



**TUGAS AKHIR-TM184730**

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

“Studi Kasus untuk Jarak Silinder Pengganggu  $S/D = 1,8$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ ; dan Bilangan Reynolds = 97000 dan 136000”

Markus Sarsanto  
NRP. 02111540000185

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

PROGRAM SARJANA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020



## **FINAL PROJECT – TM184730**

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

“Study Case of Ratio Variation  $S/D = 1,8$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$ ;  $0,9$ ; and  $1,0$ ;  $Re = 97000$  and  $136000$ ”

Markus Sarsanto  
0211154000185

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

BACHELOR’S DEGREE  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2020

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

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

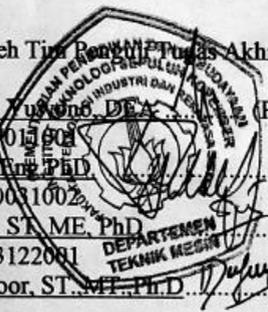
**TUGAS AKHIR**

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:

**Markus Sarsanto**  
NRP. 0211154000185

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- 
1. **Prof. Dr. Ir. Triyogi Purwono, D.E.A.** ..... (Pembimbing)  
NIP. 19600129198701302
  2. **Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D.** ..... (Penguji 1)  
NIP. 196412281990031002
  3. **Vivien Suphandani, ST, ME, PhD** ..... (Penguji 2)  
NIP. 198105292003122001
  4. **Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, Ph.D.** ..... (Penguji 3)  
NIP. 132309758

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH  
VARIASI UKURAN DIAMETER  
SILINDER PENGANGGU DIDEPAN SISI  
RETURNING BLADE TERHADAP  
KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS**  
“Studi Kasus Variasi Rasio  $S/D = 1,8$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$  pada  
 $Re = 97000$  dan  $136000$ ”

Nama Mahasiswa : Markus Sarsanto  
NRP : 02111540000185  
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono,  
DEA

## ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang masih menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi dalam kehidupan sehari – hari. Sumber energi tersebut membutuhkan waktu yang cukup lama untuk diperbaharui keberadaannya, maka dari itu energi terbarukan menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Salah satu sumber energi yang tidak akan ada habisnya di Indonesia dilihat dari letak geografisnya adalah angin, oleh karena itu Pembangkit Listrik Tenaga Angin menjadi jawaban untuk permasalahan energi untuk negara Indonesia. Turbin angin dapat mengonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik dengan menggunakan generator. Karena Indonesia merupakan wilayah dengan kecepatan angin yang rendah maka cocok untuk digunakan turbin angin dengan tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius yang memiliki sudu dengan diameter turbin ( $D$ ) sebesar 167,1 mm, diameter *end plate* ( $D_0$ ) sebesar 334 mm, tinggi ( $H$ ) sebesar 305,9 mm, dan diameter poros ( $b$ ) sebesar 19,3 mm. Silinder pengganggu dipasang didepan *returning blade* dengan tinggi ( $t$ ) sebesar 500 mm. Silinder pengganggu ini digunakan untuk mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*. Untuk sumber alirannya digunakan axial fan dan digunakan *honeycomb* untuk penyeragam aliran yang muju turbin angin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan variasi perbandingan antara diameter silinder dan diameter turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0, lalu dengan letak penghalang terhadap *returning blade* ( $S/D$ ) sebesar 1,8 serta variasi bilangan Reynolds sebesar 97.000 dan 136.000. Pada penelitian ini alat ukur yang digunakan adalah *anemometer* sebagai pengukur kecepatan aliran udara, *torque meter* sebagai pengukur torsi statis, *tachometer* sebagai pengukur kecepatan putar turbin, dan *brake dynamometer* sebagai pengukur torsi dinamis.

Hasil yang didapatkan dari penelitian adalah bahwa dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada  $d/D = 0,5$  dan  $Re = 97000$  paling efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya *Coefficient of power* maksimum sebesar 0,152 menjadi 0,214 dan meningkatnya *Coefficient of Moment* maksimum sebesar 0,28 menjadi 0,427. Selain itu, penempatan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dengan  $S/D = 1,8$  pada  $Re = 97000$  dan 136000 mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius di semua posisi angular sudu turbin dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

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

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

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

**“Study Case of Ratio Variation  $S/D = 1,8$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$ ;  $0,9$ ; and  $1,0$ ;  $Re = 97000$  and  $136000$ ”**

**Student Name : Markus Sarsanto**  
**NRP : 02111540000185**  
**Department : Teknik Mesin FTI-ITS**  
**Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono,**  
**DEA**

## **ABSTRACT**

Indonesia is a developing country that still uses fossil fuels as an energy source in daily life. The energy source requires a long time to be renewed, so renewable energy is the solution to the problem. One of the endless sources of energy in Indonesia viewed from its geographical location is the wind, therefore the Wind Power Plant is the answer to the energy problem for the Indonesian state. Wind turbines can convert wind kinetic energy into electrical energy by using a generator. Because Indonesia is a region with low wind speeds, it is suitable for use with wind turbines with the type of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) .

In this experimental study, Savonius wind turbines have blades with a turbine diameter (D) of 167.1 mm, end plate (Do) diameter of 334 mm, height (H) of 305.9 mm, and shaft diameter (b) of 19 , 3 mm. Disturbance cylinders are mounted in front of the returning blade with a height (t) of 500 mm. This cylinder is designed to reduce the drag force that occurs on the

returning blade. The axial fan is used for the flow source and honeycomb is used for uniform flowing towards the Savonius wind turbine. This research was conducted with a variation of the ratio between the diameter of the cylinder and the diameter of the turbine ( $d / D$ ) of 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; and 1.0, then with the location of the cylinder against returning blade ( $S / D$ ) of 1.8 and the variation of Reynolds numbers of 97,000 and 136,000. In this study the measuring instruments used are anemometer as a gauge of air flow velocity, torque meter as a static torque gauge, tachometer as a turbine rotational speed gauge, and brake dynamometer as a dynamic torque gauge.

The results obtained from this experimental study are that compared to Savonius wind turbines without disturbing cylinders, Savonius wind turbines with disturbing cylinders in front of the returning blade at  $d / D = 0.5$  and  $Re = 97000$  most effectively improve the performance of Savonius wind turbines. This is proven by increasing the maximum Coefficient of power by 0.152 to 0.214 and increasing the maximum Coefficient of Moment by 0.28 to 0.427. In addition, the placement of the disruptive cylinder placed in front of the returning blade with  $S / D = 1.8$  at  $Re = 97000$  and 136000 was able to increase the self-starting capability of the Savonius wind turbine in all angular positions of the turbine blade compared to the Savonius wind turbine without the cylinder.

**Keywords :** *Savonius Wind Turbine, coefficient of power, coefficient of moment, Static Torque, Dynamic Torque.*

## **KATA PENGANTAR**

Puji Syukur atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena hanya dengan tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak yang terlibat. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Parmahan Janauli Tambunan dan Ibu Rita Endang, selaku kedua orang tua penulis serta Febriyola Anastasia selaku kakak dari penulis yang selalu memberikan semangat sehingga tugas akhir ini dapat selesai dengan baik dan penuh kejujuran. Dan keluarga besar yang selalu memberikan doa, semangat, dan hal lain yang tidak bisa diungkapkan dengan kata-kata sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing yang telah membimbing penulis selama melakukan tugas akhir.
3. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD, Dedy Zulhidayat Noor, ST.,MT.,Ph.D, dan Ibu Vivien Suphandani, ST,ME, PhD. selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis terkait Tugas Akhir ini.
4. Maria Shinta S.Pwk yang telah menemani dan memberikan dukungan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
5. Grup Tikungan Simanu, Agas, Alwan, Aldo, Danang, Hamjar, Ijaz, Jove, Juan, Juli, Tomat, Prabas, Zhul, dan

Geraldus yang telah menemani hari-hari penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dan memberikan hiburan setiap saat

6. Seluruh Teman nyangkruk yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah mengisi cerita bagi penulis selama perkuliahan maupun dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini
7. Keluarga Angkatan M58 Teknik Mesin ITS yang memberikan penulis pengalaman dan cerita dalam perkuliahan

Semoga segala kebaikan dan keikhlasan yang diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa. Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna sehingga penulis terbuka terhadap saran dan kritik yang membangun demi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	viii
KATA PENGANTAR .....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Batasan Masalah .....	6
BAB II DASAR TEORI .....	9
2.1 Turbin Angin.....	9
2.1.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> .....	10
2.1.2 <i>Vertikal Axis Wind Turbine</i> .....	11
2.2 Turbin Angin Savonius.....	12
2.3 Gaya Drag.....	14
2.4 <i>Reynolds Number</i> .....	15
2.5 <i>Coefficient of Power</i> .....	17
2.6 Aliran Fluida Melintasi Silinder Pejal .....	20
2.7 <i>Tip Speed Ratio</i> .....	20
2.8 Penelitian Terdahulu .....	22
2.8.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu.....	22

2.8.2. Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius.....	26
2.8.3 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Penganggu Aliran di Depan Sisi <i>Returning Blade</i> Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius .....	36
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>41</b>
3.1 Analisa Parameter .....	41
3.2 Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP).....	43
3.3 Analisa Dimensi <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) ....	47
3.4 Peralatan Penelitian.....	50
3.4.1 <i>Axial Fan</i> .....	50
3.4.2 Honeycomb .....	51
3.4.3 Penyangga Turbin Savonius.....	52
3.4.4 Turbin Savonius .....	53
3.4.5 <i>Bearing</i> .....	55
3.4.6 Silinder Penganggu .....	55
3.4.7 Alat Ukur.....	57
3.5 Prosedur Penelitian .....	64
3.5.1 Torsi Dinamis .....	64
3.5.2 Torsi Statis .....	67
3.6 Flowchart Penelitian .....	69
3.6.1 Pengukuran Torsi Dinamis.....	69
3.6.2 Pengukuran Torsi Statis .....	72
3.7 Perhitungan <i>Uncertainty</i> .....	73

3.8 Hasil yang Diperoleh .....	76
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN ....	77
4.1 Contoh Perhitungan .....	77
4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds .....	77
4.1.2 Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	79
4.1.3 Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	79
4.1.4 Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i> (CM).....	80
4.2 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	81
4.2.1 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	81
4.2.2 Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	83
4.2.3 Analisa Nilai Torsi Statis (T <sub>s0</sub> ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	85
4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu .....	87
4.3.1. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	87
4.3.2. Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> <i>maximum</i> (CoP <sub>max</sub> ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu	

( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi variasi $d/D$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	92
4.3.3. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	94
4.3.4 Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	99
4.4 Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> <i>maximum</i> ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $d/D$ di $S/D =$ 1,6 s.d 3,0 pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ....	101
4.5 Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> <i>maximum</i> ( $CoP_{max}$ ) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) Terhadap Variasi $S/D$ di $d/D =$ 0,1 s.d 1,0 pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ....	104
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	107
5.2 Kesimpulan .....	107
5.2 Saran .....	108
DAFTAR PUSTAKA .....	109
LAMPIRAN .....	109
BIODATA PENULIS .....	10932

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Thorntonbank Horizontal Axis Wind Turbine</i> (Franklin Coyle, 2011).....	11
Gambar 2.2 Turbin Darrieus (Sumber : <a href="https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55">https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55</a> ) .....	12
Gambar 2.3 Konstruksi Sederhana Turbin Savonius (Ahmad Hemami, 2012) .....	14
Gambar 2.4 Skema Turbin Angin Savonius .....	16
Gambar 2.5 Skema Free-Body Diagram Brake Dynamometer (Daffa & Yuwono, 2019).....	18
Gambar 2.6 Grafik Hubungan antara <i>Coefficient Of Power</i> Dengan <i>Tip Speed Ratio</i> untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Fox et al., 2008).....	22
Gambar 2.7 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	23
Gambar 2.8 Koefisien Drag (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	24
Gambar 2.9 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkuler Utama (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	24
Gambar 2.10 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Pengganggu (Tsutsui & Igarashi, 2002) .....	25
Gambar 2. 11 Skema Turbin Angin Savonius <i>Single Stage</i> (a) tampak samping dan (b) tampak atas (Mahmoud, et al., 2012) .....	27
Gambar 2. 12 Hubungan antara <i>coefficient of power</i> dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat <i>blades</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	28
Gambar 2.13 Hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat <i>blades</i> (a) <i>aspect ratio</i> = 0,5 dan (b) <i>aspect ratio</i> = 5 (Mahmoud, et al., 2012).....	29
Gambar 2.14 Hubungan antara <i>mechanical power</i> dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat <i>blades</i> (a) <i>aspect ratio</i> = 0,5; <i>single stage</i> , (b) <i>aspect ratio</i> = 5; <i>single stage</i> (Mahmoud, et al., 2012) .....	30
Gambar 2.15 Hubungan antara <i>mechanical power</i> dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan	

empat <i>blades</i> dengan <i>aspect ratio</i> = 0,5; <i>double stages</i> . (Mahmoud, et al., 2012).....	30
Gambar 2.16 Hubungan antara <i>specific power</i> dan kecepatan angin pada turbin Savonius <i>single stage</i> dan <i>double stages</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	32
Gambar 2.17 Hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius <i>single stage</i> dan <i>double stages</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	32
Gambar 2.18 Hubungan antara <i>mechanical power</i> dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi <i>overlap ratio</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	33
Gambar 2.19 Hubungan antara <i>coefficient of power</i> dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi <i>aspect ratio</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	34
Gambar 2.20 Hubungan antara <i>mechanical power</i> dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya <i>End Plate</i> dan tanpa <i>end plate</i> (Mahmoud, et al., 2012).....	35
Gambar 2.21 Skema Penelitian (Fernando, et al., 2017) .....	37
Gambar 2.22 Grafik <i>Tip Speed Ratio</i> turbin angin Savonius berpengganggu (TSR) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, et al., 2017) .....	38
Gambar 2.23 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin Savonius berpengganggu (CoP) sebagai fungsi jarak pada $S/D = 1,4 - 2,4$ (Fernando, et al., 2017) .....	38
Gambar 3. 1 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (a) .....	42
Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (b) .....	43
Gambar 3. 3 <i>Axial Fan</i> CKESPV-18 .....	51
Gambar 3. 4 <i>Honeycomb</i> .....	52
Gambar 3. 5 Penyangga Turbin Savonius.....	53
Gambar 3. 6 Turbin Angin Savonius .....	54
Gambar 3. 7 <i>Ball Bearing</i> .....	55
Gambar 3. 8 Silinder Pengganggu .....	56
Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141 .....	57
Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12.....	59
Gambar 3. 11 Powell voltage regulator .....	60

Gambar 3. 12 <i>Torque meter</i> Lutron model TQ-8800.....	61
Gambar 3. 13 Gambar skema <i>brake dynamometer</i> .....	62
Gambar 3. 14 Neraca pegas NAGATA tipe C-5 .....	63
Gambar 3. 15 Pemberat.....	64
Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis.....	71
Gambar 3. 17 Flowchart Pengukuran Torsi Statis .....	73
Gambar 4. 1 Grafik <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Tanpa Silinder Pengganggu .....	82
Gambar 4. 2 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> ( $CM_0$ ) Terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Tanpa Silinder Pengganggu.....	83
Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis ( $T_{s0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	85
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	88
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada $S/D = 1,8$ dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan $1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	89
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0,max}$ ) terhadap variasi diameter $d/D = 0.1 - 1.0$ .....	93
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CM$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	95
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CM$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CM_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>	

( $\lambda$ ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9;$ dan $1,0$ pada $13,6 \times 10^4$ .....	96
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts0) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) dengan $S/D = 1,8;$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	99
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts0) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) dengan $S/D = 1,8$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	100
Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan coefficient of power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap $d/D = 0,1 - 1,0$ pada $Re = 97000$ .....	102
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan coefficient of power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap $d/D = 0,1 - 1,0$ pada $Re = 136000$ .....	102
Gambar 4. 13 Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi $S/D$ di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ .....	104
Gambar 4. 14 Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi $S/D$ di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	105

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Dimensi Parameter CoP .....	44
Tabel 3. 2 Dimensi Parameter CM.....	48
Tabel 3. 3 Spesifikasi <i>Axial Fan</i> CKE SPV-18 .....	51
Tabel 3. 4 Spesifikasi <i>Honeycomb</i> .....	52
Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius .....	54
Tabel 3. 6 Spesifikasi <i>Ball Bearing</i> .....	55
Tabel 3. 7 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141.....	58
Tabel 3. 8 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12 .....	59
Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage Regulator.....	60
Tabel 3. 10 Spesifikasi Torque meter Lutron model TQ-8800 .....	61
Tabel 3. 11 Spesifikasi Neraca pegas NAGATA tipe C-5....	64
Tabel 4. 1 Tabel perbandingan CoP turbin angin Savonius dengan silinder penggaggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	90
Tabel 4. 2 Tabel <i>uncertainty</i> pada CoP turbin angin Savonius dengan silinder penggaggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	91
Tabel 4. 3 Tabel perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius $Re = 9,6 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	97
Tabel 4. 4 Tabel <i>uncertainty</i> pada CM turbin angin Savonius dengan silinder penggaggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	98

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Permasalahan **energi** bagi kelangsungan hidup manusia merupakan masalah besar yang dihadapi oleh hampir seluruh negara di dunia termasuk juga Indonesia. Tidak lagi ditemukannya cadangan dalam jumlah yang besar pada rentang waktu terakhir ini membuat hampir seluruh dunia termasuk Indonesia menjadikan permasalahan **energi** menjadi permasalahan besar yang ditangani secara serius. Dalam laporan yang dikeluarkan *International Energy Agency (IEA)* pada tahun 2004, diperkirakan peningkatan konsumsi **energi** ini akan terus terjadi dengan kenaikan rata-rata hingga 1.6 % setiap tahunnya. Sementara itu sebuah laporan yang diterbitkan oleh perusahaan minyak BP pada tahun 2005 tentang konsumsi **energi** di seluruh dunia menyebutkan bahwa peningkatan konsumsi **energi** antara tahun 2003 dan 2004 saja mencapai 4.3%.

Dalam laporan yang dikeluarkan oleh BP yang disebut sebagai Review of World Energy 2005 itu, disebutkan bahwa total konsumsi **energi** di seluruh dunia hingga akhir tahun 2004 telah mencapai setara 10.244,4 juta ton minyak. Jumlah yang sangat fantastis ini setara dengan sekitar 1/15 dari total cadangan minyak yang ada di seluruh dunia yang berhasil ditemukan hingga tahun 2004 yang mencapai sekitar 162 milyar ton. Jumlah **energi** di seluruh dunia itu sendiri masih didominasi oleh sumber-sumber **energi** fosil utama yaitu minyak bumi, gas alam dan batu bara. Ketiga sumber **energi** yang paling dicari ini menyumbang hingga 87,7% dari total konsumsi **energi** dunia.

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang yang juga masih menggunakan Bahan Bakar Fosil sebagai sumber

energi dalam kehidupan sehari – hari. Sumber energi tersebut membutuhkan waktu yang cukup lama untuk diperbaharui keberadaannya, maka dari itu Energi Terbarukan menjadi solusi dari permasalahan tersebut. Salah satu sumber energi yang tidak akan ada habisnya di Indonesia dilihat dari letak geografisnya adalah angin, oleh karena itu Pembangkit Listrik Tenaga Angin menjadi jawaban untuk permasalahan Energi untuk negara Indonesia. Kecepatan angin di wilayah Indonesia umumnya memiliki kecepatan yang tergolong relative rendah yaitu di bawah 5,9 m/s.

Pembangkit listrik tenaga angin menjadi salah satu teknologi energi terbarukan yang berkembang dengan cepat. Penggunaan dari energi terbarukan meningkat dan mendapat dukungan di seluruh negara yang ada di dunia. Kapasitas pembangkit angin global terpasang di darat dan lepas pantai meningkat dari 7,5 Gigawatt pada tahun 1997 menjadi 564 Gigawatt pada tahun 2018, menurut data terbaru. (*International Renewable Energy Agency, 2018*)

Produksi listrik tenaga angin meningkat dua kali lipat antara tahun 2009 dan 2013, dan pada tahun 2016 energi angin menyumbang 16% dari listrik yang dihasilkan oleh energi terbarukan. Banyak bagian dunia memiliki kecepatan angin yang kuat, tetapi lokasi terbaik untuk menghasilkan tenaga angin kadang-kadang jauh. Tenaga angin lepas pantai menawarkan potensi luar biasa.

Turbin Savonius merupakan turbin yang mampu bekerja pada kecepatan yang relative rendah. Turbin angin jenis Savonius sesuai dengan kondisi kecepatan angin di Indonesia. Turbin Angin Savonius mempunyai efisiensi yang rendah, karena hal tersebut banyak penelitian mengenai pengoptimasian dari turbin angin tersebut.

Pada tahun 2002 **Tsutsui dan Igarashi** melakukan sebuah penelitian mengenai aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder lain. Penelitian ini memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder ( $L/D$ ),

diameter silinder pengganggu, dan harga bilangan Reynolds pada rentang  $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$ . Pada penelitian ini didapatkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynold (Re) serta variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar wake dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Pada tahun 2012 **Mahmoud et al** melakukan penelitian untuk mencari performa turbin angin Savonius yang paling optimal dengan melakukan variasi terhadap jumlah blade, jumlah *stage*, dan *overlap ratio* pada turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *aspect ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Didapatkan nilai dari *coefficient of power* meningkat seiring meningkatnya *aspect ratio* pada turbin Savonius.

Pada tahun 2017 **Daniel Fernando et al** melakukan sebuah eksperimen pengaruh silinder sirkular sebagai pengganggu aliran di depan sisi *returning blade* terhadap performa turbin angin tipe Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan menambahkan penghalang berbentuk silinder yang ditempatkan didepan *returning blade* dengan variasi jarak silinder pengganggu. Adapun variasi jarak (S/D) yang dari titik pusat silinder pengganggu dan pusat turbin adalah sebesar  $1,5 \leq S/D \leq 2,4$ . Hasil yang didapatkan adalah kenaikan *Coefficient of Power* sebesar 13,35, putaran turbin angin Savonius meningkat 1,9 kali, dan torsi statis meningkat 1,74 kali pada  $RE = 3 \times 10^4$ . Untuk semua bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian didapatkan bahwa jarak (S/D) 1,6 menjadi jarak paling yang paling efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.

Dari beberapa penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan pengganggu dengan bentuk silinder yang

diletakkan didepan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius ( $S/D$ ) sebesar 1,8 dan variasi rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1.0. Penelitian ini dilakukan dengan bilangan Reynolds sebesar 97000 dan 136000.

## 1.2 Perumusan Masalah

Turbin angin Savonius mengkonversi energi angin yang bergerak horizontal menjadi energi kinetik rotasi. Desain dari turbin angin Savonius ini merupakan desain yang cukup sederhana, terdiri dari dua Sudu dan satu rotor. Dua sudu tersebut adalah *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* berbentuk cekung menjadi bagian yang menangkap angin dan *returning blade* berbentuk cembung menjadi bagian yang diharuskan untuk melawan angin. Perbedaan profil tersebut membuat turbin angin Savonius mempunyai gaya drag yang berbeda antara kedua sudu. Gaya drag pada kedua sudu menciptakan torsi positif dan negatif. Dengan adanya perbedaan profil sudu maka *advancing blade* mempunyai gaya drag yang lebih besar sebagai torsi positif yang mengakibatkan rotor dari turbin angin berputar dan menghasilkan suatu daya. Semakin besar perbedaan gaya drag, maka semakin besar juga torsi yang dihasilkan. Semakin besar torsi yang dihasilkan maka akan semakin besar daya yang didapat. Salah satu caranya yaitu memperkecil drag yang terjadi pada *returning blade*.

Pada penelitian kali ini dilakukan pemasangan pengganggu didepan *returning blade* sehingga mendapatkan perbedaan drag yang semakin besar dan diharapkan dapat meningkatkan performa turbin. Pengganggu tersebut berupa silinder sirkular

dengan variasi jarak tertentu. Dugaan yang diharapkan terjadi pada penelitian kali ini adalah :

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* membuat daerah diantara silinder pengganggu dan *returning blade* mengalami penurunan tekanan. Hal ini mengakibatkan penurunan perbedaan tekanan antara bagian depan dan *belakang returning blade*. Akibatnya *pressure drag* pada *returning blade* turun, sehingga membuat gaya *drag* pada *returning blade* juga turun, maka nilai torsi dan daya yang dihasilkan turbin akan semakin tinggi.
2. Aliran yang mengenai silinder pengganggu akan membentuk *wake* di bagian belakang silinder pengganggu. *Shear Layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan *returning blade*. *Boundary Layer* pada permukaan *returning blade* terganggu dan mempercepat terbentuknya *boundary layer* pada *returning blade* menjadi *turbulen*. Akibatnya titik separasi pada permukaan *returning blade* akan mundur sehingga *wake* yang dihasilkan akan lebih sempit. Dengan *wake* yang lebih sempit maka gaya *drag* pada *returning blade* akan mengecil sehingga nilai torsi meningkat dan daya yang dihasilkan turbin akan semakin tinggi.
3. Ukuran diameter silinder pengganggu yang diletakkan didepan *returning blade* mempunyai variasi rasio ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ;dan 1.0. Apabila rasio ( $d/D$ ) terlalu kecil diduga kurang efektif dalam menurunkan tekanan di depan *returning blade* dan dalam menunda titik separasi. Apabila rasio ( $d/D$ ) terlalu besar diduga akan menyebabkan defleksi aliran dari silinder pengganggu yang akan menghalangi *free stream* yang menuju *advancing blade*. Variasi ini dilakukan untuk

mengetahui pengaruh diameter silinder pengganggu sehingga didapatkan diameter optimum dimana *wake* yang dihasilkan oleh silinder pengganggu menjadi efektif menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder sirkular penghalang di depan *returning blade* dengan rasio jarak antara silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius ( $S/D$ ) adalah sebesar 1,8 dan dengan nilai *Reynolds number* sebesar 97000 dan 136000 terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius dan variasi rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; dan 1,0. Dengan menggunakan diameter sudu turbin ( $D$ ) sebesar 167,1 mm. Terdapat beberapa hal yang perlu dilakukan, yakni:

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

### 1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini, antara lain:

1. Fluida yang digunakan adalah udara dengan kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada bilangan Reynold 97000 dan 136000.

2. Jenis aliran yang digunakan adalah *eksternal flow*.
3. Jarak pusat returning blade turbin angin dengan pusat silinder pengganggu ( $S/D$ ) yang digunakan sebesar 1,8.
4. Analisa dilakukan pada turbin angin tipe Savonius dengan diameter ( $D$ ) = 167,1 mm.
5. Variasi rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1.0.
6. Analisa Aliran dua dimensi.

(HALAMAN SENGAJA DIKOSONGKAN)

## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Turbin Angin

Indonesia merupakan salah satu negara yang berpotensi membuat pembangkit bertenaga angin karena letak geografis Indonesia yang mempunyai banyak pantai. Energi yang dihasilkan dari turbin angin tidaklah sebesar pembangkit tenaga fosil, akan tetapi selama bumi mengalami rotasi, angin akan tetap ada dan itu mengartikan bahwa pembangkit listrik tenaga angin merupakan suatu pembangkit yang harus diteliti agar dapat dimaksimalkan performanya untuk melakukan proses pembuatan energi listrik lebih optimal.

Banyak peneliti terdahulu sudah melakukan penelitiannya untuk meningkatkan atau mengoptimalkan performa dari pembangkit listrik tenaga angin tersebut.

Turbin Angin merupakan suatu pembangkit listrik yang diciptakan melalui energi kinetik dari aliran angin. Energi dari aliran angin tersebut akan memutar baling – baling yang membuat rotor berputar dan putaran tersebut akan dirubah menjadi energi listrik oleh generator. Dari sumbu putarnya turbin angin dibedakan menjadi dua jenis yaitu *horizontal axis wind turbine* dan *vertical axis wind turbine*.

Komponen utama dari turbin angin terdiri dari rotor, baling-baling yang melekat pada rotor, generator dan struktur menara. Rotor adalah elemen dari turbin angin yang mengumpulkan energi dari angin. Baling-baling dari turbin angin melekat pada pusat rotor. Baling-baling ini diputar oleh aliran angin dengan menggunakan desain aerodinamis yang rumit. Tingkat putaran baling-baling tergantung pada kecepatan angin dan bentuk baling-balingnya. Instalasi pembangkit listrik tenaga angin membutuhkan ketinggian yang cukup tinggi (biasanya diatas 80 meter) karena pada ketinggian

tersebut terdapat angin yang memiliki kecepatan angin yang relative lebih dtinggi dan lebih konstan.

### **2.1.1 *Horizontal Axis Wind Turbine***

Turbin angin dapat dibagi menjadi dua jenis turbin berdasarkan sumbu putar baling – balingnya. *Horizontal axis wind turbine* merupakan turbin yang memiliki baling – baling dengan sumbu putar horizontal. Turbin jenis ini merupakan turbin angin tipe komersial tipe lama yang banyak digunakan.

Turbin angin jenis ini mempunyai generator pada puncak *tower*. Poros yang diputar oleh baling – baling tidak langsung memutar generator karena selalu ada *gearbox* yang mengubah kecepatan agar mendapatkan putaran yang lebih tinggi pada poros generator.

Kelebihan dari turbin angin jenis ini adalah menghasilkan daya yang lebih besar dari turbin angin jenis lainnya dikarenakan *angle of attack* yang dimiliki oleh sudunya dapat disesuaikan dengan kecepatan angin agar performa turbin meningkat.

Kekurangan dari turbin angin jenis ini adalah pemasangan yang cukup sulit dikarenakan memiliki ukuran yang besar yang mengartikan bahwa transportasi yang digunakan membutuhkan biaya yang mahal. Turbin angin hanya bisa menerima angin dari satu arah saja, karena itu dibutuhkan kontrol untuk memutar turbin ke arah angin. Gambar 2.1 merupakan gambar dari *horizontal axis wind turbine* lepas pantai yang terletak pada negara Belgia.



Gambar 2.1 *Thorntonbank Horizontal Axis Wind Turbine* (Franklin Coyle, 2011)

### **2.1.2 Vertikal Axis Wind Turbine**

*Vertikal Axis Wind Turbine* merupakan turbin yang memiliki baling – baling tegak lurus dengan poros turbin. Turbin jenis ini dapat menerima aliran angin dari banyak arah. Kelebihan turbin angin jenis ini adalah bentuknya yang relative kecil sehingga tidak memerlukan transportasi yang mahal untuk instalasi. Area instalasi yang dibutuhkan tidak membutuhkan area yang luas karena bentuk yang minimalis.

Kekurangan dari turbin angin jenis ini adalah daya yang dihasilkan lebih kecil dari *horizontal axis wind turbine*. Gambar 2.2 merupakan gambar dari Turbin Angin Darrieus.



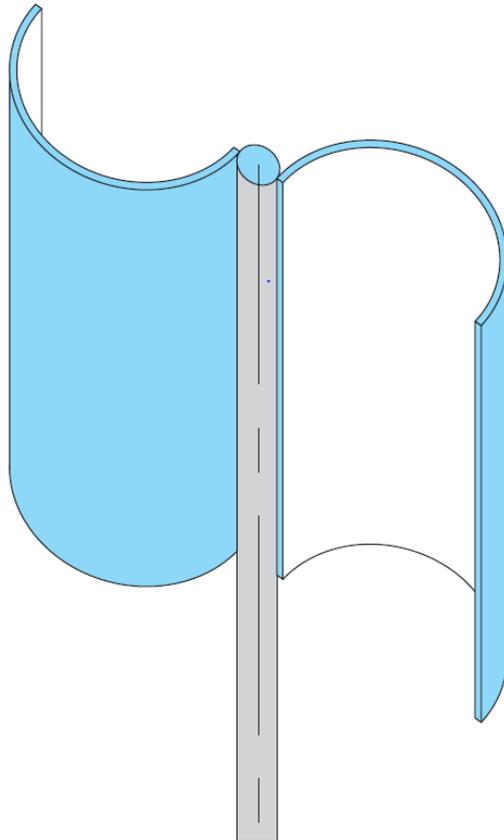
Gambar 2.2 Turbin Darrieus (Sumber : <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/93-dornier-darrieus-55>)

## 2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin yang memiliki sumbu vertikal ini pertama kali ditemukan oleh **Sigurd Johannes Savonius** di tahun 1922. Sebenarnya kincir angin sendiri sudah ditemukan di abad ke 5 di persia dan mulai menyebar di seluruh bagian negara eropa. Turbin ini memiliki sumbu vertikal dengan bentuk sudu berbentuk setengah silinder dan menyerupai huruf “S”. Turbin ini juga disebut sebagai turbin drag karena cara

mengerakannya memanfaatkan gaya *drag* pada sudu – sudunya.

Terdapat dua sisi pada turbin ini, yaitu sisi yang berbentuk cembung disebut *returning blade* dan sisi cekung yang disebut *advancing blade*. Sisi *returning blade* membelakangi arah aliran angin yang datang, sedangkan sisi *advancing blade* tegak lurus terhadap arah datangnya aliran angin sehingga berfungsi sebagai penangkap aliran. Gaya drag pada turbin Savonius ini nantinya dapat menghasilkan daya dengan cara mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanis pada generator yang kemudian menjadi energi listrik. Kelebihan dari turbin angin Savonius adalah tidak memerlukan torsi awal untuk memutarinya dan sebagai sumber listrik untuk keperluan yang kecil seperti pompa air. Gambar 2.3 merupakan gambar konstruksi dasar dari turbin angin Savonius.



Gambar 2.3 Konstruksi Sederhana Turbin Savonius  
(Ahmad Hemami, 2012)

### **2.3 Gaya Drag**

Gaya *drag* merupakan gaya hambat yang disebabkan oleh adanya tahanan antara permukaan. Pada turbin angin Savonius gaya hambat tersebut disebabkan oleh adanya tahanan dari gesekan permukaan sudu dengan angin. Gaya drag mempunyai arah yang sejajar horizontal dengan arah aliran. Perbedaannya

dengan gaya *lift* atau gaya angkat adalah arahnya vertikal atau tegak lurus dengan arah aliran udara. Gaya *drag* dapat bersifat menguntungkan dan juga merugikan. Contoh mekanisme gaya *drag* menguntungkan adalah gesekan antara gergaji dengan kayu. Contoh mekanisme gaya *drag* yang merugikan adalah tertahannya laju kendaraan oleh angin. Penjumlahan dari gaya gesek dan tekanan dari aliran fluida pada permukaan, gaya *drag*, tersebut dirumuskan sebagai berikut :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 C_d A \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

- $F_D$  = Gaya *drag*
- $\rho$  = densitas fluida
- $U$  = kecepatan fluida
- $C_d$  = *Coefficient of Drag*
- $A$  = luas bidang yang terkena aliran fluida

## 2.4 Reynolds Number

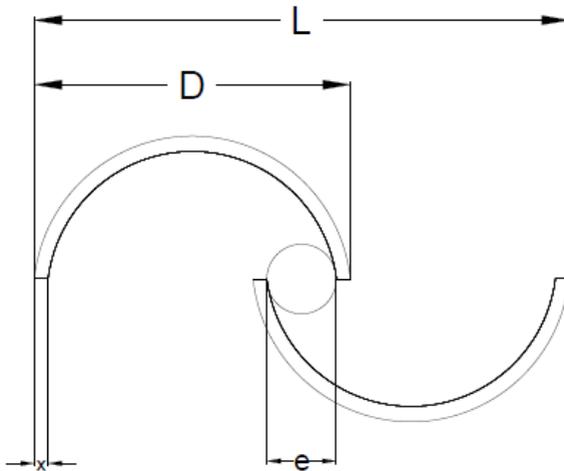
Bilangan *Reynolds* adalah bilangan tak berdimensi untuk menentukan karakteristik dari sebuah aliran. aliran dapat dikatakan laminar, transisi dan turbulen dari besarnya bilangan *Reynolds*. Bilangan *Reynolds* ditemukan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1880an yang mempelajari transisi antara aliran laminar dan aliran turbulen merupakan bilangan tak berdimensi yang diperoleh dari rasio antara gaya inersia dan gaya viscous dimana parameter yang digunakan adalah massa jenis fluida ( $\rho$ ), Persamaan dari Bilangan *Reynolds* adalah sebagai berikut:

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

..... (2.2)

Dimana:

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



Gambar 2.4 Skema Turbin Angin Savonius

Gambar 2.4 merupakan gambar skema dari turbin angin savonius yang saya lakukan pada penelitian kali ini. Untuk turbin angin Savonius pada penelitian kali ini, panjang karakteristik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$L = 2D - 2x - e \text{ ..... (2.3)}$$

Dimana:

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

## 2.5 Coefficient of Power

*Coefficient of Power* (CoP) merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya yang diberikan oleh angin berupa gaya drag. Nilai ini digunakan untuk melihat performa pada suatu turbin. Nilai CoP berbanding lurus dengan performa turbin angin sehingga semakin besar nilai CoP maka semakin tinggi daya yang dihasilkan oleh turbin. Persamaan CoP adalah sebagai berikut:

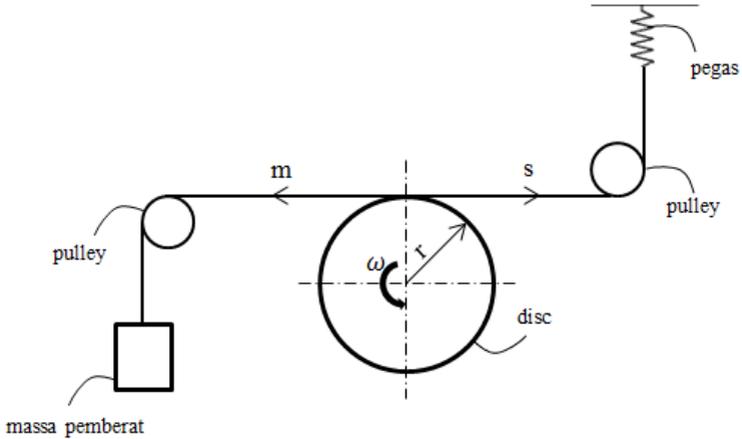
$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \dots\dots\dots(2.4)$$

Daya aktual turbin ( $P_T$ ) dihitung berdasarkan torsi dinamis dan putaran turbin yang diukur dengan menggunakan *brake dynamometer*. Hasil pengukuran yang terbaca dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$P_T = \tau\omega \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

- $P_T$  = daya actual pada turbin (Watt)  
 $\tau$  = torsi dinamis yang diukur dengan *brake dynamometer* (Nm)  
 $\omega$  = putaran turbin angin Savonius (rad/s)



Gambar 2.5 Skema Free-Body Diagram Brake Dynamometer (Daffa & Yuwono, 2019)

Gambar 2.5 merupakan gambar skema *Free Body Diagram* dari *Brake Dynamometer*. Berdasarkan Gambar, nilai torsi dimanis dari turbin angin Savonius diperoleh dari persamaan:

$$\tau = \{(s - m)g\} \times r \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :  
 s = massa yang terbaca pada pegas (kg)  
 m = massa beban (kg)  
 g = gravitasi (m/s<sup>2</sup>)  
 r = jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Daya yang dihasilkan oleh angin (P<sub>w</sub>) adalah besarnya energi kinetic yang dibawa terhadap waktu, sehingga daya yang dihasilkan oleh angin yaitu:

$$P_w = \frac{E_k}{t} \dots\dots\dots(2.7)$$

Besarnya laju energi angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin secara teoritis. Besarnya laju energi angin dipengaruhi oleh energi kinetik yang dihasilkan oleh udara serta laju aliran massa dari udara. Besarnya energi kinetik yang dimiliki oleh udara adalah:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m' \cdot U^2 \dots\dots\dots(2.8)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan  $\rho$ , yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{m'}{t} \\ \dot{m} &= \rho \cdot U \cdot A \dots\dots\dots(2.9) \end{aligned}$$

Maka persamaan daya yang dihasilkan oleh udara menjadi:

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot U^2 \\ P_w &= \frac{1}{2} (\rho \cdot U \cdot A) U^2 \\ P_w &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \dots\dots\dots(2.10) \end{aligned}$$

Setelah analisa daya aktual turbin dan daya yang dihasilkan oleh angin maka didapatkan nilai *coefficient of performance* (CoP) yaitu:

$$\begin{aligned} CoP &= \frac{\{(s - m)g\} \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \\ CoP &= \frac{\{(s - m)g\} \cdot r \cdot \frac{2\pi n}{60}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \\ CoP &= \frac{\{(s-m)g\} \cdot r \cdot \pi \cdot n}{15 \cdot \rho \cdot A \cdot U^3} \dots\dots\dots(2.11) \end{aligned}$$

dimana :

$P_T$	= Daya aktual turbin	(Watt)
$P_w$	= Daya kinetik angin	(Watt)
$s$	= Pembacaan neraca pegas	(Kg)
$g$	= Percepatan Gravitasi	(m/s <sup>2</sup> )
$r$	= jari-jari poros Turbin	(m)
$\omega$	= kecepatan sudut poros Turbin	(rad/s)
$\rho$	= massa jenis udara	(kg/m <sup>3</sup> )
$A$	= Area yang ditabrak oleh aliran udara	(m <sup>2</sup> )
$V$	= kecepatan udara	(m/s)
$m'$	= massa udara	(Kg)
$m$	= massa pembebanan	(Kg)

## 2.6 Aliran Fluida Melintasi Silinder Pejal

Suatu aliran fluida akan mengalami perubahan bentuk aliran ketika menabrak suatu benda. Bentuk dari aliran baru yang terjadi pada fluida tersebut mengikuti kontur dari benda yang ditabrak. Karakteristik bentuk aliran yang terjadi akan tergantung pada dimensi dan properties benda yang ditabrak dan juga kecepatan dan properties.

Suatu aliran yang melintasi silinder akan menjadi aliran yang kompleks dan berbanding lurus dengan berubahnya bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds ini menyatakan perbandingan dari efek inersia dan efek viskos. Ketika efek viskos diabaikan ( $\mu=0$ ) maka bilangan Reynolds menjadi tak terhingga, akan tetapi bila efek inersia diabaikan ( $\rho=0$ ) maka bilangan Reynolds akan menjadi 0. Aliran dengan bilangan Reynolds  $< 1$  apabila melewati suatu silinder, hal ini menyatakan bahwa adanya silinder dan efek viskos akan terasa pada bagian yang relatif besar pada medan aliran.

## 2.7 Tip Speed Ratio

*Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) adalah suatu parameter yang cukup penting untuk menentukan besar performa yang diciptakan

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

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} \dots\dots\dots (2.12)$$

Di mana:

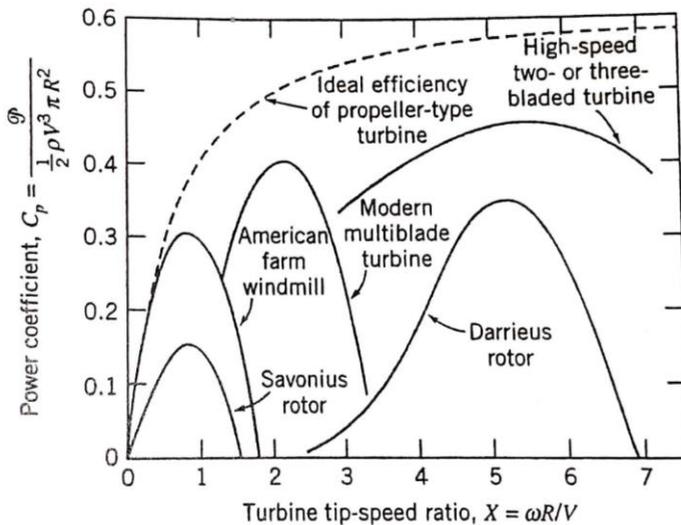
- $\lambda$  : *tip speed ratio*
- $\omega$  : kecepatan sudut turbin (rad/s)
- R : Diameter Sudu Turbin (m)
- U : kecepatan angin (m/s)

Semakin tinggi nilai *Tip Speed Ratio*, maka *coefficient of power* akan meningkat hingga titik optimumnya, kemudian nilai *coefficient of power* akan turun seiring dengan meningkatnya nilai  $\lambda$ .

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

Masing-masing turbin angin memiliki titik kerja awal yang berbeda. Apabila titik kerja awal suatu turbin terletak pada nilai  $\lambda$  yang rendah, artinya turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah. Turbin angin Savonius memiliki rentang kerja pada tip speed ratio yang rendah, yaitu kurang 1,4 dengan power coefficient maksimum sekitar 15%. Namun, beberapa *drag* turbines seperti turbin angin Savonius mampu mencapai nilai power coefficient yang lebih tinggi dengan

desain dan pengondisian yang tepat. Gambar 2.6 merupakan gambar grafik hubungan antara *Coefficient of Power* dengan *Tip Speed Ratio* untuk berbagai jenis turbin angin yang ada di dunia dengan batas maksimal dari efisiensi adalah 59%.

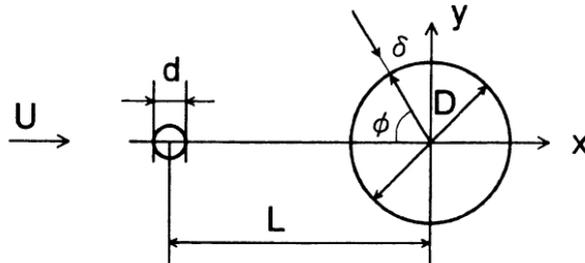


Gambar 2.6 Grafik Hubungan antara *Coefficient Of Power* Dengan *Tip Speed Ratio* untuk Berbagai Jenis Turbin Angin (Fox et al., 2008)

## 2.8 Penelitian Terdahulu

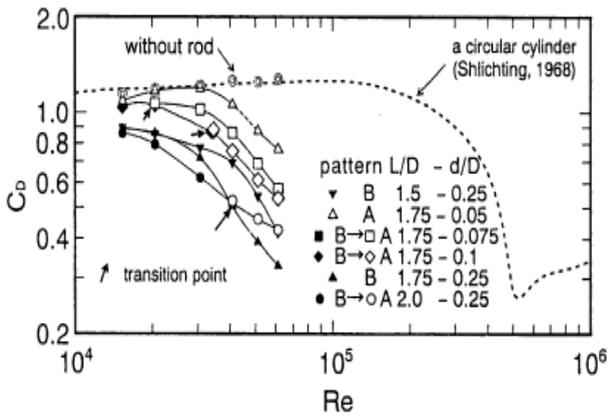
### 2.8.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu

Penelitian tentang aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder lain pernah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)**. Penelitian tersebut memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder ( $L/D$ ), diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ), dan harga bilangan Reynolds pada rentang  $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$ .

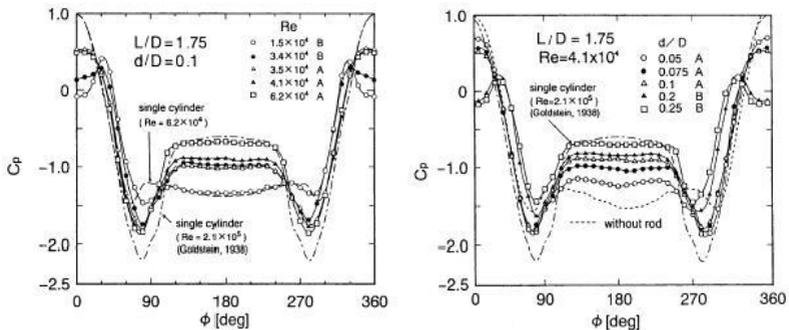


Gambar 2.7 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Pada gambar 2.7 diperlihatkan skema dari penelitian yang dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi pada tahun 2002. Geometri benda uji tersebut mempunyai diameter silinder utama sebesar 40 mm dengan perubahan diameter silinder pengganggu dari 1 mm sampai dengan 10 mm, sedangkan jarak antar kedua pusat silinder divariasikan dari rentang 50 mm sampai dengan 120 mm. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa penurunan harga koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan peningkatan bilangan Strouhal yang disebabkan oleh peningkatan bilangan Reynolds ( $Re$ ) dan peningkatan  $d/D$  serta penurunan harga  $L/D$ . Dengan peningkatan bilangan Reynolds di atas  $3 \times 10^4$ , maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, tebal *Shear Layer* berkurang, sehingga bilangan Strouhal akan meningkat dan daerah wake menyempit (koefisien *drag* menurun). Gambar 2.8 merupakan grafik hubungan koefisien drag dengan bilangan Reynolds yang dilakukan pada penelitian ini.

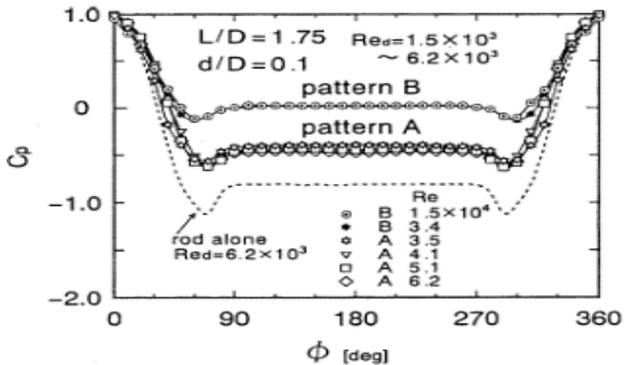


Gambar 2.8 Koefisien Drag (Tsutsui & Igarashi,



2002)

Gambar 2.9 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkuler Utama (Tsutsui & Igarashi, 2002)



Gambar 2.10 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Pengganggu (Tsutsui & Igarashi, 2002)

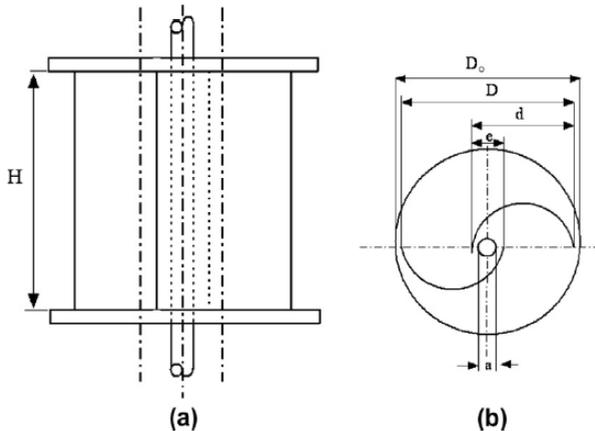
Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 merupakan gambar distribusi tekanan pada sekitar silinder utama dan silinder pengganggu dengan variasi bilangan *Reynolds* dan variasi ukuran diameter silinder pengganggu. Untuk mengetahui pengaruh variasi bilangan *Reynolds* ( $Re$ ), diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ), dan jarak pusat silinder pengganggu dengan silinder sirkular utama ( $L/D$ ) terhadap koefisien drag ( $C_D$ ) maka didapatkan grafik distribusi  $C_p$  seperti gambar 2.9 diatas. Pada gambar 2.9 (a) percobaan dilakukan dengan variasi bilangan *Reynolds* yang dilakukan pada  $L/D = 1,75$  dan  $d/D = 0,1$  dengan dua pola aliran yaitu pola aliran A dengan adanya vortex shedding dibelakang silinder pengganggu dan pola aliran B yaitu tanpa vortex shedding dibelakang silinder pengganggu. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu maka  $C_p$  pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan. Untuk pola aliran (A)  $C_p$  menurun menjadi 0,5 dan pola aliran (B)  $C_p$  menjadi negatif pada bagian depan silinder sirkular utama. Dari grafik 2.9 (a) dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan *Reynolds* yang

semakin meningkat maka lebar wake dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Sedangkan pada gambar 2.9 (b) percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder sirkular utama yang dilakukan pada  $L/D = 1,75$  dan  $Re = 4,1 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu yang semakin meningkat maka  $C_p$  pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan. Dari grafik 2.9 (b) dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar wake dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit. Kondisi optimum penurunan harga *pressure drag Coefficient* ( $C_D$ ) diperoleh pada nilai  $d/D = 0,25$ ;  $L/D = 2$  untuk  $Re$  kurang dari  $4,1 \times 10^4$  dan diperoleh  $C_D$  sebesar 73% dibanding pada silinder tunggal. Sedangkan penurunan *total pressure drag Coefficient* ( $C_{DT}$ ) didapatkan untuk harga  $L/D = 1,75$  pada  $Re$  lebih besar dari  $4,1 \times 10^4$  serta didapatkan  $C_{DT}$  sebesar 63% dibandingkan pada silinder tunggal.

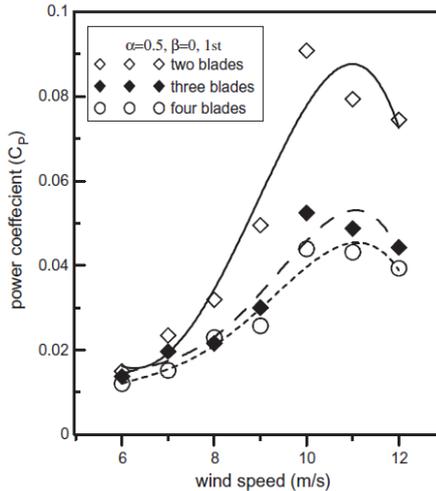
### 2.8.2 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius

Pada penelitian N.H. Mahmoud et al (2012) dilakukan percobaan untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan skema geometri seperti di gambar 2.11 dan menggunakan beberapa variasi. Variasi pertama adalah variasi dari jumlah *blades* yaitu dengan menggunakan dua *blades*, tiga *blades*, dan empat *blades*. Variasi kedua adalah variasi jumlah stage turbin yaitu *single stage* dan *double stages*. Variasi ketiga adalah variasi *overlap ratio* ( $\beta$ ) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35 dan *aspect ratio* ( $\alpha$ ) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5 dengan ada tidaknya *end plates*.



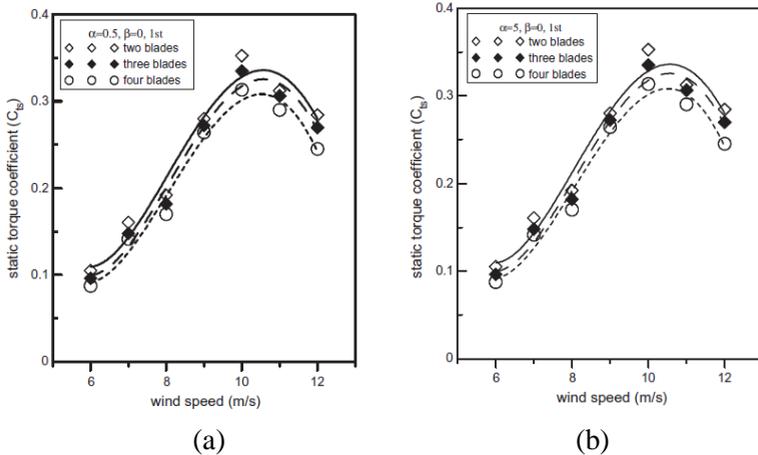
Gambar 2. 11 Skema Turbin Angin Savonius *Single Stage* (a) tampak samping dan (b) tampak atas (Mahmoud, et al., 2012)

Pada penelitian ini, turbin Savonius mempunyai diameter poros 14 mm dan panjang 62 cm untuk semua variasi yang diletakkan di depan *exit wind tunnel* dengan jarak 125 cm. Peletakkan diperhatikan sehingga *vertical axis* dari turbin Savonius harus berhadapan lurus dengan *centre line* dari *wind tunnel*. *Blades* dari turbin Savonius dibuat dari pipa plastik ringan PVC dengan diameter yang berbeda yaitu 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,008 m. *End plates* yang digunakan terbuat dari plat kayu ringan dengan tebal 2,5 mm. Berikut ini merupakan beberapa hasil dari penelitian yang didapat dari penelitian ini :



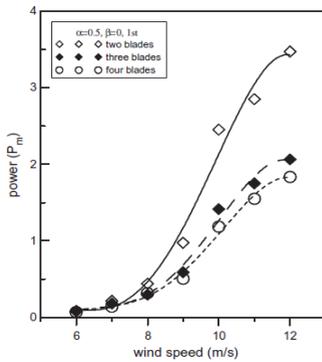
Gambar 2. 12 Hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.12 merupakan gambar hasil dari penelitian dari hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades*. Pada penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *blades* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius pada *aspect ratio* sebesar 0,5 dan *overlap ratio* sebesar 0 dengan kondisi *single stage rotor*. Dapat dilihat pada gambar diatas bahwa *coefficient of power* pada turbin dengan dua *blades* lebih tinggi daripada turbin dengan tiga dan empat *blades*. Selain itu didapatkan *coefficient of power* tertinggi pada kecepatan angin 10 m/s pada setiap *blades*

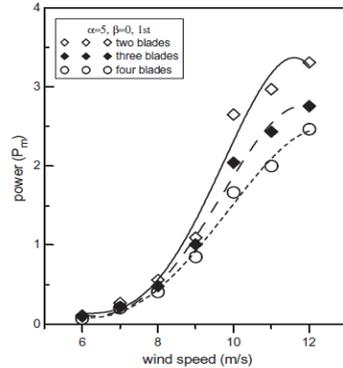


Gambar 2.13 Hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades* (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5 (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.13 merupakan gambar dari hasil penelitian tentang hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades* (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5. Pada penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *blades* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius pada *aspect ratio* sebesar 0,5 dan 5, *overlap ratio* sebesar 0 dengan kondisi *single stage* rotor. Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa torsi statis pada turbin Savonius dengan dua *blades* lebih tinggi daripada torsi statis pada turbin Savonius dengan tiga dan empat *blades* pada *aspect ratio* 0,5 dan 5.

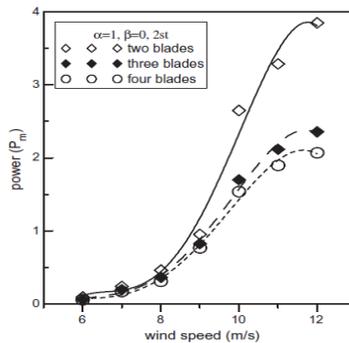


(a)



(b)

Gambar 2. 14 Hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades (a) *aspect ratio* = 0,5; *single stage*, (b) *aspect ratio* = 5; *single stage* (Mahmoud, et al., 2012)

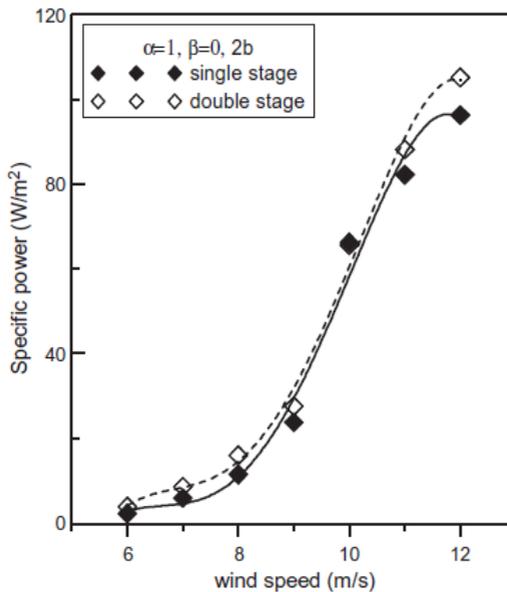


(c)

Gambar 2.15 Hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga,

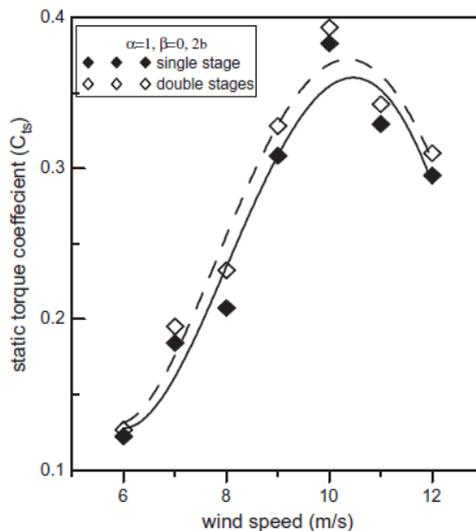
dan empat *blades* dengan *aspect ratio* = 0,5; *double stages*. (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.14 merupakan gambar dari hasil penelitian tentang Hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades* (a) *aspect ratio* = 0,5; *single stage*, (b) *aspect ratio* = 5; *single stage*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blades* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa turbin dengan dua *blades* mempunyai performa lebih baik daripada tiga dan empat *blades* untuk semua *aspect ratio* dan pada *single stage* maupun *double stages*.



Gambar 2.16 Hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* (Mahmoud, et al., 2012)

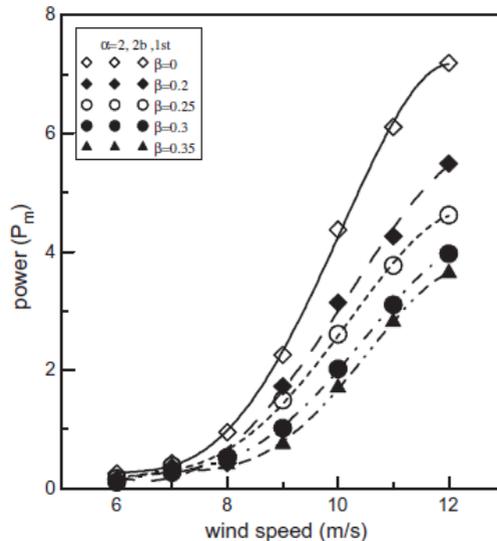
Gambar 2.16 merupakan gambar dari hasil penelitian tentang hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stage*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai *specific power* pada turbin Savonius *double stages* lebih besar daripada *specific power* pada turbin Savonius *single stage*.



Gambar 2.17 Hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.17 merupakan gambar dari hasil penelitian tentang hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada

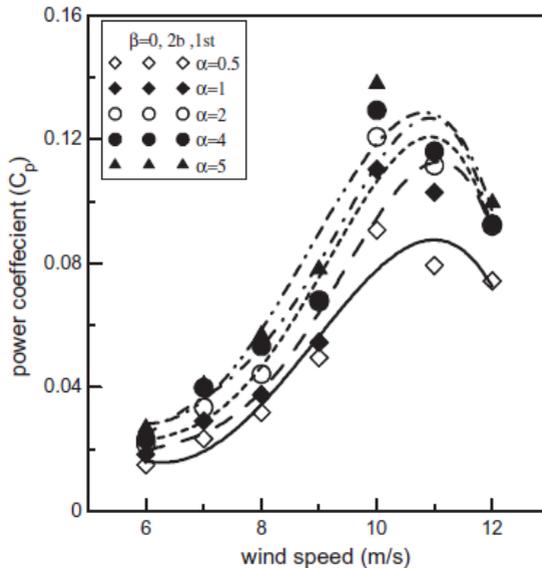
turbin Savonius *single stage* dan *double stages*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai torsi statis pada turbin Savonius *double stages* lebih besar daripada torsi statis pada turbin Savonius *single stage*.



Gambar 2.18 Hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *overlap ratio* (Mahmoud, et al., 2012)

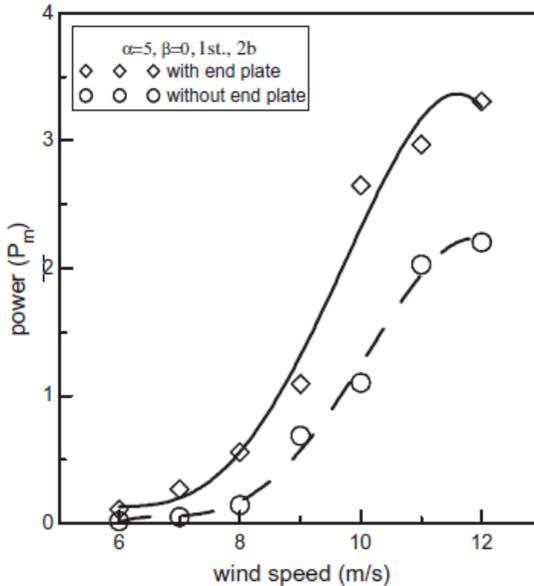
Gambar 2.18 merupakan gambar hasil penelitian tentang hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *overlap ratio*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *overlap ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari

*mechanical power* akan menurun seiring meningkatnya *overlap ratio* pada turbin Savonius.



Gambar 2.19 Hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *aspect ratio* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.19 merupakan gambar hasil penelitian tentang hubungan anatar *coefficient of power* dan kecepatan turbin Savonius dengan variasi *aspect ratio*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *aspect ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Dari gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari *coefficient of power* akan meningkat seiring meningkatnya *aspect ratio* pada turbin Savonius.

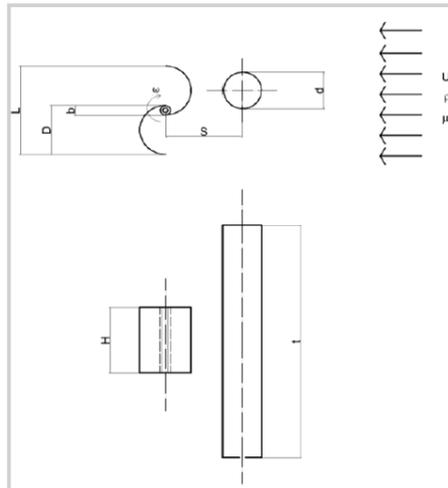


Gambar 2.20 Hubungan antara *mechanical power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya *End Plate* dan tanpa *end plate* (Mahmoud, et al., 2012)

Gambar 2.19 merupakan gambar hasil penelitian tentang hubungan antara *mechanical power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya *End Plate* dan tanpa *end plate*. Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *mechanical power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya *End Plate* dan tanpa *end plate* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa turbin Savonius yang menggunakan *end plate* memiliki nilai *mechanical power* yang lebih tinggi daripada tanpa menggunakan *end plate*.

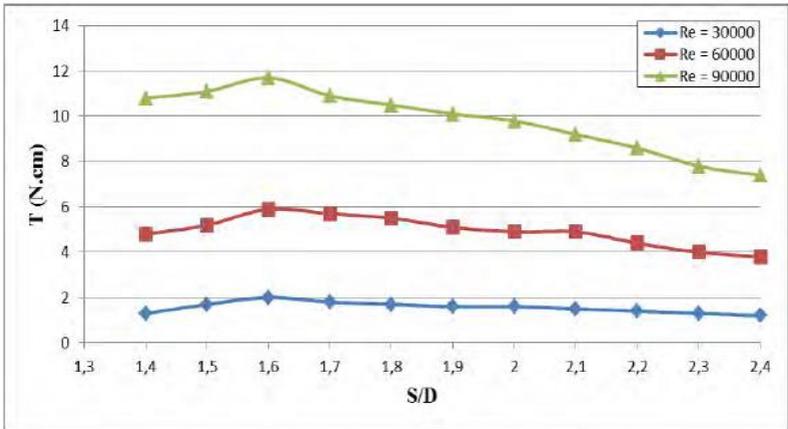
### **2.8.3 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi *Returning Blade* Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius**

Pada tahun 2017 Daniel Fernando et al melakukan sebuah eksperimen pengaruh silinder sirkular sebagai pengganggu aliran di depan sisi *returning blade* terhadap performa turbin angin tipe Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan menambahkan penghalang berbentuk silinder yang ditempatkan didepan *returning blade* dengan variasi jarak silinder pengganggu. Adapun variasi jarak ( $S/D$ ) yang dari titik pusat silinder pengganggu dan pusat turbin adalah sebesar  $1,5 \leq S/D \leq 2,4$ . Dilakukan juga simulasi aliran menggunakan *software solidwork*. Pada simulasi, terlihat bahwa tanpa silinder pengganggu, kecepatan angin yang menerpa *advancing blade* dan *returning blade* sama besar. Ketika diberikan silinder pengganggu, angin yang menerpa bagian *returning blade* mengalami penurunan kecepatan pada permukaan yang kontak langsung dengan arah aliran. Hal tersebut mengakibatkan berkurangnya gaya hambat pada bagian *returning blade* yang mengakibatkan meningkatnya torsi. Dalam meningkatnya nilai torsi tersebut, maka akan didapatkan nilai performa yang lebih besar. Pada gambar 2.21 diperlihatkan skema penelitian yang dilakukan Fernando pada tahun 2017.

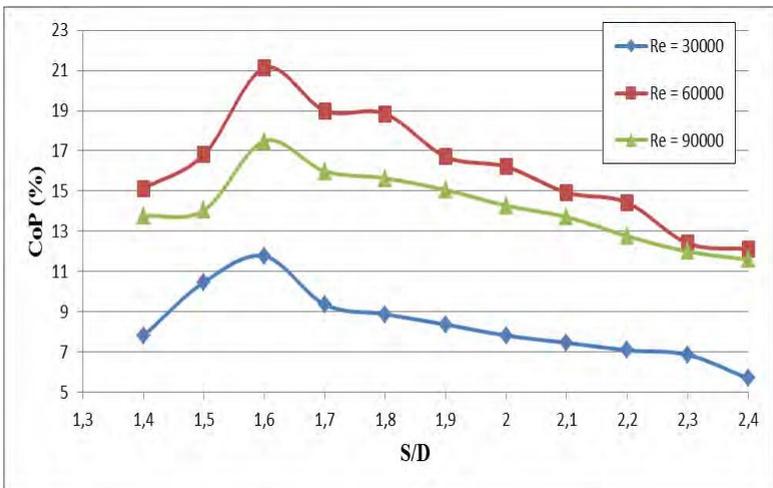


Gambar 2.21 Skema Penelitian (Fernando, et al., 2017)

Hasil yang didapatkan adalah kenaikan *Coefficient of Power* sebesar 13,35, putaran turbin angin Savonius meningkat 1,9 kali, dan torsi statis meningkat 1,74 kali pada  $RE = 3 \times 10^4$ . Untuk semua bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian didapatkan bahwa jarak ( $S/D$ ) 1,6 menjadi jarak paling yang paling efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.



Gambar 2.22 Grafik *Tip Speed Ratio* turbin angin Savonius berpengganggu (TSR) sebagai fungsi jarak pada  $S/D = 1,4 - 2,4$  (Fernando, et al., 2017)



Gambar 2.23 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius berpengganggu (CoP) sebagai fungsi jarak pada  $S/D = 1,4 - 2,4$  (Fernando, et al., 2017)

Gambar 2.22 merupakan gambar grafik antara *Tip Speed Ratio* dengan jarak (S/D) 1,4 sampai dengan 2,4. Gambar 2.23 merupakan gambar grafik *coefficient of power* dengan jarak (S/D) 1,4 sampai dengan 2,4. Pada jarak S/D 1,4 sampai dengan 1,6 nilai *Coefficient of Power* mengalami kenaikan. Hal ini dikarenakan penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat mengurangi gaya *drag* pada sudu *returning blade*. Dengan adanya penambahan pengganggu menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu memberikan gangguan terhadap *boundary layer returning blade*. Sehingga *boundary layer returning blade* terganggu dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen. Oleh karena itu momentum aliran di dekat dinding kontur *returning blade* menjadi lebih besar dan akibatnya aliran lebih dapat menahan *adverse pressure gradien* serta gaya gesek yang terjadi sehingga titik separasi mundur ke belakang dan daerah *wake* menyempit. Daerah *wake* yang sempit ini mengakibatkan torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* juga akan turun dan membuat selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar. Hal ini dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh turbin.

Pada jarak S/D 1,6 sampai dengan 2,4 nilai *Coefficient of Power* mengalami penurunan. Selain pengaruh silinder pengganggu, variasi jarak juga memberikan efek pada *returning blade*. Pada variasi jarak yang dekat, *shear layer* dari silinder pengganggu akan sangat efektif mengganggu *boundary layer* dari *returning blade*. Apabila jarak silinder pengganggu dijauhkan, maka *shear layer* dari silinder pengganggu sudah semakin tidak efektif lagi mengganggu *boundary layer returning blade*, bahkan pada jarak yang sangat jauh akan seperti bila tidak ada pengganggu dan diasumsikan sebagai dua buah silinder yang tidak saling mempengaruhi. Untuk ketiga bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini, semuanya menunjukkan bahwa nilai puncak

(*peak value*) *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius berpengganggu berada pada jarak  $S/D = 1,6$ . Ini menunjukkan bahwa pada posisi pengganggu dengan  $S/D = 1,6$  di depan *Returning blade* memberikan kinerja yang optimal pada turbin Savonius yang diteliti.

Kesimpulan pada penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu yang diletakan di depan *returning blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin, variasi jarak ( $S/D$ ) yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Pada penelitian kali ini, jarak ( $S/D$ ) 1,6 adalah jarak yang paling menghasilkan performa yang paling tinggi.

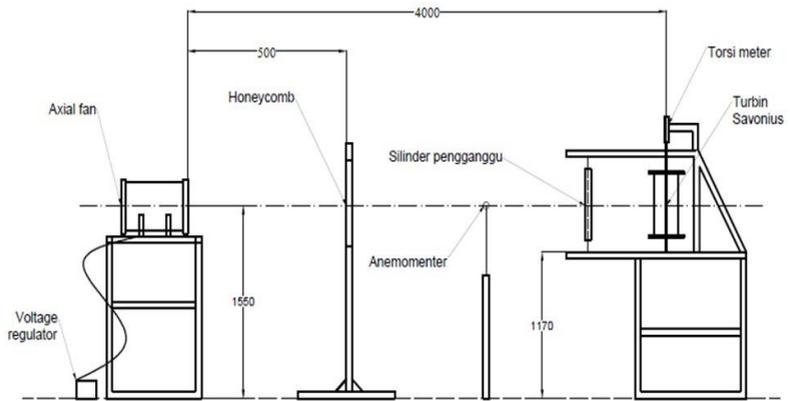
## BAB III

### Metodologi Penelitian

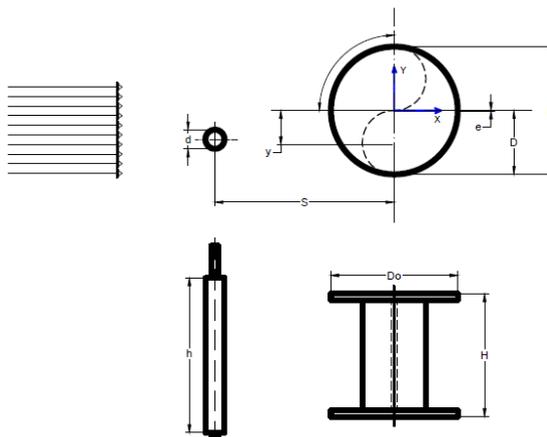
#### 3.1. Analisa Parameter

Pada penelitian kali ini, dilakukan analisa parameter untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu penelitian atau tidak. Parameter-parameter pada penelitian kali ini antara lain adalah kecepatan fluida, densitas udara, viskositas udara, diameter turbin, diameter penghalang, panjang silinder pengganggu, tinggi turbin, dan letak penghalang terhadap returning blade. Parameter yang perlu diperhitungkan pengaruhnya terhadap variabel yang akan diteliti, yakni *coefficient of power* dan *coefficient of moment*. Skema pada penelitian kali ini diperlihatkan pada gambar 3.1. Parameter tersebut meliputi:

$\mu$	: viskositas udara	(N.s/m <sup>2</sup> )
U	: kecepatan udara	(m/s)
$\rho$	: densitas udara	(kg/m <sup>3</sup> )
D	: diameter turbin	(m)
d	: diameter silinder pengganggu	(m)
S	: jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat poros turbin angin Savonius	(m)
L	: panjang karakteristik	(m)
H	: tinggi turbin	(m)
n	: kecepatan putar turbin	(rpm)



Gambar 3. 1 Skema Penelitian dan Parameter Ukur  
(a)



Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur  
(b)

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

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Parameter-parameter yang mempengaruhi *power* adalah sebagai berikut :

P	: <i>power</i>	(watt)
$\rho$	: massa jenis udara	(kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	: viskositas absolut udara	(N.s/m <sup>2</sup> )
U	: kecepatan aliran udara	(m/s)
D	: diameter sudu turbin angin Savonius	(m)
e	: diameter poros	(m)
d	: diameter silinder pengganggu	(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 penghalang terhadap sudut Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan dalam menganalisa. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t.
3. Membuat dimensi primer dari parameter yang mempengaruhi.

Tabel 3.1 Dimensi Parameter CoP

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- $\pi_1$  : *Coefficient of Power*
- $\pi_2$  : Bilangan Reynolds
- $\pi_3$  : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_4$  : rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_5$  : rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_6$  : rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_7$  : rasio kecepatan tip
- $\pi_8$  : rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_9$  : rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter sudu turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah :

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

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

$\frac{S}{D}, \frac{e}{D}, \frac{y}{D}, \frac{t}{D}$ , dan  $\frac{H}{D}$  merupakan variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}$ , dan  $\frac{n D}{U}$  merupakan variabel yang divariasikan agar dapat diketahui pengaruhnya terhadap *coefficient of power* turbin angin Savonius, sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

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

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan nilai L dimana  $L = 2D - 2x - e$ . Nilai x pada kasus ini merupakan tebal turbin, sehingga didapatkan persamaan :

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

Sehingga dapat ditulis menjadi :

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

### 3.3. Analisa Dimensi *Coefficient of Moment* (C<sub>M</sub>)

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter

Berikut merupakan parameter yang mempengaruhi *moment* :

$T$	: torsi	(N.m)
$\rho$	: massa jenis udara	(kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	: viskositas absolut udara	(N.s/m <sup>2</sup> )
$U$	: kecepatan aliran udara	(m/s)
$D$	: diameter sudu turbin angin Savonius	(m)
$e$	: diameter poros	(m)
$d$	: diameter silinder pengganggu	(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 penghalang terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin	(m)

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

- Membuat dimensi primer masing-masing parameter

Tabel 3. 2 Dimensi Parameter CM

Parameter	T	$\rho$	$\mu$	U	D	e	S	d	H	n	y	h
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^2}$	$\frac{M}{L}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	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 =  $12 - 3 = 9$  grup tanpa dimensi. Grup tanpa dimensi tersebut antara lain :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- $\pi_1$  : *Coefficient of Moment*
- $\pi_2$  : Bilangan Reynolds
- $\pi_3$  : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_4$  : rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_5$  : rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_6$  : rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_7$  : rasio kecepatan tip
- $\pi_8$  : rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_9$  : rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter sudu turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah :

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

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

Pada penelitian ini,  $\frac{S}{D}, \frac{e}{D}, \frac{y}{D}, \frac{t}{D}$ , dan  $\frac{H}{D}$  merupakan variabel tetap. Sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}$  dan  $\frac{n D}{U}$  merupakan variabel yang divariasikan agar dapat diketahui pengaruhnya terhadap *coefficient of moment* turbin angin Savonius, sehingga persamannya dapat ditulis sebagai berikut:

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

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

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

Atau dapat juga ditulis menjadi :

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

### 3.4 Peralatan Penelitian

#### 3.4.1 Axial Fan

Pada penelitian ini, sumber fluida angin yang digunakan berasal dari *Axial Fan*. *Axial Fan* yang

digunakan adalah CKE SPV-18. Gambar 3.3 merupakan gambar dari *Axial Fan* yang digunakan pada penelitian kali ini.



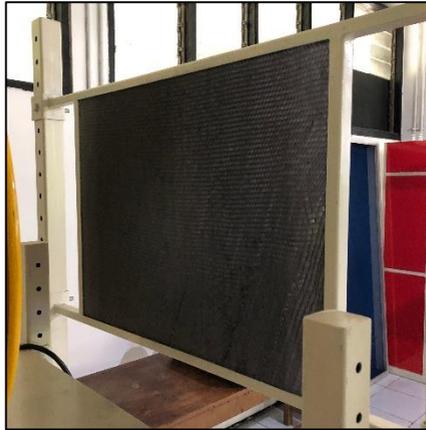
Gambar 3. 3 *Axial Fan* CKESPV-18

Tabel 3. 3 Spesifikasi *Axial Fan* CKE SPV-18

Power	1800W
RPM	2800
Voltage	220 – 240 V
Diameter	450 mm
Phase	1

### 3.4.2 Honeycomb

Pada penelitian ini, digunakan *honeycomb* untuk menyeragamkan fluida angin yang bergerak menuju turbin angin Savonius. *Honeycomb* ini diletakkan di antara *Axial Fan* dengan turbin angin Savonius. Gambar 3.4 merupakan gambar *honeycomb* yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 4 *Honeycomb*

Tabel 3. 4 Spesifikasi *Honeycomb*

Panjang sisi <i>frame</i>	508 mm
Panjang sisi <i>honeycomb</i>	468 mm
Tebal <i>frame</i>	50 mm
Tebal <i>honeycomb</i>	20 mm
Lebar sisi <i>frame</i>	490 mm
Lebar sisi <i>honeycomb</i>	460 mm
<i>Meshing size</i>	0,0248 lubang/mm <sup>2</sup>

### 3.4.3 Penyangga Turbin Savonius

Dalam penelitian kali ini, turbin angin savonius ditopang oleh suatu penyangga. Berikut adalah gambar dari penyangga turbin Savonius. Gambar 3.5 dibawah ini merupakan gambar penyangga turbin savonius pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 5 Penyangga Turbin Savonius

#### **3.4.4 Turbin Savonius**

Pada Penelitian kali ini turbin angin yang digunakan adalah turbin angin dengan tipe turbin Savonius. Gambar 3.6 merupakan gambar turbin angin savonius yang digunakan pada penelitian kali ini.



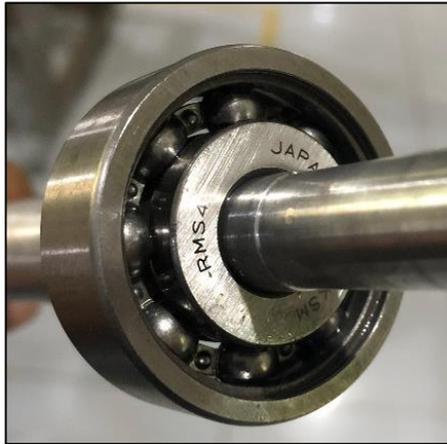
Gambar 3. 6 Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

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

### 3.4.5 Bearing

*Bearing* berfungsi untuk menjaga agar poros turbin tidak langsung bergesekan dengan dudukan penyangga. Sehingga dapat mengurangi gesekan. Pada penelitian ini digunakan bearing merek KSM tipe RMS 4 *Ball Bearing*. Gambar 3.7 merupakan gambar *ball bearing* yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3. 7 *Ball Bearing*

Tabel 3. 6 Spesifikasi *Ball Bearing*

Diameter Dalam	12,7 mm
Diameter Luar	41,275 mm
Tebal	15,875 mm

### 3.4.6 Silinder Pengganggu

Pada penelitian kali ini, digunakan silinder pengganggu untuk mengurangi gaya drag yang diterima oleh sudu turbin angin sehingga torsi yang dihasilkan semakin besar dan diharapkan dapat menghasilkan daya

yang lebih besar. 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; dan 1,0. Gambar 3.8 merupakan gambar silinder pengganggu.



Gambar 3. 8 Silinder Pengganggu

### 3.4.7 Alat Ukur

#### a. Anemometer

Pada penelitian kali ini, anemometer digunakan sebagai alat ukur yang berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer model Omega HHF141 seperti pada gambar 3.9 dengan *high resolution* sebesar 0,01 m/s.



Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 7 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	

b. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer* OMEGA HHT12 akurasi pembacaan sebesar 0,01%. Tachometer yang digunakan penelitian kali ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12

Tabel 3. 8 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12

<i>Range</i>	5 to 99.999 rpm
<i>Accuracy</i>	0,01 % of reading or $\pm 1$ digit
<i>Resolution</i>	0,001 to 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

c. Voltage Regulator

*Voltage Regulator* merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar dari fan. *Voltage*

*regulator* yang digunakan adalah Ling Bridge TDGC 2J-3 untuk mengatur kecepatan fan, perlu mengubah *voltage output* dari regulator. *Voltage regulator* tersebut dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Powell voltage regulator

Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage Regulator TDGC<sub>2</sub>

Capacity	Phase	Input	Ouput	Frekuensi
3 KVa	$\Phi 1$	220 V	0-250 V	50-60 Hz

d. *Torque meter* Statis

*Torque meter* merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi dari suatu objek. *Torque meter* yang digunakan dalam penelitian ini adalah torque meter Lutron model TQ-8800 dengan *high resolution* sebesar 0,1 Newton-cm. Gambar 3.12 merupakan gambar *Torque meter*.



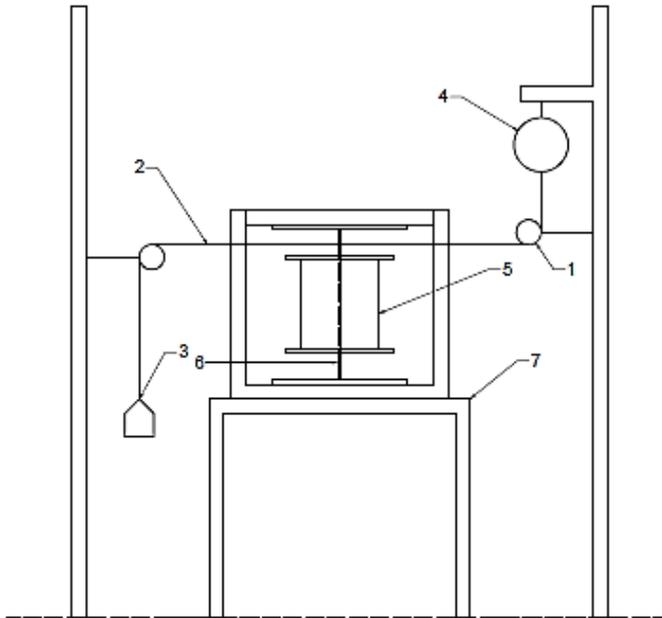
Gambar 3. 12 *Torque meter* Lutron model TQ-8800

Tabel 3. 10 Spesifikasi *Torque meter* Lutron model TQ-8800

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

e. *Brake Dynamometer*

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



Gambar 3. 13 Gambar skema *brake dynamometer*

Keterangan :

1. *Pulley*
2. Benang nilon
3. Pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius

## 7. Penyangga turbin angin Savonius

Gambar 3.13 merupakan gambar skema dari *brake dynamometer*. Prosedur penggunaan *Brake Dynamometer* adalah pertama benang nilon dipasang melingkari poros turbin angin Savonius. Benang nylon yang digunakan adalah benang nylon merek Lazer. Pada saat turbin angin berputar, pemberat pemberat akan diletakkan pada benang untuk menurunkan putaran porosnya. Saat menambahkan akan dicatat putaran porosnya dan pembacaan pada *spring balance*. Penambahan pemberat akan terus dilakukan hingga turbin angin berhenti berputar. Spesifikasi benang dan *spring balance* adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 14 Neraca pegas NAGATA tipe C-5

Tabel 3. 11 Spesifikasi Neraca pegas NAGATA tipe C-5

Capacity	10 kg
Graduation	50 gram
Features	High impact ABS body
Platter Size	Pan size : Ø 290 mm Alum. Round pan Dual display chart, Dial 187 mm



Gambar 3. 15 Pemberat

### 3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam pengambilan data torsi dinamis dan torsi statis pada penelitian ini adalah sebagai berikut

#### 3.5.1 Torsi Dinamis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.

3. Melakukan pengukuran temperatur dengan tachometer.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu 97000.
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros turbin tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *tachometer*.
7. Mengukur torsi dinamis tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *brake dynamometer*.
8. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu untuk sebesar 3,1 gr
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
10. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 – 10 hingga turbin Savonius berhenti berputar atau sampai mendapatkan *tip speed ratio* = 0.
12. Mengulangi langkah 5 – 11 dengan mengubah bilangan Reynolds = 136000
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur diameter turbin Savonius dan diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) sebesar 0,1 dan ( $S/D$ ) sebesar 1,8.

14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada bilangan Reynolds 97000.
15. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *tachometer*.
16. Mengukur torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan *brake dynamometer*.
17. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu sebesar 3,1 gram. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
18. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
19. Mengulangi langkah 17 – 19 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
20. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah bilangan Reynolds = 136000
21. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi  $d/D$  menjadi 0,1 ; 0,2 ; 0,3; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1.0.
22. Mematikan *axial fan*.
23. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran ( $n$ ) terhadap  $\lambda$  serta bilangan Reynolds, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ .

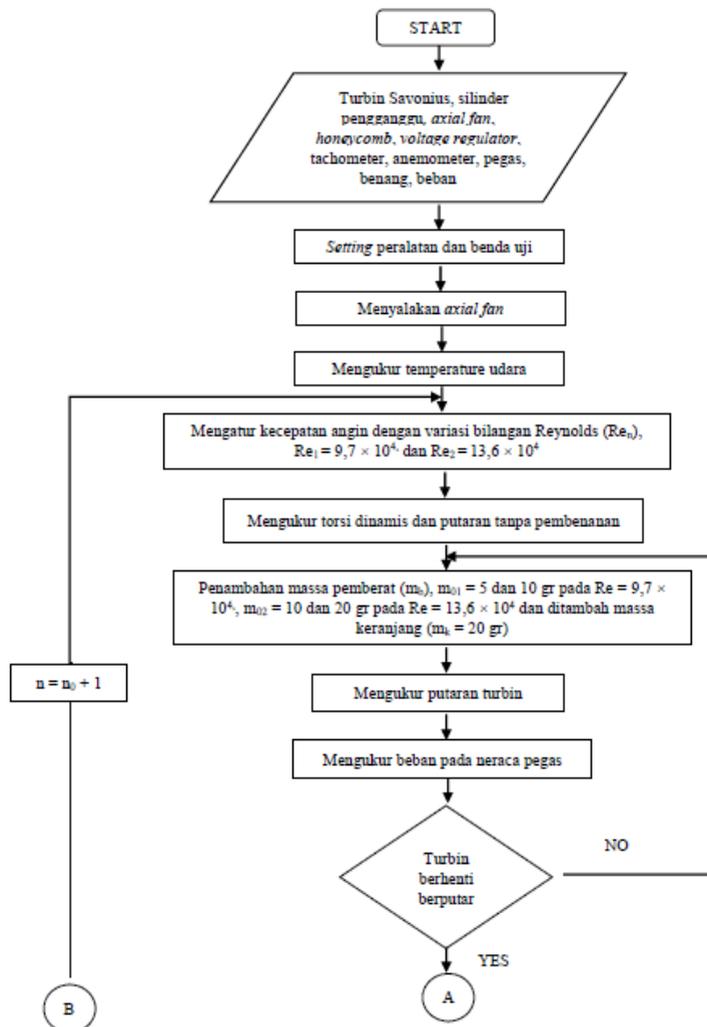
### 3.5.2 Torsi Statis

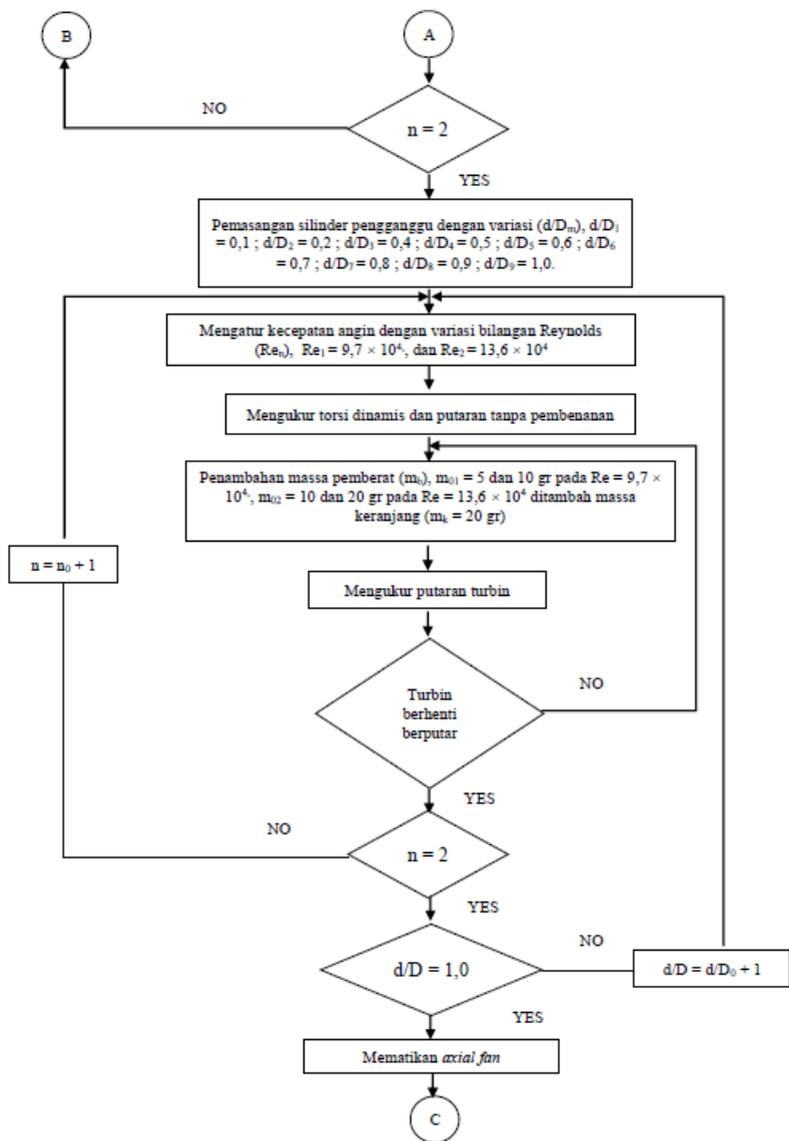
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan menggunakan *voltage regulator* sehingga mendapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu 97000.
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angina yang *steady*, kemudian mengukur torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan *torque meter*.
7. Mematikan *axial fan*.
8. Mengulangi langkah 3 - 7 dengan variasi sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
9. Mengulangi langkah 3 - 8 dengan mengubah bilangan *Reynolds* menjadi 136000
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur diameter turbin Savoius dan diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) sebesar 0,5 dan ( $S/D$ ) sebesar 1,8.
11. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .

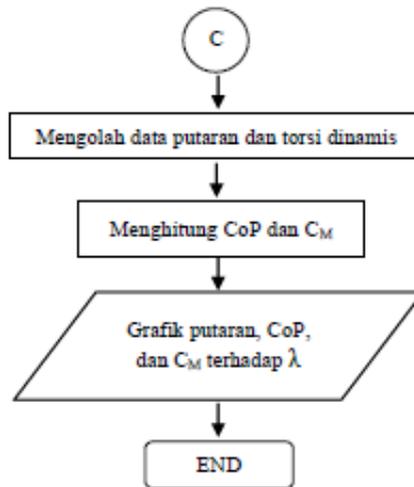
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds = 97000.
13. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.
14. Mematikan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 11 - 14 dengan mengubah sudut tubin angin Savonius ( $\theta$ ) menjadi  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  (kenaikan  $10^\circ$  tiap pengamatan).
16. Mengulangi langkah 11 - 15 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi 136000.
17. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting* grafik perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\theta$ .

### 3.6 Flowchart Penelitian

#### 3.6.1 Pengukuran Torsi Dinamis

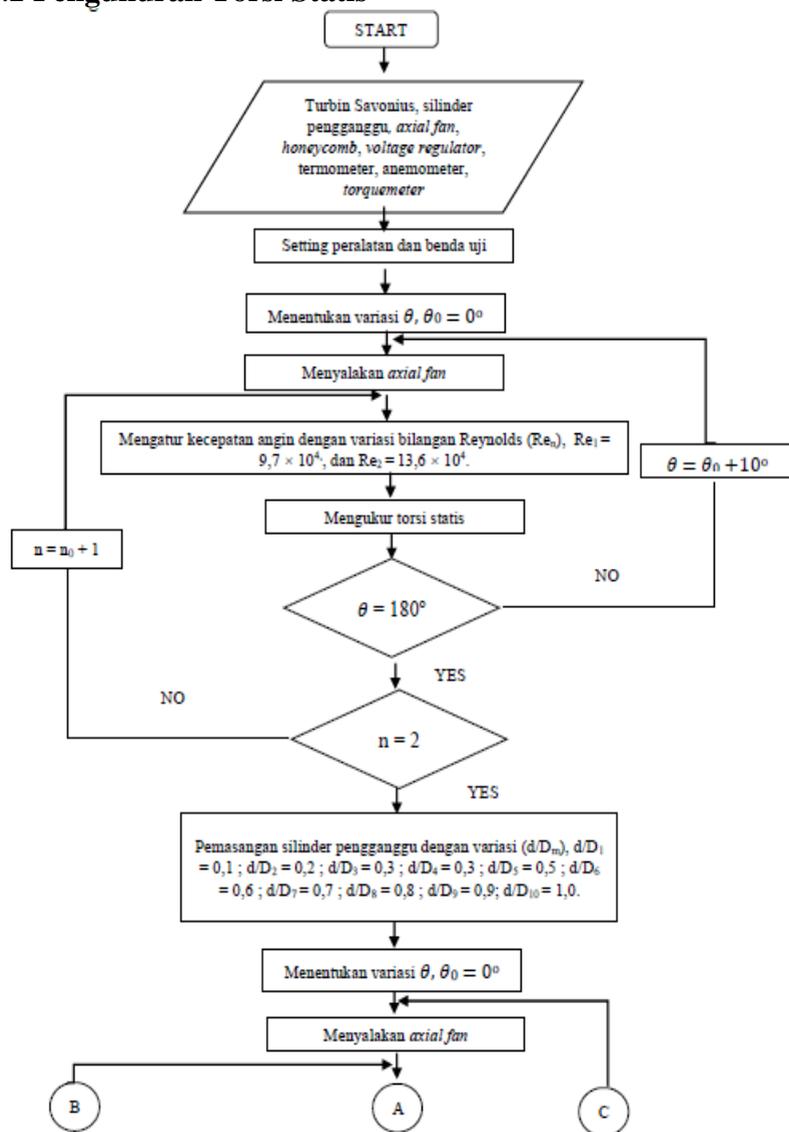


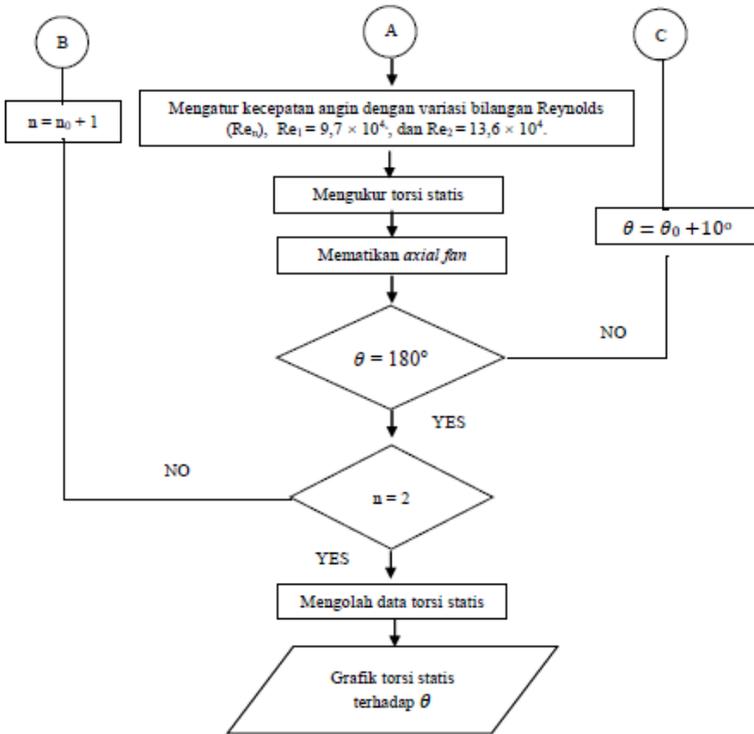




Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis

### 3.6.2 Pengukuran Torsi Statis





Gambar 3. 17 Flowchart Pengukuran Torsi Statis

### 3.7 Perhitungan *Uncertainty*

Dilakukan perhitungan *uncertainty* yang bertujuan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan *uncertainty*, diambil dari data *coefficient of power* di titik maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{\omega} = \pm \frac{0,1}{215,9} = \pm 4,63 \times 10^{-4}$$

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

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

*Uncertainty* pada pembacaan kecepatan (U)

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

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

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

$$u_\lambda = \pm \{ (4,63 \times 10^{-4})^2 + (3,23 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

Berikut nilai dari *uncertainty* yang didapatkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada CoP maksimum turbin angin Savonius dengan penempatan silinder pada ukuran diameter  $d/D = 0,5$  dan jarak  $S/D = 1,8$  sebagai berikut.

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<b><i>Coefficient of Power (CoP)</i></b>	4,270 %
<b><i>Coefficient of Moment (C<sub>M</sub>)</i></b>	4,287 %
<b><i>Tip Speed Ratio (λ)</i></b>	0,383%
<b><i>Torsi Dinamis (T<sub>D</sub>)</i></b>	4,208 %
<b><i>Reynolds Number (Re)</i></b>	0,261 %

### 3.8 Hasil yang Diperoleh

Pada penelitian kali ini, hasil yang akan diperoleh adalah :

1. Grafik putaran ( $n$  dan  $n_0$ ) sebagai fungsi bilangan *Reynolds*
2. Grafik torsi statis ( $T_s$  dan  $T_{s_0}$ ) sebagai fungsi sudut ( $\theta$ )
3. Grafik *Coefficient of Power* ( $CoP$  dan  $CoP_0$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ )
4. Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_m$  dan  $C_{m_0}$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ )

## BAB IV

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Contoh Perhitungan

Pada penelitian kali ini dilakukan pengambilan data menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan asumsi aliran *steady* dan *incompressible* dengan properties fluida sebagai berikut:

- Tekanan absolut udara dalam keadaan standart ( $P_{std}$ ) = 1,01325 N/m<sup>2</sup>.
- Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_{std}$ ) = 288,2 K.
- Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_{std}$ ) = 1,225 Kg/m<sup>3</sup>.

##### 4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

- Massa Jenis Udara ( $\rho$ )

Berdasarkan persamaan gas ideal didapatkan:

$$PV = nRT \dots\dots\dots (4.1)$$

Kedua ruas dibagi dengan  $m$  maka persamaan 4.1 menjadi:

$$P = \rho RT \dots\dots\dots (4.2)$$

dengan:

$\rho$  : massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

P : tekanan udara = 101325 Pa

R : konstanta spesifik gas = 287,058 J/kg.K

T : temperatur udara = 301,5 K

Maka:

$$\rho = \frac{101325 \text{ Pa}}{287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} 301,5 \text{ K}} = 1,17 \text{ kg/m}^3 \dots (4.3)$$

- Viskositas Udara ( $\mu$ )

Untuk perhitungan viskositas absolut udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu:

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

dimana untuk udara :

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}}$$

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

dengan menggunakan  $T = T_{\text{uji}} = 301,5 \text{ K}$ , kemudian mensubstitusikan nilai b, s, dan T pada persamaan 4.4, maka diperoleh nilai viskositas udara sebagai berikut :

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}} \times (301,5)^{3/2}}{(110,4 + 301,5)\text{K}}$$

$$\mu = 1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

- Kecepatan Aliran Udara ( $V$ )

Kecepatan aliran udara yang digunakan yaitu 5 m/s dan 7m/s untuk variasi bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  maka didapatkan

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

dimana:

L : Panjang karakteristik turbin angin Savonius = 309 mm

maka didapatkan Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5 \text{ m/s} \cdot 0,309 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}}$$

$$Re = 97185 \approx 9,7 \times 10^4$$

#### 4.1.2 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Berdasarkan persamaan 2.12 untuk mendapatkan  $\lambda$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah sebagai berikut :

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

dimana:

$$\omega \quad : \text{kecepatan radial turbin} = \frac{2\pi n}{60}$$

$$n \quad : \text{kecepatan putaran turbin (rpm)}$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times 186,4 \text{ rpm}}{60} = 19,509 \text{ rad/s}$$

$$R \quad : \text{jari - jari sudu turbin angin Savonius} = \frac{L}{2} = \frac{(2D - e - 2x)}{2}$$

$$R = \frac{(2 \times 0,1671) - 0,019 - (2 \times 0,00295)}{2} m$$

$$R = 0,1546 \text{ m}$$

$$V \quad : \text{kecepatan aliran udara pada Reynolds Number 97000} \\ \text{adalah 5 m/s}$$

maka diperoleh nilai *Tip Speed Ratio*:

$$\lambda = \frac{(19,509 \text{ rad/s}) \times (0,1546 \text{ m})}{5 \text{ m/s}} = 0,603$$

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

Berdasarkan persamaan 2.11 didapatkan bahwa:

$$CoP = \frac{|m-s| g r \pi n}{15 \rho A V^3} \dots\dots\dots (4.7)$$

dimana:

A : luas penampang turbin yang ditumbuk oleh angin(m<sup>2</sup>)

$$A = L \times H = 0,309 \text{ m} \times 0,298 \text{ m}$$

$$A = 0,092 \text{ m}^2$$

r : jari-jari poros turbin yang menerima beban (m)

adalah 0,0125 m

s : gaya yang terbaca pada neraca pegas (g)

m : massa pemberat (g)

$\rho$  : massa jenis udara pada saat pengujian (kg/m<sup>3</sup>)

g : percepatan gravitasi bumi (m/s<sup>2</sup>)

n : jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)  
pada bilangan Reynolds  $9,6 \times 10^4$

sehingga didapatkan nilai CoP:

$$CoP = \frac{\left| \frac{33,9 - 460}{1000} \right| \text{ kg} \cdot (0,0125 \text{ m}) \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot \pi \cdot 186,4 \text{ rpm}}{15 \cdot \left( 1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot (0,092 \text{ m}^2) \cdot (5 \text{ m/s})^3}$$

$$CoP = 0,151$$

#### 4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Moment* (CM)

Berdasarkan perumusan *Coefficient of Moment* didapatkan bahwa:

$$C_M = \frac{|m-s|g}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \dots\dots\dots (4.8)$$

sehingga didapatkan nilai CM:

$$CM = \frac{\left| \frac{26 - 190}{1000} \right| \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{\frac{1}{2} \cdot \left( 1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot (5 \text{ m/s})^2}$$

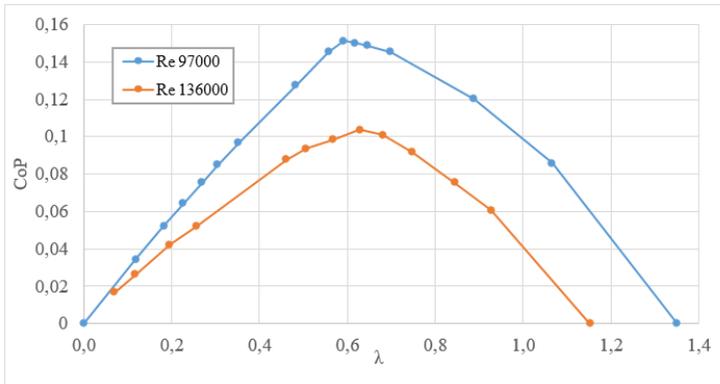
$$CM = 0,107$$

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

Analisa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dilakukan untuk membandingkan kondisi awal dari performa turbin angin Savonius tanpa pengganggu dengan kondisi performa setelah turbin angin Savonius ditambahkan silinder pengganggu. Analisa ini dilakukan dengan kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Analisa yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR dan torsi statis yang dihasilkan turbin.

### **4.2.1 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu**

Didapat data berupa nilai putaran terhadap *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) pada masing-masing pengujian untuk bilangan Reynolds  $9,6 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Daya *output* dari turbin angin Savonius ini berasal dari perkalian torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin angin Savonius. Pengukuran torsi dinamis dihitung menggunakan *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin dihasilkan dari putaran turbin yang diukur dengan *tachometer*. Dalam penggunaannya sinar sensor dari tachometer diarahkan pada salah satu sisi sudu turbin yang sebelumnya telah diberi *silver scotlight*. Kemudian nilai putaran akan terbaca pada layar dari *tachometer*. Data hasil pengukuran putaran turbin disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Tanpa Silinder Pengganggu

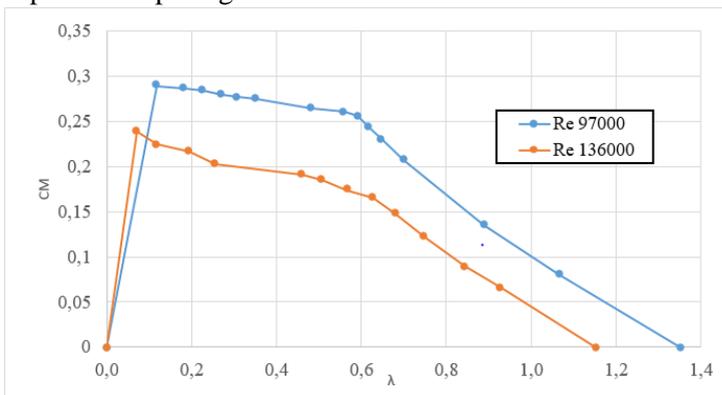
Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR, sehingga puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai maksimum dari *Coefficient of Power* ( $CoP_0$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan nilai  $CoP_0$  maksimum sebesar 0,1515 atau 15,15% pada  $TSR = 0,591$ . Lalu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan nilai  $CoP_0$  maksimum sebesar 0,104 atau 10,4% pada  $TSR = 0,628$ . Dapat dilihat dari kedua grafik tersebut bahwa nilai  $CoP_0$  maksimum tertinggi terjadi pada  $Re\ 9,7 \times 10^4$ .

Dari *trendline* grafik yang dibuat dapat dilihat bahwa nilai  $CoP_0$  pada  $Re\ 9,7 \times 10^4$  terhadap  $13,6 \times 10^4$  mengalami penurunan nilai, hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai  $Re$  mempengaruhi nilai  $CoP$  turbin angin Savonius. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan bilangan Reynolds tidak meningkatkan nilai  $CoP$ . Nilai  $CoP$  Turbin angin Savonius fungsi bilangan Reynolds mempunyai bentuk grafik

parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada bilangan Reynolds tertentu dan akan turun setelah melewati titik optimumnya. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat dan turbin akan membentuk seperti *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna, sehingga daya turbin yang dihasilkan justru akan rendah. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan Reynolds maka nilai CoP tidak selalu semakin tinggi.

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

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan untuk turbin tanpa adanya silinder pengganggu, didapatkan data berupa nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) pada  $Re\ 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Grafik *Coefficient of Moment* ( $CM_0$ ) Terhadap *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Tanpa Silinder Pengganggu

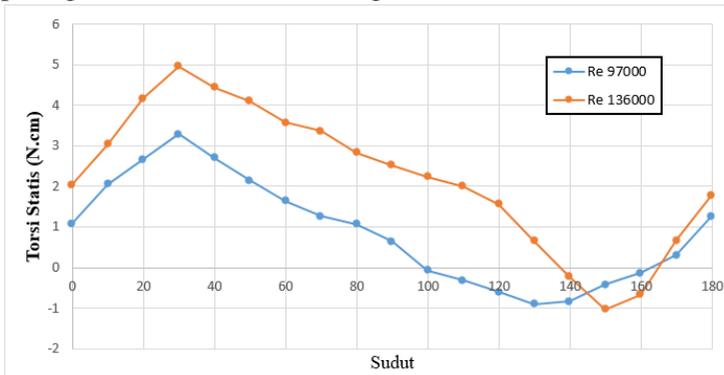
Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa *trendline* naik sampai titik maksimum dari *coefficient of moment* pada *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) optimum. Selanjutnya *trendline* akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya nilai *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Untuk bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  nilai *coefficient of moment* maksimum sebesar 0,289 pada TSR 0,18. Untuk bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  nilai *coefficient of moment* maksimum sebesar 0,239 pada TSR 0,07.

Dari hasil tersebut maka diketahui bahwa peningkatan bilangan Reynolds mempengaruhi peningkatan nilai putaran turbin angin Savonius yang dihasilkan pada  $\lambda$  yang konstan. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan kecepatan dari aliran fluida yang terjadi seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds. Kecepatan aliran fluida berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara sisi *advancing blade* dan *returning blade*. Dimana adanya peningkatan selisih gaya *drag* ini yang akan mempengaruhi putaran dari turbin. Ketika selisih gaya *drag* semakin besar maka putaran yang dihasilkan akan semakin besar pula.

Secara garis besar dapat dilihat pada *trendline*  $C_{m0}$  turun seiring bertambahnya nilai *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Hal ini dikarenakan semakin besar nilai TSR semakin kecil massa yang diberikan pada brake *dynamometer* yang akan berpengaruh pada nilai  $s$  yang terbaca pada neraca pegas. Nilai  $s$  akan berpengaruh pada nilai torsi dinamis dari turbin saat berputar. Semakin besar massa pemberat maka semakin besar nilai  $s$  pada neraca pegas. Nilai torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai  $C_{m0}$ , semakin kecil massa pemberat maka semakin meningkat *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Sehingga hal ini membuat *trendline* dari grafik  $C_{m0}$  ini turun seiring naiknya *tip speed ratio* ( $\lambda$ ). Nilai  $C_{m0}$  akan naik seiring meningkatnya nilai Reynolds *number* sampai nilai maksimumnya dan akan turun setelah melewati nilai maksimum.

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

Pada eksperimen ini didapatkan nilai torsi statis terhadap fungsi sudut turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada  $Re$   $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.3 dalam bentuk grafik.



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

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah sinusoidal pada kedua bilangan Reynolds. Terjadi peningkatan nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ . Lalu nilai torsi statis mengalami penurunan dari sudut  $30^\circ$  hingga sudut  $130^\circ$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan dari sudut  $30^\circ$  sampai sudut  $150^\circ$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$ . Lalu nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds tersebut mengalami kenaikan hingga sudut  $180^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar  $3,28 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$  dan nilai torsi statis minimum sebesar  $-0,9 \text{ N.cm}$  pada sudut  $130^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar  $4,96$

N.cm pada sudut  $30^\circ$  dan nilai torsi statis minimum sebesar  $-1,04$  N.cm pada sudut  $150^\circ$ . Torsi statis negatif pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  berada pada sudut  $100^\circ$  sampai  $160^\circ$ , pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  berada pada sudut  $140^\circ$  sampai  $160^\circ$ . Torsi statis maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , hal ini disebabkan oleh bilangan Reynolds yang semakin besar menjadikan kecepatan dan gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self starting* atau bahkan berputar kearah yang tidak seharusnya. Hal ini menunjukkan bahwa turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut  $30^\circ$  untuk kedua bilangan Reynolds dan untuk torsi negatif terbesar pada sudut  $130^\circ$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $150^\circ$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$ . Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut  $30^\circ$  sampai dengan sudut  $130^\circ$  dan  $150^\circ$  terjadi dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin membuat luas permukaan yang diterpa angin semakin kecil yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin yang membuat luas permukaan yang diterpa angin semakin besar sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Terjadinya peningkatan nilai torsi statis disebabkan oleh gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Terjadinya torsi *negative* terjadi pada sudut  $100^\circ$  sampai dengan  $160^\circ$  pada  $Re$  97000 dan pada sudut  $140^\circ$  sampai dengan  $160^\circ$  pada  $Re$  136000. Hal ini disebabkan oleh gaya *drag* pada *advancing blade* lebih kecil dibandingkan gaya *drag* yang terjadi di *returning blade*, yang terjadi karena luas permukaan pada *advancing blade* yang semakin kecil

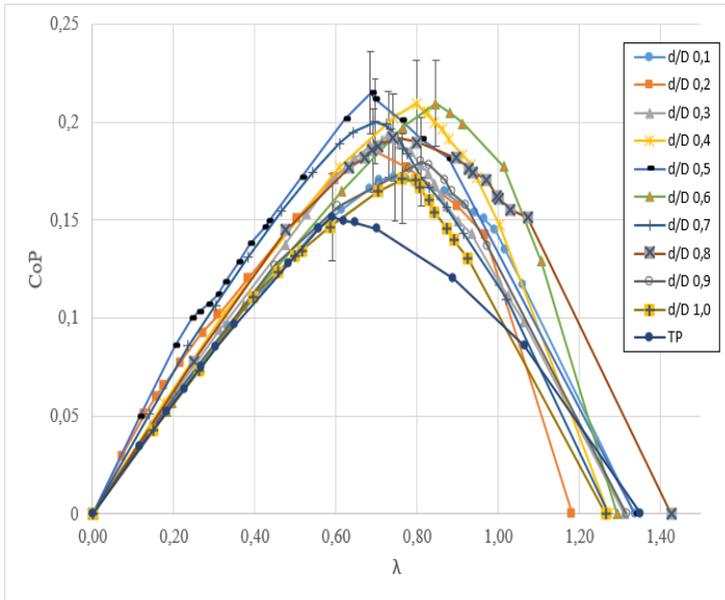
menjadikan area yang diterpa udara akan semakin sedikit, ditambahkan dengan *streamline* udara yang seharusnya memberikan momentum ke *advancing blade* semakin berkurang karena terganggu oleh *streamline* udara yang dihasilkan setelah silinder pengganggu. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut  $30^\circ$  merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis maksimum.

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

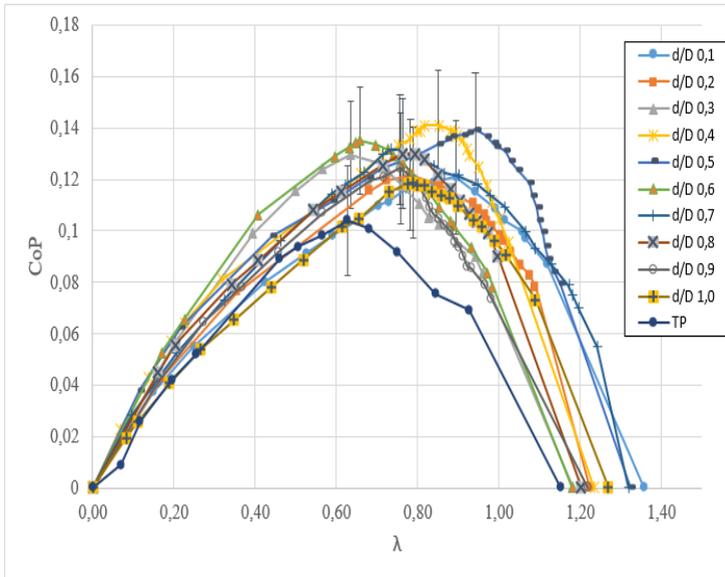
Analisa ini bertujuan untuk mengetahui kondisi performa turbin angin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu. Analisa yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR dan torsi statis yang dihasilkan turbin.

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

Analisa nilai CoP terhadap TSR ini dilakukan dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  serta variasi ukuran diameter silinder pengganggu  $d/D$  antara 0,1 sampai 1,0. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5 dalam bentuk grafik.



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



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

Pada gambar 4.4 dan 4.5 dapat dilihat grafik CoP terhadap TSR turbin di setiap variasi  $d/D$  memiliki *trendline* parabolik dimana nilai CoP akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR sehingga setiap puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai maksimum dari CoP turbin angin Savonius. Berikut merupakan data CoP maksimum dari setiap variasi  $d/D$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  yang bisa dilihat pada tabel 4.1.

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

d/D	Tanpa Silinder				Dengan Silinder Pengganggu					
	Re 97000		Re 136000		Re 97000			Re 136000		
	CoP max	$\lambda$	CoP max	$\lambda$	CoP max	$\lambda$	Peningkatan (%)	CoP max	$\lambda$	Peningkatan (%)
0,1	0,1515	0,591	0,104	0,028	0,172	0,745	13,53	0,12	0,893	15,38
0,2					0,185	0,692	22,11	0,121	0,781	16,35
0,3					0,193	0,729	27,39	0,129	0,634	24,04
0,4					0,209	0,798	37,95	0,14	0,85	34,62
0,5					0,214	0,684	41,25	0,139	0,941	33,65
0,6					0,209	0,845	37,95	0,135	0,657	29,81
0,7					0,2	0,696	32,01	0,131	0,756	25,96
0,8					0,192	0,741	26,73	0,13	0,762	25,00
0,9					0,179	0,81	18,15	0,124	0,757	19,23
1					0,171	0,764	12,87	0,118	0,789	13,46

Pada tabel 4.1 terlihat bahwa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds memiliki nilai CoP yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di seluruh variasi d/D sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif meningkatkan CoP turbin. Dari seluruh variasi d/D, nilai CoP maksimum tertinggi terjadi di  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada variasi d/D = 0,5 yaitu sebesar 0,214 atau 21,4% pada TSR 0,684. Terjadi kenaikan CoP maksimal pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  sebesar 41,3% jika dibandingkan dengan performa turbin angin tanpa silinder pengganggu. Pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  juga terjadi peningkatan performa ketika diberikan silinder pengganggu dengan CoP paling tinggi pada variasi d/D = 0,4 yaitu sebesar 0,140 atau sebesar 14,09 % pada TSR 0,850. Terjadi kenaikan CoP maksimal pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  sebesar 34,6% jika dibandingkan dengan performa turbin angin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini sesuai dengan hipotesa awal bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade*

turbin angin Savonius dapat menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat yang menyebabkan daya turbin meningkat. Pernyataan tersebut didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi pada tahun 2002 dimana pemberian silinder pengganggu di depan sebuah silinder dapat menurunkan gaya drag yang diterima oleh silinder tersebut. Pada penelitian kali ini penurunan gaya drag pada *returning blade* menaikkan performa turbin angin Savonius dan didapatkan d/D paling optimal pada kedua variasi *Reynolds Number*. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal dimana d/D terlalu kecil kurang efektif dalam mengurangi momentum angin yang menerpa bagian *returning blade* dan d/D terlalu besar dapat mengganggu aliran menuju *advancing blade* karena *streamline* yang dihasilkan oleh silinder pengganggu menghalangi *streamline* yang seharusnya memberikan momentum mutlak kearah *advancing blade*.

Tabel 4. 2 Tabel *uncertainty* pada CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

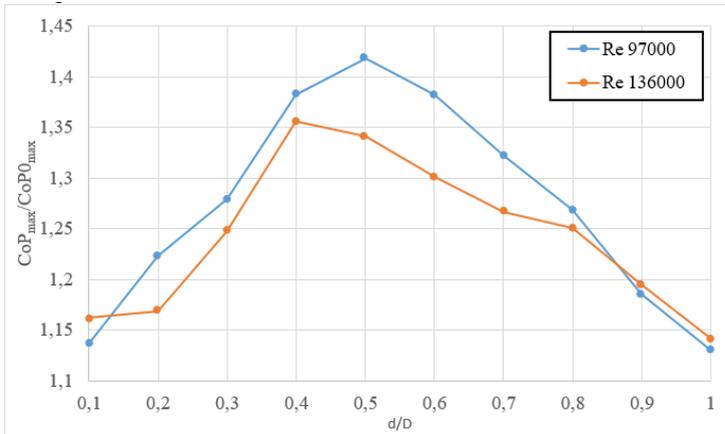
d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CoPmax	Uncertainty (%)	Range	CoPmax	Uncertainty (%)	Range
0,1	0,172	4,522	0,164 - 0,180	0,12	4,375	0,115 - 0,125
0,2	0,185	4,291	0,177 - 0,193	0,121	4,314	0,116 - 0,126
0,3	0,193	4,410	0,184 - 0,202	0,129	4,169	0,124 - 0,134
0,4	0,209	4,411	0,200 - 0,218	0,14	4,256	0,134 - 0,146
0,5	0,214	4,220	0,205 - 0,223	0,139	4,349	0,133 - 0,145
0,6	0,209	4,390	0,200 - 0,218	0,135	4,176	0,129 - 0,141
0,7	0,2	4,346	0,191 - 0,209	0,131	4,257	0,125 - 0,137
0,8	0,192	4,420	0,184 - 0,200	0,13	4,249	0,124 - 0,136
0,9	0,179	4,528	0,171 - 0,187	0,124	4,289	0,119 - 0,129
1	0,171	4,547	0,163 - 0,179	0,118	4,333	0,113 - 0,123

Pada tabel 4.2 terlihat bahwa nilai CoP turbin angin Savonius memiliki ketidakpastian dalam hasil yang didapatkan dari hasil pengukurannya. Hal tersebut disebabkan oleh

kemampuan dari alat ukur yang menunjang nilai dari CoP tersebut. Setiap nilai CoP yang diukur pada penelitian kali ini memiliki *range* seperti yang ditunjukkan pada tabel diatas. *Range* tersebut merupakan batas toleransi dari ketelitian alat ukur tersebut. Pada gambar 4.4 dan 4.5 yang merupakan perbandingan dari CoP fungsi *tip speed ratio* pada tiap d/D menunjukkan bahwa beberapa variasi d/D tidak memiliki perbedaan nilai CoPmax yang signifikan karena ketidakpastian hasil pengukuran. Maka dari itu, batas CoP yang bersinggungan dapat diambil pada salah satu variasi d/D. Adapun variasi d/D setelah dilakukan eliminasi adalah 0,2; 0,5; dan 0,9 untuk Re 97000 dan 0,2; 0,4; dan 0,9 untuk Re 136000.

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

Dilakukan analisa peningkatan nilai CoP turbin angin Savonius dengan membandingkan nilai CoPmax antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>max</sub>/CoP<sub>0max</sub>) terhadap d/D pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  sehingga dapat dilihat nilai peningkatannya. Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah dalam bentuk grafik.



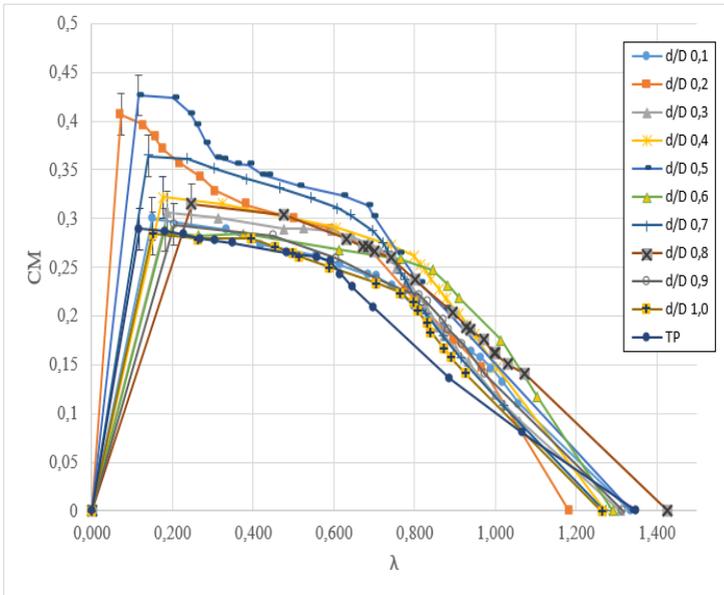
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi diameter  $d/D = 0.1 - 1.0$ .

Dapat dilihat dari gambar 4.6 bahwa kedua grafik tersebut memiliki *trendline* parabolik dimana nilai perbandingan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya ukuran diameter silinder pengganggu sehingga puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai tertinggi dari  $CoP_{max}/CoP_{0max}$ . Pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D = 0,5$  yaitu sebesar 1,4181 yang artinya nilai  $CoP$  turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,1515 menjadi 0,2148 terjadi kenaikan performa sebesar 41,81%. Selanjutnya pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ , nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D = 0,4$  yaitu sebesar 1,3554 yang artinya nilai  $CoP$  turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,1040 menjadi 0,14098 terjadi kenaikan 35,54%.

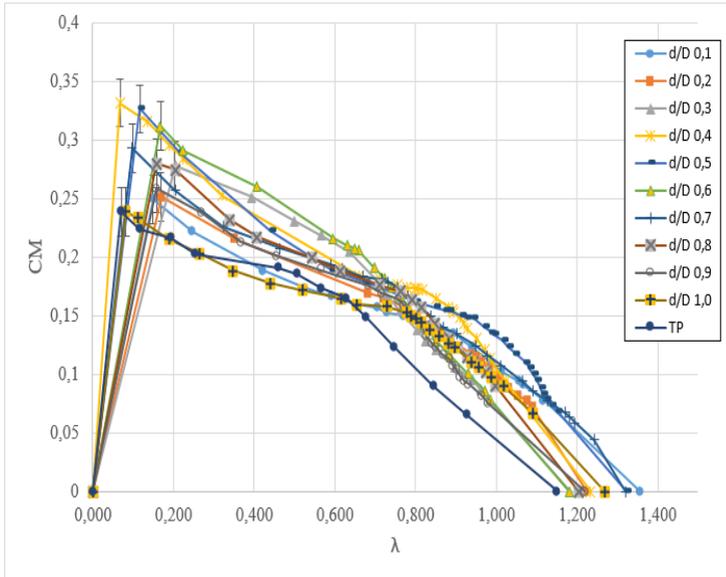
Dari hasil-hasil tersebut didapatkan bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius karena nilai  $CoP_{max}/CoP0_{max} > 1$  di seluruh variasi  $d/D$ . Dapat dikatakan juga bahwa variasi ukuran diameter silinder pengganggu mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dapat menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat yang menyebabkan daya turbin meningkat. Pada penelitian kali ini penurunan gaya drag pada *returning blade* menaikkan performa turbin angin Savonius dan didapatkan  $d/D$  paling optimal pada kedua variasi *Reynolds Number*. Hal ini sesuai dengan hipotesa awal dimana  $d/D$  terlalu kecil kurang efektif dalam mengurangi momentum angin yang menerpa bagian *returning blade* dan  $d/D$  terlalu besar dapat mengganggu aliran menuju *advancing blade* karena *streamline* yang dihasilkan oleh silinder pengganggu menghalangi *streamline* yang seharusnya memberikan momentum mutlak kearah *advancing blade*.

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

Analisa nilai *coefficient of moment* terhadap TSR ini dilakukan dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  dan variasi ukuran silinder pengganggu  $d/D$  antara 0,1 sampai 1,0. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8 dalam bentuk grafik.



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



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

Dari gambar 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa grafik *coefficient of moment* terhadap *tip speed ratio* (TSR) memiliki *trendline* yang cenderung turun hingga mencapai *tip speed ratio* (TSR) maksimum pada nilai *coefficient of moment* minimum. Torsi dinamis maksimal didapat saat turbin angin Savonius akan berhenti berputar, akibatnya disaat tersebut didapatkan nilai *coefficient of moment* maksimum. Berikut merupakan data *coefficient of moment* maksimum dari setiap

variasi  $d/D$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  yang bisa dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 3 Tabel perbandingan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius  $Re = 9,6 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder				Dengan Silinder Pengganggu					
	Re 97000		Re 136000		Re 97000			Re 136000		
	CM <sub>0</sub> max	$\lambda$	CM <sub>0</sub> max	$\lambda$	CM max	$\lambda$	Peningkatan (%)	CM max	$\lambda$	Peningkatan (%)
0,1	0,28	0,591	0,239	0,117	0,300	0,149	7,12	0,249	0,150	4,38
0,2					0,407	0,073	45,34	0,252	0,170	5,30
0,3					0,307	0,188	9,51	0,278	0,204	16,50
0,4					0,322	0,176	14,96	0,332	0,068	38,78
0,5					0,427	0,116	52,35	0,327	0,117	36,71
0,6					0,289	0,182	3,10	0,312	0,169	30,59
0,7					0,364	0,141	30,15	0,293	0,099	22,63
0,8					0,315	0,248	12,39	0,281	0,159	17,40
0,9					0,294	0,204	4,97	0,259	0,159	8,19
1					0,285	0,151	1,64	0,239	0,083	0,09

Berdasarkan tabel 4.2 terlihat bahwa nilai *coefficient of moment* maksimum di setiap variasi  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Dapat dilihat untuk seluruh variasi  $d/D$  pada kedua bilangan Reynolds, nilai CM maksimumnya lebih tinggi daripada nilai  $CM_0$  maksimum sebelum diberikan silinder pengganggu sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* maksimum turbin angin Savonius. Dapat dilihat juga pada tabel diatas, untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  nilai CM maksimum tertinggi terdapat pada  $d/D = 0,5$  yaitu sebesar 0,427 di  $TSR = 0,116$  dengan kenaikan sebesar 52,35% dibandingkan dengan tanpa diberi pengganggu. Lalu untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$  nilai CM maksimum tertinggi terdapat pada  $d/D = 0,4$  yaitu sebesar 0,332 di  $TSR = 0,068$  dengan kenaikan sebesar 38,78% dibandingkan dengan tanpa diberi pengganggu.

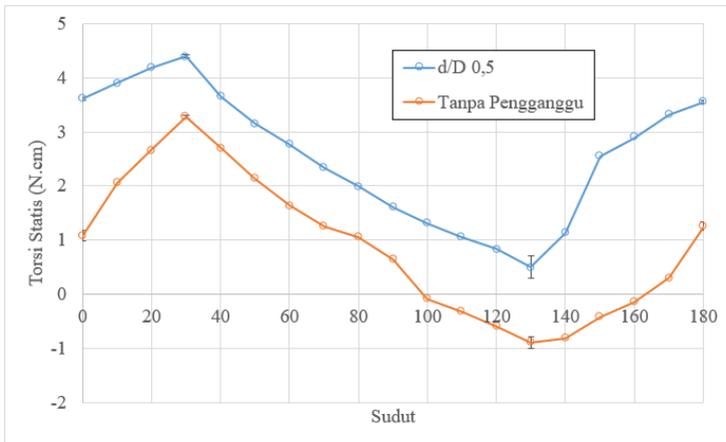
Tabel 4. 4 Tabel *uncertainty* pada CM turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CMmax	Uncertainty (%)	Range	CMmax	Uncertainty (%)	Range
0,1	0,300	4,313	0,287 - 0,313	0,249	4,138	0,239 - 0,260
0,2	0,407	4,199	0,390 - 0,424	0,252	4,142	0,241 - 0,262
0,3	0,307	4,265	0,294 - 0,320	0,278	4,123	0,267 - 0,290
0,4	0,322	4,300	0,308 - 0,336	0,332	4,096	0,318 - 0,345
0,5	0,427	4,183	0,409 - 0,444	0,327	4,090	0,313 - 0,340
0,6	0,289	4,359	0,276 - 0,301	0,312	4,103	0,299 - 0,325
0,7	0,364	4,241	0,349 - 0,380	0,293	4,107	0,281 - 0,305
0,8	0,315	4,281	0,301 - 0,328	0,281	4,115	0,269 - 0,292
0,9	0,294	4,323	0,281 - 0,307	0,259	4,125	0,248 - 0,269
1	0,285	4,327	0,272 - 0,297	0,239	4,138	0,229 - 0,249

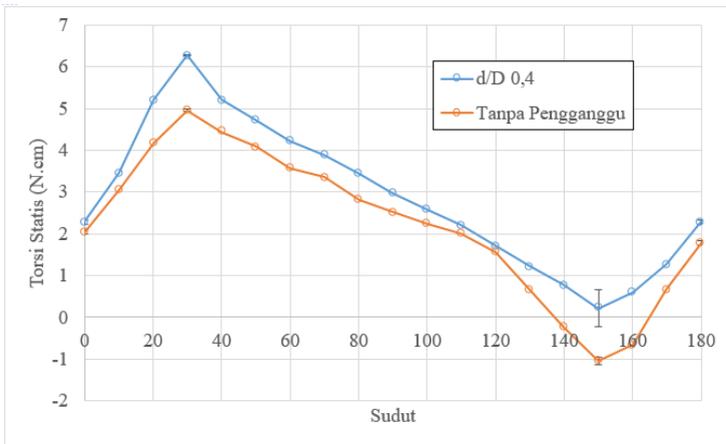
Pada tabel 4.4 terlihat bahwa nilai CM turbin angin Savonius memiliki ketidakpastian dalam hasil yang didapatkan dari hasil pengukurannya. Hal tersebut disebabkan oleh kemampuan dari alat ukur yang menunjang nilai dari CM tersebut. Setiap nilai CM yang diukur pada penelitian kali ini memiliki *range* seperti yang ditunjukkan pada tabel diatas. *Range* tersebut merupakan batas toleransi dari ketelitian alat ukur tersebut. Pada gambar 4.7 dan 4.8 yang merupakan perbandingan dari CM fungsi *tip speed ratio* pada tiap d/D menunjukkan bahwa beberapa variasi d/D tidak memiliki perbedaan nilai CMmax yang signifikan karena ketidakpastian hasil pengukuran. Maka dari itu, batas CM yang bersinggungan dapat diambil pada salah satu variasi d/D. Adapun variasi d/D setelah dilakukan eliminasi adalah 0,2; 0,5; 0,7; dan 0,9 untuk Re 97000 dan 0,2; 0,4; 0,7; dan 0,9 untuk Re 136000.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi statis terhadap fungsi sudut turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di  $S/D = 1,8$  dan diameter  $d/D = 0,5$  pada  $Re 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$  pada  $Re 13,6 \times 10^4$ . Data hasil pengukuran ini akan dibandingkan dengan torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu yang dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10 dalam bentuk grafik.



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  $S/D = 1,8$ ; pada  $Re 9,7 \times 10^4$



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  $S/D = 1,8$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ .

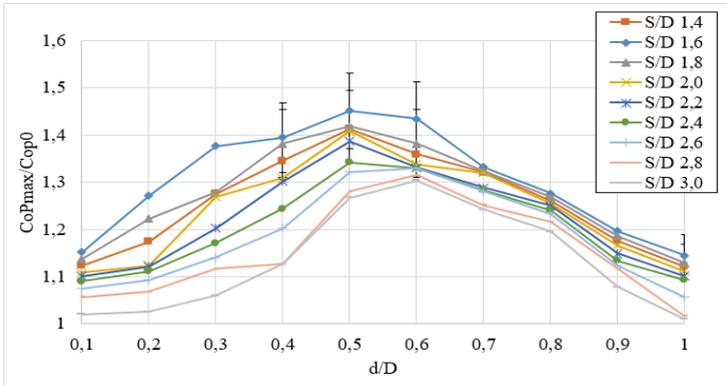
Pada gambar 4.9 dan 4.10 dapat dilihat bahwa *trendline* kedua grafik membentuk grafik sinusoidal. Dari gambar 4.7 (a) dapat dilihat penambahan silinder pengganggu dengan ukuran  $d/D = 0,5$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 3,28 N.cm menjadi 4,4 N.cm pada sudut  $30^\circ$  serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum yaitu dari -0,9 N.cm menjadi 0,5 N.cm pada sudut  $150^\circ$ . Lalu pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  seperti pada gambar 4.7 (b) pemberian silinder pengganggu juga efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 4,96 N.cm menjadi 6,28 N.cm pada sudut  $30^\circ$  serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum dari -1,04 N.cm menjadi 0,22 N.cm pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat garis ketidakpastian pada beberapa titik kritis pada sudut  $30^\circ$  dan  $150^\circ$ .

Dari hasil-hasil tersebut dapat dikatakan bahwa penambahan silinder pengganggu dengan diameter  $d/D = 0,5$  di  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,4$  di  $Re = 13,6 \times 10^4$  efektif dalam

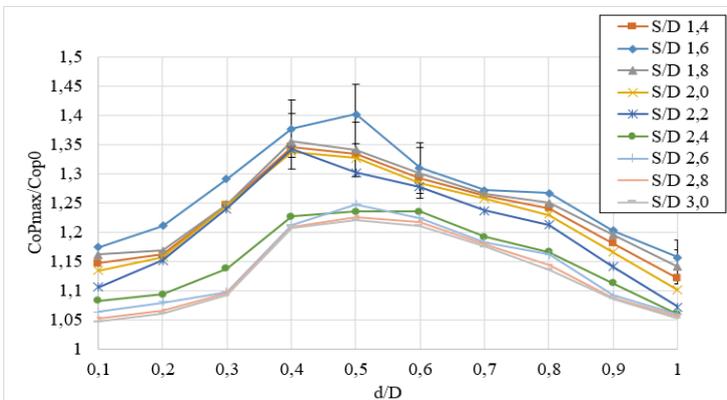
meningkatkan nilai torsi statis. Torsi statis minimum di kedua bilangan Reynolds sudah tidak memiliki nilai negatif yang artinya setelah diberikan silinder pengganggu, turbin angin Savonius memiliki kemampuan *self starting* di setiap sudut. Nilai ketidakpastian pada gambar 4.9 dan 4.10 tidak signifikan kecuali pada sudut  $150^\circ$ . Hal tersebut disebabkan oleh alat ukur yang memiliki ketelitian yang baik dan hasil tersebut jugamenunjukkan bahwa nilai Torsi Statis yang didapatkan sudah akurat.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap  $d/D$  pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000 dengan  $d/D = 0,1-1,0$ . Data berikut didapatkan dari hasil penelitian yang dilakukan saya, Markus Sarsanto, Muhammad Rizky Ramadhan, Muhammad Ghiyats Humam, Lazuardhi Rahim Yamin, Prabasworo Drestanto, Ardy Makarim, Hilda Mailil Haq, dan Asri Melati.



Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan coefficient of power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$  pada  $Re = 97000$



Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan coefficient of power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$  pada  $Re = 136000$

Berdasarkan gambar 4.11 dan 4.12, diketahui bahwa pada setiap bilangan Reynolds mempunyai CoP maksimum pada  $S/D = 1,6$  dengan diameter silinder pengganggu sebesar  $d/D = 0,5$  yang menghasilkan peningkatan sebesar 45,17% pada  $Re = 97000$  dan 40,21% pada  $Re = 136000$ .

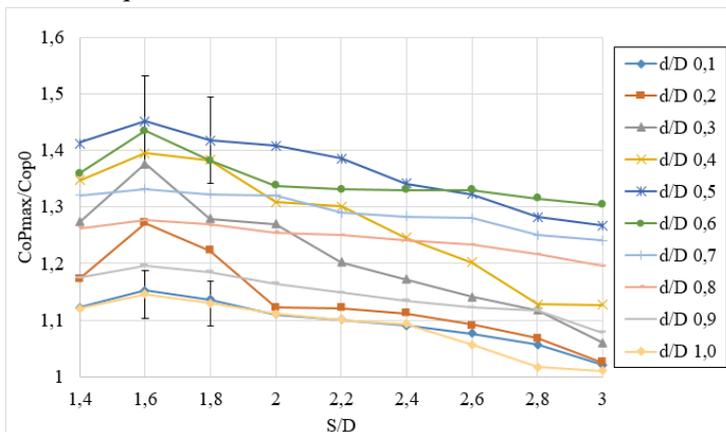
Pada penelitian ini didapati bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang dibuktikan dengan seluruh nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} \geq 1$ . Berdasarkan gambar 4.11 dan 4.12 juga dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak antara *returning blade* terhadap silinder pengganggu ( $S/D$ ) akan berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dari analisis ini didapatkan bahwa penempatan jarak ( $S/D$ ) paling efektif untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah pada  $S/D = 1,6$ .

Hal ini dapat disebabkan karena ketika jarak penempatan silinder pengganggu terlalu dekat kurang efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga kurang efektif menunda titik separasi, selanjutnya ketika diletakkan pada jarak yang tidak terlalu dekat ( $S/D \geq 1,6$ ) efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga lebih efektif menunda titik separasi. Selain itu dengan penempatan silinder pengganggu yang tidak terlalu dekat ( $S/D \geq 1,6$ ) dapat menurunkan tekanan di bagian depan *returning blade* dan meningkatkan selisih tekanan di bagian depan dan belakang *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* juga meningkat dan meningkatkan kinerja turbin angin Savonius. Adapun nilai ketidakpastiaan yang ada pada grafik tersebut memberitahukan bahwa nilai yang didapatkan mempunyai nilai *error* yang mengartikan bahwa data tersebut memiliki ketidakpastian dalam keakuratan. Adapun *error* yang terjadi pada  $Re 97000$  memiliki rata – rata *error*  $\pm 7\%$  dan  $Re 136000$  memiliki rata

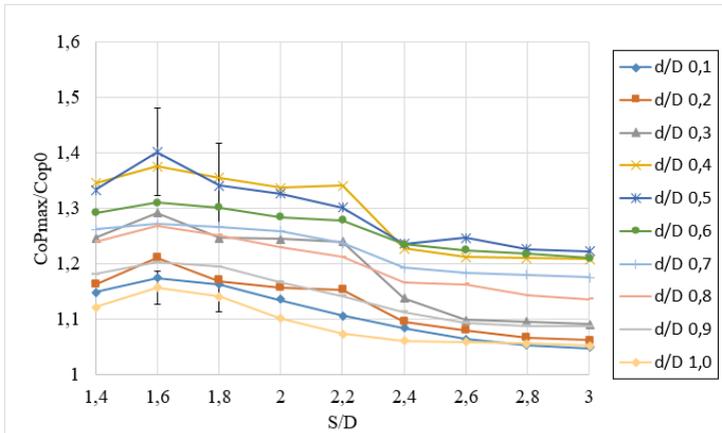
– rata *error* +/- 5%. Hal tersebut mengartikan juga bahwa beberapa hasil perbandingan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  dengan variasi S/D dan d/D tidak signifikan perbedaannya.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap S/D pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000 dengan d/D = 0,1-1,0. Data berikut didapatkan dari hasil penelitian yang dilakukan saya, Markus Sarsanto, Muhammad Rizky Ramadhan, Muhammad Ghiyats Humam, Lazuardhi Rahim Yamin, Prabasworo Drestanto, Ardy Makarim, Hilda Mailil Haq, dan Asri Melati.



Gambar 4. 13 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi S/D di d/D = 0,1 s.d 1,0 pada  $Re = 9,7 \times 10^4$



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{max}$ ) terhadap variasi S/D di d/D = 0,1 s.d 1,0 pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada subbab ini dilakukan analisa perbandingan nilai  $CoP_{max}$  antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0\ max}$ ) terhadap variasi S/D di d/D = 0,1 s.d 1,0 pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.13 dan 4.14 diatas.

Berdasarkan gambar 4.13 dan 4.14 terlihat bahwa *trendline* semakin turun ketika S/D semakin jauh. Dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak antara *returning blade* terhadap silinder pengganggu (S/D) akan berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dari analisis ini didapatkan bahwa penempatan jarak (S/D) paling efektif untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah pada S/D = 1,6.

Adapun nilai ketidakpastiaan yang ada pada grafik tersebut memberitahukan bahwa nilai yang didapatkan mempunyai

nilai *error* yang mengartikan bahwa data tersebut memiliki ketidakpastian dalam keakuratan. Adapun *error* yang terjadi pada Re 97000 memiliki rata – rata *error* +- 7% dan Re 136000 memiliki rata – rata *error* +- 5%. Hal tersebut mengartikan juga bahwa beberapa hasil perbandingan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  dengan variasi S/D dan d/D tidak signifikan perbedaannya.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.2 Kesimpulan

Berdasarkan hasil Analisa yang dilakukan pada penelitian pengaruh penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada  $S/D = 1,8$  dan  $y/D = 0,5$  dengan variasi  $(d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$  yang dilakukan pada  $Re = 97000$  dan  $136000$ , didapatkan kesimpulan berupa:

1. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds pada seluruh variasi  $d/D$ . Peningkatan nilai *coefficient of power* tertinggi terletak pada  $d/D = 0,5$  dengan peningkatan sebesar 41,3% pada  $Re = 97000$  dan  $d/D = 0,4$  dengan peningkatan sebesar 34,6% pada  $Re = 136000$ .
2. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds. Peningkatan nilai *coefficient of moment* tertinggi yaitu pada  $d/D = 0,5$  dengan peningkatan sebesar 52,35% pada  $Re 97000$  dan pada  $d/D = 0,4$  dengan peningkatan sebesar 38,78% pada  $Re 136000$ .
3. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius pada  $d/D = 0,5$  pada  $Re 97000$  dan  $d/D = 0,4$  pada  $Re 136000$  efektif meningkatkan nilai torsi statis hingga turbin memiliki kemampuan *self-starting*.
4. Diameter silinder pengganggu paling optimum meningkatkan performa turbin angin Savonius pada  $S/D = 1,8$  adalah  $d/D = 0,5$  pada  $Re 97000$  dan  $d/D = 0,4$  pada  $Re 136000$  dengan peningkatan nilai

maksimum dari *coefficient of power*, *coefficient of moment*, dan torsi statis sebagai acuan.

## 5.2 **Saran**

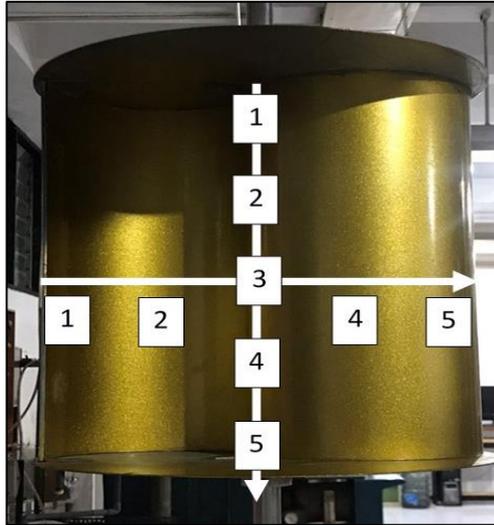
Beberapa saran yang diberikan terhadap penelitian yang telah dilakukan adalah:

1. Pembersihan *bearing* saat pengambilan data harus dengan konsisten dilakukan saat sebelum dan setelah pengambilan data untuk mencegah terjadinya pengendapan pelumas yang menyebabkan putaran turbin angin Savonius terhambat.
2. *Endplate* pada *returning blade* dihilangkan untuk mengurangi intervensi pada udara pada dibagian *returning blade*.
3. Penggantian benang pada *brake dynamometer* dilakukan secara berkala agar mencegah pemelaran pada benang yang akan menyebabkan pengambilan data yang kurang akurat.

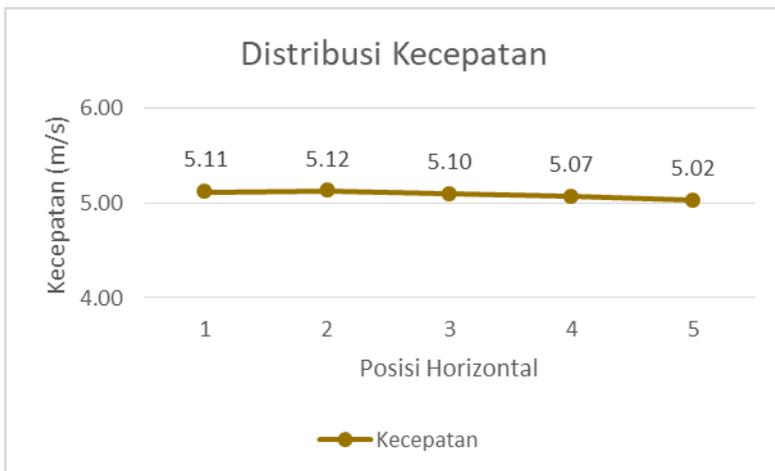
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Coyle, F. (2011). *Introduction to Wind Power* (1ST ed.). USA: THE ENGLISH PRESS
- [2] Daffa, D. A., & Yuwono, T. (2019). *STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DIDEPAN RETURNING BLADE TURBIN* “Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Sirkular  $d/D = 1,0$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,4$ ;  $2,6$ ;  $2,8$ ;  $3,0$ ; dan  $3,2$ ;  $Re = 96.000$ ,  $134.000$ , dan  $173.000$ .”
- [3] Fernando, D. & Yuwono, T. (2017). *STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN DI DEPAN SISI RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS* “Studi Kasus ( $d/D = 0,75$ ; Jarak  $S/D = 1,5 \leq S/D \leq 2,4$ ; dengan Bilangan Reynolds  $= 3,0 \times 10^4$ ;  $6,0 \times 10^4$ ; dan  $9,0 \times 10^4$  “
- [4] Hemami, A. (2011). *Wind Turbine Technology* (1ST ed.) USA: CENGAGE LEARNING
- [5] Mahmoud, N.H., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2010, “An experimental study on improvement of Savonius rotor performance”. Mesir : Alexandria university
- [6] Tsutsui, T dan Igarashi, T. 2002. “Drag Reduction on Circular Cylinder in an Air-Stream”, Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamic, Vol 90.
- [7] Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. “Introduction to Fluid

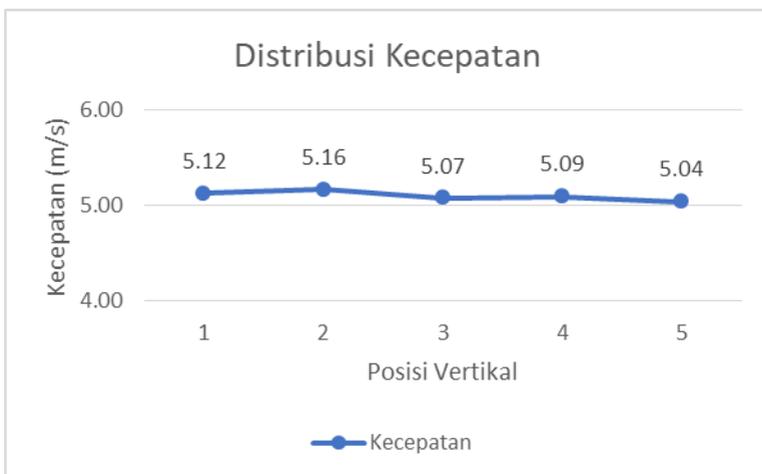
Mechanics". 8th penyunt. USA: John Willey & Sons  
Inc..

**LAMPIRAN****A. *UNIFORMITY FLOW TEST***

Gambar A.1 Posisi titik pengambilan *uniformity test*



Gambar A.2 Grafik distribusi kecepatan horizontal



Gambar A.3 Grafik distribusi kecepatan vertical

Tabel A.1 Data keseragaman kecepatan angin

Data	(Horizontal)					(Vertikal)				
Kec. 5 m/s	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)	$n_0$ (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>t</sub>	Cm <sub>t</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>s0</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  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,1$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_p$ (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	333,88	34,9461	6	190	0,0125	0,092	1,17	1,05887	0,02256	0,1172	0,11069
28,5	5	320,72	33,5687	9,1	230	0,0125	0,092	1,17	1,01713	0,02709	0,13516	0,13289
28,5	5	312,76	32,7355	12,2	255	0,0125	0,092	1,17	0,99189	0,02977	0,14488	0,14606
28,5	5	304,24	31,8438	15,3	275	0,0125	0,092	1,17	0,96487	0,03185	0,15074	0,15623
28,5	5	296,44	31,0274	18,4	290	0,0125	0,092	1,17	0,94013	0,0333	0,1536	0,16339
28,5	5	274,48	28,7289	21,5	335	0,0125	0,092	1,17	0,87049	0,03844	0,16417	0,18859
28,5	5	251,8	26,3551	24,6	375	0,0125	0,092	1,17	0,79856	0,04297	0,16833	0,21079
28,5	5	243,52	25,4884	27,7	395	0,0125	0,092	1,17	0,7723	0,04504	0,17064	0,22095
28,5	5	234,94	24,5904	30,8	415	0,0125	0,092	1,17	0,74509	0,04711	0,17221	0,23112
28,5	5	222,66	23,3051	33,9	435	0,0125	0,092	1,17	0,70614	0,04918	0,17038	0,24129
28,5	5	216,08	22,6164	37	440	0,0125	0,092	1,17	0,68528	0,04942	0,16613	0,24243
28,5	5	194,4	20,3472	40,1	460	0,0125	0,092	1,17	0,61652	0,05149	0,15573	0,2526
28,5	5	175,1	18,3271	49,4	485	0,0125	0,092	1,17	0,55531	0,05342	0,14551	0,26204
28,5	5	152,7	15,8893	64,9	520	0,0125	0,092	1,17	0,42084	0,05581	0,11522	0,27377
28,5	5	104,98	10,9879	80,4	560	0,0125	0,092	1,17	0,33293	0,05892	0,09605	0,28851
28,5	5	47,08	4,92771	111,4	610	0,0125	0,092	1,17	0,14931	0,06114	0,04478	0,29994
28,5	5	0	0	173,4	660	0,0125	0,092	1,17	0	0,05967	0	0

Tabel C.2 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,2$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_p$ (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	372,84	39,0239	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,18242	0	0	0
28,5	5	305,3	31,9547	6	250	0,0125	0,092	1,17	0,96823	0,02992	0,14212	0,14678
28,5	5	283,4	29,6625	9,1	300	0,0125	0,092	1,17	0,89877	0,03567	0,15728	0,175
28,5	5	245,3	25,6747	12,2	390	0,0125	0,092	1,17	0,77794	0,04633	0,1768	0,22727
28,5	5	218,44	22,8634	15,3	460	0,0125	0,092	1,17	0,69276	0,05453	0,18532	0,26752
28,5	5	187,3	19,6041	18,4	500	0,0125	0,092	1,17	0,594	0,05906	0,17209	0,28971
28,5	5	158,38	16,5771	21,5	520	0,0125	0,092	1,17	0,50229	0,06113	0,15063	0,29988
28,5	5	121,06	12,6709	27,7	550	0,0125	0,092	1,17	0,38393	0,06405	0,12063	0,3142
28,5	5	97,1	10,1631	33,9	580	0,0125	0,092	1,17	0,30794	0,06697	0,10116	0,32851
28,5	5	85,3	8,92807	40,1	610	0,0125	0,092	1,17	0,27052	0,06988	0,09274	0,34283
28,5	5	68,3	7,14873	46,3	640	0,0125	0,092	1,17	0,21661	0,0728	0,07736	0,35715
28,5	5	55,76	5,83621	52,5	670	0,0125	0,092	1,17	0,17684	0,07572	0,06569	0,37147
28,5	5	49,22	5,15169	61,8	700	0,0125	0,092	1,17	0,1561	0,07826	0,05993	0,38392
28,5	5	40,5	4,239	71,1	730	0,0125	0,092	1,17	0,12844	0,0808	0,05091	0,39637
28,5	5	22,96	2,40315	83,5	760	0,0125	0,092	1,17	0,07282	0,08296	0,02963	0,40696
28,5	5	0	0	92,8	800	0,0125	0,092	1,17	0	0,08672	0	0

Tabel C.3 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada S/D = 1,8 dan d/D 0,3 pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\dot{s}$ (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	413,16	43,2441	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,3103	0	0	0
28,5	5	334,88	35,0508	6	160	0,0125	0,092	1,17	1,06204	0,01888	0,09839	0,09264
28,5	5	322,68	33,7738	9,1	190	0,0125	0,092	1,17	1,02335	0,02218	0,11136	0,10882
28,5	5	315,28	32,9993	12,2	210	0,0125	0,092	1,17	0,99988	0,02426	0,11898	0,11899
28,5	5	294,42	30,816	15,3	270	0,0125	0,092	1,17	0,93372	0,03123	0,14306	0,15322
28,5	5	283,9	29,7149	18,4	295	0,0125	0,092	1,17	0,90036	0,03392	0,14981	0,16639
28,5	5	275,36	28,821	21,5	320	0,0125	0,092	1,17	0,87328	0,0366	0,15681	0,17957
28,5	5	270,72	28,3354	24,6	340	0,0125	0,092	1,17	0,85856	0,03868	0,1629	0,18973
28,5	5	265,62	27,8016	27,7	360	0,0125	0,092	1,17	0,84239	0,04075	0,16839	0,1999
28,5	5	260,94	27,3117	30,8	380	0,0125	0,092	1,17	0,82755	0,04282	0,17384	0,21007
28,5	5	254,86	26,6753	33,9	400	0,0125	0,092	1,17	0,80826	0,04489	0,17801	0,22023
28,5	5	246,98	25,8506	37	430	0,0125	0,092	1,17	0,78327	0,04819	0,18518	0,23642
28,5	5	238,58	24,9714	40,1	455	0,0125	0,092	1,17	0,75663	0,05088	0,18885	0,24959
28,5	5	229,98	24,0712	43,2	485	0,0125	0,092	1,17	0,72936	0,05418	0,19384	0,26577
28,5	5	225,32	23,5835	46,3	490	0,0125	0,092	1,17	0,71458	0,05441	0,19073	0,26691
28,5	5	216,14	22,6227	49,4	505	0,0125	0,092	1,17	0,68547	0,05587	0,18787	0,27407
28,5	5	203,3	21,2787	52,5	520	0,0125	0,092	1,17	0,64475	0,05733	0,18132	0,28123
28,5	5	187,64	19,6397	61,8	540	0,0125	0,092	1,17	0,59508	0,05864	0,17119	0,28767
28,5	5	166,3	17,4061	77,3	560	0,0125	0,092	1,17	0,5274	0,05919	0,15315	0,29038
28,5	5	149,92	15,6916	108,3	590	0,0125	0,092	1,17	0,47546	0,05907	0,13777	0,28977
28,5	5	98,4	10,2992	139,3	640	0,0125	0,092	1,17	0,31207	0,0614	0,094	0,3012
28,5	5	59,16	6,19208	170,3	680	0,0125	0,092	1,17	0,18762	0,0625	0,05753	0,30662
28,5	5	0	0	201,3	700	0,0125	0,092	1,17	0	0,06115	0	0

Tabel C.4 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada S/D = 1,8 dan d/D 0,4 pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\dot{s}$ (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	401,44	42,0174	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,27313	0	0	0
28,5	5	316,52	33,1291	6	250	0,0125	0,092	1,17	1,00381	0,02992	0,14734	0,14678
28,5	5	298,78	31,2723	9,1	310	0,0125	0,092	1,17	0,94755	0,0369	0,17152	0,18101
28,5	5	294,14	30,7867	12,2	330	0,0125	0,092	1,17	0,93284	0,03897	0,17834	0,19118
28,5	5	287,62	30,1042	15,3	350	0,0125	0,092	1,17	0,91216	0,04104	0,18366	0,20134
28,5	5	277,1	29,0031	18,4	380	0,0125	0,092	1,17	0,87879	0,04434	0,19116	0,21753
28,5	5	271,6	28,4275	21,5	400	0,0125	0,092	1,17	0,86135	0,04641	0,19612	0,22769
28,5	5	265,14	27,7513	24,6	420	0,0125	0,092	1,17	0,84086	0,04849	0,20001	0,23786
28,5	5	260,08	27,2217	27,7	440	0,0125	0,092	1,17	0,82482	0,05056	0,20458	0,24803
28,5	5	257,1	26,9098	30,8	450	0,0125	0,092	1,17	0,81537	0,0514	0,20562	0,25218
28,5	5	251,9	26,3655	33,9	470	0,0125	0,092	1,17	0,79888	0,05348	0,20958	0,26234
28,5	5	234,24	24,5171	37	490	0,0125	0,092	1,17	0,74287	0,05555	0,20244	0,27251
28,5	5	191,32	20,0248	46,3	530	0,0125	0,092	1,17	0,60675	0,05931	0,17655	0,29098
28,5	5	102,36	10,7137	55,6	580	0,0125	0,092	1,17	0,32462	0,0643	0,10241	0,31546
28,5	5	55,6	5,81947	64,9	600	0,0125	0,092	1,17	0,17633	0,06562	0,05676	0,3219
28,5	5	0	0	95,9	580	0,0125	0,092	1,17	0	0,05936	0	0

Tabel C.5 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (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	Cmu
28,5	5	421,84	44,1526	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,33782	0	0	0
28,5	5	276,38	28,9278	6	350	0,0125	0,092	1,17	0,87651	0,04218	0,18138	0,20694
28,5	5	255,96	26,7905	9,1	400	0,0125	0,092	1,17	0,81175	0,04793	0,19088	0,23515
28,5	5	240,16	25,1367	12,2	450	0,0125	0,092	1,17	0,76164	0,05369	0,20059	0,26337
28,5	5	219,7	22,9953	15,3	520	0,0125	0,092	1,17	0,69676	0,06189	0,21154	0,30361
28,5	5	215,94	22,6017	18,4	540	0,0125	0,092	1,17	0,68483	0,06396	0,21488	0,31378
28,5	5	195,98	20,5126	21,5	560	0,0125	0,092	1,17	0,62153	0,06603	0,20134	0,32394
28,5	5	162,04	16,9602	24,6	580	0,0125	0,092	1,17	0,51389	0,06811	0,1717	0,33411
28,5	5	136,66	14,3037	27,7	600	0,0125	0,092	1,17	0,4334	0,07018	0,14921	0,34428
28,5	5	133,44	13,9667	30,8	605	0,0125	0,092	1,17	0,42319	0,07041	0,14618	0,34542
28,5	5	121,94	12,7631	33,9	625	0,0125	0,092	1,17	0,38672	0,07248	0,13751	0,35559
28,5	5	113,2	11,8483	37	630	0,0125	0,092	1,17	0,359	0,07272	0,12807	0,35673
28,5	5	103,04	10,7849	40,1	640	0,0125	0,092	1,17	0,32678	0,07356	0,11793	0,36088
28,5	5	97,08	10,161	43,2	645	0,0125	0,092	1,17	0,30788	0,0738	0,11146	0,36202
28,5	5	89,26	9,34255	52,5	680	0,0125	0,092	1,17	0,28308	0,07695	0,10686	0,37748
28,5	5	81,98	8,58057	61,8	720	0,0125	0,092	1,17	0,25999	0,08071	0,10294	0,39595
28,5	5	76,78	8,03631	71,1	750	0,0125	0,092	1,17	0,2435	0,08325	0,09945	0,4084
28,5	5	63,86	6,68401	80,4	785	0,0125	0,092	1,17	0,20253	0,0864	0,08584	0,42386
28,5	5	36,72	3,84336	95,9	805	0,0125	0,092	1,17	0,11645	0,08695	0,04968	0,42657
28,5	5	0	0	111,4	840	0,0125	0,092	1,17	0	0,08934	0	0

Tabel C.6 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,6$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (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	Cmu
28,5	5	407,62	42,6642	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,29273	0	0	0
28,5	5	348,5	36,4763	6	200	0,0125	0,092	1,17	1,10523	0,02379	0,12898	0,1167
28,5	5	319,84	33,4766	9,1	300	0,0125	0,092	1,17	1,01434	0,03567	0,1775	0,175
28,5	5	287,72	30,1147	12,2	375	0,0125	0,092	1,17	0,91248	0,04449	0,19915	0,21825
28,5	5	278,34	29,1329	15,3	400	0,0125	0,092	1,17	0,88273	0,04717	0,20428	0,23142
28,5	5	266,7	27,9146	18,4	430	0,0125	0,092	1,17	0,84581	0,05047	0,20943	0,2476
28,5	5	241,38	25,2644	21,5	450	0,0125	0,092	1,17	0,76551	0,05254	0,19733	0,25777
28,5	5	193,42	20,2446	24,6	470	0,0125	0,092	1,17	0,61341	0,05462	0,16436	0,26794
28,5	5	118,44	12,3967	27,7	500	0,0125	0,092	1,17	0,37562	0,05792	0,10672	0,28412
28,5	5	83,5	8,73967	30,8	500	0,0125	0,092	1,17	0,26481	0,05754	0,07474	0,28225
28,5	5	62,1	6,4998	33,9	510	0,0125	0,092	1,17	0,19694	0,05838	0,05641	0,28641
28,5	5	57,34	6,00159	40,1	520	0,0125	0,092	1,17	0,18185	0,05885	0,0525	0,28869
28,5	5	0	0	55,6	600	0,0125	0,092	1,17	0	0,06676	0	0

Tabel C.7 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada S/D = 1,8 dan d/D 0,7 pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (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	401,08	41,9797	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,27199	0	0	0
28,5	5	321,74	33,6755	6	185	0,0125	0,092	1,17	1,02037	0,02195	0,10987	0,10768
28,5	5	288,38	30,1838	9,1	270	0,0125	0,092	1,17	0,91457	0,03199	0,14354	0,15695
28,5	5	274,7	28,7519	12,2	310	0,0125	0,092	1,17	0,87118	0,03652	0,15607	0,17915
28,5	5	261,4	27,3599	15,3	350	0,0125	0,092	1,17	0,829	0,04104	0,16691	0,20134
28,5	5	255,72	26,7654	18,4	370	0,0125	0,092	1,17	0,81099	0,04311	0,17153	0,21151
28,5	5	244,9	25,6329	21,5	415	0,0125	0,092	1,17	0,77668	0,04825	0,18385	0,23672
28,5	5	241,56	25,2833	24,6	430	0,0125	0,092	1,17	0,76608	0,04971	0,18683	0,24387
28,5	5	238,08	24,919	27,7	450	0,0125	0,092	1,17	0,75505	0,05178	0,19181	0,25404
28,5	5	231,52	24,2324	30,8	475	0,0125	0,092	1,17	0,73424	0,05447	0,1962	0,26722
28,5	5	228,08	23,8724	33,9	490	0,0125	0,092	1,17	0,72333	0,05593	0,19846	0,27437
28,5	5	219,76	23,0015	37	515	0,0125	0,092	1,17	0,69695	0,05861	0,20041	0,28755
28,5	5	202,42	21,1866	40,1	545	0,0125	0,092	1,17	0,64195	0,06191	0,19498	0,30373
28,5	5	191,9	20,0855	43,2	560	0,0125	0,092	1,17	0,60859	0,06337	0,1892	0,31089
28,5	5	171,36	17,9357	46,3	580	0,0125	0,092	1,17	0,54345	0,06544	0,17448	0,32106
28,5	5	147,34	15,4216	49,4	600	0,0125	0,092	1,17	0,46727	0,06752	0,15477	0,33122
28,5	5	120,64	12,627	52,5	620	0,0125	0,092	1,17	0,3826	0,06959	0,13061	0,34139
28,5	5	95,8	10,0271	55,6	640	0,0125	0,092	1,17	0,30382	0,07166	0,10681	0,35155
28,5	5	74,72	7,82069	58,7	660	0,0125	0,092	1,17	0,23697	0,07373	0,08572	0,36172
28,5	5	44,34	4,64092	74,2	680	0,0125	0,092	1,17	0,14062	0,07429	0,05125	0,36443
28,5	5	0	0	89,7	750	0,0125	0,092	1,17	0	0,08097	0	0

Tabel C.8 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada S/D = 1,8 dan d/D 0,8 pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (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	450,04	47,1042	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,42726	0	0	0
28,5	5	338,56	35,4359	6	240	0,0125	0,092	1,17	1,07371	0,02869	0,15114	0,14077
28,5	5	324,66	33,9811	9,1	260	0,0125	0,092	1,17	1,02963	0,03077	0,1554	0,15093
28,5	5	315,7	33,0433	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	1,00121	0,03284	0,16129	0,1611
28,5	5	314,38	32,9051	15,3	285	0,0125	0,092	1,17	0,99702	0,03307	0,16176	0,16224
28,5	5	306,38	32,0678	18,4	310	0,0125	0,092	1,17	0,97165	0,03576	0,17044	0,17542
28,5	5	296,22	31,0044	21,5	330	0,0125	0,092	1,17	0,93943	0,03783	0,17434	0,18558
28,5	5	292,96	30,6631	24,6	340	0,0125	0,092	1,17	0,92909	0,03868	0,17628	0,18973
28,5	5	282,58	29,5767	27,7	365	0,0125	0,092	1,17	0,89617	0,04136	0,18184	0,20291
28,5	5	252,38	26,4158	30,8	425	0,0125	0,092	1,17	0,8004	0,04834	0,1898	0,23714
28,5	5	233,7	24,4606	33,9	465	0,0125	0,092	1,17	0,74116	0,05286	0,19221	0,25933
28,5	5	221,54	23,1879	37	480	0,0125	0,092	1,17	0,70259	0,05432	0,18724	0,26649
28,5	5	216,5	22,6603	40,1	490	0,0125	0,092	1,17	0,68661	0,05517	0,18583	0,27064
28,5	5	211,56	22,1433	49,4	500	0,0125	0,092	1,17	0,67094	0,05525	0,18187	0,27107
28,5	5	199,1	20,8391	64,9	530	0,0125	0,092	1,17	0,63143	0,05703	0,17667	0,27979
28,5	5	150,54	15,7565	95,9	600	0,0125	0,092	1,17	0,47742	0,06182	0,14478	0,30325
28,5	5	78,16	8,18075	126,9	650	0,0125	0,092	1,17	0,24788	0,06415	0,078	0,31468
28,5	5	0	0	157,9	710	0,0125	0,092	1,17	0	0,0677	0	0

Tabel C.9 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,9$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\gamma$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP <sub>o</sub>	Cm <sub>o</sub>
28,5	5	415,18	43,4555	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,3167	0	0	0
28,5	5	306,76	32,1075	6	240	0,0125	0,092	1,17	0,97286	0,02869	0,13695	0,14077
28,5	5	289,88	30,3408	9,1	295	0,0125	0,092	1,17	0,91933	0,03506	0,15811	0,17199
28,5	5	279,4	29,2439	12,2	320	0,0125	0,092	1,17	0,88609	0,03774	0,16407	0,18516
28,5	5	274,34	28,7143	15,3	340	0,0125	0,092	1,17	0,87004	0,03982	0,16994	0,19533
28,5	5	261,78	27,3996	18,4	375	0,0125	0,092	1,17	0,83021	0,04373	0,17809	0,21452
28,5	5	255,58	26,7507	21,5	390	0,0125	0,092	1,17	0,81055	0,04519	0,17968	0,22168
28,5	5	245,5	25,6957	24,6	400	0,0125	0,092	1,17	0,77858	0,04603	0,17582	0,22583
28,5	5	222,92	23,3323	33,9	430	0,0125	0,092	1,17	0,70697	0,04857	0,16846	0,23828
28,5	5	190,88	19,9788	49,4	480	0,0125	0,092	1,17	0,60536	0,0528	0,15681	0,25903
28,5	5	141,54	14,8145	80,4	550	0,0125	0,092	1,17	0,44888	0,05758	0,12681	0,2825
28,5	5	64,34	6,73425	111,4	600	0,0125	0,092	1,17	0,20405	0,05991	0,05997	0,29392
28,5	5	0	0	142,4	650	0,0125	0,092	1,17	0	0,06224	0	0

Tabel C.10 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 1,0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	$n_s$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\gamma$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP <sub>o</sub>	Cm <sub>o</sub>
28,5	5	398,44	41,7034	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,26361	0	0	0
28,5	5	292,06	30,5689	6	240	0,0125	0,092	1,17	0,92624	0,02869	0,13038	0,14077
28,5	5	280,8	29,3904	9,1	270	0,0125	0,092	1,17	0,89053	0,03199	0,13977	0,15695
28,5	5	275,12	28,7959	12,2	290	0,0125	0,092	1,17	0,87252	0,03407	0,14581	0,16711
28,5	5	265,24	27,7618	15,3	320	0,0125	0,092	1,17	0,84118	0,03736	0,15419	0,1833
28,5	5	261,18	27,3368	18,4	340	0,0125	0,092	1,17	0,82831	0,03944	0,16025	0,19346
28,5	5	254,18	26,6042	21,5	365	0,0125	0,092	1,17	0,80611	0,04212	0,16657	0,20664
28,5	5	251,12	26,2839	24,6	380	0,0125	0,092	1,17	0,7964	0,04358	0,17027	0,2138
28,5	5	240,98	25,2226	27,7	400	0,0125	0,092	1,17	0,76424	0,04565	0,17116	0,22396
28,5	5	221,46	23,1795	30,8	420	0,0125	0,092	1,17	0,70234	0,04773	0,16444	0,23413
28,5	5	184,82	19,3445	33,9	450	0,0125	0,092	1,17	0,58614	0,05102	0,14672	0,25031
28,5	5	162,62	17,0209	37	470	0,0125	0,092	1,17	0,51573	0,0531	0,13434	0,26048
28,5	5	157,48	16,4829	40,1	480	0,0125	0,092	1,17	0,49943	0,05394	0,13216	0,26463
28,5	5	143,52	15,0218	49,4	500	0,0125	0,092	1,17	0,45516	0,05525	0,12338	0,27107
28,5	5	124,84	13,0666	64,9	530	0,0125	0,092	1,17	0,39592	0,05703	0,11077	0,27979
28,5	5	82,42	8,62663	95,9	560	0,0125	0,092	1,17	0,26139	0,05691	0,07298	0,27919
28,5	5	47,64	4,98632	126,9	600	0,0125	0,092	1,17	0,15109	0,05801	0,043	0,2846
28,5	5	0	0	157,9	650	0,0125	0,092	1,17	0	0,06034	0	0

Tabel C.11 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,1$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	598,78	62,6723	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,35641	0	0	0
28,5	7	493,58	51,6614	6	260	0,0125	0,092	1,17	1,1181	0,03115	0,08716	0,07796
28,5	7	470,5	49,2457	9,1	305	0,0125	0,092	1,17	1,06582	0,03628	0,0968	0,09082
28,5	7	466,28	48,804	12,2	320	0,0125	0,092	1,17	1,05626	0,03774	0,09978	0,09447
28,5	7	447,34	46,8216	15,3	350	0,0125	0,092	1,17	1,01335	0,04104	0,1041	0,10273
28,5	7	437,94	45,8377	18,4	375	0,0125	0,092	1,17	0,99206	0,04373	0,10858	0,10945
28,5	7	415,28	43,466	21,5	420	0,0125	0,092	1,17	0,94073	0,04887	0,11506	0,12231
28,5	7	394,6	41,3015	24,6	465	0,0125	0,092	1,17	0,89388	0,054	0,12082	0,13517
28,5	7	370,02	38,7288	27,7	490	0,0125	0,092	1,17	0,8382	0,05669	0,11893	0,14189
28,5	7	352,96	36,9431	30,8	510	0,0125	0,092	1,17	0,79956	0,05876	0,1176	0,14708
28,5	7	340,7	35,6599	33,9	525	0,0125	0,092	1,17	0,77178	0,06022	0,11633	0,15073
28,5	7	322,08	33,711	37	535	0,0125	0,092	1,17	0,7296	0,06107	0,11152	0,15285
28,5	7	310,9	32,5409	40,1	550	0,0125	0,092	1,17	0,70428	0,06253	0,11022	0,1565
28,5	7	288,64	30,211	49,4	570	0,0125	0,092	1,17	0,65385	0,06384	0,10447	0,15978
28,5	7	261,56	27,3766	58,7	600	0,0125	0,092	1,17	0,59251	0,06638	0,09844	0,16614
28,5	7	232,46	24,3308	74,2	640	0,0125	0,092	1,17	0,52659	0,06938	0,09145	0,17366
28,5	7	187,54	19,6292	105,2	720	0,0125	0,092	1,17	0,42483	0,07539	0,08016	0,1887
28,5	7	109,34	11,4443	136,2	860	0,0125	0,092	1,17	0,24769	0,08876	0,05502	0,22215
28,5	7	66,18	6,92684	167,2	980	0,0125	0,092	1,17	0,14992	0,09967	0,0374	0,24947
28,5	7	0	0	198,2	1000	0,0125	0,092	1,17	0	0,09832	0	0

Tabel C.12 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,2$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	540,08	56,5284	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,22344	0	0	0
28,5	7	481,04	50,3489	6	240	0,0125	0,092	1,17	1,08969	0,02869	0,07826	0,07182
28,5	7	474,96	49,7125	9,1	260	0,0125	0,092	1,17	1,07592	0,03077	0,08285	0,07701
28,5	7	465,28	48,6993	12,2	280	0,0125	0,092	1,17	1,05399	0,03284	0,08663	0,08219
28,5	7	455,12	47,6359	15,3	305	0,0125	0,092	1,17	1,03098	0,03552	0,09167	0,08892
28,5	7	446,18	46,7002	18,4	330	0,0125	0,092	1,17	1,01073	0,03821	0,09666	0,09564
28,5	7	442,68	46,3338	21,5	340	0,0125	0,092	1,17	1,0028	0,03906	0,09803	0,09775
28,5	7	434,66	45,4944	24,6	360	0,0125	0,092	1,17	0,98463	0,04113	0,10136	0,10294
28,5	7	428,98	44,8999	27,7	375	0,0125	0,092	1,17	0,97176	0,04259	0,10368	0,10659
28,5	7	425,66	44,5524	30,8	390	0,0125	0,092	1,17	0,96424	0,04405	0,10653	0,11025
28,5	7	419,62	43,9202	33,9	405	0,0125	0,092	1,17	0,95056	0,04551	0,10827	0,1139
28,5	7	414,04	43,3362	37	420	0,0125	0,092	1,17	0,93792	0,04697	0,11025	0,11755
28,5	7	377,08	39,4677	40,1	490	0,0125	0,092	1,17	0,85419	0,05517	0,11795	0,13808
28,5	7	345,06	36,1163	43,2	550	0,0125	0,092	1,17	0,78166	0,06215	0,12159	0,15555
28,5	7	319,28	33,418	52,5	590	0,0125	0,092	1,17	0,72326	0,06591	0,11932	0,16497
28,5	7	300,92	31,4963	68	620	0,0125	0,092	1,17	0,68167	0,06769	0,11549	0,16942
28,5	7	156,08	16,3364	99	800	0,0125	0,092	1,17	0,35357	0,08596	0,07607	0,21515
28,5	7	74,84	7,83325	130	950	0,0125	0,092	1,17	0,16953	0,10055	0,04267	0,25168
28,5	7	0	0	161	1000	0,0125	0,092	1,17	0	0,10288	0	0

Tabel C.13 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,3$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	521,7	54,6046	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,1818	0	0	0
28,5	7	423,62	44,3389	6	290	0,0125	0,092	1,17	0,95962	0,03483	0,08365	0,08717
28,5	7	415,98	43,5392	9,1	320	0,0125	0,092	1,17	0,94231	0,03812	0,08992	0,09542
28,5	7	395,82	41,4292	12,2	360	0,0125	0,092	1,17	0,89665	0,04265	0,09571	0,10675
28,5	7	375,68	39,3212	15,3	410	0,0125	0,092	1,17	0,85102	0,0484	0,10309	0,12114
28,5	7	364,84	38,1866	18,4	435	0,0125	0,092	1,17	0,82647	0,05109	0,10567	0,12786
28,5	7	355,06	37,1629	21,5	470	0,0125	0,092	1,17	0,80431	0,055	0,11072	0,13765
28,5	7	335,64	35,1303	24,6	530	0,0125	0,092	1,17	0,76032	0,06197	0,11794	0,15512
28,5	7	320,8	33,5771	27,7	580	0,0125	0,092	1,17	0,7267	0,06773	0,12319	0,16951
28,5	7	313,36	32,7983	30,8	610	0,0125	0,092	1,17	0,70985	0,07102	0,12619	0,17777
28,5	7	280,26	29,3339	33,9	700	0,0125	0,092	1,17	0,63487	0,08168	0,12979	0,20444
28,5	7	250,04	26,1709	37	750	0,0125	0,092	1,17	0,56641	0,08743	0,12395	0,21883
28,5	7	220,4	23,0685	46,3	800	0,0125	0,092	1,17	0,49927	0,09242	0,11549	0,23133
28,5	7	174,3	18,2434	61,8	880	0,0125	0,092	1,17	0,39484	0,10033	0,09915	0,25112
28,5	7	90	9,42	92,8	1000	0,0125	0,092	1,17	0,20388	0,11125	0,05677	0,27844
28,5	7	0	0	123,8	1200	0,0125	0,092	1,17	0	0,13197	0	0

Tabel C.14 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,4$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	545,04	57,0475	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,23467	0	0	0
28,5	7	452,2	47,3303	6	310	0,0125	0,092	1,17	1,02436	0,03728	0,09558	0,0933
28,5	7	441,68	46,2292	9,1	350	0,0125	0,092	1,17	1,00053	0,0418	0,10468	0,10463
28,5	7	434,2	45,4463	12,2	380	0,0125	0,092	1,17	0,98359	0,0451	0,11103	0,11289
28,5	7	428,66	44,8664	15,3	410	0,0125	0,092	1,17	0,97104	0,0484	0,11763	0,12114
28,5	7	420,1	43,9705	18,4	445	0,0125	0,092	1,17	0,95165	0,05231	0,1246	0,13093
28,5	7	409,8	42,8924	21,5	475	0,0125	0,092	1,17	0,92831	0,05561	0,12921	0,13919
28,5	7	406,48	42,5449	24,6	490	0,0125	0,092	1,17	0,92079	0,05707	0,13153	0,14284
28,5	7	402,06	42,0823	27,7	510	0,0125	0,092	1,17	0,91078	0,05914	0,13482	0,14803
28,5	7	395,4	41,3852	30,8	530	0,0125	0,092	1,17	0,89569	0,06121	0,13723	0,15321
28,5	7	393,54	41,1905	33,9	540	0,0125	0,092	1,17	0,89148	0,06206	0,13848	0,15533
28,5	7	389,32	40,7488	37	550	0,0125	0,092	1,17	0,88192	0,06291	0,13886	0,15745
28,5	7	375,58	39,3107	40,1	580	0,0125	0,092	1,17	0,8508	0,06621	0,14098	0,16571
28,5	7	360,7	37,7533	43,2	605	0,0125	0,092	1,17	0,81709	0,06889	0,14089	0,17243
28,5	7	355,26	37,1839	46,3	610	0,0125	0,092	1,17	0,80477	0,06912	0,13923	0,17301
28,5	7	352,7	36,9159	49,4	615	0,0125	0,092	1,17	0,79897	0,06936	0,1387	0,17359
28,5	7	344,14	36,02	52,5	620	0,0125	0,092	1,17	0,77958	0,06959	0,13578	0,17418
28,5	7	333,24	34,8791	55,6	630	0,0125	0,092	1,17	0,75488	0,07044	0,13308	0,17613
28,5	7	314,1	32,8758	58,7	650	0,0125	0,092	1,17	0,71153	0,07251	0,12913	0,18148
28,5	7	291,22	30,481	68	670	0,0125	0,092	1,17	0,6597	0,07382	0,12189	0,18477
28,5	7	141,02	14,7601	77,3	900	0,0125	0,092	1,17	0,31945	0,10088	0,08066	0,2525
28,5	7	99,54	10,4185	92,8	1020	0,0125	0,092	1,17	0,22549	0,1137	0,06417	0,28458
28,5	7	84,82	8,87783	108,3	1070	0,0125	0,092	1,17	0,19214	0,11793	0,05671	0,29517
28,5	7	60,02	6,28209	123,8	1150	0,0125	0,092	1,17	0,13596	0,12584	0,04282	0,31496
28,5	7	30	3,14	139,3	1220	0,0125	0,092	1,17	0,06796	0,13252	0,02254	0,33169
28,5	7	0	0	154,8	1350	0,0125	0,092	1,17	0	0,14656	0	0

Tabel C.15 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,5$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	583,96	61,1211	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,32284	0	0	0
28,5	7	508,16	53,1874	6	230	0,0125	0,092	1,17	1,15113	0,02747	0,07914	0,06875
28,5	7	501,38	52,4778	9,1	250	0,0125	0,092	1,17	1,13577	0,02954	0,08398	0,07394
28,5	7	495,28	51,8393	12,2	270	0,0125	0,092	1,17	1,12195	0,03161	0,08877	0,07912
28,5	7	491,7	51,4646	15,3	290	0,0125	0,092	1,17	1,11384	0,03369	0,09391	0,08431
28,5	7	488,8	51,1611	18,4	310	0,0125	0,092	1,17	1,10727	0,03576	0,0991	0,0895
28,5	7	485,24	50,7885	21,5	330	0,0125	0,092	1,17	1,09921	0,03783	0,10408	0,09469
28,5	7	482,84	50,5373	24,6	350	0,0125	0,092	1,17	1,09377	0,0399	0,10924	0,09987
28,5	7	477,82	50,0118	27,7	370	0,0125	0,092	1,17	1,0824	0,04197	0,11372	0,10506
28,5	7	474,04	49,6162	30,8	390	0,0125	0,092	1,17	1,07384	0,04405	0,11839	0,11025
28,5	7	461,3	48,2827	33,9	420	0,0125	0,092	1,17	1,04498	0,04735	0,12383	0,1185
28,5	7	454,16	47,5354	37	440	0,0125	0,092	1,17	1,0288	0,04942	0,12725	0,12369
28,5	7	448,18	46,9095	40,1	460	0,0125	0,092	1,17	1,01526	0,05149	0,13084	0,12888
28,5	7	438,18	45,8628	43,2	480	0,0125	0,092	1,17	0,9926	0,05356	0,13307	0,13406
28,5	7	435,42	45,574	46,3	490	0,0125	0,092	1,17	0,98635	0,05441	0,13432	0,13618
28,5	7	427,5	44,745	49,4	510	0,0125	0,092	1,17	0,96841	0,05648	0,1369	0,14137
28,5	7	415,8	43,5204	52,5	535	0,0125	0,092	1,17	0,94191	0,05917	0,13949	0,14809
28,5	7	409,04	42,8129	55,6	540	0,0125	0,092	1,17	0,92659	0,0594	0,13776	0,14867
28,5	7	402,82	42,1618	58,7	550	0,0125	0,092	1,17	0,9125	0,06025	0,1376	0,15079
28,5	7	390,18	40,8388	61,8	565	0,0125	0,092	1,17	0,88387	0,0617	0,13651	0,15444
28,5	7	384,92	40,2883	64,9	570	0,0125	0,092	1,17	0,87195	0,06194	0,13518	0,15503
28,5	7	375,18	39,2688	68	580	0,0125	0,092	1,17	0,84989	0,06278	0,13355	0,15714
28,5	7	352,86	36,9327	71,1	600	0,0125	0,092	1,17	0,79933	0,06486	0,12976	0,16233
28,5	7	313,08	32,769	80,4	650	0,0125	0,092	1,17	0,70922	0,06985	0,12399	0,17482
28,5	7	299,4	31,3372	111,4	690	0,0125	0,092	1,17	0,67823	0,07095	0,12044	0,17758
28,5	7	260,22	27,2364	142,4	760	0,0125	0,092	1,17	0,58947	0,07573	0,11174	0,18955
28,5	7	194,42	20,3493	173,4	900	0,0125	0,092	1,17	0,44042	0,0891	0,09822	0,22301
28,5	7	94,96	9,93915	204,4	1150	0,0125	0,092	1,17	0,21511	0,11595	0,06243	0,29022
28,5	7	51,62	5,40289	235,4	1300	0,0125	0,092	1,17	0,11693	0,13055	0,03821	0,32675
28,5	7	0	0	266,4	1400	0,0125	0,092	1,17	0	0,13901	0	0

Tabel C.16 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,6$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	521,44	54,5774	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,18121	0	0	0
28,5	7	434,96	45,5258	6	265	0,0125	0,092	1,17	0,98531	0,03176	0,07832	0,07949
28,5	7	428,96	44,8978	9,1	290	0,0125	0,092	1,17	0,97172	0,03445	0,08378	0,08621
28,5	7	411,02	43,0201	12,2	340	0,0125	0,092	1,17	0,93108	0,0402	0,09367	0,10061
28,5	7	392,06	41,0356	15,3	390	0,0125	0,092	1,17	0,88813	0,04595	0,10214	0,115
28,5	7	389,6	40,7781	18,4	400	0,0125	0,092	1,17	0,88256	0,04679	0,10337	0,11712
28,5	7	376,26	39,3819	21,5	440	0,0125	0,092	1,17	0,85234	0,05132	0,10948	0,12845
28,5	7	361,28	37,814	24,6	490	0,0125	0,092	1,17	0,8184	0,05707	0,1169	0,14284
28,5	7	336,28	35,1973	27,7	570	0,0125	0,092	1,17	0,76177	0,0665	0,12679	0,16644
28,5	7	327,08	34,2344	30,8	600	0,0125	0,092	1,17	0,74093	0,0698	0,12944	0,1747
28,5	7	320,74	33,5708	33,9	625	0,0125	0,092	1,17	0,72657	0,07248	0,13181	0,18142
28,5	7	308,02	32,2394	37	660	0,0125	0,092	1,17	0,69775	0,0764	0,13342	0,19121
28,5	7	290,44	30,3994	40,1	710	0,0125	0,092	1,17	0,65793	0,08215	0,13527	0,20561
28,5	7	285,8	29,9137	43,2	720	0,0125	0,092	1,17	0,64742	0,08299	0,13448	0,20772
28,5	7	278,54	29,1539	46,3	730	0,0125	0,092	1,17	0,63097	0,08384	0,1324	0,20984
28,5	7	263,24	27,5525	55,6	760	0,0125	0,092	1,17	0,59631	0,08638	0,12892	0,21662
28,5	7	180,04	18,8442	71,1	920	0,0125	0,092	1,17	0,40784	0,1041	0,10626	0,26055
28,5	7	99	10,362	102,1	1050	0,0125	0,092	1,17	0,22426	0,11624	0,06525	0,29093
28,5	7	74,58	7,80604	133,1	1150	0,0125	0,092	1,17	0,16895	0,1247	0,05273	0,31211
28,5	7	0	0	164,1	1400	0,0125	0,092	1,17	0	0,15155	0	0

Tabel C.17 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,7$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	$\lambda$ (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	582,62	60,9809	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,3198	0	0	0
28,5	7	548,66	57,4264	6	150	0,0125	0,092	1,17	1,24287	0,01766	0,05493	0,0442
28,5	7	527,48	55,2096	9,1	200	0,0125	0,092	1,17	1,19489	0,02341	0,07001	0,05859
28,5	7	521,4	54,5732	12,2	220	0,0125	0,092	1,17	1,18112	0,02548	0,07533	0,06378
28,5	7	516,78	54,0896	15,3	235	0,0125	0,092	1,17	1,17065	0,02694	0,07894	0,06743
28,5	7	498,06	52,1303	18,4	270	0,0125	0,092	1,17	1,12825	0,03085	0,08712	0,07722
28,5	7	481,8	50,4284	21,5	300	0,0125	0,092	1,17	1,09141	0,03415	0,09329	0,08548
28,5	7	470,34	49,2289	24,6	330	0,0125	0,092	1,17	1,06545	0,03745	0,09987	0,09373
28,5	7	446,92	46,7776	27,7	380	0,0125	0,092	1,17	1,0124	0,0432	0,10947	0,10813
28,5	7	431,72	45,1867	30,8	410	0,0125	0,092	1,17	0,97797	0,0465	0,11382	0,11638
28,5	7	418,22	43,7737	33,9	440	0,0125	0,092	1,17	0,94739	0,0498	0,11808	0,12464
28,5	7	398,2	41,6783	37	475	0,0125	0,092	1,17	0,90204	0,05371	0,12126	0,13443
28,5	7	382,5	40,035	40,1	500	0,0125	0,092	1,17	0,86647	0,0564	0,12281	0,14115
28,5	7	370,58	38,7874	43,2	530	0,0125	0,092	1,17	0,83947	0,05969	0,12542	0,14941
28,5	7	357,64	37,433	46,3	560	0,0125	0,092	1,17	0,81016	0,06299	0,12773	0,15767
28,5	7	344,52	36,0598	49,4	590	0,0125	0,092	1,17	0,78044	0,06629	0,12949	0,16592
28,5	7	333,74	34,9315	52,5	620	0,0125	0,092	1,17	0,75602	0,06959	0,13168	0,17418
28,5	7	323,7	33,8806	55,6	640	0,0125	0,092	1,17	0,73327	0,07166	0,13352	0,17996
28,5	7	315,28	32,9993	58,7	650	0,0125	0,092	1,17	0,7142	0,07251	0,12961	0,18148
28,5	7	294,58	30,8327	61,8	660	0,0125	0,092	1,17	0,66731	0,07335	0,12252	0,1836
28,5	7	273,94	28,6724	71,1	690	0,0125	0,092	1,17	0,62055	0,07589	0,11788	0,18995
28,5	7	259,88	27,2008	86,6	720	0,0125	0,092	1,17	0,5887	0,07767	0,11445	0,1944
28,5	7	204,94	21,4504	102,1	780	0,0125	0,092	1,17	0,46425	0,08313	0,09659	0,20806
28,5	7	142,96	14,9631	133,1	870	0,0125	0,092	1,17	0,32385	0,09036	0,07324	0,22617
28,5	7	90,44	9,46605	164,1	1000	0,0125	0,092	1,17	0,20487	0,1025	0,05256	0,26566
28,5	7	43,56	4,55928	195,1	1150	0,0125	0,092	1,17	0,09868	0,11709	0,02892	0,29308
28,5	7	0	0	226,1	1200	0,0125	0,092	1,17	0	0,11942	0	0

Tabel C.18 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,8$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	530,86	55,5633	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,20255	0	0	0
28,5	7	441	46,158	6	300	0,0125	0,092	1,17	0,99899	0,03605	0,09014	0,09023
28,5	7	430,44	45,0527	9,1	340	0,0125	0,092	1,17	0,97507	0,04058	0,09903	0,10156
28,5	7	417	43,646	12,2	370	0,0125	0,092	1,17	0,94462	0,04388	0,10374	0,10982
28,5	7	410	42,9133	15,3	390	0,0125	0,092	1,17	0,92877	0,04595	0,10681	0,115
28,5	7	400	41,8667	18,4	420	0,0125	0,092	1,17	0,90611	0,04925	0,11169	0,12326
28,5	7	390	40,82	21,5	450	0,0125	0,092	1,17	0,88346	0,05254	0,11619	0,13152
28,5	7	375	39,25	24,6	490	0,0125	0,092	1,17	0,84948	0,05707	0,12134	0,14284
28,5	7	360	37,68	27,7	540	0,0125	0,092	1,17	0,8155	0,06282	0,12823	0,15724
28,5	7	350	36,6333	30,8	565	0,0125	0,092	1,17	0,79285	0,06551	0,12999	0,16396
28,5	7	336,5	35,2203	33,9	590	0,0125	0,092	1,17	0,76227	0,06819	0,1301	0,17068
28,5	7	315	32,97	37	610	0,0125	0,092	1,17	0,71357	0,07026	0,12549	0,17587
28,5	7	270	28,26	46,3	660	0,0125	0,092	1,17	0,61163	0,07525	0,1152	0,18836
28,5	7	240	25,12	61,8	710	0,0125	0,092	1,17	0,54367	0,07949	0,10816	0,19895
28,5	7	180	18,84	92,8	800	0,0125	0,092	1,17	0,40775	0,08672	0,0885	0,21705
28,5	7	150	15,7	123,8	880	0,0125	0,092	1,17	0,33979	0,09273	0,07886	0,23209
28,5	7	90	9,42	154,8	1050	0,0125	0,092	1,17	0,20388	0,10977	0,05602	0,27476
28,5	7	70	7,32667	185,8	1100	0,0125	0,092	1,17	0,15857	0,1121	0,04449	0,28059
28,5	7	0	0	216,8	1300	0,0125	0,092	1,17	0	0,13283	0	0

Tabel C.19 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 0,9$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	538	56,3107	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,21872	0	0	0
28,5	7	433,7	45,3939	6	250	0,0125	0,092	1,17	0,98245	0,02992	0,07357	0,07489
28,5	7	426,4	44,6299	9,1	275	0,0125	0,092	1,17	0,96592	0,03261	0,07883	0,08161
28,5	7	411,4	43,0599	12,2	310	0,0125	0,092	1,17	0,93194	0,03652	0,08518	0,0914
28,5	7	406,8	42,5784	15,3	320	0,0125	0,092	1,17	0,92152	0,03736	0,08618	0,09352
28,5	7	403	42,1807	18,4	340	0,0125	0,092	1,17	0,91291	0,03944	0,09011	0,09871
28,5	7	398,3	41,6887	21,5	360	0,0125	0,092	1,17	0,90226	0,04151	0,09374	0,10389
28,5	7	394,2	41,2596	24,6	375	0,0125	0,092	1,17	0,89298	0,04297	0,09604	0,10755
28,5	7	390	40,82	27,7	395	0,0125	0,092	1,17	0,88346	0,04504	0,09959	0,11273
28,5	7	382,5	40,035	30,8	415	0,0125	0,092	1,17	0,86647	0,04711	0,10217	0,11792
28,5	7	376,3	39,3861	33,9	435	0,0125	0,092	1,17	0,85243	0,04918	0,10494	0,12311
28,5	7	370,8	38,8104	37	450	0,0125	0,092	1,17	0,83997	0,05064	0,10647	0,12676
28,5	7	365,4	38,2452	40,1	470	0,0125	0,092	1,17	0,82774	0,05272	0,10922	0,13195
28,5	7	363	37,994	43,2	490	0,0125	0,092	1,17	0,8223	0,05479	0,11276	0,13713
28,5	7	355	37,1567	46,3	520	0,0125	0,092	1,17	0,80418	0,05809	0,11692	0,14539
28,5	7	350	36,6333	49,4	540	0,0125	0,092	1,17	0,79285	0,06016	0,11938	0,15058
28,5	7	341	35,6913	52,5	570	0,0125	0,092	1,17	0,77246	0,06346	0,12269	0,15883
28,5	7	334,6	35,0215	55,6	590	0,0125	0,092	1,17	0,75796	0,06553	0,12432	0,16402
28,5	7	316	33,0747	58,7	610	0,0125	0,092	1,17	0,71583	0,0676	0,12112	0,16921
28,5	7	301	31,5047	68	640	0,0125	0,092	1,17	0,68185	0,07014	0,1197	0,17556
28,5	7	250	26,1667	83,5	700	0,0125	0,092	1,17	0,56632	0,0756	0,10716	0,18922
28,5	7	201	21,038	114,5	770	0,0125	0,092	1,17	0,45532	0,08038	0,0916	0,20119
28,5	7	162	16,956	145,5	840	0,0125	0,092	1,17	0,36698	0,08516	0,07822	0,21316
28,5	7	120	12,56	176,5	950	0,0125	0,092	1,17	0,27183	0,09485	0,06453	0,2374
28,5	7	70	7,32667	207,5	1050	0,0125	0,092	1,17	0,15857	0,10331	0,041	0,25858
28,5	7	0	0	238,5	1300	0,0125	0,092	1,17	0	0,13017	0	0

Tabel C.20 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 1,8$  dan  $d/D 1,0$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28,5	7	560,2	58,6343	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,26901	0	0	0
28,5	7	481	50,3447	6	225	0,0125	0,092	1,17	1,0896	0,02685	0,07324	0,06722
28,5	7	449	46,9953	9,1	300	0,0125	0,092	1,17	1,01711	0,03567	0,09081	0,08928
28,5	7	436,2	45,6556	12,2	330	0,0125	0,092	1,17	0,98812	0,03897	0,09638	0,09754
28,5	7	422,98	44,2719	15,3	360	0,0125	0,092	1,17	0,95817	0,04227	0,10137	0,1058
28,5	7	413,66	43,2964	18,4	380	0,0125	0,092	1,17	0,93706	0,04434	0,104	0,11098
28,5	7	396,32	41,4815	21,5	420	0,0125	0,092	1,17	0,89778	0,04887	0,10981	0,12231
28,5	7	388,58	40,6714	24,6	440	0,0125	0,092	1,17	0,88024	0,05094	0,11223	0,12749
28,5	7	379,12	39,6812	27,7	460	0,0125	0,092	1,17	0,85882	0,05301	0,11395	0,13268
28,5	7	369,3	38,6534	30,8	480	0,0125	0,092	1,17	0,83657	0,05508	0,11534	0,13787
28,5	7	359,7	37,6486	33,9	505	0,0125	0,092	1,17	0,81482	0,05777	0,11782	0,14459
28,5	7	353,3	36,9787	37	515	0,0125	0,092	1,17	0,80033	0,05861	0,11741	0,14671
28,5	7	348,34	36,4596	40,1	530	0,0125	0,092	1,17	0,78909	0,06007	0,11865	0,15036
28,5	7	343,04	35,9049	43,2	540	0,0125	0,092	1,17	0,77708	0,06092	0,11849	0,15248
28,5	7	322,12	33,7152	46,3	560	0,0125	0,092	1,17	0,72969	0,06299	0,11505	0,15767
28,5	7	289,22	30,2717	49,4	570	0,0125	0,092	1,17	0,65517	0,06384	0,10468	0,15978
28,5	7	271,1	28,3751	52,5	590	0,0125	0,092	1,17	0,61412	0,06591	0,10131	0,16497
28,5	7	228,82	23,9498	61,8	620	0,0125	0,092	1,17	0,51834	0,06845	0,0888	0,17132
28,5	7	194,42	20,3493	71,1	650	0,0125	0,092	1,17	0,44042	0,07099	0,07825	0,17768
28,5	7	153,58	16,0747	86,6	700	0,0125	0,092	1,17	0,3479	0,07522	0,0655	0,18827
28,5	7	116,56	12,1999	117,6	780	0,0125	0,092	1,17	0,26404	0,08123	0,05368	0,2033
28,5	7	83,875	8,77892	148,6	850	0,0125	0,092	1,17	0,19	0,08601	0,0409	0,21527
28,5	7	48,84	5,11192	179,6	940	0,0125	0,092	1,17	0,11064	0,09324	0,02582	0,23338
28,5	7	36,5	3,82033	210,6	990	0,0125	0,092	1,17	0,08268	0,09557	0,01978	0,23921
28,5	7	0	0	241,6	1100	0,0125	0,092	1,17	0	0,10526	0	0

## D. Data Uncertainty pada penelitian

### Uncertainty Luas (A)

$$A = A(L, H) = LH$$

$$dA = \frac{\partial A}{\partial L} dL + \frac{\partial A}{\partial H} dH = HdL + LdH$$

$$u_{A,L} = \frac{\delta A, L}{A} = \frac{L}{A} \frac{\partial A}{\partial L} u_L = \frac{L}{LH} (H) u_L = u_L = \pm \frac{0,5 \text{ mm}}{309 \text{ mm}}$$

$$= \pm 1,618 \times 10^{-3}$$

$$u_{A,H} = \frac{\delta A, H}{A} = \frac{H}{A} \frac{\partial A}{\partial H} u_H = \frac{H}{LH} (L) u_H = u_H = \pm \frac{0,5 \text{ mm}}{298 \text{ mm}}$$

$$= \pm 1,678 \times 10^{-3}$$

$$\begin{aligned}
 u_A &= \pm[(u_L)^2 + (u_H)^2]^{1/2} \\
 &= \pm[(1,618 \times 10^{-3})^2 + (1,678 \times 10^{-3})^2]^{1/2} \\
 u_A &= \pm 2,331 \times 10^{-3} = \pm 0,233\%
 \end{aligned}$$

### **Uncertainty Massa Jenis ( $\rho$ )**

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

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

$$\begin{aligned}
 \frac{d\rho}{dT} \approx \frac{\Delta\rho}{\Delta T} &= \frac{\rho(30^\circ\text{C}) - \rho(27^\circ\text{C})}{(30 - 27)^\circ\text{C}} = \frac{(1,1768 - 1,1651) \text{ kg}/\text{m}^3}{3^\circ\text{C}} \\
 &= 3,9 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3\text{C}
 \end{aligned}$$

$$u_{\rho(T)} = \pm \frac{1}{1,1710 \text{ kg}/\text{m}^3} (3,9 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3\text{C}) (\pm 0,1^\circ\text{C})$$

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

### **Uncertainty Viskositas Dinamis ( $\mu$ )**

$$\mu = \mu(T) = T^{3/2}$$

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

$$\begin{aligned}
 \frac{d\mu}{dT} \approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} &= \frac{\mu(30^\circ\text{C}) - \mu(27^\circ\text{C})}{(30 - 27)^\circ\text{C}} \\
 &= \frac{(1,8601 \times 10^{-5}) - (1,846 \times 10^{-5}) \text{ kg}/\text{ms}}{3^\circ\text{C}}
 \end{aligned}$$

$$\frac{d\mu}{dT} = 4,7 \times 10^{-8} \text{Ns}/\text{m}^2\text{°C}$$

$$u_{\mu(T)} = \pm \frac{1}{1,853 \times 10^{-5} \text{kg}/\text{m}_s} \left( 4,7 \times 10^{-8} \text{Ns}/\text{m}^2\text{°C} \right) (\pm 0,1\text{°C})$$

$$u_{\mu(T)} = \pm 2,5473 \times 10^{-3} = \pm 0,255\%$$

### Uncertainty Bilangan Reynolds (Re)

$$Re = Re(\rho, V, L, \mu) = \rho VL\mu^{-1}$$

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

$$dRe = (VL\mu^{-1})d\rho + (\rho L\mu^{-1})dV + (\rho V\mu^{-1})dL + [(-\mu^{-2})\rho VL]d\mu$$

$$u_{Re,\rho} = \frac{\delta Re, \rho}{Re} = \frac{\rho}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} u_\rho = \rho \frac{\mu}{\rho VL} \frac{VL}{\mu} u_\rho = u_\rho$$

$$= \pm 3,332 \times 10^{-3}$$

$$u_{Re,V} = \frac{\delta Re, V}{Re} = \frac{V}{Re} \frac{\partial Re}{\partial V} u_V = V \frac{\mu}{\rho VL} \frac{\rho L}{\mu} u_V = u_V$$

$$= \pm \left( \frac{0,01 \text{ m/s}}{5 \text{ m/s}} \right) = \pm 2 \times 10^{-3}$$

$$u_{Re,L} = \frac{\delta Re, L}{Re} = \frac{L}{Re} \frac{\partial Re}{\partial L} u_L = L \frac{\mu}{\rho VL} \frac{\rho V}{\mu} u_L = u_L$$

$$= \pm 1,618 \times 10^{-3}$$

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

$$= \pm (-2,55 \times 10^{-3})$$

$$u_{Re} = \pm \left[ (u_\rho)^2 + (u_V)^2 + (u_L)^2 + (u_\mu)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{Re} = \pm[(3,332 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 10^{-3})^2 + (1,618 \times 10^{-3})^2 + (-2,55 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$$

$$u_{Re} = \pm 2,606 \times 10^{-3} = \pm 0,261\%$$

### **Uncertainty Torsi Dinamis ( $T_D$ )**

$$T_D = T_D(m-s, r) = (m-s)r$$

$$dT_D = \frac{\partial T_D}{\partial(m-s)} d(m-s) + \frac{\partial T_D}{\partial r} dr = rd(m-s) + (m-s)dr$$

$$u_{T_D, (m-s)} = \frac{\delta T_D, (m-s)}{T_D} = \frac{(m-s)}{T_D} \frac{\partial T_D}{\partial(m-s)} u_{(m-s)} = u_{(m-s)}$$

$$u_{T_D, r} = \frac{\delta T_D, r}{T_D} = \frac{r}{T_D} \frac{\partial T_D}{\partial r} u_r = u_r$$

$$u_{(m-s)} = \pm \left( \frac{0,1 \text{ gr}}{18,4 \text{ gr}} \right) - \left( \frac{10 \text{ gr}}{540 \text{ gr}} \right) = \pm 0,01308$$

$$u_r = \pm \frac{0,5 \text{ mm}}{12,5 \text{ mm}} = \pm 0,04$$

$$u_{T_D} = \pm \left[ (u_{(m-s)})^2 + (u_r)^2 \right]^{1/2} = [(0,01308)^2 + (0,04)^2]^{1/2}$$

$$u_{T_D} = \pm 0,04208 = \pm 4,208\%$$

### **Uncertainty Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )**

$$\lambda = \lambda(\omega, R, V) = \omega R V^{-1}$$

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial \lambda}{\partial R} dR + \frac{\partial \lambda}{\partial V} dV$$

$$d\lambda = (R V^{-1}) d\omega + (\omega V^{-1}) dR + (-V^{-2} \omega R) dV$$

$$u_{\lambda,\omega} = \frac{\delta\lambda\omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial\omega} u_\omega = \frac{\omega}{\omega RV^{-1}} (RV^{-1}) u_\omega = u_\omega = \frac{0,1/min}{215,9/min} \\ = \pm 4,63 \times 10^{-4}$$

$$u_{\lambda,R} = \frac{\delta\lambda R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial R} u_R = \frac{R}{\omega RV^{-1}} (\omega V^{-1}) u_R = u_R = \pm \frac{0,5mm}{154,5mm} \\ = \pm 3,23 \times 10^{-3}$$

$$u_{\lambda,V} = \frac{\delta\lambda V}{\lambda} = \frac{V}{\lambda} \frac{\partial\lambda}{\partial V} u_V = \frac{V}{\omega RV^{-1}} (-V^{-2}\omega R) u_V = -u_V \\ = \pm (-2 \times 10^{-3})$$

$$u_\lambda = \pm [(u_\omega)^2 + (u_R)^2 + (-u_V)^2]^{1/2}$$

$$u_\lambda = \pm [(4,63 \times 10^{-4})^2 + (3,23 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$$

$$u_\lambda = \pm 3,827 \times 10^{-3} = 0,383\%$$

### **Uncertainty Coefficient of Power (CoP)**

$$CoP = CoP(T_D, \omega, \rho, V, A) = T_D \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}$$

$$dCoP = \frac{\partial CoP}{\partial T_D} dT_D + \frac{\partial CoP}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial CoP}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial CoP}{\partial V} dV + \frac{\partial CoP}{\partial A} dA$$

$$dCoP = (\omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) dT_D + (T_D \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) d\omega \\ + [(-\rho^{-2}) T_D \omega V^{-3} A^{-1}] d\rho \\ + [(-3V^{-4}) T_D \omega \rho^{-1} A^{-1}] dV \\ + [(-A^{-2}) T_D \omega V^{-3} \rho^{-1}] dA$$

$$u_{CoP,T_D} = \frac{\delta CoP, T_D}{CoP} = \frac{T_D}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial T_D} u_{T_D} = T_D \left( \frac{\rho V^3 A}{\omega} \right) \left( \frac{\omega}{\rho V^3 A} \right) u_{T_D} \\ = u_{T_D} = \pm 0,04208$$

$$u_{CoP,\omega} = \frac{\delta CoP, \omega}{CoP} = \frac{\omega}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \omega} u_\omega = \omega \left( \frac{\rho V^3 A}{T_D} \right) \left( \frac{T_D}{\rho V^3 A} \right) u_\omega = u_\omega \\ = \pm \frac{0,1/min}{215,9/min} = \pm 4,63 \times 10^{-4}$$

$$u_{CoP,\rho} = \frac{\delta CoP,\rho}{CoP} = \frac{\rho}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \rho} u_\rho = \rho \left( \frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left( -\frac{T_D \omega}{\rho^2 V^3 A} \right) u_\rho$$

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

$$u_{CoP,V} = \frac{\delta CoP,V}{CoP} = \frac{V}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial V} u_V = V \left( \frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left( -\frac{3T_D \omega}{\rho V^4 A} \right) u_V$$

$$= -3u_V = \pm(-3 \times 2 \times 10^{-3})$$

$$u_{CoP,A} = \frac{\delta CoP,A}{CoP} = \frac{A}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial A} u_A = A \left( \frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left( -\frac{T_D \omega}{\rho V^3 A} \right) u_A$$

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

$$u_{CoP} = \pm \left[ (u_{T_D})^2 + (u_\omega)^2 + (-u_\rho)^2 + (-3u_V)^2 + (-u_A)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{CoP} = \pm \left[ (0,04208)^2 + (4,63 \times 10^{-4})^2 + (-3,332 \times 10^{-3})^2 + (-3 \times 2 \times 10^{-3})^2 + (-2,331 \times 10^{-3})^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0427 = \pm 4,27\%$$

### **Uncertainty Coefficient of Moment (C<sub>M</sub>)**

$$C_M = C_M(T_D, \rho, A, V, R) = 2T_D \rho^{-1} A^{-1} V^{-2} R^{-1}$$

$$dC_M = \frac{\partial C_M}{\partial T_D} dT_D + \frac{\partial C_M}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial C_M}{\partial A} dA + \frac{\partial C_M}{\partial V} dV + \frac{\partial C_M}{\partial R} dR$$

$$dC_M = (\rho^{-1} A^{-1} V^{-2} R^{-1}) dT_D + [(-\rho^2) T_D A^{-1} V^{-2} R^{-1}] d\rho$$

$$+ [(-A^2) T_D \rho^{-1} V^{-2} R^{-1}] dA$$

$$+ [(-2V^3) T_D \rho^{-1} A^{-1} R^{-1}] dV$$

$$+ [(-R^2) T_D \rho^{-1} A^{-1} V^{-2}] dR$$

$$u_{C_M, T_D} = \frac{\delta C_M, T_D}{C_M} = \frac{T_D}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial T_D} u_{T_D} = T_D \left( \frac{\rho A V^2 R}{T_D} \right) \left( \frac{1}{\rho A V^2 R} \right) u_{T_D}$$

$$= u_{T_D} = \pm 0,04338$$

$$u_{C_M, \rho} = \frac{\delta C_M, \rho}{C_M} = \frac{\rho}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial \rho} u_\rho = \rho \left( \frac{\rho AV^2 R}{T_D} \right) \left( -\frac{T_D}{\rho^2 AV^2 R} \right) u_\rho$$

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

$$u_{C_M, A} = \frac{\delta C_M, A}{C_M} = \frac{A}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial A} u_A = A \left( \frac{\rho AV^2 R}{T_D} \right) \left( -\frac{T_D}{\rho A^2 V^2 R} \right) u_A$$

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

$$u_{C_M, V} = \frac{\delta C_M, V}{C_M} = \frac{V}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial V} u_V = V \left( \frac{\rho AV^2 R}{T_D} \right) \left( -\frac{2T_D}{\rho AV^3 R} \right) u_V$$

$$= -2u_V = \pm(-2 \times 2 \times 10^{-3})$$

$$u_{C_M, R} = \frac{\delta C_M, R}{C_M} = \frac{R}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial R} u_R = R \left( \frac{\rho AV^2 R}{T_D} \right) \left( -\frac{T_D}{\rho AV^2 R^2} \right) u_R$$

$$= -u_R = \pm(-3,236 \times 10^{-3})$$

$$u_{C_M} = \pm \left[ (u_{T_D})^2 + (-u_\rho)^2 + (-u_A)^2 + (-2u_V)^2 + (-u_R)^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{C_M} = \pm [(0,04208)^2 + (-3,332 \times 10^{-3})^2 + (-2,331 \times 10^{-3})^2$$

$$+ (-2 \times 2 \times 10^{-3})^2 + (-3,236 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,04287 = \pm 4,287\%$$

## BIODATA PENULIS



**Markus Sarsanto** merupakan anak kedua dari pasangan Parmahan Janauli Tambunan dan Rita Endang. Penulis lahir di Jakarta pada tanggal 4 Maret 1996, memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SDK 3 BPK Penabur pada tahun 2002, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di Tarakanita 4 Jakarta lulus tahun 2011 dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 31 Jakarta lulus tahun 2014. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015 melalui jalur Mandiri ITS.

Semasa kuliah penulis aktif dalam seluruh kegiatan akademik maupun non akademik. Dalam bidang organisasi, penulis aktif sebagai staf Divisi Hubungan Luar Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin FTI-ITS di tahun 2016-2017.

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