putus-putus menunjukkan nilai koefisien *drag* pada silinder sirkular tanpa pengganggu. Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai  $C_D$  menurun seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds pada khususnya untuk bilangan Reynolds yang melebihi  $3 \times 10^4$ . Nilai koefisien *drag* juga menurun seiring bertambahnya rasio  $d/D$  dan menurunnya rasio  $L/D$ .

Penurunan *pressure drag coefficient* ( $C_D$ ) memiliki kondisi optimum pada  $d/D = 0,25$ ;  $L/D = 2,0$  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.

### 2.10.3 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

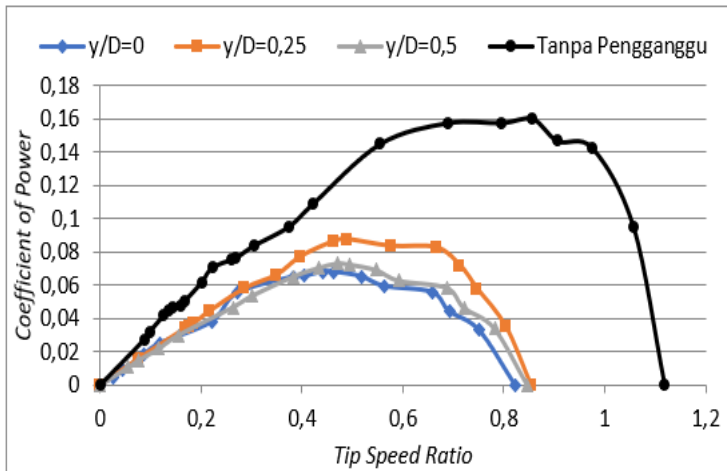
Penelitian yang dilakukan oleh **Ignatius Yudhistira Dwidianto** dari Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember menggunakan perbandingan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius pararel dengan datangnya angin terhadap diameter turbin Savonius ( $S/D$ ) sebesar 2,2; perbandingan diameter silinder pengganggu dan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 1,0; serta variasi perbandingan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius tegak lurus dengan datangnya angin ( $y/D$ ) sebesar 0; 0,25; 0,5. Bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini ada 3, yaitu sebesar 90.000, 138.000, dan 168.000. Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *axial fan*, *honeycomb*, turbin Savonius, silinder pengganggu, penyangga turbin, anemometer, tachometer,

*voltage regulator, torque meter, brake dynamometer, neraca pegas, benang nylon, pelumas, dan ball bearing.*



Gambar 2. 22 Skema turbin dan silinder pengganggu (Dwidianto, 2018)

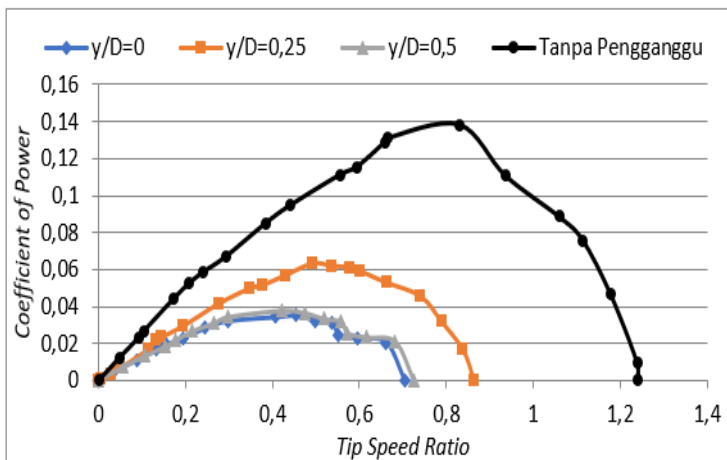
Gambar 2.22 menunjukkan skema turbin dan silinder pengganggu yang dilakukan pada penelitian tersebut. Dimensi turbin Savonius yang digunakan memiliki diameter sudu ( $D$ ) = 152,4 mm; tinggi ( $H$ ) = 300 mm; diameter poros ( $b$ ) = 19 mm; diameter *endplate* ( $D_0$ ) = 321 mm; dan tebal *end plate* = 1 mm. Untuk dimensi silinder pengganggunya memiliki diameter ( $d$ ) = 152 mm dan tinggi ( $h$ ) 400 mm.



Gambar 2. 23 Grafik Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 90.000$  (Dwidiyanto, 2018)

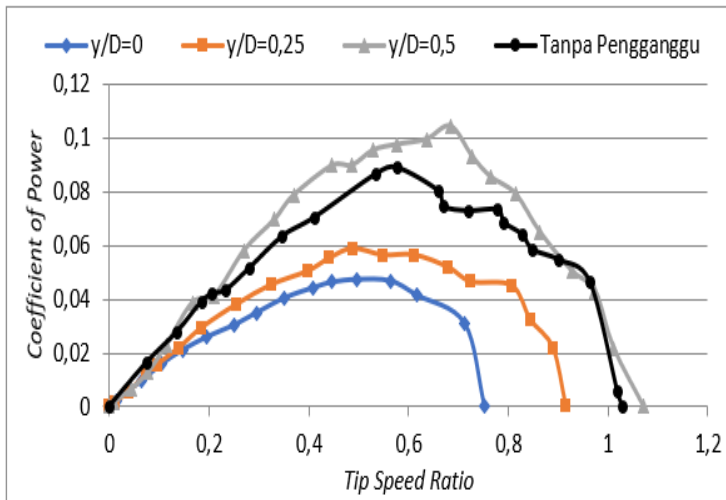
Pada gambar 2.23 dapat dilihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,86 yaitu sebesar 16,03%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,463 yaitu sebesar 7,16%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,49 yaitu sebesar 8,74%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,47 yaitu sebesar 7,31%. Dapat disimpulkan bahwa pada  $Re = 90000$ , *Coefficient of Power* maksimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu yaitu sebesar 16,03%.





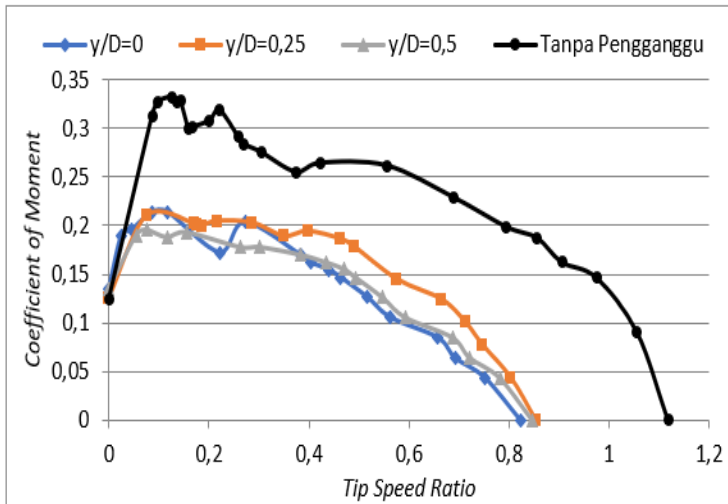
Gambar 2. 24 Grafik Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 138.000$  (Dwidianto, 2018)

Pada gambar 2.24 dapat dilihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,83 yaitu sebesar 13,83%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,456 yaitu sebesar 3,5%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,493 yaitu sebesar 6,32%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,423 yaitu sebesar 3,8%. Dapat disimpulkan bahwa pada  $Re = 138000$ , *Coefficient of Power* maksimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu yaitu sebesar 13,83%.



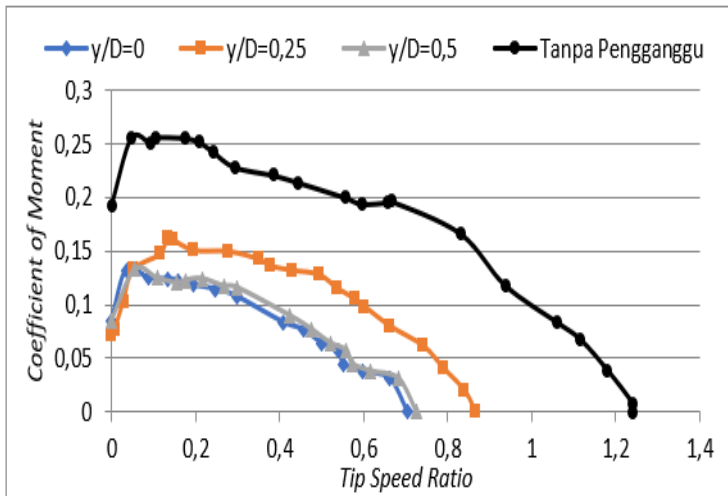
Gambar 2. 25 Grafik Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 168.000$  (Dwidiyanto, 2018)

Pada gambar 2.25 dapat dilihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai CoP maksimum sebesar 8,89% pada *Tip Speed Ratio* = 0,576. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki CoP maksimum sebesar 4,75% pada *Tip Speed Ratio* = 0,497. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki CoP maksimum sebesar 5,87% pada *Tip Speed Ratio* = 0,488. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki CoP maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,684 yaitu sebesar 10,44%. Dapat disimpulkan bahwa pada  $Re = 168000$ , *Coefficient of Power* maksimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berjarak  $y/D = 0,5$  yaitu sebesar 10,44%.



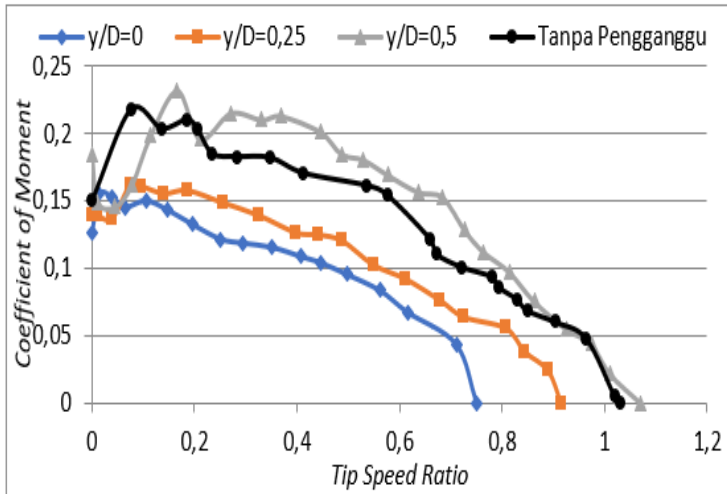
Gambar 2. 26 Grafik Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 90.000$  (Dwidiyanto, 2018)

Pada gambar 2.26 juga terlihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,126 yaitu sebesar 33,21%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,086 dan 0,118 yaitu sebesar 21,36%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,075 yaitu sebesar 20,99%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,075 yaitu sebesar 19,55%.



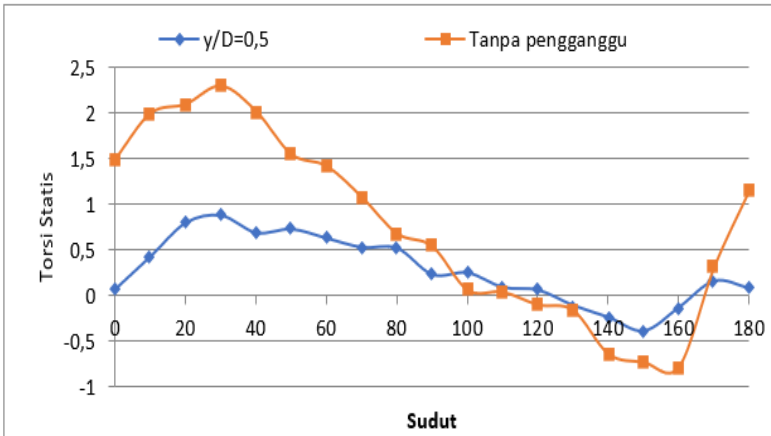
Gambar 2. 27 Grafik Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 138.000$  (Dwidiyanto, 2018)

Pada gambar 2.27 juga terlihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,104 yaitu sebesar 25,64%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,035 yaitu sebesar 13,26%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,133 yaitu sebesar 16,3%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,055 yaitu sebesar 13,27%. Dapat disimpulkan bahwa pada  $Re = 138000$ , *Coefficient of Moment* maksimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu.



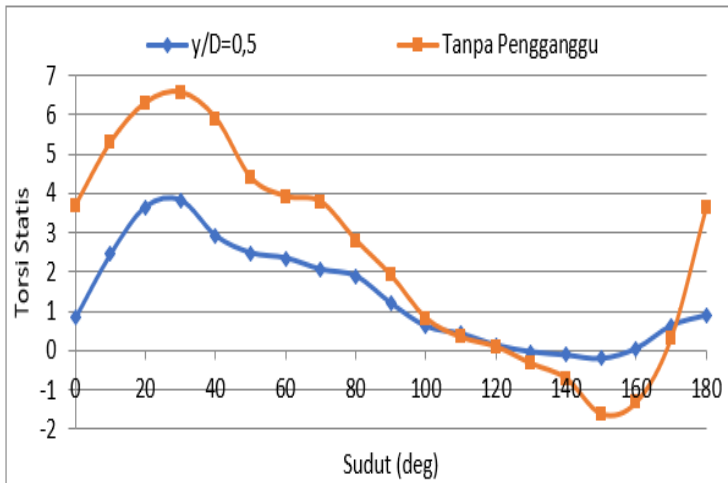
Gambar 2. 28 Grafik Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada  $Re = 168.000$  (Dwidianto, 2018)

Pada gambar 2.28 juga terlihat bahwa pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,075 yaitu sebesar 21,76%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,014 yaitu sebesar 15,48%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,25$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,075 yaitu sebesar 16,24%. Pada silinder pengganggu  $y/D = 0,5$  memiliki nilai *Coefficient of Moment* maksimum pada *Tip Speed Ratio* = 0,167 yaitu sebesar 23,17%. Dapat disimpulkan bahwa pada  $Re = 168000$ , *Coefficient of Moment* maksimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berjarak  $y/D = 0,5$ .



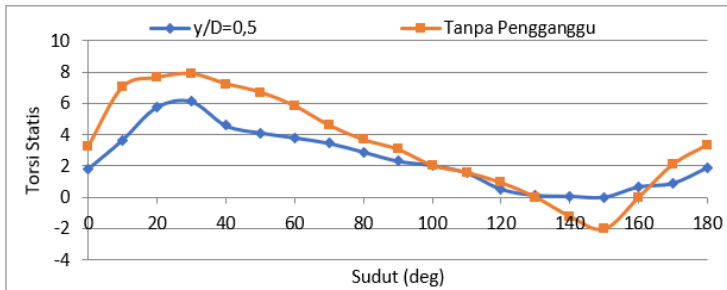
Gambar 2. 29 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada  $Re = 90.000$  (Dwidianto, 2018)

Pada gambar 2.29 diperoleh nilai torsi statis maksimum pada  $Re = 90000$  tanpa silinder pengganggu sebesar  $2,3 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $30^\circ$  sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu memiliki torsi maksimum sebesar  $0,9 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $30^\circ$ . Nilai torsi statis minimum pada turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebesar  $-0,78 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $160^\circ$ , sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu sebesar  $-0,39 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $150^\circ$ . Dapat disimpulkan bahwa torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu.



Gambar 2. 30 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada  $Re = 138.000$  (Dwidianto, 2018)

Pada gambar 2.30 diperoleh nilai torsi statis maksimum pada  $Re = 138000$  tanpa silinder pengganggu sebesar  $6,56 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $30^\circ$  sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu memiliki torsi maksimum sebesar  $3,81 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $30^\circ$ . Nilai torsi statis minimum pada turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebesar  $-1,61 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $150^\circ$ , sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu sebesar  $-0,2 \text{ N.cm}$  pada sudut bukaan turbin  $150^\circ$ . Dapat disimpulkan bahwa torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu.



Gambar 2. 31 Grafik Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Pengganggu sebagai Fungsi Sudut pada  $Re = 168.000$  (Dwidianto, 2018)

Pada gambar 2.31 diperoleh nilai torsi statis maksimum pada  $Re = 168000$  tanpa silinder pengganggu sebesar  $7,88 \text{ N.cm}$  pada sudu bukaan turbin  $30^0$  sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu memiliki torsi maksimum sebesar  $6,11 \text{ N.cm}$  pada sudu bukaan turbin  $30^0$ . Nilai torsi statis minimum pada turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebesar  $-2,03 \text{ N.cm}$  pada sudu bukaan turbin  $150^0$ , sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu sebesar  $0,01 \text{ N.cm}$  pada sudu bukaan turbin  $150^0$ . Dapat disimpulkan bahwa torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum tertinggi terdapat pada turbin angin Savonius tidak berpengganggu.

Kesimpulan yang didapat pada penelitian tersebut adalah peningkatan *Coefficient of Power* terjadi hanya pada  $Re=168000$ , dimana  $y/D=0,5$  memiliki nilai CoP yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu; peningkatan *Coefficient of Moment* terjadi hanya pada  $Re=168000$ ; serta dengan adanya silinder pengganggu dan variasi *Reynolds Number* tidak menaikkan nilai torsi statis maksimum turbin namun menaikkan nilai torsi statis minimumnya.



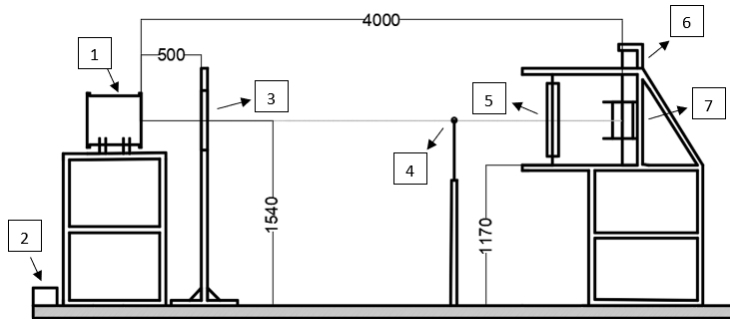
## BAB III METODOLOGI

### 3.1 *Setting* Eksperimental

*Setting* eksperimental pada penelitian ini meliputi parameter yang diukur dan analisa dimensi.

#### 3.1.1 Parameter yang Diukur

Pada penelitian ini, terdapat beberapa parameter yang akan dianalisa yaitu diameter silinder pengganggu ( $d$ ), diameter sudu turbin Savonius ( $D$ ), jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius ( $y$ ), jarak titik pusat silinder pengganggu terhadap titik pusat returning blade turbin Savonius ( $S$ ), kecepatan fluida ( $U$ ), densitas fluida ( $\rho$ ), dan viskositas fluida ( $\mu$ ). Pada gambar 3.1, terdapat skema penelitian yang dilakukan serta skema turbin Savonius juga dapat dilihat pada gambar 3.2.

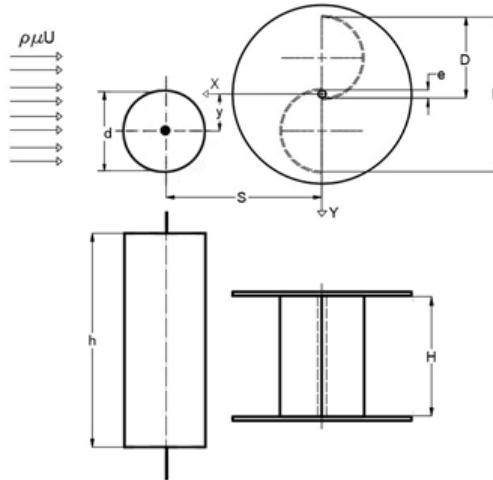


Gambar 3. 1 Skema penelitian

Keterangan:

1. *Axial Fan*
2. *Voltage Regulator*
3. *Honeycomb*

4. Anemometer
5. Silinder Pengganggu
6. Torsimeter
7. Turbin Angin Savonius



Gambar 3. 2 Skema turbin angin Savonius tampak atas dan samping

Pengukuran dilakukan pada posisi:

$$(d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$$

$$(y/D) = 0,5$$

$$(S/D) = 2,4$$

Dimana:

- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- $\rho$  : massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : viskositas udara ( $\text{Ns/m}^2$ )
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- d : diameter silinder pengganggu (m)
- e : diameter poros (m)

- $y$  : jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius  
 $x$  : tebal sudu turbin (m)  
 $S$  : jarak titik pusat silinder pengganggu terhadap titik pusat *returning blade* turbin Savonius (m)  
 $H$  : tinggi turbin Savonius (m)  
 $L$  : diameter turbin Savonius (m)  
 $h$  : tinggi silinder pengganggu (m)

### 3.1.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui parameter apa saja yang dapat mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin Savonius dengan silinder sirkular pengganggu yang memiliki diameter tertentu dimana teorema Phi Buckingham digunakan sebagai metode analisa ini.

#### 3.1.2.1 Analisa Dimensi *Coefficient of Power*

Langkah-langkah berikut dilakukan dalam analisa dimensi *Coefficient of Power*:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

- $P$  : *power* (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)  
 e : diameter poros (m)  
 S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)  
 H : tinggi turbin Savonius (m)  
 n : putaran turbin (rpm)  
 h : tinggi silinder pengganggu (m)  
 y : posisi silinder pengganggu terhadap sudut Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
- Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan, dimana pada penelitian ini menggunakan M, L, t
  - Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Dimensi untuk setiap parameter CoP

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

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

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

Dimana:

$$\begin{aligned} M & : a + 1 = 0 \\ L & : -3a + b + c + 2 = 0 \\ t & : -b - 3 = 0 \end{aligned}$$

Lalu diperoleh:

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

sehingga:

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

atau

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

- Dengan cara yang sama, maka diperoleh:

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

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

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

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

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

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

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

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

Setelah dilakukan analisa dimensi, maka diperoleh grup tanpa dimensi seperti berikut:

- $\pi_1$  : *Coefficient of Power*
- $\pi_2$  : bilangan Reynolds
- $\pi_3$  : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_4$  : rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_5$  : rasio diameter *overlap* turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_6$  : *Tip Speed Ratio*
- $\pi_7$  : rasio jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_8$  : rasio tinggi turbin angin dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_9$  : rasio ketinggian silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

Variable tetap untuk penelitian ini adalah  $\frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{h}{D}, \frac{e}{D}$  dan  $\frac{H}{D}$ . Sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}$  dan  $\frac{nD}{U}$  adalah variabel yang divariasikan agar dapat diketahui pengaruhnya terhadap *coefficient of power* pada turbin Savonius, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan nilai L.  
Untuk nilai  $L = 2D - e - 2x$

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

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

### 3.1.2.2 Analisa Dimensi *Coefficient of Moment*

Langkah-langkah berikut ini dilakukan untuk menganalisa dimensi *coefficient of moment*:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

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)
e	: diameter poros (m)
S	: Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (m)
H	: tinggi turbin angin Savonius (m)
n	: putaran turbin (rpm)
h	: panjang silinder pengganggu (m)

- y : posisi silinder pengganggu terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
- Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t.
  - Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Dimensi untuk setiap parameter CM

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

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

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

Dimana:

$$\begin{aligned} M &: a + 1 = 0 \\ L &: -3a + b + c + 2 = 0 \\ t &: -b - 2 = 0 \end{aligned}$$

Lalu diperoleh:

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

sehingga:



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

atau

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

- Dengan cara yang sama, maka diperoleh:

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

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

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

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

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

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

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

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

Setelah dilakukan analisa dimensi, maka diperoleh grup tanpa dimensi seperti berikut:

$\pi_1$  : *Coefficient of Moment*

$\pi_2$  : bilangan Reynolds

$\pi_3$  : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius

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

$\pi_5$  : rasio diameter *overlap* turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius.

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

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

Variable tetap untuk penelitian ini adalah  $\frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{e}{D}, \frac{h}{D}$  dan  $\frac{H}{D}$ . Sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}$  dan  $\frac{nD}{U}$  adalah variabel yang divariasikan agar dapat diketahui pengaruhnya terhadap *coefficient of moment* pada turbin Savonius, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan nilai L. Untuk nilai  $L = 2D - e - 2t$

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

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

## 3.2 Peralatan

Beberapa peralatan digunakan pada penelitian ini untuk mendapatkan hasil terbaik dalam pengambilan data. Berikut ini merupakan peralatan yang digunakan.

### 3.2.1 *Axial Fan*

*Axial fan* digunakan sebagai penghasil angin untuk dapat memutar sudu turbin angin Savonius. *Axial fan* pada penelitian ini berupa CKE SPV-18 yang dapat dilihat pada gambar 3.3. Spesifikasi dari *axial fan* CKE SPV-18 adalah sebagai berikut:

- Diameter : 450 mm
- Tekanan statis : 520 Pa
- Tegangan : 220 – 240 V
- *Air flow* : 2,09 m<sup>3</sup>/s
- Phase : 1



Gambar 3. 3 *Axial fan*

### 3.2.2 Turbin Savonius

Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius dimana turbin beserta skemanya dapat dilihat pada gambar 3.4. Berikut ini adalah spesifikasi turbin angin Savonius yang digunakan:

- Diameter sudu turbin ( $D$ ) = 167,1 mm
- Diameter poros ( $e$ ) = 19,3 mm
- Diameter *end plate* ( $D_0$ ) = 320 mm
- Tinggi *blade* ( $H$ ) = 298 mm
- Tebal *end plate* = 1,8 mm
- Tebal sudu turbin ( $x$ ) = 2,95 mm



Gambar 3. 4 Turbin angin Savonius

### 3.2.3 Silinder Pengganggu

Silinder pengganggu yang digunakan dalam penelitian ini beserta skemanya dapat dilihat pada gambar 3.5. Berikut ini adalah spesifikasi dari silinder pengganggu yang digunakan:

- Rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius ( $y/D$ ): 0,5.

- Rasio diameter silinder pengganggu dan diameter tubin angin Savonius ( $d/D$ ): 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.



Gambar 3. 5 Silinder Pengganggu

### 3.2.4 Penyangga Turbin Angin Savonius

Turbin Savonius beserta silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini diletakkan pada suatu penyangga yang dapat dilihat pada gambar 3.6.

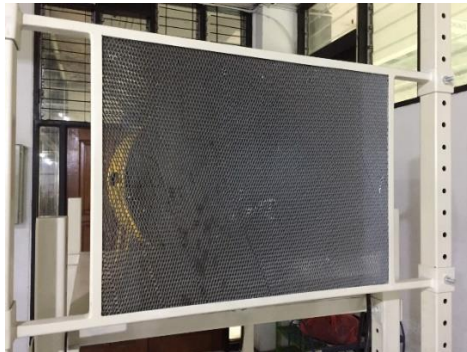


Gambar 3. 6 Penyangga

### 3.2.5 Honeycomb

*Honeycomb* digunakan pada penelitian ini yang diletakkan di antara *axial fan* dan turbin Savonius dengan tujuan untuk menyeragamkan aliran fluida yang menuju turbin Savonius serta mencegah terjadinya *swirl*. *Honeycomb* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.7. Berikut ini merupakan spesifikasi dari *honeycomb* yang digunakan:

- Panjang sisi *frame* : 750 mm
- Panjang sisi *honeycomb* : 630 mm
- Tinggi *honeycomb* : 460 mm
- Tinggi *frame* : 490 mm
- Tebal *frame* : 30 mm
- Tebal *honeycomb* : 20 mm
- *Meshing Size* : 16 lubang/in<sup>2</sup>



Gambar 3. 7 *Honeycomb*

### 3.3 Alat Ukur

Untuk mendapatkan nilai putaran dan torsi yang dihasilkan turbin Savonius, digunakan beberapa alat ukur dalam penelitian ini.

### 3.3.1 Anemometer

Anemometer adalah alat untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer dalam penelitian ini menggunakan model **Omega HHF141** yang dapat dilihat pada gambar 3.8 dengan *high resolution* sebesar 0,01 m/s. Spesifikasi dari anemometer ini dapat dilihat pada tabel 3.3.



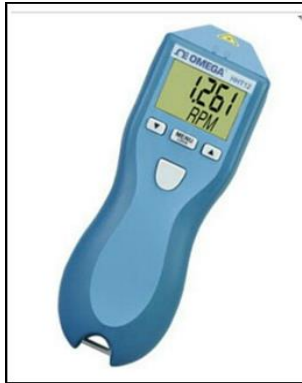
Gambar 3. 8 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 3 Spesifikasi anemometer Omega HHF141

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

### 3.3.2 Tachometer

Tachometer digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer untuk penelitian ini adalah *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer Omega HHT12* dengan akurasi pembacaan sebesar 0,01%. Tachometer yang digunakan seperti pada gambar 3.9 dan spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 3.4.



Gambar 3. 9 Tachometer Omega HHT12

Tabel 3. 4 Spesifikasi Tachometer Omega HHT12

<b>SPESIFIKASI Tachometer Omega HHTI12</b>	
<i>Range</i>	5 - 99.999 rpm
<i>Accuracy</i>	0,01 % of reading or $\pm 1$ digit
<i>Resolution</i>	0,001 - 1,0 rpm
<i>Display</i>	5-digit alphanumeric LCD
<i>Memory</i>	Max, min and last
<i>Power</i>	2 "AA" 1,5 V dc batteries
<i>Environmental</i>	5 to 40° C



### 3.3.3 Voltage Regulator

*Voltage Regulator* digunakan untuk mengatur kecepatan putar dari *fan* dimana untuk mengatur kecepatan *fan*, perlu mengubah *voltage output* dari *regulator*. *Voltage regulator* pada penelitian ini adalah **Ling Bridge TDGC 2J-3** yang dapat dilihat pada gambar 3.10 dan spesifikasinya dapat dilihat di tabel 3.5.



Gambar 3. 10 *Voltage regulator*

Tabel 3. 5 Spesifikasi *voltage regulator*

<i>Capacity</i>	<i>Phase</i>	<i>Input</i>	<i>Ouput</i>	<i>Max output Current</i>
3 KVa	$\Phi 1$	220 V/50-60 Hz	0-250 V	12 A

### 3.3.4 Torquemeter Statis

Pengukuran torsi pada penelitian ini menggunakan *torquemeter* yang merupakan alat untuk mengukur torsi dari suatu objek. *Torquemeter* yang digunakan adalah *torquemeter* **LUTRON** model **TQ-8800** dengan *high resolution* sebesar 0,1 Newton-cm. *Torquemeter* pada penelitian ini seperti pada gambar 3.11 dan spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 3.6.



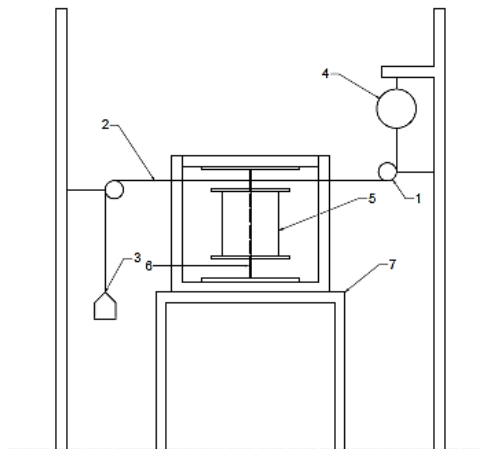
Gambar 3. 11 *Torquemeter* LUTRON model TQ-8800

Tabel 3. 6 Spesifikasi *torquemeter* LUTRON model TQ-8800

<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

### 3.3.5 *Brake Dynamometer*

Torsi dinamis dalam penelitian ini dapat diukur dengan *Brake dynamometer* dengan timbangan sebagai *spring balance*. Skema pemasangan *brake dynamometer* dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Skema *brake dynamometer*

Keterangan:

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

*Brake Dynamometer* dalam penelitian ini memiliki prosedur dalam penggunaannya. Pertama adalah memasang benang nylon melingkari poros turbin Savonius. Saat turbin Savonius berputar, pemberat diletakkan pada benang agar dapat menurunkan putaran poros turbin. Pemberat akan terus ditambah hingga turbin berhenti berputar. Pencatatan putaran poros dan pembacaan pada *spring balance* dilakukan seiring penambahan beban pemberat. *Spring balance* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.13 dan spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 3.7.

Sedangkan untuk pemberat yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.14.



Gambar 3. 13 Neraca pegas Nagata tipe C-5

Tabel 3. 7 Spesifikasi neraca pegas Nagata tipe C-5

<i>Specification NAGATA type C-5</i>	
<b>Capacity</b>	10 kg
<b>Graduation</b>	50 gram
<b>Features</b>	<i>High impact ABS body</i>
<b>Platter Size</b>	Pan size: Ø 290 mm <i>Alum. Round pan</i> <i>Dual display chart, Dial 187 mm</i>



Gambar 3. 14 Pemberat

### 3.4 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

#### 3.4.1 Torsi Dinamis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Meletakkan benda uji pada *test section*.
3. Mengukur temperatur ruangan dengan menggunakan termometer.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu  $9,7 \times 10^4$ .
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros tanpa silinder pengganggu dan beban dengan menggunakan *tachometer*.
7. Mengukur torsi dinamis tanpa silinder pengganggu dan beban dengan *brake dynamometer*.
8. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan (untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  sebesar 5 gr dan 10 gr;  $Re = 13,6 \times 10^4$  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.
12. Mengulangi langkah 5 – 11 dengan mengubah bilangan  $Reynolds = 13,6 \times 10^4$ .
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur perbandingan antara diameter silinder pengganggu dengan

- diameter turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,1 dan ( $S/D$ ) sebesar 2,4.
14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .
  15. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan 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 (untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  sebesar 5 gr dan 10 gr;  $Re = 13,6 \times 10^4$  sebesar 10 gr dan 20 gr).
  18. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
  19. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
  20. Mengulangi langkah 17 – 19 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
  21. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah bilangan Reynolds =  $13,6 \times 10^4$ .
  22. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi  $d/D$  menjadi 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0.
  23. Mematikan *axial fan*.
  24. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran ( $n$ ) terhadap  $\lambda$  dan bilangan Reynolds, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ .

### 3.4.2 Torsi Statis

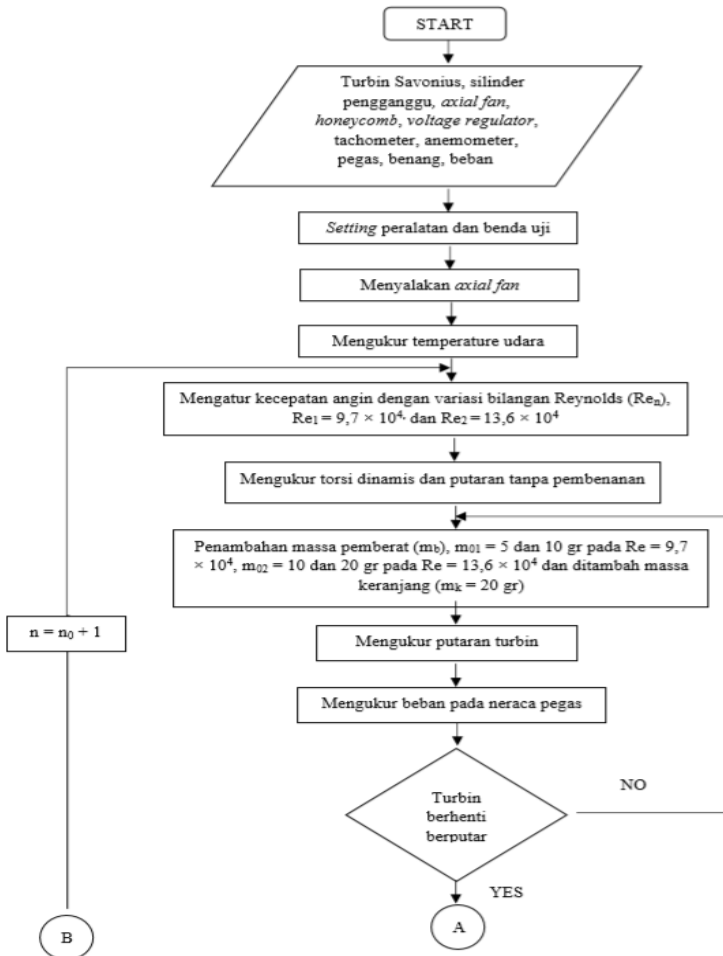
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Meletakkan benda uji pada *test section*.
3. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .

4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu  $9,7 \times 10^4$ .
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan *torquemeter*.
7. Mematikan *axial fan*.
8. Mengulangi langkah 3 - 7 dengan variasi sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (dengan kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
9. Mengulangi langkah 3 - 8 dengan variasi mengubah bilangan Reynolds menjadi  $13,6 \times 10^4$ .
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan perbandingan antara diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius ( $d/D$ ) yang paling optimum dan ( $S/D$ ) sebesar 2,4.
11. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$ .
13. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torquemeter*.
14. Mematikan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 11 - 14 dengan mengubah variasi sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (dengan kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
16. Mengulangi langkah 11 - 15 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi  $13,6 \times 10^4$ .
17. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting* grafik, perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\theta$

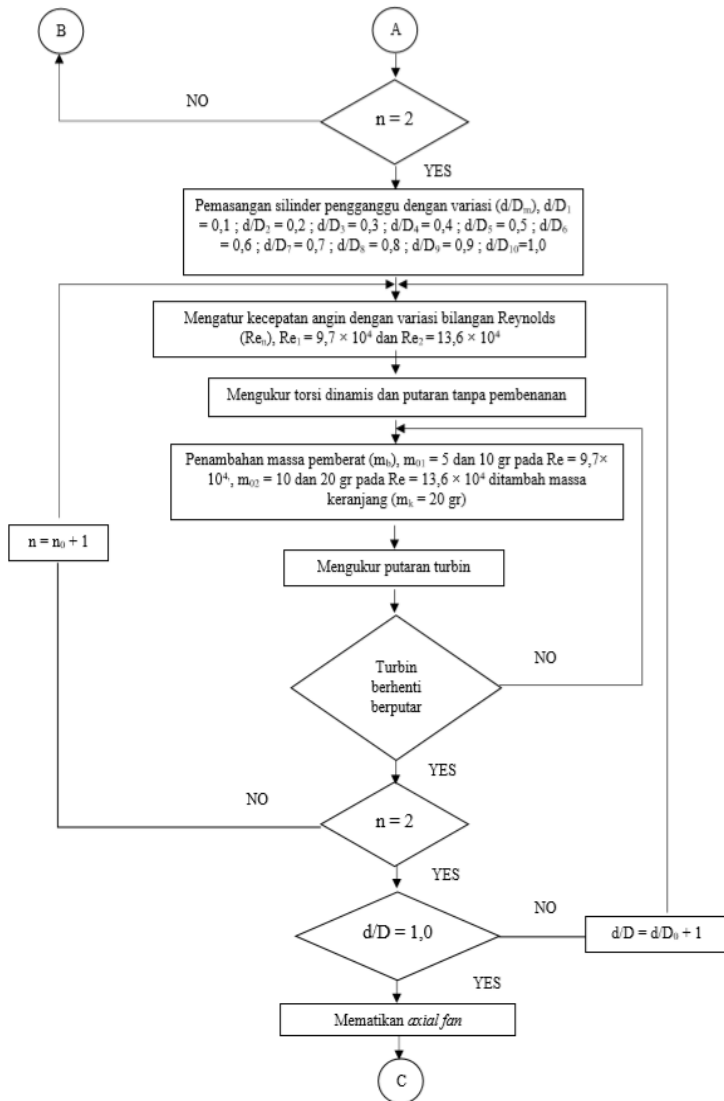
### 3.5 Flowchart Penelitian

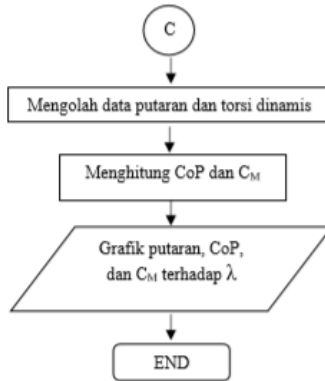
Berikut ini adalah *flowchart* yang digunakan dalam penelitian ini

#### 3.5.1 Torsi Dinamis



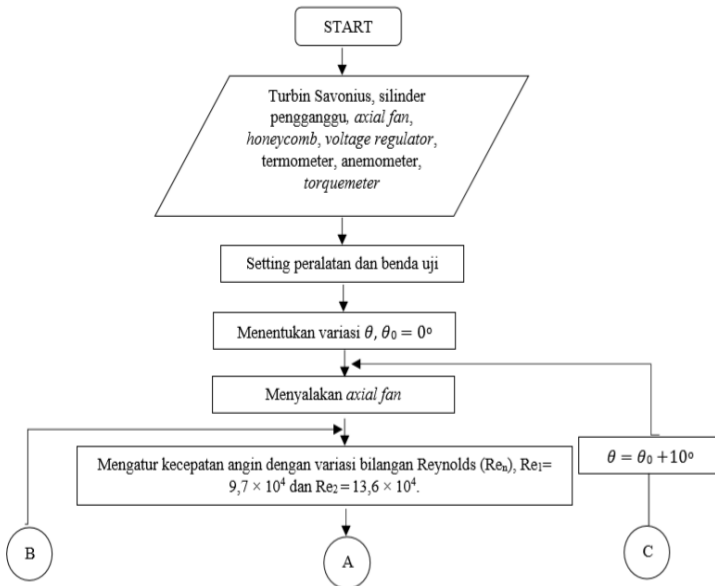


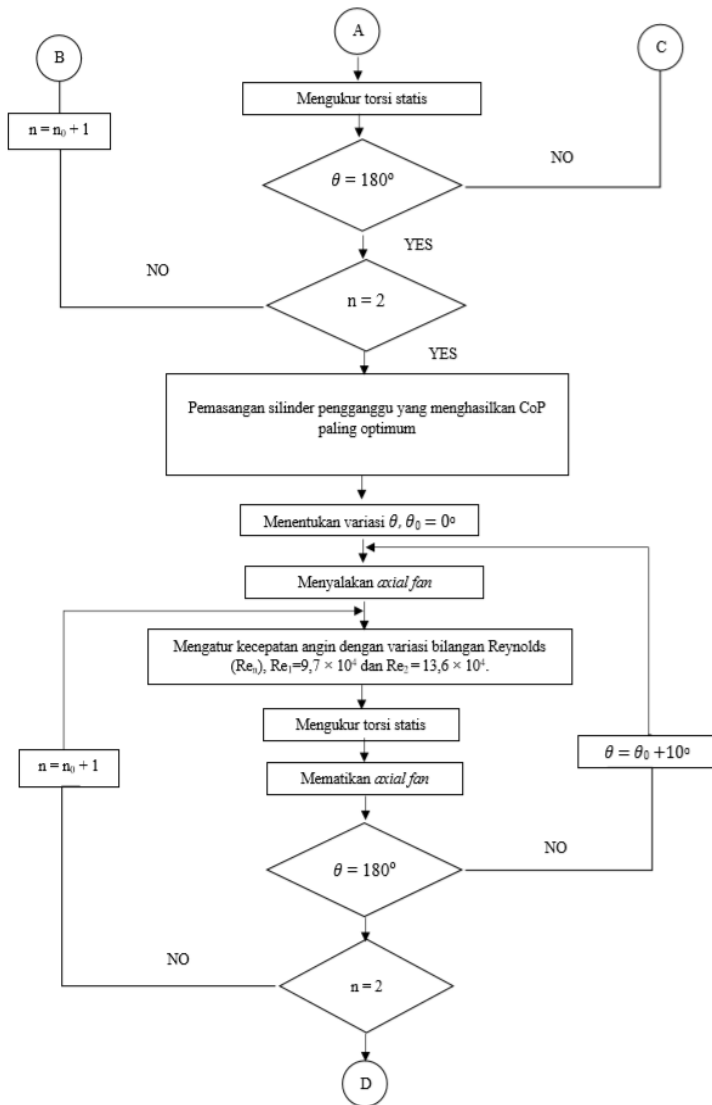


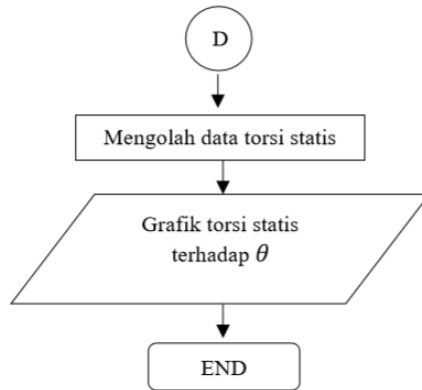


Gambar 3. 15 *Flowchart* pengukuran torsi dinamis

### 3.5.2 Torsi Statis







Gambar 3. 16 *Flowchart* pengukuran torsi statis

### 3.6 Perhitungan *Uncertainty*

Perhitungan *uncertainty* dilakukan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian dalam suatu pengukuran dalam eksperimen. Pada eksperimen kali ini, setiap parameter dilakukan analisis perhitungan *uncertainty*, menggunakan data dari *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $d/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,4$ ; dan  $Re = 9,7 \times 10^4$ . Berikut adalah contoh perhitungan *uncertainty* untuk *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) pada saat *coefficient of power* maksimum.

- *Uncertainty* pada pembacaan kecepatan (U)

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

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

$$u_\omega = \pm \frac{0,1}{220,64} = \pm 4,53 \times 10^{-4}$$

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

$$u_R = \pm \frac{0,5}{154,5} = \pm 3,24 \times 10^{-3}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{\lambda} = \pm \{ [4,53 \times 10^{-4}]^2 + [3,24 \times 10^{-3}]^2 + 0,002^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\lambda} = \pm 3,83 \times 10^{-3}$$

$$u_{\lambda} = \pm 0,383\%$$

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

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,045)^2 + (0,0005)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0456$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *coefficient of moment* ( $C_M$ )

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

$$u_{CM} = \pm \{ (0,045)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 0,0458$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds ( $Re$ )

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

$$u_{RE} = \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,62 \times 10^{-3})^2 + (0,005)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 6,87 \times 10^{-3}$$

Berikut ini merupakan nilai dari *uncertainty* yang didapatkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada CoP maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $d/D = 0,5$ .

Tabel 3. 8 *Uncertainty*

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<b><i>Coefficient of Power (CoP)</i></b>	4,56%
<b><i>Coefficient of Moment (C<sub>M</sub>)</i></b>	4,58%
<b><i>Tip Speed Ratio (λ)</i></b>	0,383%
<b><i>Reynolds Number (Re)</i></b>	0,687%

### 3.7 Hasil yang akan Diperoleh

Hasil yang akan diperoleh dalam penelitian ini adalah:

1. Grafik torsi statis ( $T_s$  dan  $T_{s0}$ ) 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  $C_{m0}$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).

4. Grafik perbandingan *Coefficient of Power* maksimum dengan dan tanpa pengganggu ( $\text{CoP}_{\text{max}}/\text{CoP}_{0\text{max}}$ ) terhadap variasi  $d/D$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)



## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Contoh Perhitungan

Pada eksperimen ini, pengambilan data menggunakan fluida kerja udara dengan asumsi *steady* dan aliran *incompressible* yang memiliki nilai sebagai berikut:

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar ( $P$ ) =  $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
2. Temperatur udara dengan kondisi standar ( $T_{\text{std}}$ ) = 288,2 K
3. Massa jenis udara dengan kondisi standar ( $\rho_{\text{std}}$ ) = 1,225  $\text{kg/m}^3$ .

Data-data di atas adalah data standar yang digunakan untuk contoh perhitungan dan perhitungan pada eksperimen ini. Adapun perhitungan yang dilakukan dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

#### 4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

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

Perhitungan untuk mendapatkan nilai massa jenis udara dalam menghitung besar gaya *drag* pada eksperimen ini dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{P_1 U_1}{T_1} = \frac{P_2 U_2}{T_2} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dimana  $U = \frac{m}{\rho}$ , sehingga persamaan 4.1 dapat menjadi:

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

Dimana:

$P_1$  = tekanan absolut udara keadaan 1 (acuan)

- $= 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
- $T_1$  = temperatur udara keadaan 1 (acuan)  
= 288,2 K
- $\rho_1$  = massa jenis udara keadaan 1 (acuan)  
= 1,225 kg/m<sup>3</sup>
- $m_1$  = massa udara keadaan 1 (acuan)
- $P_2$  = tekanan absolut udara keadaan 2 (penelitian)
- $T_2$  = temperatur udara keadaan 2 (penelitian) = 301,5 K
- $\rho_2$  = massa jenis udara keadaan 2 (penelitian)
- $m_2$  = massa udara keadaan 2 (penelitian)

Kondisi 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga  $P_1 = P_2$  dan massa udara pada kondisi 1 dan 2 bernilai sama  $m_1 = m_2$ . Berdasarkan batasan tersebut maka:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2} \dots\dots\dots (4.3)$$

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

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

- **Viskositas Udara**

Perhitungan viskositas udara menggunakan persamaan **Sutherland**, yaitu:

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

dimana untuk udara:

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

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

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

Nilai-nilai tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 4.4, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

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

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

- **Reynolds Number**

Berdasarkan persamaan 2.6, maka bilangan Reynolds untuk kecepatan aliran fluida 5 m/s adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots (4.5)$$

dimana:

$$\begin{aligned} L &= \text{panjang karakteristik} \\ &= 2D - e - 2x = (2 \times 167,1) - 19,3 - (2 \times 2,95) \\ &= 309 \text{ mm} = 0,309 \text{ m} \end{aligned}$$

Nilai panjang karakteristik (L) kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 4.5, sehingga nilai bilangan Reynolds untuk kecepatan angin 5 m/s adalah:

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

### 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:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \dots\dots\dots (4.6)$$

dimana:

- $n$  = jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)
- $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi (336,1)}{60} = 35,178 \text{ rad/s}$
- $R$  = jari-jari turbin angin Savonius  
=  $154,5 \text{ mm} = 0,1545 \text{ m}$
- $U$  = kecepatan angin =  $5 \text{ m/s}$  untuk bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

sehingga didapat:

$$\lambda = \frac{35,178 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1545 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,087$$

### 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:

$$CoP = \frac{|m-s|g r \omega}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \dots\dots\dots (4.7)$$

dimana:

- $A$  = Luas penampang turbin angin Savonius  
=  $L \cdot H = 0,309 \text{ m} \times 0,298 \text{ m} = 0,092 \text{ m}^2$
- $r$  = jari-jari poros turbin =  $0,0125 \text{ m}$

- $\omega$  = Kecepatan sudut turbin angin Savonius  
 $m$  = massa pembebanan = 0,006 kg  
 $s$  = massa yang terbaca pada neraca pegas = 0,14 kg

sehingga didapatkan nilai CoP:

$$\begin{aligned}
 C_{oP} &= \frac{\left| \frac{6 - 140}{1000} \right| kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0125 m \cdot 35,178 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,092 m^2 \cdot \left(5 \frac{m}{s}\right)^3} \\
 &= 0,0859
 \end{aligned}$$

#### 4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ )

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

$$C_M = \frac{T_D}{T_\infty} \dots\dots\dots (4.8)$$

$$C_M = \frac{(m - s) g \cdot r}{T_\infty} \dots\dots\dots (4.9)$$

dimana:

- $T_\infty$  = torsi teoritis (N.m) = 0,2038 N.m  
 $m$  = massa pembebanan = 0,006 kg  
 $s$  = massa yang terbaca di neraca pegas = 0,14 kg  
 $g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ ) = 9,81  $m/s^2$   
 $r$  = jari-jari poros turbin Savonius = 0,0125 m

sehingga nilai  $C_M$  didapatkan sebagai berikut:

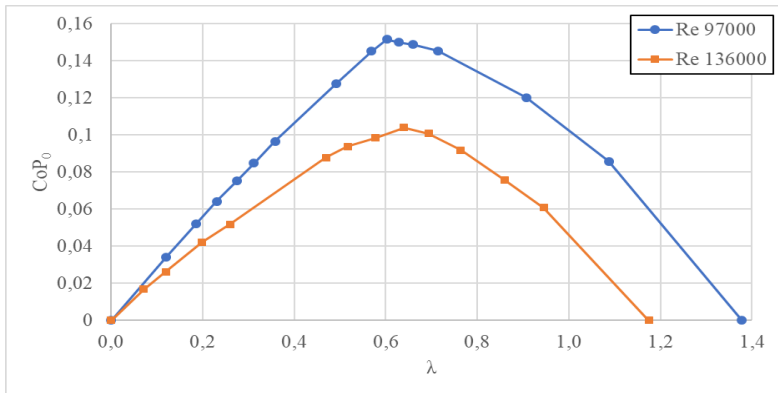
$$C_M = \frac{(0,006 - 0,14) 9,81 \times 0,0125}{0,2038} = 0,08$$

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

Untuk mengetahui kondisi awal dari performa turbin Savonius, dilakukan pengukuran performa turbin tanpa menggunakan silinder pengganggu. Hasil dari pengukuran tersebut akan dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu. Analisa yang dilakukan berupa nilai *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan torsi statis yang dihasilkan turbin. Pengukuran dilakukan dengan kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s serta bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

### **4.2.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP<sub>0</sub>) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu**

Dari hasil pengukuran awal, didapat nilai *coefficient of power* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran yang dilakukan untuk mendapat nilai tersebut pada turbin Savonius tanpa silinder pengganggu menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan *tachometer*. Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik *Coefficient of Power* (CoP<sub>0</sub>) terhadap fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

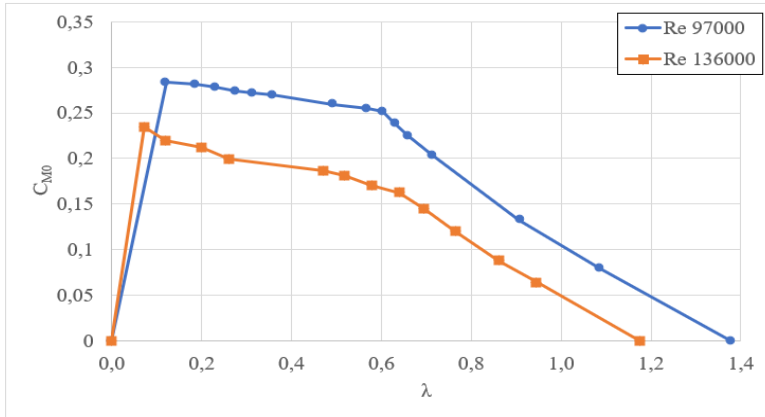
Pada gambar 4.1, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik dimana nilai *coefficient of power* pada kedua bilangan Reynolds akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , turbin Savonius menghasilkan nilai CoP maksimum sebesar 15,2% pada TSR 0,603. Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ ; turbin menghasilkan nilai CoP maksimum sebesar 10,4% pada TSR 0,64. Dari grafik tersebut juga menunjukkan nilai CoP maksimum tertinggi pada turbin Savonius tanpa silinder pengganggu terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .

Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dapat bekerja lebih optimal pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dibanding pada  $Re\ 13,6 \times 10^4$ . Hal tersebut dapat diakibatkan oleh perputaran turbin yang terlalu cepat karena kecepatan angin yang terlalu tinggi pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Perputaran turbin yang terlalu cepat akan membentuk seperti *solid wall* yang mengakibatkan aliran fluida tidak dapat mencapai sudu turbin, sehingga daya yang dihasilkan turbin menjadi rendah. Fenomena tersebut diperkuat oleh penelitian yang pernah dilakukan Mahmoud et al., 2012. Pada gambar 2.9

menunjukkan nilai CoP dari turbin Savonius fungsi kecepatan angin memiliki grafik dengan trendline parabolik dimana nilai CoP naik sampai pada kecepatan angin tertentu dan akan turun setelah mencapai titik optimumnya. Dapat disimpulkan bahwa meningkatnya bilangan Reynolds atau kecepatan angin yang digunakan, tidak berbanding lurus dengan peningkatan CoP.

#### 4.2.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Dari hasil pengukuran awal, didapat nilai *coefficient of moment* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran yang dilakukan untuk mendapat nilai tersebut pada turbin Savonius tanpa silinder pengganggu menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan *tachometer*. Hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.2.



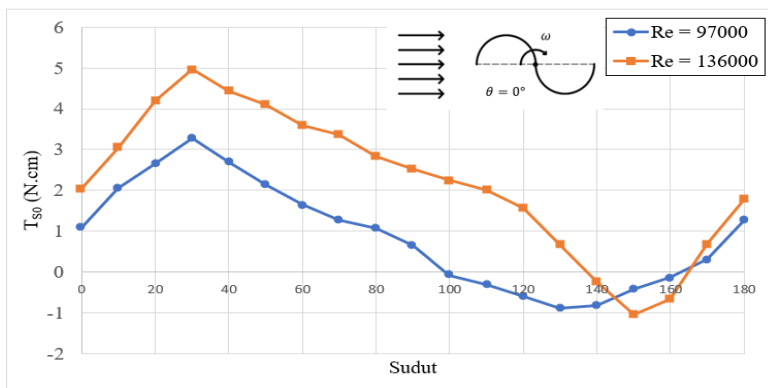
Gambar 4. 2 Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) terhadap fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu



Pada gambar 4.2, grafik yang dihasilkan cenderung turun dimana nilai *coefficient of moment* pada kedua bilangan Reynolds akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , turbin Savonius menghasilkan nilai  $C_M$  maksimum sebesar 0,284 pada TSR 0,121. Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , turbin menghasilkan nilai  $C_M$  maksimum sebesar 0,235 pada TSR 0,072. Dari grafik tersebut menunjukkan torsi dinamis maksimum akan didapat saat kondisi turbin akan berhenti berputar, sehingga nilai  $C_M$  maksimum didapat saat kondisi tersebut. Dari grafik ini dapat disimpulkan nilai  $C_M$  maksimum tertinggi pada turbin Savonius tanpa silinder pengganggu terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .

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

Dari hasil pengukuran awal, didapat nilai torsi statis terhadap sudut pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran yang dilakukan untuk mendapat nilai tersebut pada turbin Savonius tanpa silinder pengganggu menggunakan alat ukur *torque* meter. Hasil pengukuran dapat dilihat pada 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, grafik yang dihasilkan berbentuk sinusoidal untuk bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  maupun  $13,6 \times 10^4$ . Untuk grafik yang terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $130^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Nilai torsi statis maksimum yang terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah  $3,28 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$ , dan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  adalah  $4,96 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$ . Sedangkan nilai torsi statis minimum yang terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah  $-0,9 \text{ N.cm}$  pada sudut  $130^\circ$ , dan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  adalah  $-1,04 \text{ N.cm}$  pada sudut  $150^\circ$ . Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai torsi statis maksimum dan minimum terbesar terjadi pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Hal tersebut diakibatkan semakin besar bilangan Reynolds yang digunakan, maka semakin besar pula kecepatan dan gaya *drag* yang diterima turbin Savonius. Nilai torsi statis yang bernilai negatif pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  terdapat pada sudut  $100^\circ$  hingga  $160^\circ$ , sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  terdapat pada sudut  $140^\circ$  hingga  $160^\circ$ . Nilai negatif tersebut menandakan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self-starting* pada sudut tertentu, sehingga dibutuhkan torsi awal agar turbin angin Savonius dapat berputar.

Pada eksperimen ini, didapatkan bahwa nilai torsi statis positif terbesar pada turbin angin Savonius terjadi pada sudut  $30^\circ$  untuk kedua bilangan Reynolds dan torsi statis negatif terbesar terjadi pada sudut  $130^\circ$  untuk bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan pada sudut  $150^\circ$  untuk bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Penurunan nilai torsi statis yang terjadi pada grafik diakibatkan oleh posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin sehingga gaya *drag* yang terjadi pada *advancing blade* turbin

mengecil, sedangkan *returning blade* turbin semakin mendekati arah datangnya angin sehingga gaya drag yang terjadi pada *returning blade* membesar. Hal tersebut menyebabkan mengecilnya selisih gaya drag yang terjadi pada kedua sudu sehingga nilai torsi statis juga akan mengecil. Peningkatan nilai torsi statis yang terjadi pada grafik diakibatkan oleh meningkatnya gaya drag yang terjadi pada *advancing blade* dan mengurangnya gaya drag yang terjadi pada *returning blade*, menyebabkan peningkatan selisih gaya drag yang terjadi pada kedua sudu turbin sehingga nilai torsi statis juga meningkat. Pada eksperimen ini didapatkan turbin Savonius menghasilkan torsi statis maksimum pada posisi sudut  $30^\circ$ .

### **4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu**

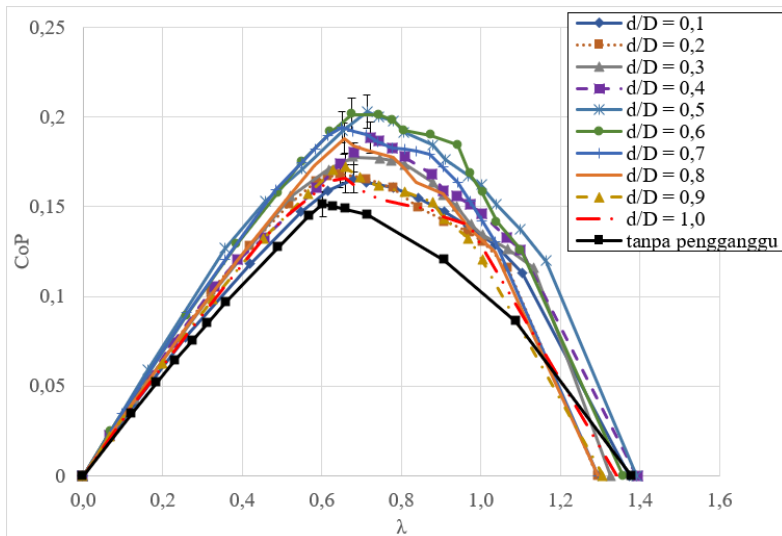
Pada eksperimen ini, dilakukan pengukuran performa turbin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu diletakkan pada jarak  $S/D = 2,4$ ; serta variasi  $d/D$  yang digunakan sebesar  $0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ . Analisa yang dilakukan berupa nilai *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan torsi statis yang dihasilkan turbin.

#### **4.3.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu**

Nilai *coefficient of power* terhadap fungsi TSR dilakukan dengan kecepatan angin  $5 \text{ m/s}$  dan  $7 \text{ m/s}$  serta bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

#### 4.3.1.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$

Pada eksperimen ini didapatkan nilai *coefficient of power* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai CoP terhadap *tip speed ratio* untuk setiap variasi  $d/D$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.4.



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

Pada gambar 4.4, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik. Nilai CoP yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Dari grafik

tersebut, setiap variasi  $d/D$  didapatkan nilai CoP maksimum pada TSR tertentu. Nilai CoP maksimum pada turbin Savonius untuk setiap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Tabel perbandingan CoP turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		Peningkatan (%)
	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$	
0,1	0,152	0,603	0,165	0,68	9,18
0,2			0,168	0,646	11,17
0,3			0,178	0,680	17,24
0,4			0,189	0,722	24,48
0,5			0,203	0,714	34,18
0,6			0,201	0,675	32,98
0,7			0,194	0,651	28,34
0,8			0,188	0,656	24,15
0,9			0,172	0,659	13,41
1,0			0,166	0,66	9,37

Dari tabel 4.1, dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi  $d/D$ , nilai CoP maksimum lebih tinggi daripada nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai CoP maksimum tertinggi terdapat pada  $d/D = 0,5$  yaitu sebesar 20,3% pada TSR 0,714; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan tertinggi sebesar 34,18% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan nilai CoP maksimum terendah terdapat pada  $d/D = 0,1$  yaitu sebesar 16,5% pada TSR 0,68; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan terendah sebesar 9,18% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

Tabel 4. 2 *Uncertainty* CoP maksimum pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ 

d/D	$Re = 9,7 \times 10^4$		
	CoP <sub>max</sub>	<i>Uncertainty</i>	<i>Range</i>
Tanpa Pengganggu	0,152	4,7	0,145 - 0,159
0,1	0,165	4,74	0,157 - 0,173
0,2	0,168	4,65	0,16 - 0,176
0,3	0,178	4,65	0,17 - 0,186
0,4	0,189	4,65	0,18 - 0,198
0,5	0,203	4,56	0,194 - 0,212
0,6	0,201	4,52	0,192 - 0,21
0,7	0,194	4,52	0,185 - 0,202
0,8	0,188	4,56	0,179 - 0,197
0,9	0,172	4,65	0,164 - 0,18
1	0,166	4,7	0,158 - 0,174

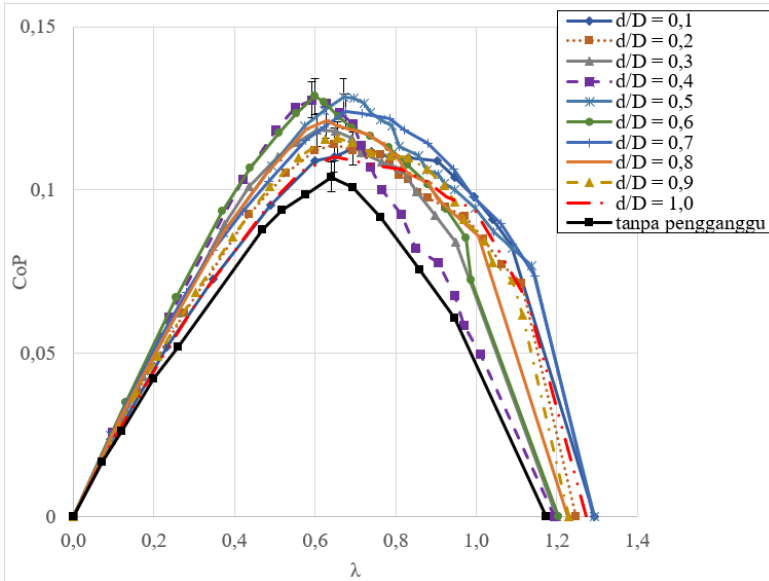
Tabel 4.2 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai CoP maksimum pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dari setiap variasi d/D maupun dengan yang tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Batas toleransi pada nilai CoP maksimum tersebut dapat dilihat secara visual pada gambar 4.4. Beberapa nilai CoP maksimum dari variasi d/D saling berdekatan satu sama lain dimana nilai-nilai tersebut memasuki suatu *range uncertainty*, sehingga untuk kedepannya variasi d/D yang digunakan dapat diminimalisir. Adapun variasi d/D yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  adalah 0,1; 0,5; dan 0,8.

Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga efektif mengganggu *boundary layer* pada permukaan *returning blade* turbin menyebabkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Aliran turbulen lebih tahan terhadap gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, sehingga titik separasi pada *returning blade* mundur dan memperkecil *wake*. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*,

sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* juga efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade*. Hal tersebut mengakibatkan selisih tekanan antara bagian depan dan belakang *returning blade* menurun sehingga *pressure drag* juga menurun. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat. Pada eksperimen ini, semua variasi  $d/D$  efektif meningkatkan performa turbin Savonius dan  $d/D$  yang paling optimum untuk meningkatkan performa turbin Savonius adalah saat  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$ .

#### **4.3.1.2 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$**

Pada eksperimen ini didapatkan nilai *coefficient of power* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai CoP terhadap *tip speed ratio* untuk setiap variasi  $d/D$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5.



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

Pada gambar 4.5, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik. Nilai CoP yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Dari grafik tersebut, setiap variasi  $d/D$  didapatkan nilai CoP maksimum pada TSR tertentu. Nilai CoP maksimum pada turbin Savonius untuk setiap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  dapat dilihat pada tabel 4.2.



Tabel 4. 3 Tabel perbandingan CoP turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		Peningkatan (%)
	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$	
0,1	0,104	0,64	0,113	0,694	8,25
0,2			0,114	0,648	9,47
0,3			0,118	0,606	13,77
0,4			0,127	0,592	22,69
0,5			0,128	0,67	23,57
0,6			0,129	0,599	23,65
0,7			0,124	0,677	19,27
0,8			0,121	0,626	16,54
0,9			0,116	0,655	11,24
1,0			0,11	0,647	5,98

Dari tabel 4.3, dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi d/D, nilai CoP maksimum lebih tinggi daripada nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai CoP maksimum tertinggi terdapat pada  $d/D = 0,6$  yaitu sebesar 12,9% pada TSR 0,599; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan tertinggi sebesar 23,65% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan nilai CoP maksimum terendah terdapat pada  $d/D = 1,0$  yaitu sebesar 11% pada TSR 0,647; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan terendah sebesar 5,98% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

Tabel 4. 4 *Uncertainty* CoP maksimum pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ 

d/D	$Re = 13,6 \times 10^4$		
	CoP <sub>max</sub>	<i>Uncertainty</i>	<i>Range</i>
Tanpa Pengganggu	0,104	4,45	0,099 - 0,109
0,1	0,113	4,45	0,108 - 0,118
0,2	0,114	4,39	0,109 - 0,119
0,3	0,118	4,33	0,113 - 0,123
0,4	0,127	4,28	0,121 - 0,132
0,5	0,128	4,34	0,122 - 0,134
0,6	0,129	4,28	0,123 - 0,135
0,7	0,124	4,37	0,119 - 0,129
0,8	0,121	4,33	0,116 - 0,126
0,9	0,116	4,39	0,111 - 0,121
1	0,11	4,41	0,105 - 0,115

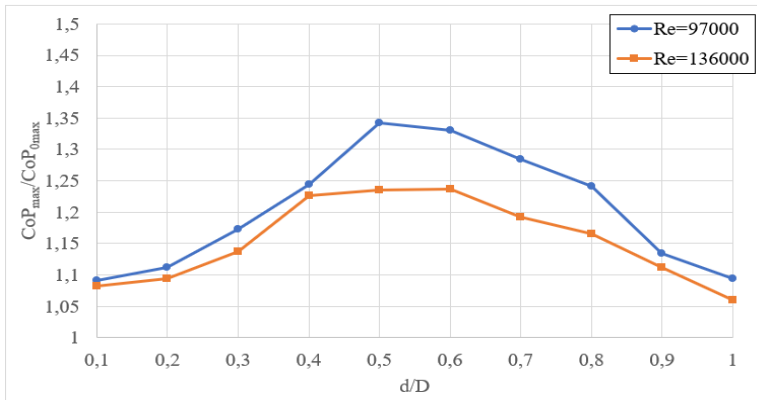
Tabel 4.4 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai CoP maksimum pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  dari setiap variasi d/D maupun dengan yang tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Batas toleransi pada nilai CoP maksimum tersebut dapat dilihat secara visual pada gambar 4.5. Beberapa nilai CoP maksimum dari variasi d/D saling berdekatan satu sama lain dimana nilai-nilai tersebut memasuki suatu *range uncertainty*, sehingga untuk kedepannya variasi d/D yang digunakan dapat diminimalisir. Adapun variasi d/D yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  adalah 0,3; 0,6; dan 1,0.

Pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga efektif mengganggu *boundary layer* pada permukaan *returning blade* turbin menyebabkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Aliran turbulen lebih tahan terhadap gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, sehingga titik separasi pada *returning blade* mundur dan memperkecil *wake*. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*,

sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* juga efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade*. Hal tersebut mengakibatkan selisih tekanan antara bagian depan dan belakang *returning blade* menurun sehingga *pressure drag* juga menurun. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat. Pada eksperimen ini, semua variasi  $d/D$  efektif meningkatkan performa turbin Savonius dan  $d/D$  yang paling optimum untuk meningkatkan performa turbin Savonius adalah saat  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$ .

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

Pada eksperimen ini, nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  didapatkan, sehingga dapat dilihat peningkatan performanya antara sebelum dan sesudah diberi silinder pengganggu. Grafik dari data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$

Pada gambar 4.6, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik dimana nilai *coefficient of power* pada kedua bilangan Reynolds akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya ukuran diameter silinder pengganggu yang digunakan. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  yang tertinggi terdapat pada saat  $d/D = 0,5$  sebesar 1,342 dimana nilai CoP maksimum naik dari 15,15% sebelum diberi silinder pengganggu menjadi 20,33% setelah diberi silinder pengganggu. Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  yang tertinggi terdapat pada saat  $d/D = 0,6$  sebesar 1,237 dimana nilai CoP maksimum naik dari 10,4% sebelum diberi silinder pengganggu menjadi 12,86% setelah diberi silinder pengganggu.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dimana  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada setiap variasi  $d/D$  dan kedua bilangan Reynolds bernilai lebih dari 1. Ukuran dari silinder pengganggu yang digunakan juga mempengaruhi peningkatan performa turbin, dimana pada

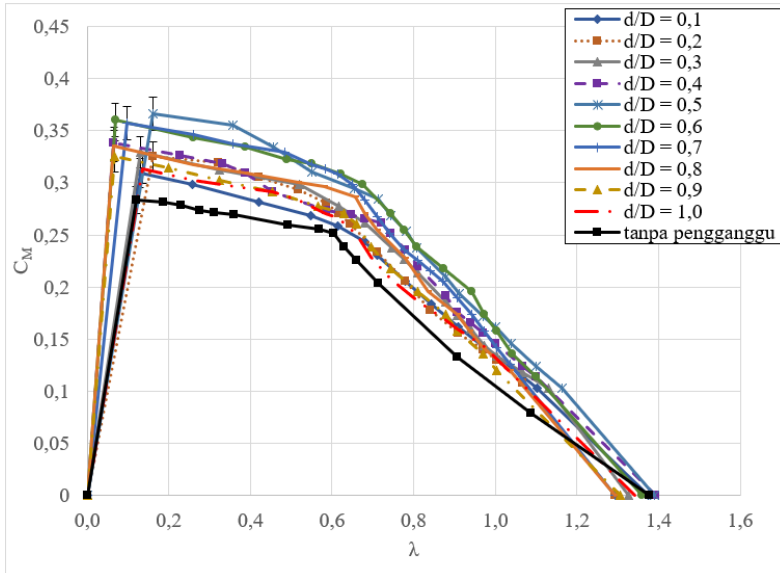
penelitian ini performa turbin yang paling optimum didapatkan saat penempatan silinder pengganggu dengan  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$ . Nilai pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  lebih rendah dibandingkan dengan  $Re = 9,7 \times 10^4$ , hal tersebut diduga diakibatkan oleh daerah bukaan *wake* di belakang silinder pengganggu pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  lebih kecil sehingga tekanan pada daerah antara silinder pengganggu dengan *returning blade* lebih tinggi dibandingkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan menyebabkan keefektifan silinder pengganggu berkurang. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga terjadi peningkatan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dan mengakibatkan daya yang dihasilkan turbin meningkat. Hasil ini juga sesuai dengan hipotesa dimana semakin besarnya nilai  $d/D$  yang digunakan tidak sebanding dengan meningkatnya CoP dari turbin angin Savonius.

#### **4.3.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu**

Nilai *coefficient of moment* terhadap fungsi TSR dilakukan dengan kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s serta bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

##### **4.3.2.1 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$**

Pada eksperimen ini didapatkan nilai *coefficient of moment* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai  $C_M$  terhadap *tip speed ratio* untuk setiap variasi  $d/D$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.7.



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

Pada gambar 4.7, grafik yang dihasilkan cenderung menurun. Nilai  $C_M$  yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Nilai  $C_M$  maksimum untuk setiap variasi  $d/D$  didapat pada saat turbin Savonius akan berhenti berputar. Nilai  $C_M$  maksimum pada turbin Savonius untuk setiap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 5 Tabel perbandingan  $C_M$  turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		Peningkatan (%)
	$C_{M0max}$	$\lambda$	$C_{Mmax}$	$\lambda$	
0,1	0,284	0,121	0,309	0,129	9,1
0,2			0,325	0,162	14,55
0,3			0,329	0,13	15,99
0,4			0,338	0,065	19,15
0,5			0,366	0,162	29,1
0,6			0,36	0,068	27,03
0,7			0,357	0,097	26,03
0,8			0,335	0,065	18,07
0,9			0,325	0,067	14,64
1,0			0,313	0,136	10,48

Dari tabel 4.5, dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi d/D, nilai  $C_M$  maksimum lebih tinggi daripada nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai  $C_M$  maksimum tertinggi terdapat pada d/D = 0,5 yaitu sebesar 0,366 pada TSR 0,162; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan tertinggi sebesar 29,1% dari nilai  $C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan nilai  $C_M$  maksimum terendah terdapat pada d/D = 0,1 yaitu sebesar 0,309 pada TSR 0,129; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan terendah sebesar 9,1% dari nilai  $C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

Tabel 4. 6 *Uncertainty*  $C_M$  maksimum pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ 

d/D	$Re = 9,7 \times 10^4$		
	$C_{Mmax}$	<i>Uncertainty</i>	<i>Range</i>
Tanpa Pengganggu	0,284	4,6	0,271 - 0,297
0,1	0,309	4,52	0,295 - 0,323
0,2	0,325	4,48	0,31 - 0,34
0,3	0,329	4,5	0,314 - 0,344
0,4	0,338	4,5	0,323 - 0,353
0,5	0,366	4,4	0,35 - 0,382
0,6	0,36	4,45	0,344 - 0,376
0,7	0,357	4,43	0,341 - 0,373
0,8	0,335	4,5	0,32 - 0,35
0,9	0,325	4,52	0,31 - 0,34
1	0,313	4,51	0,299 - 0,327

Tabel 4.6 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai  $C_M$  maksimum pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dari setiap variasi d/D maupun dengan yang tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Batas toleransi pada nilai  $C_M$  maksimum tersebut dapat dilihat secara visual pada gambar 4.7. Beberapa nilai  $C_M$  maksimum dari variasi d/D saling berdekatan satu sama lain dimana nilai-nilai tersebut memasuki suatu *range uncertainty*, sehingga untuk kedepannya variasi d/D yang digunakan dapat diminimalisir. Adapun variasi d/D yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  adalah 0,1; 0,5; dan 0,8

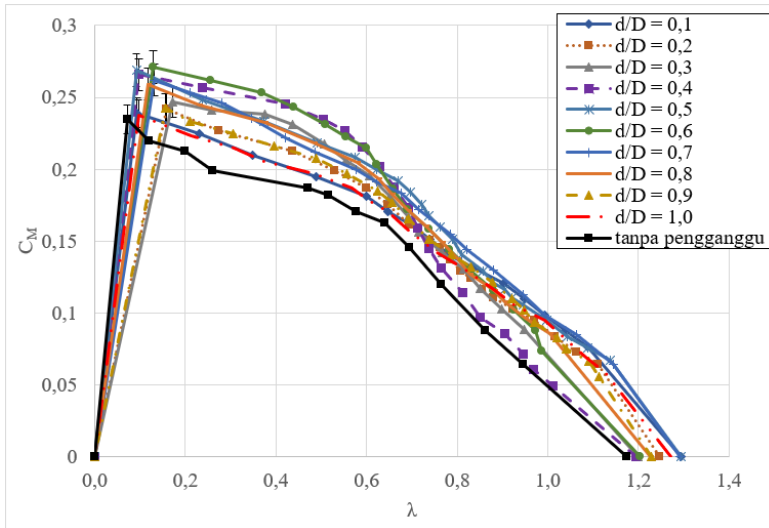
Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ , peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga efektif mengganggu *boundary layer* pada permukaan *returning blade* turbin menyebabkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Aliran turbulen lebih tahan terhadap gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, sehingga titik separasi pada *returning blade*



mundur dan memperkecil *wake*. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*, sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* juga efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade*. Hal tersebut mengakibatkan selisih tekanan antara bagian depan dan belakang *returning blade* menurun sehingga *pressure drag* juga menurun. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat. Pada eksperimen ini, semua variasi  $d/D$  efektif meningkatkan performa turbin Savonius dan  $d/D$  yang paling optimum untuk meningkatkan performa turbin Savonius adalah saat  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$ .

#### **4.3.2.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$**

Pada eksperimen ini didapatkan nilai *coefficient of moment* terhadap *tip speed ratio* pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai  $C_M$  terhadap *tip speed ratio* untuk setiap variasi  $d/D$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik perbandingan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) dengan  $S/D = 2,4$ ;  $d/D = 0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$ ;  $0,9$ ;  $1,0$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.8, grafik yang dihasilkan cenderung menurun. Nilai  $C_M$  yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai TSR. Nilai  $C_M$  maksimum untuk setiap variasi  $d/D$  didapat pada saat turbin Savonius akan berhenti berputar. Nilai  $C_M$  maksimum pada turbin Savonius untuk setiap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4. 7 Tabel perbandingan  $C_M$  turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		Peningkatan (%)
	$C_{M0max}$	$\lambda$	$C_{Mmax}$	$\lambda$	
0,1	0,235	0,07	0,24	0,093	1,95
0,2			0,242	0,159	3,14
0,3			0,247	0,173	5,22
0,4			0,266	0,097	13,32
0,5			0,269	0,092	14,56
0,6			0,271	0,129	15,49
0,7			0,262	0,132	11,73
0,8			0,259	0,117	10,53
0,9			0,242	0,155	3,28
1,0			0,238	0,097	1,42

Dari tabel 4.7, dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi d/D, nilai  $C_M$  maksimum lebih tinggi daripada nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai  $C_M$  maksimum tertinggi terdapat pada d/D = 0,6 yaitu sebesar 0,271 pada TSR 0,129; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan tertinggi sebesar 15,5% dari nilai  $C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan nilai  $C_M$  maksimum terendah terdapat pada d/D = 1,0 yaitu sebesar 0,238 pada TSR 0,097; dimana nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan terendah sebesar 1,42% dari nilai  $C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

Tabel 4. 8 *Uncertainty*  $C_M$  maksimum pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ 

d/D	$Re = 13,6 \times 10^4$		
	$C_{Mmax}$	<i>Uncertainty</i>	<i>Range</i>
Tanpa Pengganggu	0,235	4,28	0,225 - 0,245
0,1	0,24	4,27	0,23 - 0,25
0,2	0,242	4,25	0,232 - 0,252
0,3	0,247	4,24	0,237 - 0,257
0,4	0,266	4,23	0,255 - 0,277
0,5	0,269	4,23	0,258 - 0,28
0,6	0,271	4,22	0,259 - 0,282
0,7	0,262	4,23	0,251 - 0,273
0,8	0,259	4,23	0,248 - 0,27
0,9	0,242	4,25	0,232 - 0,252
1	0,238	4,27	0,228 - 0,248

Tabel 4.8 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai  $C_M$  maksimum pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  dari setiap variasi d/D maupun dengan yang tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Batas toleransi pada nilai  $C_M$  maksimum tersebut dapat dilihat secara visual pada gambar 4.8. Beberapa nilai  $C_M$  maksimum dari variasi d/D saling berdekatan satu sama lain dimana nilai-nilai tersebut memasuki suatu *range uncertainty*, sehingga untuk kedepannya variasi d/D yang digunakan dapat diminimalisir. Adapun variasi d/D yang dapat digunakan setelah dilakukan eliminasi pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  adalah 0,3; 0,6; dan 1,0.

Pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga efektif mengganggu *boundary layer* pada permukaan *returning blade* turbin menyebabkan transisi aliran dari laminar menjadi turbulen semakin cepat. Aliran turbulen lebih tahan terhadap gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, sehingga titik separasi pada *returning blade*

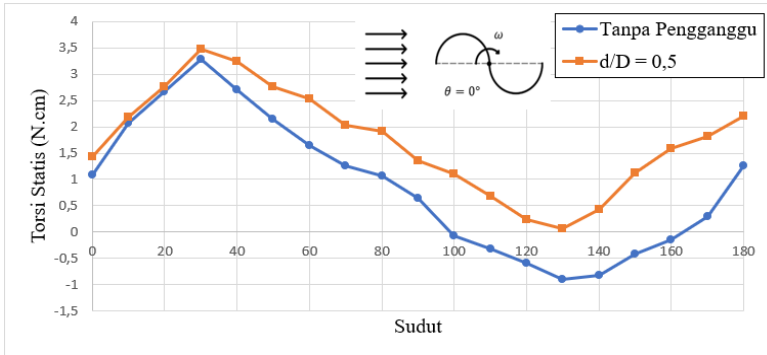
mundur dan memperkecil *wake*. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*, sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* juga efektif menurunkan tekanan di depan *returning blade*. Hal tersebut mengakibatkan selisih tekanan antara bagian depan dan belakang *returning blade* menurun sehingga *pressure drag* juga menurun. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat. Pada eksperimen ini, semua variasi  $d/D$  efektif meningkatkan performa turbin Savonius dan  $d/D$  yang paling optimum untuk meningkatkan performa turbin Savonius adalah saat  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$ .

#### **4.3.3 Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu**

Nilai torsi statis terhadap fungsi sudut dilakukan dengan kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s serta bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

##### **4.3.3.1 Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$**

Pada eksperimen ini didapatkan nilai torsi statis terhadap sudut pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai Ts terhadap sudut bukaan turbin dengan interval  $10^\circ$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $T_s$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $T_{s0}$ ) terhadap fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan  $S/D = 2,4$ ;  $d/D = 0,5$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$

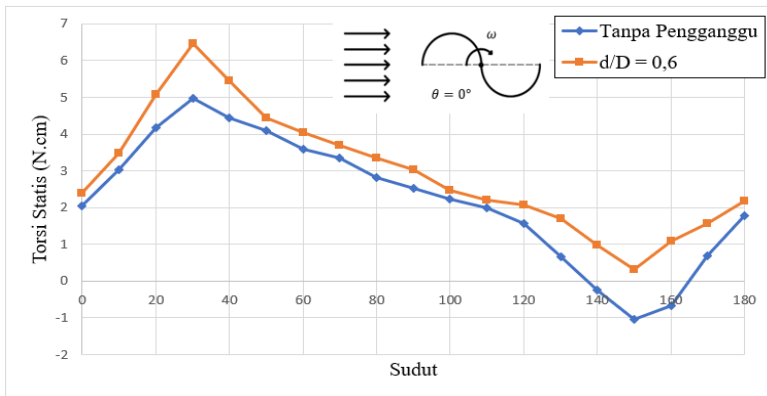
Pada gambar 4.9, grafik yang dihasilkan berbentuk sinusoidal. Untuk grafik yang terjadi dengan tanpa pengganggu, nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $130^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Saat kondisi tanpa pengganggu, nilai torsi statis maksimum yang terjadi adalah  $3,28 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$ , sedangkan nilai torsi statis minimum adalah  $-0,9 \text{ N.cm}$  pada sudut  $130^\circ$ . Untuk grafik yang terjadi dengan menggunakan pengganggu, nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $130^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Saat kondisi dengan pengganggu, nilai torsi statis maksimum yang terjadi adalah  $3,48 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$ , sedangkan nilai torsi statis minimum adalah  $0,06 \text{ N.cm}$  pada sudut  $130^\circ$ .

Nilai torsi statis maksimum terjadi saat kondisi turbin dengan pengganggu, dan torsi statis minimum saat kondisi tanpa pengganggu. Terdapat nilai torsi statis yang bernilai negatif saat kondisi tanpa silinder pengganggu, yaitu pada posisi sudut  $100^\circ$  hingga  $160^\circ$  yang mengakibatkan *no self-starting*, sehingga

dibutuhkan torsi awal agar turbin angin Savonius dapat berputar. Sedangkan saat kondisi menggunakan silinder pengganggu tidak terdapat nilai minus. Hal tersebut membuktikan dengan adanya silinder pengganggu efektif meningkatkan performa turbin Savonius dimana kemampuan *self-starting* pada turbin akan semakin baik.

#### 4.3.3.2 Analisis Nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada eksperimen ini didapatkan nilai torsi statis terhadap sudut pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ . Hasil yang didapat berupa grafik nilai  $T_s$  terhadap sudut bukaan turbin dengan interval  $10^\circ$ . Data hasil eksperimen tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $T_s$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $T_{s0}$ ) terhadap fungsi sudut ( $\theta$ ) dengan  $S/D = 2,4$ ;  $d/D = 0,6$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.10, grafik yang dihasilkan berbentuk sinusoidal. Untuk grafik yang terjadi dengan tanpa pengganggu,

nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Saat kondisi tanpa pengganggu, nilai torsi statis maksimum yang terjadi adalah 4,96 N.cm pada sudut  $30^\circ$ , sedangkan nilai torsi statis minimum adalah -1,04 N.cm pada sudut  $150^\circ$ . Untuk grafik yang terjadi dengan menggunakan pengganggu, nilai torsi statis mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Saat kondisi dengan pengganggu, nilai torsi statis maksimum yang terjadi adalah 6,46 N.cm pada sudut  $30^\circ$ , sedangkan nilai torsi statis minimum adalah 0,32 N.cm pada sudut  $150^\circ$ .

Nilai torsi statis maksimum terjadi saat kondisi turbin dengan pengganggu, dan torsi statis minimum saat kondisi tanpa pengganggu. Terdapat nilai torsi statis yang bernilai 108egative saat kondisi tanpa silinder pengganggu, yaitu pada posisi sudut  $140^\circ$  hingga  $160^\circ$  yang mengakibatkan *no self-starting*, sehingga dibutuhkan torsi awal agar turbin angin Savonius dapat berputar. Sedangkan saat kondisi menggunakan silinder pengganggu tidak terdapat nilai minus. Hal tersebut membuktikan dengan adanya silinder pengganggu efektif meningkatkan performa turbin Savonius dimana kemampuan *self-starting* pada turbin akan semakin baik.

#### **4.4 Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu**

Penelitian pada turbin angin Savonius ini juga terdapat variasi S/D yang dilakukan secara berkelompok, dimana setiap anggota kelompok berfokus terhadap satu dari delapan variasi S/D. Muhammad Rizky Ramadhan (S/D = 1,6); Markus Sarsanto (S/D = 1,8); Muhammad Ghiyats Humam (S/D = 2,0); Lazuardhi Rahim Yamin (S/D = 2,2); Prabasworo Drestanto (S/D = 2,4); Ardy Makarim (S/D = 2,6); Hilda Mailil Haq (S/D = 2,8); dan Asri



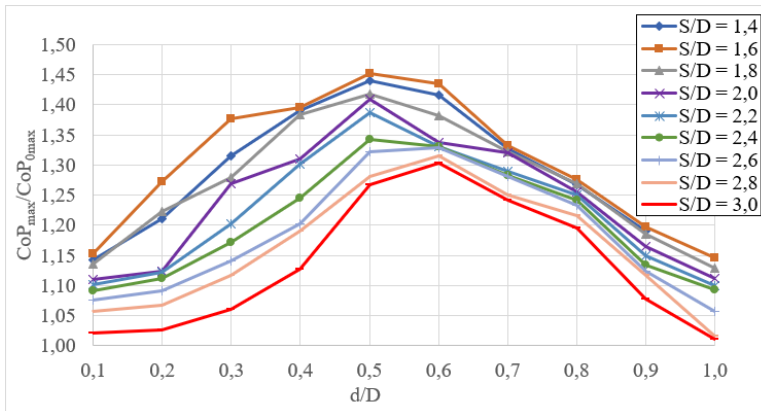
Melati ( $S/D = 3,0$ ) dengan penambahan  $S/D = 1,4$ . Dilakukan pada variasi bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Penelitian yang dilakukan berdasarkan variasi  $S/D$  tersebut juga dilakukan terhadap variasi  $d/D$  yang sama untuk setiap anggota kelompok yaitu  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ .

#### **4.4.1 Analisis Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ dengan $S/D = 1,4$ s.d $3,0$**

Pada penelitian secara berkelompok ini, didapatkan nilai perbandingan nilai *Coefficient of Power* maksimum antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $d/D$  dengan  $S/D = 1,4$  s.d  $3,0$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

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

Setelah nilai  $CoP$  maksimum untuk setiap variasi  $S/D$  dan variasi  $d/D$  didapat, dilakukan perbandingan terhadap nilai  $CoP$  maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{0max}$ ). Data dari penelitian pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $d/D$  0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada  $Re = 9,7 \times 10^4$

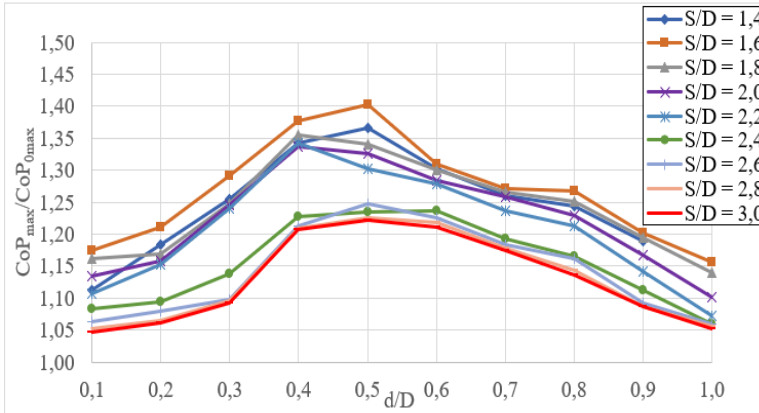
Pada gambar 4.11, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik. Nilai CoP yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai  $d/D$ . Dari grafik tersebut, setiap variasi S/D didapatkan nilai CoP maksimum tertinggi pada  $d/D$  tertentu. Dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi  $d/D$ , nilai CoP maksimum tertinggi untuk setiap variasi S/D lebih tinggi daripada nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai CoP maksimum tertinggi di antara setiap variasi S/D terdapat pada  $S/D = 1,6$  yaitu sebesar 22% pada  $d/D = 0,5$ . Nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan sebesar 45,17% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa tidak terdapat nilai pada  $d/D = 1,0$  untuk  $S/D = 1,4$  dikarenakan silinder pengganggu akan mengenai *endplate* turbin sehingga silinder pengganggu dengan  $d/D = 1,0$  tidak dapat diletakkan pada  $S/D = 1,4$ .

Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin efektif meningkatkan

performa turbin angin Savonius dimana  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada setiap variasi S/D dan variasi d/D bernilai lebih dari 1. Ukuran dari silinder pengganggu yang digunakan juga mempengaruhi peningkatan performa turbin, dimana pada penelitian ini performa turbin yang paling optimum didapatkan saat penempatan silinder pengganggu dengan d/D = 0,5 untuk S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4 dan d/D = 0,6 untuk S/D = 2,6; 2,8; 3,0. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga terjadi peningkatan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dan mengakibatkan daya yang dihasilkan turbin meningkat. Hasil ini juga sesuai dengan hipotesa dimana semakin besarnya nilai d/D yang digunakan tidak sebanding dengan meningkatnya CoP dari turbin angin Savonius.

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

Setelah nilai CoP maksimum untuk setiap variasi S/D dan variasi d/D didapat, dilakukan perbandingan terhadap nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{0max}$ ). Data dari penelitian pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  dapat dilihat pada gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $d/D$  0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.12, grafik yang dihasilkan berbentuk parabolik. Nilai CoP yang dihasilkan akan mengalami kenaikan dan kemudian turun seiring bertambahnya nilai  $d/D$ . Dari grafik tersebut, setiap variasi  $S/D$  didapatkan nilai CoP maksimum tertinggi pada  $d/D$  tertentu. Dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi  $d/D$ , nilai CoP maksimum tertinggi untuk setiap variasi  $S/D$  lebih tinggi daripada nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai CoP maksimum tertinggi di antara setiap variasi  $S/D$  terdapat pada  $S/D = 1,6$  yaitu sebesar 14,6% pada  $d/D = 0,5$ . Nilai tersebut menandakan terjadinya peningkatan sebesar 40,21% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa tidak terdapat nilai pada  $d/D = 1,0$  untuk  $S/D = 1,4$  dikarenakan silinder pengganggu akan mengenai *endplate* turbin sehingga silinder pengganggu dengan  $d/D = 1,0$  tidak dapat diletakkan pada  $S/D = 1,4$ .

Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin efektif meningkatkan

performa turbin angin Savonius dimana  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada setiap variasi S/D dan variasi d/D bernilai lebih dari 1. Ukuran dari silinder pengganggu yang digunakan juga mempengaruhi peningkatan performa turbin, dimana pada penelitian ini performa turbin yang paling optimum didapatkan saat penempatan silinder pengganggu dengan d/D = 0,4 untuk S/D = 1,8; 2,0; 2,2; d/D = 0,5 untuk S/D = 1,4; 1,6; 2,6; 2,8; 3,0; dan d/D = 0,6 untuk S/D = 2,4. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga terjadi peningkatan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dan mengakibatkan daya yang dihasilkan turbin meningkat. Hasil ini juga sesuai dengan hipotesa dimana semakin besarnya nilai d/D yang digunakan tidak sebanding dengan meningkatnya CoP dari turbin angin Savonius.

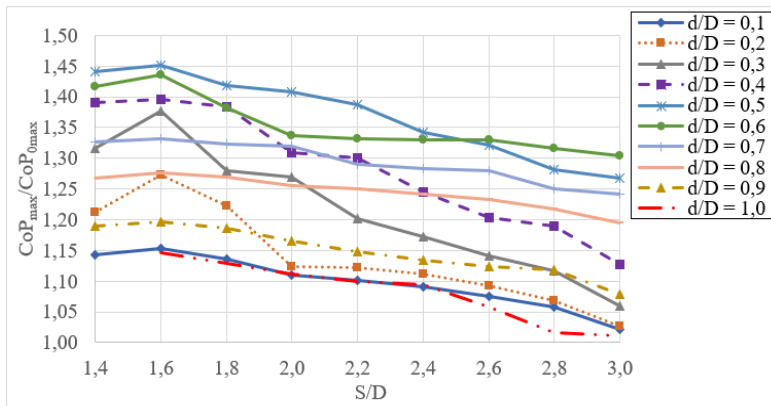
#### **4.4.2 Analisis Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* maksimum antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi S/D dengan d/D = 0,1 s.d 1,0**

Pada penelitian secara berkelompok ini, didapatkan nilai perbandingan nilai *Coefficient of Power* maksimum antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi S/D dengan d/D = 0,1 s.d 1,0 untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ .

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

Setelah nilai CoP maksimum untuk setiap variasi S/D dan variasi d/D didapat, dilakukan perbandingan terhadap nilai CoP

maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ). Data dari penelitian tersebut pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dapat dilihat pada gambar 4.13.



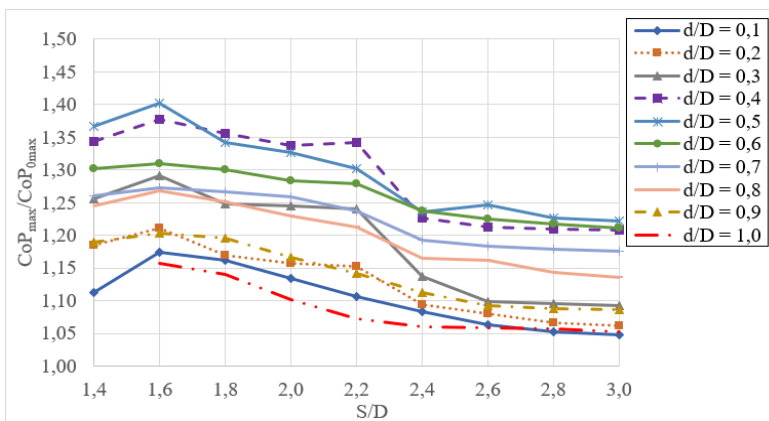
Gambar 4. 13 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$

Pada gambar 4.13, dapat dilihat bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dimana  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada setiap variasi  $S/D$  dan variasi  $d/D$  bernilai lebih dari 1. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga terjadi peningkatan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dan mengakibatkan daya yang dihasilkan turbin meningkat. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa tidak terdapat nilai pada  $d/D = 1,0$  untuk  $S/D = 1,4$  dikarenakan silinder pengganggu akan mengenai *endplate* turbin sehingga silinder pengganggu dengan  $d/D = 1,0$  tidak dapat diletakkan pada  $S/D = 1,4$ .

Nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  meningkat dari  $S/D = 1,4$  ke  $1,6$ ; kemudian nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada  $S/D = 1,8$  s.d  $3,0$  mengalami penurunan. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian yang dilakukan secara berkelompok ini, penambahan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 1,6$  dan  $d/D = 0,5$  menghasilkan performa turbin yang paling baik.

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

Setelah nilai  $CoP$  maksimum untuk setiap variasi  $S/D$  dan variasi  $d/D$  didapat, dilakukan perbandingan terhadap nilai  $CoP$  maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ). Data dari penelitian tersebut pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $S/D = 1,4$ ;  $1,6$ ;  $1,8$ ;  $2,0$ ;  $2,2$ ;  $2,4$ ;  $2,6$ ;  $2,8$ ;  $3,0$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.14, dapat dilihat bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dimana  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada setiap variasi  $S/D$  dan variasi  $d/D$  bernilai lebih dari 1. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa dimana peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat menurunkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga terjadi peningkatan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dan mengakibatkan daya yang dihasilkan turbin meningkat. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat bahwa tidak terdapat nilai pada  $d/D = 1,0$  untuk  $S/D = 1,4$  dikarenakan silinder pengganggu akan mengenai *endplate* turbin sehingga silinder pengganggu dengan  $d/D = 1,0$  tidak dapat diletakkan pada  $S/D = 1,4$ .

Nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  meningkat dari  $S/D = 1,4$  ke 1,6; kemudian nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada  $S/D = 1,8$  s.d 3,0 cenderung mengalami penurunan. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian yang dilakukan secara berkelompok ini, penambahan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 1,6$  dan  $d/D = 0,5$  menghasilkan performa turbin yang paling baik.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan variasi  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$  pada  $S/D = 2,4$  dan  $y/D = 0,5$ ; serta bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Setelah dilakukannya analisa pada penelitian ini, didapat kesimpulan-kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan ditematkannya silinder pengganggu di depan *returning blade*, performa turbin angin Savonius meningkat. Hal ini dibuktikan dengan adanya peningkatan nilai *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan torsi statis pada kedua variasi bilangan Reynolds.
2. Dengan ditematkannya silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $S/D = 2,4$ ; terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* pada seluruh variasi  $d/D$ . Dimana peningkatan nilai CoP maksimum tertinggi yang terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  terdapat pada variasi  $d/D = 0,5$  dengan kenaikan sebesar 34,2% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , peningkatan CoP maksimum tertinggi terdapat pada variasi  $d/D = 0,6$  dengan kenaikan sebesar 23,6% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.
3. Dengan ditematkannya silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $S/D = 2,4$ ; terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Moment* pada seluruh variasi  $d/D$ . Dimana peningkatan nilai  $C_M$  maksimum tertinggi yang terjadi pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  terdapat pada variasi  $d/D = 0,5$  dengan kenaikan sebesar 29,1% dari nilai

$C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , peningkatan  $C_M$  maksimum tertinggi terdapat pada variasi  $d/D = 0,6$  dengan kenaikan sebesar 15,5% dari nilai  $C_M$  maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

4. Dengan ditematkannya silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $S/D = 2,4$ ; variasi  $d/D = 0,5$  efektif meningkatkan nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Sedangkan pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , variasi  $d/D = 0,6$  juga efektif meningkatkan nilai torsi statis. Peningkatan tersebut membuat nilai torsi statis turbin Savonius tidak ada yang bernilai negatif, sehingga turbin memiliki kemampuan *self-starting* pada setiap sudut.
5. Dari hasil penelitian ini, turbin angin Savonius dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  menghasilkan performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius dengan bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ .
6. Penelitian ini dilakukan secara berkelompok dengan variasi  $S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0$ ; dimana setiap anggota berfokus pada satu variasi  $S/D$ . Hasil yang paling optimum terdapat pada  $S/D = 1,6$  dengan  $d/D = 0,5$  untuk kedua bilangan Reynolds; dimana nilai CoP maksimum mengalami kenaikan sebesar 45,17% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ . Sedangkan pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ ; nilai CoP maksimum mengalami kenaikan sebesar 40,21% dari nilai CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

## 5.2 Saran

Adapun saran-saran sebagai berikut agar penelitian selanjutnya dapat lebih baik:

1. Menggunakan neraca pegas dengan ketelitian yang lebih akurat.
2. Menempatkan kipas angin ke arah *voltage regulator* agar tidak mudah panas dan tahan lebih lama.
3. Melakukan pelumasan pada *bearing* secara berkala.

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## DAFTAR PUSTAKA

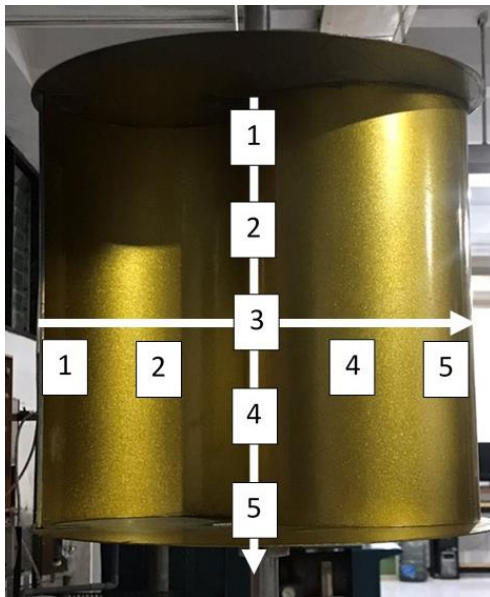
- Ahire, R., Gawli, S., Geedh, K., Gade, A. 2017. "Review on Vertical Axis Wind Turbine." India: Zeal College of Engineering and Research
- Al-Shemmeri, T. 2010. "Wind Turbines: First Edition." ISBN 978-87-7681-692-6.
- Daryanto, Y. 2007. "Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu." Yogyakarta: BALAI PPTAGG-UPT-LAGG.
- Direktorat Jendral Ketenagalistrikan Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2018. "STATISTIK KETENAGALISTRIKAN 2017 Edisi No. 31 Tahun Anggaran 2018." Jakarta.
- Dwidiyanto, I.Y. 2018. "Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius." Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 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, A.J. 2018. "Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius." Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Tsutsui, T., Igarashi, T. 2002. "Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Issue 90, pp. 527-541.
- Vivek, C.M., Gopikrishnan, P., Muruges, R., Mohamed, R.R. 2017. "A Review on Vertical and Horizontal Axis Wind Turbine." India: Periyar Maniammai University

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

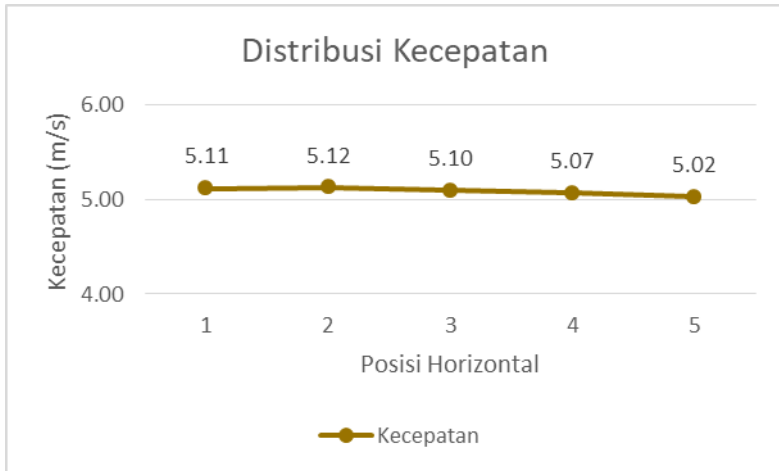
## LAMPIRAN

### A. *UNIFORMITY FLOW TEST*

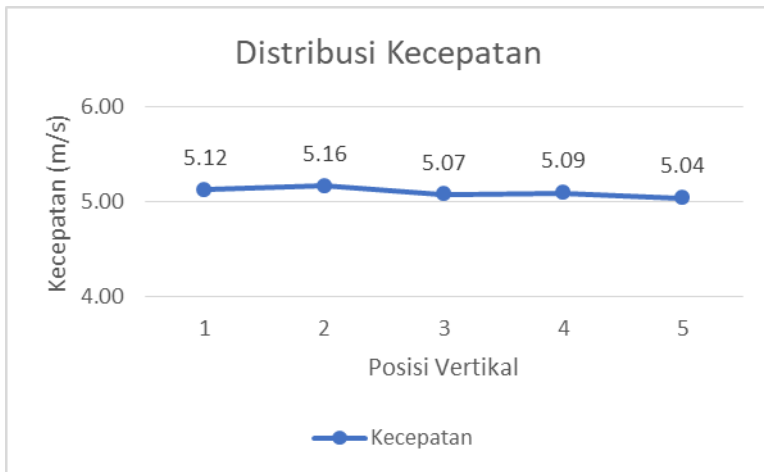
Pada penelitian ini diperlukan *uniformity flow test* (uji keseragaman aliran) agar hasil yang didapatkan adalah hasil yang paling ideal. Penelitian ini dilakukan pada kondisi terbuka, sehingga *honeycomb* diperlukan untuk menyeragamkan aliran. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan fluida yang mengalir ke arah turbin angin Savonius sama untuk di setiap titik. Pengujian ini juga dilakukan pada sisi *upstream* turbin angin Savonius, menggunakan anemometer untuk mengukur kecepatan aliran fluida pada 5 titik vertikal dan 5 titik horizontal.



Gambar A. 1 Titik pengambilan *uniformity test*



Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan (horizontal)



Gambar A. 3 Grafik distribusi kecepatan (vertikal)



Tabel A. 1 Data uniformity test

Data Kec. 5 m/s	(Horizontal)					(Vertikal)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
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)	$n_b$ (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 <sub>5</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	426	44.588	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,378	0	0	0
28,5	5	336.1	35.178	6	140	0,0125	0,092	1,17	1,087	0,01643	0,08592	0,07904
28,5	5	280.38	29.346	15.3	240	0,0125	0,092	1,17	0,907	0,02755	0,12019	0,13255
28,5	5	220.74	23.104	24.6	370	0,0125	0,092	1,17	0,714	0,04235	0,14546	0,20375
28,5	5	203.98	21.350	27.7	410	0,0125	0,092	1,17	0,660	0,04688	0,14877	0,22551
28,5	5	194.6	20.368	30.8	435	0,0125	0,092	1,17	0,629	0,04957	0,15006	0,23843
28,5	5	186.4	19.510	33.9	460	0,0125	0,092	1,17	0,603	0,05225	0,15153	0,25135
28,5	5	175.86	18.407	37	470	0,0125	0,092	1,17	0,569	0,0531	0,14527	0,25542
28,5	5	151.96	15.905	40.1	480	0,0125	0,092	1,17	0,491	0,05394	0,12753	0,25949
28,5	5	110.84	11.601	43.2	500	0,0125	0,092	1,17	0,358	0,05602	0,0966	0,26946
28,5	5	96.58	10.109	49.4	510	0,0125	0,092	1,17	0,312	0,05648	0,08487	0,2717
28,5	5	85.06	8.903	55.6	520	0,0125	0,092	1,17	0,275	0,05695	0,07536	0,27394
28,5	5	71.4	7.473	68	540	0,0125	0,092	1,17	0,231	0,05788	0,06429	0,27843
28,5	5	57.5	6.018	83.5	560	0,0125	0,092	1,17	0,186	0,05843	0,05227	0,28108
28,5	5	37.36	3.910	99	580	0,0125	0,092	1,17	0,121	0,05898	0,03428	0,28373
28,5	5	0	0.000	130	560	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,05273	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)	CoP <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
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	0.06088	0.06441
28,5	7	372.66	39.005	18.4	310	0,0125	0,092	1,17	0,861	0.03576	0.07555	0.08776
28,5	7	330.54	34.597	30.8	430	0,0125	0,092	1,17	0,764	0.04895	0.09174	0.12014
28,5	7	300.26	31.427	37	520	0,0125	0,092	1,17	0,694	0.05923	0.10083	0.14536
28,5	7	277.08	29.001	40.1	580	0,0125	0,092	1,17	0,640	0.06621	0.10401	0.16249
28,5	7	249.9	26.156	43.2	610	0,0125	0,092	1,17	0,577	0.0695	0.09848	0.17058
28,5	7	223.6	23.403	46.3	650	0,0125	0,092	1,17	0,517	0.07403	0.09385	0.18169
28,5	7	203.46	21.295	49.4	670	0,0125	0,092	1,17	0,470	0.0761	0.08779	0.18678
28,5	7	112.74	11.800	58.7	720	0,0125	0,092	1,17	0,260	0.08109	0.05184	0.19903
28,5	7	86.14	9.016	74.2	780	0,0125	0,092	1,17	0,199	0.08655	0.04227	0.21242
28,5	7	51.8	5.422	89.7	820	0,0125	0,092	1,17	0,120	0.08955	0.0263	0.21979
28,5	7	30.96	3.240	120.7	900	0,0125	0,092	1,17	0,072	0.09556	0.01677	0.23454
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>50</sub> (N.cm)	
	Re = $9,7 \times 10^4$	Re = $13,6 \times 10^4$
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  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	424,92	44,475	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,374	0	0	0
28,5	5	341,16	35,708	6	180	0,0125	0,092	1,17	1,103	0,02134	0,11325	0,10264
28,5	5	320,56	33,552	9,1	220	0,0125	0,092	1,17	1,037	0,02586	0,12898	0,12441
28,5	5	299,92	31,392	12,2	255	0,0125	0,092	1,17	0,970	0,02977	0,13893	0,14322
28,5	5	281,04	29,416	15,3	290	0,0125	0,092	1,17	0,909	0,03369	0,14729	0,16204
28,5	5	260,5	27,266	18,4	330	0,0125	0,092	1,17	0,843	0,03821	0,15486	0,18381
28,5	5	241,36	25,262	21,5	370	0,0125	0,092	1,17	0,781	0,04273	0,16047	0,20557
28,5	5	219,88	23,014	24,6	415	0,0125	0,092	1,17	0,711	0,04787	0,16377	0,23029
28,5	5	210,32	22,013	27,7	440	0,0125	0,092	1,17	0,680	0,05056	0,16544	0,24321
28,5	5	190	19,887	30,8	470	0,0125	0,092	1,17	0,614	0,05386	0,1592	0,25908
28,5	5	169,64	17,756	33,9	490	0,0125	0,092	1,17	0,549	0,05593	0,14761	0,26905
28,5	5	130,38	13,646	43,2	520	0,0125	0,092	1,17	0,422	0,05847	0,1186	0,28126
28,5	5	79,76	8,348	74,2	580	0,0125	0,092	1,17	0,258	0,06202	0,07697	0,29836
28,5	5	40,02	4,189	105,2	630	0,0125	0,092	1,17	0,129	0,06435	0,04007	0,30957
28,5	5	0	0,000	136,2	700	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,06914	0	#DIV/0!

Tabel C. 2 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	399,82	41,848	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,293	0	0	0
28,5	5	330,04	34,544	6	190	0,0125	0,092	1,17	1,067	0,02256	0,11586	0,10854
28,5	5	310,4	32,489	9,1	230	0,0125	0,092	1,17	1,004	0,02709	0,13081	0,13031
28,5	5	299,88	31,387	12,2	250	0,0125	0,092	1,17	0,970	0,02916	0,13605	0,14027
28,5	5	281,24	29,436	15,3	280	0,0125	0,092	1,17	0,910	0,03246	0,14202	0,15614
28,5	5	260,22	27,236	18,4	320	0,0125	0,092	1,17	0,842	0,03698	0,14973	0,17791
28,5	5	241,12	25,237	21,5	370	0,0125	0,092	1,17	0,780	0,04273	0,16031	0,20557
28,5	5	219,98	23,025	24,6	420	0,0125	0,092	1,17	0,711	0,04849	0,16594	0,23324
28,5	5	199,64	20,896	27,7	470	0,0125	0,092	1,17	0,646	0,05424	0,16846	0,26091
28,5	5	190,3	19,918	30,8	490	0,0125	0,092	1,17	0,615	0,05631	0,16671	0,27087
28,5	5	181,06	18,951	33,9	510	0,0125	0,092	1,17	0,586	0,05838	0,16446	0,28084
28,5	5	160,1	16,757	43,2	540	0,0125	0,092	1,17	0,518	0,06092	0,15174	0,29305
28,5	5	129,74	13,579	52,5	570	0,0125	0,092	1,17	0,420	0,06346	0,12809	0,30527
28,5	5	99,72	10,437	68	610	0,0125	0,092	1,17	0,323	0,06646	0,10311	0,31972
28,5	5	50	5,233	99	650	0,0125	0,092	1,17	0,162	0,06757	0,05256	0,32503
28,5	5	0	0,000	130	690	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,06867	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	410,14	42,928	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,326	0	0	0
28,5	5	349,84	36,617	6	180	0,0125	0,092	1,17	1,131	0,02134	0,11613	0,10264
28,5	5	329,92	34,532	9,1	210	0,0125	0,092	1,17	1,067	0,02464	0,12645	0,11851
28,5	5	310,06	32,453	12,2	240	0,0125	0,092	1,17	1,003	0,02793	0,13475	0,13438
28,5	5	301,12	31,517	15,3	260	0,0125	0,092	1,17	0,974	0,03001	0,14057	0,14434
28,5	5	290,34	30,389	18,4	290	0,0125	0,092	1,17	0,939	0,0333	0,15044	0,16021
28,5	5	280	29,307	21,5	315	0,0125	0,092	1,17	0,906	0,03599	0,15678	0,17313
28,5	5	271,68	28,436	24,6	340	0,0125	0,092	1,17	0,879	0,03868	0,16348	0,18605
28,5	5	250,7	26,240	27,7	390	0,0125	0,092	1,17	0,811	0,04443	0,17328	0,21372
28,5	5	239,92	25,112	30,8	415	0,0125	0,092	1,17	0,776	0,04711	0,17586	0,22663
28,5	5	230,44	24,119	33,9	437	0,0125	0,092	1,17	0,745	0,04943	0,17722	0,23778
28,5	5	210,2	22,001	37	480	0,0125	0,092	1,17	0,680	0,05432	0,17765	0,26132
28,5	5	190,68	19,958	40,1	510	0,0125	0,092	1,17	0,617	0,05762	0,17094	0,27719
28,5	5	161,08	16,860	43,2	550	0,0125	0,092	1,17	0,521	0,06215	0,15574	0,29895
28,5	5	99,84	10,450	71,1	600	0,0125	0,092	1,17	0,323	0,06486	0,10074	0,31199
28,5	5	40,06	4,193	102,1	660	0,0125	0,092	1,17	0,130	0,06841	0,04264	0,3291
28,5	5	0	0,000	133,1	720	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07197	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	430,5	45,059	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,392	0	0	0
28,5	5	340,1	35,997	6	200	0,0125	0,092	1,17	1,100	0,02379	0,12588	0,11444
28,5	5	329,52	34,490	9,1	220	0,0125	0,092	1,17	1,066	0,02586	0,13258	0,12441
28,5	5	309,52	32,396	12,2	260	0,0125	0,092	1,17	1,001	0,03039	0,14633	0,14617
28,5	5	300,18	31,419	15,3	280	0,0125	0,092	1,17	0,971	0,03246	0,15159	0,15614
28,5	5	290,36	30,391	18,4	300	0,0125	0,092	1,17	0,939	0,03453	0,15599	0,16611
28,5	5	279,94	29,300	21,5	320	0,0125	0,092	1,17	0,905	0,0366	0,15942	0,17608
28,5	5	271,32	28,398	24,6	350	0,0125	0,092	1,17	0,878	0,0399	0,16844	0,19195
28,5	5	250,08	26,175	27,7	400	0,0125	0,092	1,17	0,809	0,04565	0,17763	0,21961
28,5	5	240,74	25,197	30,8	430	0,0125	0,092	1,17	0,779	0,04895	0,18335	0,23548
28,5	5	229,98	24,071	33,9	460	0,0125	0,092	1,17	0,744	0,05225	0,18695	0,25135
28,5	5	223,18	23,360	37	480	0,0125	0,092	1,17	0,722	0,05432	0,18862	0,26132
28,5	5	210,42	22,024	40,1	490	0,0125	0,092	1,17	0,681	0,05517	0,18061	0,26539
28,5	5	199,98	20,931	43,2	500	0,0125	0,092	1,17	0,647	0,05602	0,17428	0,26946
28,5	5	181,24	18,970	46,3	510	0,0125	0,092	1,17	0,586	0,05686	0,16033	0,27353
28,5	5	140,42	14,697	55,6	550	0,0125	0,092	1,17	0,454	0,06063	0,13245	0,29164
28,5	5	119,98	12,558	64,9	590	0,0125	0,092	1,17	0,388	0,06439	0,12019	0,30975
28,5	5	102,34	10,712	80,4	620	0,0125	0,092	1,17	0,331	0,06617	0,10535	0,3183
28,5	5	70,14	7,341	95,9	650	0,0125	0,092	1,17	0,227	0,06795	0,07415	0,32685
28,5	5	20,16	2,110	126,9	700	0,0125	0,092	1,17	0,065	0,07028	0,02204	0,33806
28,5	5	0	0,000	157,9	750	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07261	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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 <sub>o</sub>	Cm <sub>b</sub>
28,5	5	430,12	45,019	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,391	0	0	0
28,5	5	359,96	37,676	6	180	0,0125	0,092	1,17	1,164	0,02134	0,11949	0,10264
28,5	5	340,26	35,614	9,1	220	0,0125	0,092	1,17	1,100	0,02586	0,13691	0,12441
28,5	5	320,86	33,583	12,2	260	0,0125	0,092	1,17	1,038	0,03039	0,15169	0,14617
28,5	5	309,28	32,371	15,3	290	0,0125	0,092	1,17	1,000	0,03369	0,16209	0,16204
28,5	5	300,1	31,410	18,4	310	0,0125	0,092	1,17	0,971	0,03576	0,16695	0,17201
28,5	5	281,6	29,474	21,5	350	0,0125	0,092	1,17	0,911	0,04028	0,17648	0,19378
28,5	5	272,04	28,474	24,6	380	0,0125	0,092	1,17	0,880	0,04358	0,18445	0,20964
28,5	5	249,58	26,123	27,7	430	0,0125	0,092	1,17	0,807	0,04933	0,19156	0,23731
28,5	5	241,72	25,300	30,8	460	0,0125	0,092	1,17	0,782	0,05263	0,19793	0,25318
28,5	5	230,08	24,082	33,9	490	0,0125	0,092	1,17	0,744	0,05593	0,2002	0,26905
28,5	5	220,64	23,094	37	520	0,0125	0,092	1,17	0,714	0,05923	0,20331	0,28491
28,5	5	202,06	21,149	40,1	540	0,0125	0,092	1,17	0,654	0,06613	0,19271	0,29488
28,5	5	170,46	17,841	43,2	570	0,0125	0,092	1,17	0,551	0,0646	0,17132	0,31075
28,5	5	141,4	14,800	52,5	620	0,0125	0,092	1,17	0,457	0,06959	0,15309	0,33476
28,5	5	110,26	11,541	68	670	0,0125	0,092	1,17	0,357	0,07382	0,12663	0,35511
28,5	5	49,98	5,231	99	720	0,0125	0,092	1,17	0,162	0,07615	0,05921	0,36632
28,5	5	0	0,000	130	780	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07971	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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 <sub>o</sub>	Cm <sub>b</sub>
28,5	5	420,04	43,964	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,358	0	0	0
28,5	5	340,16	35,603	6	200	0,0125	0,092	1,17	1,100	0,02379	0,1259	0,11444
28,5	5	321,66	33,667	9,1	240	0,0125	0,092	1,17	1,040	0,02831	0,1417	0,1362
28,5	5	310,18	32,466	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	1,003	0,03284	0,15847	0,15797
28,5	5	300,44	31,446	15,3	310	0,0125	0,092	1,17	0,972	0,03614	0,16892	0,17384
28,5	5	291,46	30,506	18,4	350	0,0125	0,092	1,17	0,943	0,04066	0,18439	0,19561
28,5	5	270,1	28,270	21,5	390	0,0125	0,092	1,17	0,874	0,04519	0,18989	0,21737
28,5	5	249,48	26,112	24,6	430	0,0125	0,092	1,17	0,807	0,04971	0,19295	0,23914
28,5	5	240,36	25,158	27,7	460	0,0125	0,092	1,17	0,777	0,05301	0,19824	0,25501
28,5	5	229,86	24,059	30,8	490	0,0125	0,092	1,17	0,743	0,05631	0,20137	0,27087
28,5	5	208,7	21,844	33,9	540	0,0125	0,092	1,17	0,675	0,06206	0,20151	0,29854
28,5	5	192,24	20,121	37	560	0,0125	0,092	1,17	0,622	0,06413	0,19181	0,30851
28,5	5	170,36	17,831	40,1	580	0,0125	0,092	1,17	0,551	0,06621	0,17547	0,31848
28,5	5	151,44	15,851	43,2	590	0,0125	0,092	1,17	0,490	0,06705	0,15798	0,32255
28,5	5	119,6	12,518	52,5	620	0,0125	0,092	1,17	0,387	0,06959	0,12949	0,33476
28,5	5	80,46	8,421	68	650	0,0125	0,092	1,17	0,260	0,07137	0,08934	0,34331
28,5	5	21,16	2,215	99	710	0,0125	0,092	1,17	0,068	0,07492	0,02467	0,36042
28,5	5	0	0,000	130	770	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07848	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>o</sub>
28,5	5	400,22	41,890	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,294	0	0	0
28,5	5	320,42	33,537	6	220	0,0125	0,092	1,17	1,036	0,02624	0,13082	0,12624
28,5	5	309,98	32,445	9,1	250	0,0125	0,092	1,17	1,003	0,02954	0,14246	0,1421
28,5	5	300,48	31,450	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	0,972	0,03284	0,15352	0,15797
28,5	5	291,4	30,500	15,3	310	0,0125	0,092	1,17	0,942	0,03614	0,16383	0,17384
28,5	5	280,14	29,321	18,4	340	0,0125	0,092	1,17	0,906	0,03944	0,17188	0,18971
28,5	5	269,4	28,197	21,5	370	0,0125	0,092	1,17	0,871	0,04273	0,17912	0,20557
28,5	5	259,52	27,163	24,6	390	0,0125	0,092	1,17	0,839	0,04481	0,18091	0,21554
28,5	5	250,12	26,179	27,7	410	0,0125	0,092	1,17	0,809	0,04688	0,18243	0,22551
28,5	5	240,04	25,124	30,8	430	0,0125	0,092	1,17	0,776	0,04895	0,18281	0,23548
28,5	5	228,88	23,956	33,9	460	0,0125	0,092	1,17	0,740	0,05225	0,18606	0,25135
28,5	5	220,02	23,029	37	490	0,0125	0,092	1,17	0,712	0,05555	0,19015	0,26722
28,5	5	210,02	21,982	40,1	520	0,0125	0,092	1,17	0,679	0,05885	0,19228	0,28309
28,5	5	201,14	21,053	43,2	550	0,0125	0,092	1,17	0,651	0,06215	0,19448	0,29895
28,5	5	190	19,887	46,3	570	0,0125	0,092	1,17	0,614	0,06422	0,18983	0,30892
28,5	5	180,38	18,880	49,4	580	0,0125	0,092	1,17	0,583	0,06506	0,1826	0,31299
28,5	5	170,1	17,804	52,5	590	0,0125	0,092	1,17	0,550	0,06591	0,17443	0,31706
28,5	5	149,92	15,692	61,8	620	0,0125	0,092	1,17	0,485	0,06845	0,15966	0,32927
28,5	5	110,04	11,518	77,3	650	0,0125	0,092	1,17	0,356	0,07023	0,12023	0,33783
28,5	5	80,7	8,447	92,8	680	0,0125	0,092	1,17	0,261	0,07201	0,09041	0,34638
28,5	5	30,02	3,142	123,8	730	0,0125	0,092	1,17	0,097	0,07434	0,03472	0,35759
28,5	5	0	0,000	154,8	800	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07912	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>o</sub>
28,5	5	400,04	41,871	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,294	0	0	0
28,5	5	320,28	33,523	6	210	0,0125	0,092	1,17	1,036	0,02502	0,12465	0,12034
28,5	5	300,08	31,408	9,1	250	0,0125	0,092	1,17	0,971	0,02954	0,13791	0,1421
28,5	5	289,96	30,349	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	0,938	0,03284	0,14814	0,15797
28,5	5	280,02	29,309	15,3	310	0,0125	0,092	1,17	0,906	0,03614	0,15744	0,17384
28,5	5	258,56	27,063	18,4	350	0,0125	0,092	1,17	0,836	0,04066	0,16357	0,19561
28,5	5	250,02	26,169	21,5	380	0,0125	0,092	1,17	0,809	0,04396	0,171	0,21147
28,5	5	241,22	25,248	24,6	410	0,0125	0,092	1,17	0,780	0,04726	0,17736	0,22734
28,5	5	220,1	23,037	27,7	460	0,0125	0,092	1,17	0,712	0,05301	0,18153	0,25501
28,5	5	210,08	21,988	30,8	490	0,0125	0,092	1,17	0,679	0,05631	0,18404	0,27087
28,5	5	202,86	21,233	33,9	520	0,0125	0,092	1,17	0,656	0,05961	0,18813	0,28674
28,5	5	179,98	18,838	37	540	0,0125	0,092	1,17	0,582	0,06168	0,17271	0,29671
28,5	5	160,2	16,768	40,1	550	0,0125	0,092	1,17	0,518	0,06253	0,15584	0,30078
28,5	5	120,08	12,568	55,6	580	0,0125	0,092	1,17	0,388	0,0643	0,12013	0,30934
28,5	5	80,5	8,426	71,1	610	0,0125	0,092	1,17	0,260	0,06608	0,08276	0,31789
28,5	5	20,18	2,112	102,1	670	0,0125	0,092	1,17	0,065	0,06964	0,02186	0,335
28,5	5	0	0,000	133,1	750	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,07565	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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 <sub>0</sub>	Cm <sub>b</sub>
28,5	5	404,2	42,306	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,307	0	0	0
28,5	5	310,06	32,453	6	210	0,0125	0,092	1,17	1,003	0,02502	0,12067	0,12034
28,5	5	299,88	31,387	9,1	240	0,0125	0,092	1,17	0,970	0,02831	0,1321	0,1362
28,5	5	280,52	29,361	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	0,907	0,03284	0,14332	0,15797
28,5	5	271,46	28,413	15,3	310	0,0125	0,092	1,17	0,878	0,03614	0,15262	0,17384
28,5	5	250,18	26,186	18,4	350	0,0125	0,092	1,17	0,809	0,04066	0,15827	0,19561
28,5	5	229,82	24,054	21,5	390	0,0125	0,092	1,17	0,743	0,04519	0,16157	0,21737
28,5	5	215,3	22,535	24,6	430	0,0125	0,092	1,17	0,696	0,04971	0,16652	0,23914
28,5	5	203,66	21,316	27,7	470	0,0125	0,092	1,17	0,659	0,05424	0,17185	0,26091
28,5	5	194,66	20,374	30,8	490	0,0125	0,092	1,17	0,630	0,05631	0,17053	0,27087
28,5	5	175,16	18,333	40,1	510	0,0125	0,092	1,17	0,567	0,05762	0,15703	0,27719
28,5	5	140,06	14,660	55,6	550	0,0125	0,092	1,17	0,453	0,06063	0,13211	0,29164
28,5	5	100,24	10,492	86,6	600	0,0125	0,092	1,17	0,324	0,06296	0,09818	0,30285
28,5	5	61,44	6,431	117,6	650	0,0125	0,092	1,17	0,199	0,06529	0,06241	0,31405
28,5	5	20,74	2,171	148,6	700	0,0125	0,092	1,17	0,067	0,06762	0,02182	0,32526
28,5	5	0	0,000	179,6	770	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,0724	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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 <sub>0</sub>	Cm <sub>b</sub>
28,5	5	414,8	43,416	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,342	0	0	0
28,5	5	300,36	31,438	6	250	0,0125	0,092	1,17	0,971	0,02992	0,13982	0,14393
28,5	5	279,96	29,302	9,1	280	0,0125	0,092	1,17	0,905	0,03322	0,14469	0,1598
28,5	5	270,32	28,293	12,2	300	0,0125	0,092	1,17	0,874	0,03529	0,14842	0,16977
28,5	5	251,6	26,334	15,3	330	0,0125	0,092	1,17	0,814	0,03859	0,15106	0,18564
28,5	5	230,06	24,080	18,4	370	0,0125	0,092	1,17	0,744	0,04311	0,15432	0,2074
28,5	5	215,1	22,514	21,5	410	0,0125	0,092	1,17	0,696	0,04764	0,15943	0,22917
28,5	5	204,2	21,373	24,6	450	0,0125	0,092	1,17	0,660	0,05216	0,16572	0,25094
28,5	5	190,2	19,908	27,7	480	0,0125	0,092	1,17	0,615	0,05546	0,16412	0,2668
28,5	5	180,44	18,886	30,8	490	0,0125	0,092	1,17	0,584	0,05631	0,15808	0,27087
28,5	5	159,96	16,742	40,1	520	0,0125	0,092	1,17	0,517	0,05885	0,14645	0,28309
28,5	5	140,02	14,655	55,6	550	0,0125	0,092	1,17	0,453	0,06063	0,13207	0,29164
28,5	5	112,2	11,744	86,6	590	0,0125	0,092	1,17	0,363	0,06173	0,10776	0,29695
28,5	5	80,32	8,407	117,6	630	0,0125	0,092	1,17	0,260	0,06283	0,07852	0,30226
28,5	5	42,02	4,398	148,6	680	0,0125	0,092	1,17	0,136	0,06516	0,0426	0,31346
28,5	5	0	0,000	179,6	740	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,06872	0	#DIV/0!

Tabel C. 11 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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)	CoPo	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	560,325	58,647	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,294	0	0	0
28,5	7	470,58	49,254	6	260	0,0125	0,092	1,17	1,087	0,03115	0,0831	0,07644
28,5	7	449,96	47,096	9,1	300	0,0125	0,092	1,17	1,039	0,03567	0,09101	0,08755
28,5	7	430,14	45,021	12,2	340	0,0125	0,092	1,17	0,994	0,0402	0,09803	0,09866
28,5	7	409,98	42,911	15,3	380	0,0125	0,092	1,17	0,947	0,04472	0,10396	0,10976
28,5	7	390,46	40,868	18,4	420	0,0125	0,092	1,17	0,902	0,04925	0,10902	0,12087
28,5	7	360,48	37,730	21,5	460	0,0125	0,092	1,17	0,833	0,05377	0,1099	0,13197
28,5	7	340,12	35,599	24,6	490	0,0125	0,092	1,17	0,786	0,05707	0,11005	0,14007
28,5	7	319,92	33,485	27,7	530	0,0125	0,092	1,17	0,739	0,06159	0,11173	0,15117
28,5	7	300,34	31,436	30,8	570	0,0125	0,092	1,17	0,694	0,06612	0,11259	0,16228
28,5	7	280,08	29,315	33,9	600	0,0125	0,092	1,17	0,647	0,06942	0,11024	0,17037
28,5	7	259,98	27,211	37	640	0,0125	0,092	1,17	0,601	0,07394	0,109	0,18148
28,5	7	211,64	22,152	52,5	700	0,0125	0,092	1,17	0,489	0,0794	0,09528	0,19487
28,5	7	150,32	15,733	83,5	780	0,0125	0,092	1,17	0,347	0,08541	0,07279	0,20962
28,5	7	100,04	10,471	114,5	860	0,0125	0,092	1,17	0,231	0,09142	0,05185	0,22437
28,5	7	40,42	4,231	145,5	940	0,0125	0,092	1,17	0,093	0,09743	0,02233	0,23911
28,5	7	0	0,000	176,5	1030	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,10466	0	#DIV/0!

Tabel C. 12 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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)	CoPo	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	540,08	56,528	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,248	0	0	0
28,5	7	481,04	50,349	6	220	0,0125	0,092	1,17	1,111	0,02624	0,07157	0,06441
28,5	7	460,62	48,212	9,1	250	0,0125	0,092	1,17	1,064	0,02954	0,07715	0,0725
28,5	7	440,12	46,066	12,2	290	0,0125	0,092	1,17	1,017	0,03407	0,08501	0,08361
28,5	7	420,16	43,977	15,3	330	0,0125	0,092	1,17	0,971	0,03859	0,09193	0,09471
28,5	7	399,48	41,812	18,4	360	0,0125	0,092	1,17	0,923	0,04189	0,09488	0,10281
28,5	7	380,46	39,821	21,5	390	0,0125	0,092	1,17	0,879	0,04519	0,09748	0,1109
28,5	7	369,76	38,702	24,6	410	0,0125	0,092	1,17	0,854	0,04726	0,09908	0,11599
28,5	7	359,74	37,653	27,7	440	0,0125	0,092	1,17	0,831	0,05056	0,10312	0,12409
28,5	7	349,74	36,606	30,8	460	0,0125	0,092	1,17	0,808	0,05263	0,10436	0,12917
28,5	7	340,28	35,616	33,9	490	0,0125	0,092	1,17	0,786	0,05593	0,10791	0,13727
28,5	7	330,16	34,557	37	520	0,0125	0,092	1,17	0,763	0,05923	0,11087	0,14536
28,5	7	319,74	33,466	40,1	540	0,0125	0,092	1,17	0,739	0,0613	0,11113	0,15045
28,5	7	300,42	31,444	43,2	580	0,0125	0,092	1,17	0,694	0,06583	0,11212	0,16156
28,5	7	280,56	29,365	46,3	630	0,0125	0,092	1,17	0,648	0,07158	0,11386	0,17567
28,5	7	259,48	27,159	49,4	670	0,0125	0,092	1,17	0,599	0,0761	0,11196	0,18678
28,5	7	228,74	23,941	58,7	720	0,0125	0,092	1,17	0,528	0,08109	0,10517	0,19903
28,5	7	188,82	19,763	74,2	780	0,0125	0,092	1,17	0,436	0,08655	0,09266	0,21242
28,5	7	118,9	12,445	105,2	860	0,0125	0,092	1,17	0,275	0,09256	0,0624	0,22717
28,5	7	68,7	7,191	136,2	940	0,0125	0,092	1,17	0,159	0,09857	0,03839	0,24191
28,5	7	0	0,000	167,2	1010	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,10335	0	#DIV/0!



Tabel C. 13 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	519,32	54,355	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,200	0	0	0
28,5	7	410,78	42,995	6	300	0,0125	0,092	1,17	0,949	0,03605	0,08397	0,08848
28,5	7	389,14	40,730	9,1	350	0,0125	0,092	1,17	0,899	0,0418	0,09223	0,1026
28,5	7	368,56	38,576	12,2	400	0,0125	0,092	1,17	0,851	0,04755	0,09937	0,11671
28,5	7	352,06	36,849	15,3	450	0,0125	0,092	1,17	0,813	0,05331	0,1064	0,13083
28,5	7	331,68	34,716	18,4	490	0,0125	0,092	1,17	0,766	0,05783	0,10875	0,14193
28,5	7	309,16	32,359	21,5	540	0,0125	0,092	1,17	0,714	0,06358	0,11145	0,15605
28,5	7	299,68	31,367	24,6	580	0,0125	0,092	1,17	0,692	0,06811	0,11572	0,16715
28,5	7	281,9	29,506	27,7	630	0,0125	0,092	1,17	0,651	0,07386	0,11805	0,18127
28,5	7	262,16	27,439	30,8	680	0,0125	0,092	1,17	0,606	0,07961	0,11833	0,19538
28,5	7	240,18	25,139	33,9	720	0,0125	0,092	1,17	0,555	0,08413	0,11457	0,20649
28,5	7	219,32	22,955	37	760	0,0125	0,092	1,17	0,507	0,08866	0,11025	0,2176
28,5	7	189,32	19,815	52,5	820	0,0125	0,092	1,17	0,437	0,09411	0,10102	0,23099
28,5	7	162,32	16,989	68	860	0,0125	0,092	1,17	0,375	0,09712	0,08938	0,23836
28,5	7	111,78	11,700	99	900	0,0125	0,092	1,17	0,258	0,09822	0,06225	0,24107
28,5	7	74,9	7,840	130	950	0,0125	0,092	1,17	0,173	0,10055	0,0427	0,24679
28,5	7	0	0,000	161	1020	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,10533	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$\eta_0$ (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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	516,84	54,096	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,194	0	0	0
28,5	7	437,44	45,785	6	170	0,0125	0,092	1,17	1,011	0,02011	0,04988	0,04936
28,5	7	419,28	43,885	9,1	210	0,0125	0,092	1,17	0,969	0,02464	0,05856	0,06046
28,5	7	409,16	42,825	12,2	250	0,0125	0,092	1,17	0,945	0,02916	0,06765	0,07157
28,5	7	392,16	41,046	15,3	300	0,0125	0,092	1,17	0,906	0,03491	0,07762	0,08568
28,5	7	368,12	38,530	18,4	340	0,0125	0,092	1,17	0,850	0,03944	0,08231	0,09679
28,5	7	351,78	36,820	21,5	400	0,0125	0,092	1,17	0,813	0,04641	0,09257	0,11391
28,5	7	331,18	34,664	24,6	460	0,0125	0,092	1,17	0,765	0,05339	0,10025	0,13104
28,5	7	318,8	33,368	27,7	510	0,0125	0,092	1,17	0,736	0,05914	0,1069	0,14515
28,5	7	308,84	32,325	30,8	560	0,0125	0,092	1,17	0,713	0,06489	0,11363	0,15927
28,5	7	299,92	31,392	33,9	610	0,0125	0,092	1,17	0,693	0,07064	0,12013	0,17338
28,5	7	285,64	29,897	37	660	0,0125	0,092	1,17	0,660	0,0764	0,12372	0,1875
28,5	7	271,94	28,463	40,1	710	0,0125	0,092	1,17	0,628	0,08215	0,12666	0,20161
28,5	7	256,06	26,801	43,2	760	0,0125	0,092	1,17	0,592	0,0879	0,12761	0,21573
28,5	7	239,04	25,020	46,3	800	0,0125	0,092	1,17	0,552	0,09242	0,12526	0,22683
28,5	7	217,98	22,815	49,4	830	0,0125	0,092	1,17	0,504	0,09572	0,1183	0,23493
28,5	7	182	19,049	64,9	880	0,0125	0,092	1,17	0,420	0,09995	0,10314	0,24531
28,5	7	102,8	10,760	95,9	950	0,0125	0,092	1,17	0,237	0,10473	0,06105	0,25705
28,5	7	41,96	4,392	126,9	1010	0,0125	0,092	1,17	0,097	0,10829	0,02576	0,26578
28,5	7	0	0,000	157,9	1100	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,11553	0	#DIV/0!

Tabel C. 15 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	560,06	58,620	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,294	0	0	0
28,5	7	492,92	51,592	6	230	0,0125	0,092	1,17	1,139	0,02747	0,07677	0,06742
28,5	7	471,08	49,306	9,1	260	0,0125	0,092	1,17	1,088	0,03077	0,08218	0,07551
28,5	7	451,68	47,276	12,2	290	0,0125	0,092	1,17	1,043	0,03407	0,08724	0,08361
28,5	7	431,98	45,214	15,3	330	0,0125	0,092	1,17	0,998	0,03859	0,09452	0,09471
28,5	7	409,4	42,851	18,4	370	0,0125	0,092	1,17	0,946	0,04311	0,10008	0,10582
28,5	7	398,74	41,735	21,5	390	0,0125	0,092	1,17	0,921	0,04519	0,10216	0,1109
28,5	7	391,54	40,981	24,6	410	0,0125	0,092	1,17	0,905	0,04726	0,10491	0,11599
28,5	7	379,66	39,738	27,7	430	0,0125	0,092	1,17	0,877	0,04933	0,10619	0,12108
28,5	7	370,66	38,796	30,8	460	0,0125	0,092	1,17	0,856	0,05263	0,11061	0,12917
28,5	7	350,16	36,650	33,9	500	0,0125	0,092	1,17	0,809	0,05716	0,11347	0,14028
28,5	7	342,2	35,817	37	540	0,0125	0,092	1,17	0,791	0,06168	0,11967	0,15138
28,5	7	330,02	34,542	40,1	570	0,0125	0,092	1,17	0,762	0,06498	0,12159	0,15948
28,5	7	319,44	33,435	43,2	600	0,0125	0,092	1,17	0,738	0,06828	0,12366	0,16758
28,5	7	312,04	32,660	46,3	630	0,0125	0,092	1,17	0,721	0,07158	0,12663	0,17567
28,5	7	301,62	31,570	49,4	660	0,0125	0,092	1,17	0,697	0,07487	0,12805	0,18377
28,5	7	289,96	30,349	52,5	690	0,0125	0,092	1,17	0,670	0,07817	0,12852	0,19186
28,5	7	269,24	28,180	55,6	720	0,0125	0,092	1,17	0,622	0,08147	0,12437	0,19996
28,5	7	248,94	26,056	58,7	750	0,0125	0,092	1,17	0,575	0,08477	0,11965	0,20805
28,5	7	212,7	22,263	74,2	800	0,0125	0,092	1,17	0,491	0,089	0,10733	0,21844
28,5	7	161,38	16,891	105,2	880	0,0125	0,092	1,17	0,373	0,09501	0,08693	0,23118
28,5	7	103,06	10,787	136,2	960	0,0125	0,092	1,17	0,238	0,10102	0,05903	0,24793
28,5	7	39,88	4,174	167,2	1060	0,0125	0,092	1,17	0,092	0,10948	0,02475	0,2687
28,5	7	0	0,000	198,2	1140	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,11549	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>g</sub>
28,5	7	521,44	54,577	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,205	0	0	0
28,5	7	427	44,693	6	250	0,0125	0,092	1,17	0,986	0,02992	0,07244	0,07343
28,5	7	421,46	44,113	9,1	300	0,0125	0,092	1,17	0,974	0,03567	0,08524	0,08755
28,5	7	400,42	41,911	12,2	350	0,0125	0,092	1,17	0,925	0,04142	0,09404	0,10166
28,5	7	380,5	39,826	15,3	400	0,0125	0,092	1,17	0,879	0,04717	0,10177	0,11578
28,5	7	358,66	37,540	18,4	450	0,0125	0,092	1,17	0,829	0,05292	0,10763	0,12989
28,5	7	339,26	35,509	21,5	500	0,0125	0,092	1,17	0,784	0,05868	0,11287	0,14401
28,5	7	318,92	33,380	24,6	550	0,0125	0,092	1,17	0,737	0,06443	0,1165	0,15813
28,5	7	299,14	31,310	27,7	600	0,0125	0,092	1,17	0,691	0,07018	0,11903	0,17224
28,5	7	284,8	29,809	30,8	650	0,0125	0,092	1,17	0,658	0,07593	0,12261	0,18636
28,5	7	269,72	28,231	33,9	710	0,0125	0,092	1,17	0,623	0,08291	0,12679	0,20348
28,5	7	259,44	27,155	37	750	0,0125	0,092	1,17	0,599	0,08743	0,12861	0,21459
28,5	7	239,76	25,095	40,1	780	0,0125	0,092	1,17	0,554	0,09073	0,12334	0,22268
28,5	7	220,5	23,079	43,2	810	0,0125	0,092	1,17	0,509	0,09403	0,11755	0,23078
28,5	7	189,88	19,874	52,5	860	0,0125	0,092	1,17	0,509	0,09902	0,1066	0,24303
28,5	7	159,56	16,701	68	910	0,0125	0,092	1,17	0,369	0,10325	0,09341	0,25341
28,5	7	110,84	11,601	99	970	0,0125	0,092	1,17	0,256	0,10681	0,06712	0,26214
28,5	7	55,76	5,836	130	1030	0,0125	0,092	1,17	0,129	0,11036	0,03489	0,27087
28,5	7	0	0,000	161	1100	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,11514	0	#DIV/0!

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

T (C)	V (m/s)	$n_b$ (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	Cm <sub>g</sub>
28,5	7	559,18	58,528	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,292	0	0	0
28,5	7	495,64	51,877	6	220	0,0125	0,092	1,17	1,145	0,02624	0,07374	0,06441
28,5	7	459,82	48,128	9,1	290	0,0125	0,092	1,17	1,062	0,03445	0,0898	0,08454
28,5	7	429,54	44,959	12,2	340	0,0125	0,092	1,17	0,992	0,0402	0,0979	0,09866
28,5	7	408,88	42,796	15,3	390	0,0125	0,092	1,17	0,945	0,04595	0,10652	0,11277
28,5	7	381,14	39,893	18,4	450	0,0125	0,092	1,17	0,880	0,05292	0,11437	0,12989
28,5	7	355,34	37,192	21,5	500	0,0125	0,092	1,17	0,821	0,05868	0,11822	0,14401
28,5	7	340,12	35,599	24,6	540	0,0125	0,092	1,17	0,786	0,0632	0,12188	0,15512
28,5	7	309,88	32,434	27,7	600	0,0125	0,092	1,17	0,716	0,07018	0,1233	0,17224
28,5	7	292,88	30,655	30,8	640	0,0125	0,092	1,17	0,677	0,0747	0,12405	0,18335
28,5	7	269,62	28,220	33,9	670	0,0125	0,092	1,17	0,623	0,078	0,11924	0,19144
28,5	7	249,84	26,150	37	700	0,0125	0,092	1,17	0,577	0,0813	0,11517	0,19954
28,5	7	210,08	21,988	46,3	750	0,0125	0,092	1,17	0,485	0,08629	0,10278	0,21179
28,5	7	182,26	19,077	61,8	800	0,0125	0,092	1,17	0,421	0,09052	0,09354	0,22217
28,5	7	149,64	15,662	77,3	860	0,0125	0,092	1,17	0,346	0,09598	0,08143	0,23556
28,5	7	120,95	12,659	92,8	910	0,0125	0,092	1,17	0,279	0,10021	0,06872	0,24595
28,5	7	91,04	9,529	108,3	950	0,0125	0,092	1,17	0,210	0,10321	0,05328	0,25332
28,5	7	57,04	5,970	139,3	1010	0,0125	0,092	1,17	0,132	0,10677	0,03453	0,26205
28,5	7	0	0,000	170,3	1080	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,11155	0	#DIV/0!

Tabel C. 18 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	530,86	55,563	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,226	0	0	0
28,5	7	435	45,530	6	290	0,0125	0,092	1,17	1,005	0,034826	0,085893	0,085473
28,5	7	411,7	43,091	9,1	330	0,0125	0,092	1,17	0,951	0,03935	0,091854	0,096579
28,5	7	391,42	40,969	12,2	370	0,0125	0,092	1,17	0,904	0,043875	0,097372	0,107684
28,5	7	381,92	39,974	15,3	400	0,0125	0,092	1,17	0,882	0,047174	0,102151	0,11578
28,5	7	358,64	37,538	18,4	440	0,0125	0,092	1,17	0,829	0,051699	0,105126	0,126885
28,5	7	346,18	36,234	21,5	480	0,0125	0,092	1,17	0,800	0,056224	0,110355	0,137991
28,5	7	331,62	34,710	24,6	520	0,0125	0,092	1,17	0,766	0,060748	0,114221	0,149096
28,5	7	316,1	33,085	27,7	560	0,0125	0,092	1,17	0,730	0,065273	0,116985	0,160202
28,5	7	299,36	31,333	30,8	600	0,0125	0,092	1,17	0,692	0,069798	0,11847	0,171307
28,5	7	284,16	29,742	33,9	640	0,0125	0,092	1,17	0,656	0,074323	0,119745	0,182413
28,5	7	271,14	28,379	37	680	0,0125	0,092	1,17	0,626	0,078848	0,121214	0,193518
28,5	7	250,88	26,259	40,1	720	0,0125	0,092	1,17	0,580	0,083373	0,118593	0,204624
28,5	7	209,18	21,894	55,6	780	0,0125	0,092	1,17	0,483	0,08883	0,105353	0,218016
28,5	7	162,66	17,025	86,6	860	0,0125	0,092	1,17	0,376	0,094838	0,087465	0,232764
28,5	7	100,2	10,488	117,6	930	0,0125	0,092	1,17	0,231	0,099621	0,056596	0,244501
28,5	7	50,86	5,323	148,6	1010	0,0125	0,092	1,17	0,117	0,105629	0,03046	0,259248
28,5	7	0	0,000	179,6	1080	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,110412	0	#DIV/0!

Tabel C. 19 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,4$  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 <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	532,1	55,693	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,229	0	0	0
28,5	7	482	50,449	6	190	0,0125	0,092	1,17	1,113	0,022563	0,061662	0,055377
28,5	7	471,76	49,378	9,1	230	0,0125	0,092	1,17	1,090	0,027088	0,072455	0,066482
28,5	7	450,64	47,167	12,2	260	0,0125	0,092	1,17	1,041	0,030386	0,077639	0,074578
28,5	7	441,2	46,179	15,3	290	0,0125	0,092	1,17	1,019	0,033685	0,084264	0,082674
28,5	7	420	43,960	18,4	330	0,0125	0,092	1,17	0,970	0,03821	0,090991	0,09378
28,5	7	409,92	42,905	21,5	360	0,0125	0,092	1,17	0,947	0,041509	0,096473	0,101875
28,5	7	398,9	41,752	24,6	390	0,0125	0,092	1,17	0,922	0,044807	0,10134	0,109971
28,5	7	380,34	39,809	27,7	430	0,0125	0,092	1,17	0,879	0,049332	0,106383	0,121077
28,5	7	359,8	37,659	30,8	470	0,0125	0,092	1,17	0,831	0,053857	0,109868	0,132182
28,5	7	340,88	35,679	33,9	500	0,0125	0,092	1,17	0,787	0,057156	0,110466	0,140278
28,5	7	319,12	33,401	37	540	0,0125	0,092	1,17	0,737	0,06168	0,111602	0,151384
28,5	7	299,46	31,343	40,1	590	0,0125	0,092	1,17	0,692	0,067431	0,114491	0,165499
28,5	7	283,6	29,683	43,2	630	0,0125	0,092	1,17	0,655	0,071956	0,115703	0,176604
28,5	7	270,58	28,321	46,3	660	0,0125	0,092	1,17	0,625	0,075255	0,115452	0,1847
28,5	7	241,38	25,264	55,6	710	0,0125	0,092	1,17	0,558	0,080246	0,109823	0,196949
28,5	7	211,12	22,097	71,1	760	0,0125	0,092	1,17	0,488	0,084476	0,10112	0,207332
28,5	7	171,6	17,961	102,1	820	0,0125	0,092	1,17	0,396	0,088032	0,085651	0,21606
28,5	7	131,92	13,808	133,1	880	0,0125	0,092	1,17	0,305	0,091589	0,068505	0,224788
28,5	7	91,02	9,527	164,1	940	0,0125	0,092	1,17	0,210	0,095145	0,049101	0,233516
28,5	7	67,3	7,044	195,1	1000	0,0125	0,092	1,17	0,155	0,098701	0,037662	0,242244
28,5	7	0	0,000	226,1	1070	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,103483	0	#DIV/0!

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

T (°C)	V (m/s)	$n_c$ (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 <sub>s</sub>	Cm <sub>s</sub>
28,5	7	550,62	57,632	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,272	0	0	0
28,5	7	488,08	51,086	6	200	0,0125	0,092	1,17	1,128	0,02379	0,06583	0,05839
28,5	7	468,8	49,068	9,1	240	0,0125	0,092	1,17	1,083	0,02831	0,07526	0,06949
28,5	7	451,3	47,236	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	1,043	0,03284	0,08403	0,0806
28,5	7	430,1	45,017	15,3	330	0,0125	0,092	1,17	0,994	0,03859	0,09411	0,09471
28,5	7	400,78	41,948	18,4	370	0,0125	0,092	1,17	0,926	0,04311	0,09797	0,10582
28,5	7	380,38	39,813	21,5	410	0,0125	0,092	1,17	0,879	0,04764	0,10274	0,11692
28,5	7	351,24	36,763	24,6	460	0,0125	0,092	1,17	0,811	0,05339	0,10633	0,13104
28,5	7	327	34,226	27,7	500	0,0125	0,092	1,17	0,755	0,05792	0,10738	0,14214
28,5	7	301,6	31,567	30,8	550	0,0125	0,092	1,17	0,697	0,06367	0,10887	0,15626
28,5	7	280,06	29,313	33,9	600	0,0125	0,092	1,17	0,647	0,06942	0,11023	0,17037
28,5	7	261,06	27,324	37	630	0,0125	0,092	1,17	0,603	0,07272	0,10763	0,17847
28,5	7	245,6	25,706	40,1	660	0,0125	0,092	1,17	0,567	0,07602	0,10585	0,18657
28,5	7	209,66	21,944	55,6	710	0,0125	0,092	1,17	0,484	0,08025	0,09539	0,19695
28,5	7	162,06	16,962	86,6	770	0,0125	0,092	1,17	0,374	0,0838	0,077	0,20568
28,5	7	133,56	13,979	117,6	830	0,0125	0,092	1,17	0,309	0,08736	0,06615	0,2144
28,5	7	92,52	9,684	148,6	890	0,0125	0,092	1,17	0,214	0,09091	0,04769	0,22313
28,5	7	41,82	4,377	179,6	970	0,0125	0,092	1,17	0,097	0,09692	0,02298	0,23788
28,5	7	0	0,000	210,6	1060	0,0125	0,092	1,17	0,000	0,10416	0	#DIV/0!

Tabel C. 21 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu untuk  $S/D = 2,4$ ; pada  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$ ; dan  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$

Sudut ( $\theta$ )	T <sub>s</sub> (N.cm)	
	Re = $9,7 \times 10^4$	Re = $13,6 \times 10^4$
0	1,44	2,4
10	2,18	3,48
20	2,76	5,08
30	3,48	6,46
40	3,24	5,46
50	2,76	4,44
60	2,54	4,04
70	2,04	3,7
80	1,92	3,34
90	1,36	3,04
100	1,1	2,48
110	0,68	2,2
120	0,24	2,08
130	0,06	1,7
140	0,44	0,98
150	1,12	0,32
160	1,58	1,1
170	1,82	1,56
180	2,2	2,18

## D. Uncertainty

**Uncertainty A ( $u_A$ ):**

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

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

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

$$= u_L$$

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

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

$$= u_H$$

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

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

$$u_A = \pm 2,33 \times 10^{-3}$$

$$u_A = \pm 0,23\%$$

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

$$\rho \times T = C$$

$$\rho = \frac{C}{T} = C \times T^{-1}$$

$$d\rho = \frac{d\rho}{dT} = C \times -T^{-2}$$

$$u_{\rho,T} = \frac{\delta \rho, T}{\rho} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} u_T$$

$$= \frac{T}{(C \times T^{-1})} \cdot (C \times -T^{-2}) \cdot u_T$$

$$= -u_T$$

$$u_\rho = \pm [(-u_T)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\rho = \pm u_T$$

$$u_\rho = \pm 0,0035$$

$$u_\rho = \pm 0,35\%$$



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

$$\begin{aligned}
T_d &= (s-m) \times g \times r \\
dT_d &= \frac{\partial T_d}{\partial (s-m)} + \frac{\partial T_d}{\partial r} \\
dT_d &= \frac{\partial ((s-m) \times r)}{\partial (s-m)} + \frac{\partial ((s-m) \times r)}{\partial r} \\
dT_d &= r + (s-m) \\
u_{T_d, (s-m)} &= \frac{\delta T_d (s-m)}{T_d} \\
&= \frac{(s-m)}{T_d} \frac{\partial T_d}{\partial (s-m)} u_{(s-m)} \\
&= \frac{(s-m)}{((s-m) \times r)} \cdot r \cdot u_{(s-m)} \\
&= u_{(s-m)} \\
u_{T_d, r} &= \frac{\delta T_d, r}{T_d} \\
&= \frac{r}{T_d} \frac{\partial T_d}{\partial r} u_r \\
&= \frac{r}{((s-m) \times r)} \cdot (s-m) \cdot u_r \\
&= u_r \\
u_{T_d} &= \pm \left\{ [u_{(s-m)}]^2 + [u_r]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\
u_{T_d} &= \pm \{ [0,0207]^2 + [0,04]^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
u_{T_d} &= \pm 0,045 \\
u_{T_d} &= \pm 4,5\%
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
CoP &= \frac{T_d \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \\
CoP &= \frac{2 T_d \omega}{\rho A V^3} \\
CoP &= 2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1} \\
dCoP &= \frac{\partial CoP}{\partial T_d} + \frac{\partial CoP}{\partial \omega} + \frac{\partial CoP}{\partial \rho} + \frac{\partial CoP}{\partial A} \\
&\quad + \frac{\partial CoP}{\partial V} \\
\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial T_d} &= 2 \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1} \\
\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial \omega} &= 2 T_d \rho^{-1} V^{-3} A^{-1} \\
\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial \rho} &= -2 T_d \omega \rho^{-2} V^{-3} A^{-1} \\
\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial A} &= -2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-2} \\
\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial V} &= -6 T_d \omega \rho^{-1} V^{-4} A^{-1} \\
u_{CoP, T_d} &= \frac{\delta CoP, T_d}{CoP} \\
u_{CoP, T_d} &= \frac{T_d}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta T_d} u_{T_d} \\
u_{CoP, T_d} &= \frac{T_d}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (2 \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) u_{T_d} \\
u_{CoP, T_d} &= u_{T_d} \\
u_{CoP, \omega} &= \frac{\delta CoP, \omega}{CoP} \\
u_{CoP, \omega} &= \frac{\omega}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta \omega} u_\omega \\
u_{CoP, \omega} &= \frac{\omega}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (2 T_d \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) u_\omega \\
u_{CoP, \omega} &= u_\omega \\
u_{CoP, \rho} &= \frac{\delta CoP, \rho}{CoP} \\
u_{CoP, \rho} &= \frac{\rho}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta \rho} u_\rho \\
u_{CoP, \rho} &= \frac{\rho}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (-2 T_d \omega \rho^{-2} V^{-3} A^{-1}) u_\rho \\
u_{CoP, \rho} &= -u_\rho \\
u_{CoP, A} &= \frac{\delta CoP, A}{CoP} \\
u_{CoP, A} &= \frac{A}{CoP} \frac{\delta CoP}{\delta A} u_A \\
u_{CoP, A} &= \frac{A}{2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}} (-2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-2}) u_A \\
u_{CoP, A} &= -u_A
\end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (4,5 \times 10^{-2})^2 + (4,53 \times 10^{-4})^2$$

$$+ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2$$

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

$$u_{CoP} = \pm 0,0456$$

- *Uncertainty pada pembacaan coefficient of moment (Cm)*

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

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

$$dCm = \frac{\partial Cm}{\partial T_D} + \frac{\partial Cm}{\partial \rho} + \frac{\partial Cm}{\partial A} + \frac{\partial Cm}{\partial v} + \frac{\partial Cm}{\partial R}$$

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

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

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

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

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

$$u_{CM} = \pm \{ u_{T_d}^2 + u_{\rho}^2 + (-2 u_V)^2 + (-u_A)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm \{ (4,5 \times 10^{-2})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 0,0458$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

$$Re = \rho VL \mu^{-1}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Maka:

$$u_{RE} = \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,618 \times 10^{-3})^2 + (0,005)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 6,62 \times 10^{-3}$$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

## BIODATA PENULIS



**Prabasworo Drestanto** merupakan anak ketiga dari pasangan Nurseto Ardiputranto dan Hesti Prirezki. Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 28 April 1997, memulai pendidikan dari jenjang Taman Kanak-Kanak di TK Marsudirini Bekasi pada tahun 2000, lalu melanjutkan Sekolah Dasar di SD Marsudirini Bekasi pada tahun 2003. Penulis kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 252

Jakarta dan lulus pada tahun 2012, lalu Sekolah Menengah Atas di SMA Labschool Rawamangun lulus tahun 2015. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015 melalui jalur SBMPTN.

Semasa kuliah, penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi maupun *event*. Penulis pernah menjadi Ketua Panitia dari Decima Cup 9-ball Pool Tournament ITS Billiard dan Koordinator Transportasi dan Akomodasi Kontes Mobil Hemat Energi 2017. Dalam bidang organisasi, penulis pernah aktif sebagai *Business Executive Staff Aiesec in Surabaya* di tahun 2017-2018. Motto hidup penulis adalah “*keep moving forward*” yang memiliki makna walaupun mengalami rintangan atau kegagalan, teruslah bergerak atau berusaha melaluinya hingga berhasil.

Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis, dapat melalui email: [prabasworo12@gmail.com](mailto:prabasworo12@gmail.com)