



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

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

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

MUHAMMAD GHIYATS HUMAM
NRP 02111540000178

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR – TM184835

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

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

Muhammad Ghiyats Humam
02111540000178

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

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



FINAL PROJECT – TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF
DISTURBER CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF
THE SIDE RETURNING BLADE ON THE
PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE**

**"Case Study for Disturber Cylinder Size $S/D = 2.0$; $y/D = 0.5$;
 $d/D = 0.1$; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8 ; 0.9 ; 1.0 ; on $Re = 9,7 \times 10^4$
and $13,6 \times 10^4$ "**

Muhammad Ghiyats Humam
02111540000178

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

BACHELOR'S DEGREE
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM
ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020

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

**“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D
= 2,0; 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; 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:

Muhammad Ghiyats Humam
NRP. 02111540000178

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA(Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD(Penguji 1)
NIP. 198105292003122004
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD(Penguji 2)
NIP. 196412281990031002
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST, MT, PhD(Penguji 3)
NIP. 197512062005011002

**SURABAYA
JANUARI, 2020**

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

“Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu $S/D = 2.0$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0,9$ dan $1,0$; pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ”

Nama Mahasiswa : Muhammad Ghiyats Humam
NRP : 021 1 15 4000 0178
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Peran energi saat ini semakin vital pada setiap aktivitas masyarakat hampir di seluruh Indonesia. Hal ini ditandai oleh kenaikan konsumsi energi pada setiap tahunnya. Demi mencukupi kebutuhan energi di masa depan diperlukannya alternatif penghasil sumber energi yaitu energi terbarukan. Potensi energi baru terbarukan di Indonesia saat ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Seperti halnya energi angin, yang merupakan energi bersih tanpa menghasilkan polusi pada penggunaannya. Saat ini, pengembangan dan pemanfaatan energi angin semakin difokuskan. Salah satu pemanfaatan energi angin tersebut adalah dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin dapat mengonversi energi 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_o) sebesar 320 mm, tinggi (H) sebesar 298

mm, dan diameter poros (b) sebesar 19,3 mm. Penelitian menggunakan silinder pengganggu untuk mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*. Sumber aliran digunakan axial fan dan digunakan *honeycomb* untuk penyeragam aliran yang menuju turbin angin Savonius. Penelitian ini dilakukan dengan rasio letak penghalang terhadap *returning blade* (S/D) sebesar 2,0 lalu dengan variasi diameter silinder pengganggu 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, serta variasi bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$, dan $13,6 \times 10^4$. Pada penelitian ini alat ukur yang digunakan adalah *anemometer* sebagai pengukur kecepatan aliran, *torque meter* sebagai pengukur torsi statis, *tachometer* sebagai pengukur kecepatan putaran turbin, dan *brake dynamometer* sebagai pengukur torsi dinamis.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini 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 $Re = 9,7 \times 10^4$ paling efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya *Coefficient of power* maksimum sebesar 40,82% menjadi 0,2134 dan meningkatnya *Coefficient of Moment* maksimum sebesar 39,25% menjadi 0,395. Selain itu, penempatan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* berdiameter $d/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$, $d/D = 0,4$ pada $Re = 13,6 \times 10^4$ mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius di semua posisi angular *blade* turbin dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

Kata Kunci : *Coefficient Of Moment, Coefficient Of Power, Turbin Angin Savonius, Torsi Statis, Torsi Dinamis.*

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF
DISTURBER CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF
THE SIDE RETURNING BLADE ON THE
PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE**

“Study Case of Ratio Variation $S/D = 2.0$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0,9$ and $1,0$; on $Re = 9,7 \times 10^4$ and $13,6 \times 10^4$ ”

Name of Student : Muhammad Ghiyats Humam
NRP : 021 1 15 4000 0178
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

The role of energy is now increasingly vital in every community activity in almost all of Indonesia. This is marked by an increase in energy consumption every year. In order to meet the energy needs in the future, it needs alternative sources of energy sources, namely renewable energy. The potential for new renewable energy in Indonesia is currently not fully utilized. As with wind energy, which is clean energy without producing pollution in its use. At present, the development and utilization of wind energy is increasingly focused. One of the uses of wind energy is by using wind turbines. Wind turbines can convert wind energy into electrical energy using generators. Because Indonesia is an area with low wind speed, it is suitable for use with wind turbines with Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) type.

In this study Savonius wind turbines have blades with a turbine diameter (D) of 167.1 mm, end plate (D_o) diameter of 320 mm, height (H) of 298 mm, and shaft diameter (b) of 19.3 mm. The study used a disruptive cylinder to reduce the drag force that occurs on the returning blade. The flow source is obtained using an axial fan and honeycomb is used to uniform the flow to Savonius

wind turbine. This research was conducted with a ratio of the location of the barrier to returning blade (S / D) of 2.0, then the variation of the disruptive cylinder diameter 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 variations of Reynolds numbers of 97,000 and 136,000. In this study the measuring instruments used were anemometer as a measure of flow velocity, torque meter as a gauge of static torque, tachometer as a measure of turbine rotation speed, and brake dynamometer as a dynamic torque gauge.

The results obtained from this study is the Savonius wind turbines with disturbing cylinders in front of the returning blade at $d / D = 0.5$ and $Re = 9,7 \times 10^4$, is improved the performance of Savonius wind turbines effectively. This is proven by increasing the maximum Coefficient of power by 40.82% to 0.2134 value of CoP and increasing the maximum Coefficient of Moment by 39.25% to 0.395 value of CM. In addition, the placement of the disruptive cylinders placed in front of the returning blade with a diameter $d / D = 0.5$ at $Re = 9,7 \times 10^4$, $d / D = 0.4$ at $Re = 13,6 \times 10^4$ are able to increase the self-starting ability of the Savonius wind turbine in all angular positions of the blade turbine compared to Savonius wind turbine without a disturbance.

Keywords: Coefficient Of Power, Coefficient Of Moment, Dynamic Torque, Savonius Wind Turbine, Static Torque.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya yang senantiasa dilimpahkan kepada penulis. Sehingga bisa menyelesaikan tugas akhir ini sebagai syarat untuk menyelesaikan Program Sarjana (S1) pada Program Sarjana Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS

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

1. Orangtua penulis Bapak Ahmad Suhandi, Ibu Siti Masnah dan kakak penulis Aida Farah beserta keluarga besar atas doa dan dukungannya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing Tugas Akhir.
3. Seluruh civitas akademika teknik mesin FTIRS-ITS yang membantu dalam pengerjaan tugas akhir.
4. Seluruh rekan tugas akhir bimbingan pak Triyogi yang berjuang bersama dalam menyelesaikan tugas akhir ini; Kiki, Hilda, Asri, Ardy, Lazuardhi, Prabas, Markus).
5. Teman-teman M58 yang sukarela mendukung dalam proses pembuatan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Suweger Indonesia yang telah membantu memberi semangat.

Penulis mohon maaf atas segala kesalahan yang pernah dilakukan. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat untuk penelitian-penelitian selanjutnya

Surabaya, Januari 2020

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Turbin Angin	7
2.2 Turbin Savonius	9
2.3 Gaya Drag	10
2.4 Reynolds Number	11
2.5 Performa Turbin Savonius	13
2.5.1 Coefficient of Power	13
2.5.2 Coefficient of Moment	16
2.6 Perhitungan Torsi Dinamis	17
2.7 Tip Speed Ratio	18
2.8 Aliran Melintasi Sebuah Silinder	19

2.9	Penelitian Terdahulu.....	20
2.9.1	Penelitian Peningkatan Performa Turbin Savonius	20
2.9.2	Studi Ekperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Menggunakan Plat Pengganggu.....	25
2.9.2.1	Pengurangan Drag Pada Silinder Sirkular Dalam Aliran Udara.....	25
2.9.2.2	Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius, Studi Kasus d/D = 0,5; S/D = 2,0; dengan Bilangan Reynolds = 9,7 x 10⁴; 14,5 x 10⁴; 17,8 x 10⁴; y/D = 0,0; 0,25, 0,5”	27
	BAB III METODOLOGI PENELITIAN	43
3.1.	<i>Setting Experimental</i>	43
3.1.1	Analisa Parameter	43
3.1.2	Analisa Dimensi	45
3.1.2.1	Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	45
3.1.2.2	Analisa Dimensi <i>Coefficient of Moment (C_M)</i>	48
3.2	Peralatan Penelitian	51
3.2.1	<i>Axial Fan</i>	51
3.2.2	<i>Honeycomb</i>	52
3.2.3	Benda Uji.....	53
3.2.4	Silinder Pengganggu	53
3.2.5	Penyangga Turbin Angin Savonius	55
3.3	Alat Ukur	55
3.3.1	Anemometer	55
3.3.2	Tachometer	56

3.3.3	<i>Brake dynamometer</i>	57
3.3.4	<i>Torque meter</i>	58
3.3.5	<i>Voltage Regulator</i>	58
3.3.6	Neraca Pegas	59
3.3.7	Massa Pemberat.....	59
3.4	Prosedur Penelitian	60
3.4.1	Torsi Dinamis.....	60
3.4.2	Torsi Statis	62
3.5	Flowchart Penelitian.....	64
3.5.1	Flowchart Prosedur Penelitian Torsi Dinamis.....	64
3.5.2	Flowchart Penelitian Torsi Statis.....	67
3.6.	Perhitungan Uncertainty	68
3.7	Hasil yang Diperoleh	70
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		71
4.1	Contoh Perhitungan	71
4.1.1	Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	71
4.1.2	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ).....	74
4.1.3	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	75
4.1.4	Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	76
4.2	Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu Dengan Variasi Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	77
4.2.1	Analisa Coefficient of Power (CoP_0) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	78

4.2.2 Analisa Coefficient of Moment (CM_0) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	79
4.2.3 Torsi Statis (TS_0) terhadap Posisi Sudut <i>Blade</i> (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	81
4.3 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Pengganggu dengan Variasi d/D ($0,1 \leq d/D \leq 1.0$).....	83
4.3.1 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Pengganggu dengan Variasi d/D ($0,1 \leq d/D \leq 1.0$) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.....	83
4.3.1.1 Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu	84
4.3.1.2 Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum (CoPmax) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoPmax/CoP₀max)	88
4.3.2 Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ).....	90
4.3.2.1 Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dengan variasi d/D	90
4.3.3 Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Sudut <i>Blade</i> (θ).....	95
4.3.3.1 Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Sudut <i>Blade</i> (θ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.....	95

4.4 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Penghalang dengan Variasi d/D ($0,1 \leq d/D \leq 1.0$) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	98
4.4.1 Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maksimum (CoPmax) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu (CoPmax/CoP₀max) dengan variasi S/D terhadap d/D.....	98
4.4.2 Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maksimum (CoPmax) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu (CoPmax/CoP₀max) dengan variasi d/D terhadap S/D...	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	105
5.1 Kesimpulan	105
5.2 Saran.....	106
DAFTAR PUSTAKA	107
LAMPIRAN.....	109
A. UNIFORMITY FLOW TEST	109
B. DATA PENELITIAN TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGGANGGU	112
C. DATA PENELITIAN TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU	115
D. UNCERTAINTY	130
BIODATA PENULIS.....	135

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Variasi Jumlah Blade Pada HAWT (Daryanto, 2007).....	8
Gambar 2. 2 Tipe Rotor Savonius (Soelaiman, 2006)	9
Gambar 2. 3 (a) Rotor Savonius U, dan (b) Rotor Savonius L (Soelaiman, 2006).....	10
Gambar 2. 4 Ilustrasi tampak atas turbin Savonius	13
Gambar 2. 5 Free body diagram brake dynamometer (Rustam, 2018)	15
Gambar 2. 6 Aliran Viscous dan Aliran Inviscid pada Bola Pejal (Pritchard, 2011)	19
Gambar 2. 7 Pengaruh Aliran Turbulensi terhadap Titik Separasi (Incropera, 2007).....	20
Gambar 2. 8 (a) Skematik Penelitian, (b) Foto Dari Double Stages Turbin Savonius, (c) Foto Dari Rangka Pengujian (Mahmoud, et al., 2012)	21
Gambar 2. 9 Grafik Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Savonius Dua, Tiga dan Empat Blades (Mahmoud, et al., 2012)	22
Gambar 2. 10 Grafik <i>Specific of Power</i> terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Savonius <i>Single Stage</i> dan <i>Double Stages</i> (Mahmoud, et al., 2012)	23
Gambar 2. 11 Grafik <i>Power</i> terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi (β) <i>overlap ratio</i> (Mahmoud, et al., 2012)	24
Gambar 2. 12 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	25
Gambar 2. 13 Grafik Koefisien Drag Terhadap Re (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	26
Gambar 2. 14 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkuler Utama (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	26

Gambar 2. 15 Skema Turbin Angin Savonius Dengan Peletakan Silinder Penghalang di Depan Returning Blade (Rustam, 2018).....	28
Gambar 2. 16 Grafik <i>Coefficient of Power</i> Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>(λ) (Rustam, 2018).....	29
Gambar 2. 17 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CM_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) (Rustam, 2018).....	30
Gambar 2. 18 Grafik Torsi Statis Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (TS_0) sebagai Fungsi Sudut (θ) (Rustam, 2018)	32
Gambar 2. 19 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>(λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	33
Gambar 2. 20 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	35
Gambar 2. 21 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i>(λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Rustam, 2018)	36
Gambar 2. 22 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Rustam, 2018)	38
Gambar 2. 23 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Rustam, 2018).....	39
Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder	

Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Rustam, 2018)	40
Gambar 3. 1 Skema Turbin dan Parameter Ukur	43
Gambar 3. 2 Skema Penelitian Turbin Savonius.....	44
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18	51
Gambar 3. 4 <i>Honeycomb</i>	52
Gambar 3. 5 Turbin Savonius	53
Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu	54
Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius.....	55
Gambar 3. 8 <i>Anemometer</i>	56
Gambar 3. 9 Tachometer	56
Gambar 3. 10 Skema <i>Brake dynamometer</i>	57
Gambar 3. 11 Torque meter	58
Gambar 3. 12 <i>Voltage Regulator</i>	59
Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA tipe C-5.....	59
Gambar 3. 14 Massa Pemberat	60
Gambar 3. 15 Flowchart Torsi Dinamis.....	66
Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis.....	68
Gambar 4.1 Grafik CoP_0 terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> pada Re 97,000 dan 136.000.....	78
Gambar 4.2 Grafik CM_0 terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> tanpa Penghalang	80
Gambar 4.3 Grafik TS_0 terhadap Sudut θ	81
Gambar 4. 4 Grafik CoP dan CoP_0 terhadap (λ) dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$; dan $1,0$ dengan $S/D=2,0$ pada (a) $Re = 97000$; (b) $Re = 136.000$	84
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) menggunakan $d/D = 0.1 - 1.0$ pada $S/D 2,0$, bilangan Reynolds 97.000 dan 136.000	88
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan CM dan CM_0 terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) 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 S/D 2,0 pada bilanga Reynolds 97000.....	90
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan CM dan CM ₀ terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) 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 S/D 2,0 pada bilanga Reynolds 136000.....	91
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Ts dan Ts ₀ terhadap sudut (θ) dengan variasi d/D = 0,5; S/D = 2,0; pada Re = 97.000 ..	96
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Ts dan Ts ₀ terhadap sudut (θ) dengan variasi d/D = 0,5; S/D = 2,0; pada Re = 97.000.....	96
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan CoP _{max} /CoP _{0max} terhadap d/D dengan variasi $1,4 \leq S/D \leq 3,0$ pada bilangan Reynolds 97.000	99
Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan CoP _{max} /CoP _{0max} terhadap d/D dengan variasi $1,4 \leq S/D \leq 3,0$ pada bilangan Reynolds 136.000	99
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan CoP _{max} /CoP _{0max} terhadap S/D dengan variasi $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ pada bilangan Reynolds 97.000	101
Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan CoP _{max} /CoP _{0max} terhadap S/D dengan variasi $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ pada bilangan Reynolds 136.000	102

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter <i>coefficient of power</i>	46
Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter <i>coefficient of moment</i>	49
Tabel 3. 3 Spesifikasi <i>fan</i> CKE SPV-18.....	52
Tabel 3. 4 Data <i>Uncertainty</i>	70
Tabel 4.1 Data turbin angin Savonius Tanpa Penghalang Silinder	78
Tabel 4.2 Data TS_0 terhadap Sudut θ	82
Tabel 4.3 Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>tip speed ratio</i> (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ pada S/D 2,0	86
Tabel 4. 4 Tabel Uncertainty nilai CoP	87
Tabel 4. 5 Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada Re $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	92
Tabel 4. 6 Tabel Uncertainty CM.....	94

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peran energi saat ini semakin vital pada setiap aktivitas masyarakat hampir di seluruh Indonesia. Hal ini ditandai oleh kenaikan konsumsi energi pada setiap tahunnya. Pada tahun 2016, konsumsi energi final Indonesia mencapai 751,3 juta BOE (**ESDM, 2017**). Konsumsi energi final didominasi oleh bahan bakar minyak yang mencapai 41,7% kemudian diikuti konsumsi listrik 19%, gas bumi 14,6%. Ketergantungan konsumsi bahan bakar minyak sampai saat ini terus bertambah, ditandai dengan adanya kenaikan konsumsi bahan bakar minyak setiap tahunnya dan diprediksi kurang dari 15 tahun lagi cadangan minyak akan habis. Demi mencukupi kebutuhan energi di masa depan diperlukannya alternatif penghasil sumber energi yaitu energi terbarukan. Potensi energi baru terbarukan di Indonesia saat ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Seperti halnya energi angin, yang merupakan energi bersih tanpa menghasilkan polusi pada penggunaannya. Menurut data EBTKE tahun 2014, potensi energi angin di Indonesia mencapai angka 960 MW dengan kecepatan angin rata-rata 3,2 hingga 4,8 m/detik. Saat ini, pengembangan dan pemanfaatan energi angin semakin difokuskan dikarenakan pemerintah memiliki target bauran energi nasional sebesar 23% yang berasal dari EBT pada tahun 2025. Dengan rentang kecepatan angin 2,2 hingga 7,5 m/detik (**ESDM, 2017**), turbin angin Savonius cocok untuk digunakan sebagai pembangkit listrik tenaga angin dikarenakan dapat bekerja pada kecepatan angin rendah.

Turbin Savonius merupakan salah satu jenis turbin vertikal axis. Konsep kerja turbin ini cukup sederhana dimana turbin ini akan menghasilkan daya dengan memanfaatkan gaya drag. Gaya drag ini dihasilkan oleh tiap-tiap sudu yang diakibatkan oleh

dorongan aliran pada kedua blade. Perbedaan arah cekungan antara *advancing blade* dan *returning blade* mengakibatkan adanya perbedaan nilai gaya drag yang dihasilkan dimana selisih dari kedua gaya drag tersebut akan menyebabkan torsi sehingga turbin Savonius dapat berputar. Semakin besar torsinya maka akan semakin besar pula daya yang dihasilkan. Turbin Savonius menyerap tenaga yang lebih kecil jika dibandingkan turbin angin yang memiliki ukuran sejenis dikarenakan tenaga yang diperoleh telah digunakan untuk mendorong *blade* yang berlawanan arah angin, sehingga turbin ini memiliki efisiensi yang relatif kecil. Maka dari itu, untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius, sampai saat ini penelitian terkait turbin Savonius masih terus berlanjut.

Pada tahun 2002, telah dilakukan penelitian oleh **Tsutsui dan Igarashi** 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 (d/D), dan harga bilangan Reynolds (Re) 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 2010 **Mahmoud et al**, melakukan percobaan untuk mencari konfigurasi optimal yang bertujuan meningkatkan performa turbin Savonius. Variasi geometri percobaan yang dilakukan meliputi jumlah *blade* (*blade*) yaitu dua *blades* (2b), tiga *blades* (3b), dan empat *blades* (4b); jumlah *stage* turbin yaitu *single stage* (1st.) dan *double stages* (2st.); *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35; aspek rasio (α) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5; dan penggunaan *end plate*. Percobaan dilakukan dengan diletakkan turbin angin Savonius di depan *exit wind tunnel* dengan jarak antara *exit wind tunnel* dan turbin angin sebesar 125cm. *Subsonic wind tunnel* dengan diameter 49 cm dialiri oleh angin dengan kecepatan

0-13 m/s. Didapatkan hasil bahwa turbin Savonius memiliki efisiensi yang lebih baik apabila konstruksinya memiliki dua buah *blades* (*blade*), menggunakan *end plate*, dan tidak memiliki *overlap ratio* atau bernilai 0. Dalam penelitiannya, Mahmood menuliskan bahwa *Coefficient of power* akan meningkat seiring dengan bertambahnya aspek rasio (α).

Penelitian lain yang mendukung dilakukan oleh **Rustam et al (2018)** yaitu tentang pengaruh silinder pengganggu yang diletakkan didepan sisi *returning blade* turbin angin Savonius. Penelitian yang dilakukan oleh Rustam menyatakan bahwa penempatan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ didepan *returning blade* dengan $y/D = 0,5$ dan $Re = 9,7 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai putaran maksimal sebesar 1,054 kali dibandingkan dengan tanpa adanya pengganggu dengan *coefficient of power* (CoP) meningkat 1,062 kali serta *coefficient of moment* (CM) meningkat 1,041 kali. Penempatan silinder pengganggu pada semua variasi bilangan Reynolds mampu membuat turbin angin Savonius mempunyai *self-starting* di semua posisi sudu turbin. Penempatan pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ di $y/D = 0,0; 0,25$ dan $0,5$ serta pada $Re = 9,7 \times 10^4$ di $y/D = 0,0$ dan $0,25$ tidak efektif meningkatkan nilai putaran maupun nilai CoP dan CM.

Berdasarkan beberapa penelitian diatas, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai turbin angin Savonius masih diperlukan untuk memperoleh performa yang lebih optimal. Melalui penelitian yang diusulkan ini, penulis mengharapkan adanya peningkatan performa turbin angin Savonius menggunakan pengganggu berupa silinder sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* dengan memvariasikan rasio diameter silinder sirkular pengganggu terhadap diameter *blade* turbin Savonius (d/D).

1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian ini akan digunakan pengganggu berbentuk silinder sirkular didepan *returning blade* dengan tujuan untuk

menaikkan *Coefficient of Performance* dengan menggunakan variasi perbandingan diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin Savonius (d/D) dengan nilai sebagai berikut; 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1,0. Dugaan pertama (hipotesa) yang diharapkan pada penelitian ini adalah ;

1. Keberadaan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan menyebabkan penurunan tekanan di depan *returning blade* turbin Savonius. Diduga hal tersebut dapat mengurangi *pressure drag* pada sisi *returning blade*. Maka terjadi penurunan gaya drag pada *returning blade* sehingga akan menghasilkan torsi turbin yang semakin besar. Begitu juga dengan daya turbin yang dihasilkan akan semakin besar.
2. Silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* diharapkan menurunkan gaya drag pada *returning blade*. Aliran udara yang telah mengenai silinder sirkular pengganggu akan membentuk *wake* di belakang silinder pengganggu. *Shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan *returning blade*. Lalu menyebabkan *boundary layer* pada permukaan *returning blade* terganggu dan meningkatkan turbulensi pada permukaan *returning blade*. Akibatnya titik separasi pada permukaan *returning blade* akan mundur sehingga *wake* yang terbentuk di belakang turbin Savonius akan lebih sempit. Dengan *wake* yang lebih sempit maka akan menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara kedua *blade* meningkat. Semakin besar selisih gaya drag pada kedua *blade* maka torsi turbin akan meningkat begitu pula dengan meningkatnya daya pada turbin.
3. Variasi diameter silinder sirkular pengganggu terhadap diameter turbin Savonius (d/D) sebesar 0,1; 0,2 ; 0,3;

0,4; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9; 1,0 digunakan untuk mendapatkan hasil optimum dimana *wake* dari silinder pengganggu digunakan secara efektif dalam menurunkan tekanan di depan *returning blade* dan menunda titik separasi. Penghalang berupa silinder sirkular dengan rasio perbandingan (d/D) diduga dapat mengurangi gaya drag pada *returning blade* dengan perbesaran diameter silinder pengganggu hingga mencapai diameter optimumnya. Pengurangan gaya drag pada *returning blade* mengakibatkan torsi, daya, dan *CoP* turbin Savonius akan meningkat. Apabila rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter *returning blade* (d/D) telah melewati nilai optimum maka diduga dapat menyebabkan defleksi aliran yang dapat menyebabkan performa turbin Savonius menjadi kurang optimum.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder sirkular pengganggu di depan *returning blade* terhadap performa turbin Savonius. Penempatan silinder sirkular sebagai pengganggu akan diletakkan didepan *returning blade* turbin Savonius menggunakan variasi rasio diameter silinder sirkular terhadap diameter *blade* turbin Savonius pada *Reynold Number* = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Agar dapat memperoleh hasil akhir studi eksperimen maka dibutuhkan beberapa pengukuran sebagai berikut;

1. Torsi statis turbin Savonius ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.
2. Torsi dinamis turbin Savonius ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.

3. *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.
4. *Coefficient of Moment* turbin angin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut;

1. Analisa aliran adalah eksternal *flow*.
2. Aliran udara yang memiliki karakteristik *steady*, *incompressible*, dan *uniform flow*.
3. Perpindahan panas akibat gesekan udara dengan komponen alat diabaikan.
4. Analisa dilakukan menggunakan rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin angin *Savonius* terhadap diameter *blade* turbin *Savonius* (S/D) sebesar 2,0.
5. Analisa dilakukan menggunakan diameter *blade* turbin *Savonius* (D) sebesar 167.1 mm.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin merupakan suatu alat yang berfungsi mengkonversi energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk beberapa hal sesuai dengan kebutuhan seperti memutar dinamo atau generator untuk menghasilkan listrik atau menggerakkan pompa untuk pengairan.

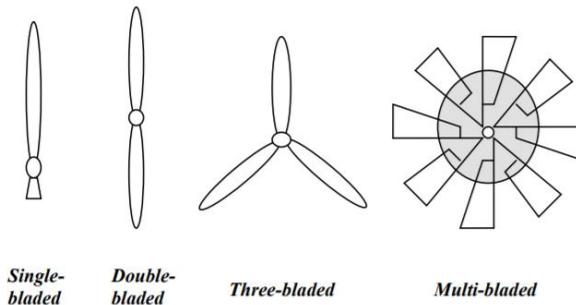
Pemanfaatan energi angin telah dilakukan sejak lama. Pertama kali digunakan untuk menggerakkan perahu di sungai Nil sekitar 5000 SM. Penggunaan kincir sederhana telah dimulai sejak permulaan abad ke-7 dan tersebar diberbagai negara seperti Persia, Mesir, dan Cina dengan berbagai desain. Di Eropa, kincir angin mulai dikenal sekitar abad ke-11 dan berkembang pesat saat revolusi industri pada awal abad ke-19.

Hingga saat ini, turbin angin telah mengalami berbagai perkembangan desain konstruksi yang bertujuan untuk menambah performa agar menjadi lebih efisien dan rendah energi. Berdasarkan bentuk rotor, turbin angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu mendatar (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*). (Daryanto, 2007).

Kedua jenis turbin ini akan dijelaskan sebagai berikut:

1. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor.

Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Pada turbin ini, putaran rotor terjadi karena adanya gaya *lift* (gaya angkat) pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Turbin ini cocok digunakan pada tipe kecepatan angin sedang dan tinggi, dan banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar. Jumlah *blade* pada HAWT bervariasi, mulai dari satu *blade*, dua *blade*, tiga *blade*, dan banyak *blade* (multi *blade*) yang penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi angin. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran turbin.



Gambar 2. 1 Variasi Jumlah Blade Pada HAWT (Daryanto, 2007)

Setiap desain rotor mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini, yaitu memiliki efisiensi yang tinggi, dan *cut-in wind speed* rendah. Kekurangannya, yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin selain itu penempatan dinamo atau generator berada di atas tower sehingga menambah beban tower.

2. *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) merupakan turbin angin sumbu tegak yang gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin. Ada tiga tipe rotor pada turbin angin jenis ini, yaitu: Savonius,

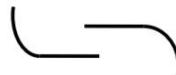
Darrieus, dan H rotor. Turbin Savonius memanfaatkan gaya drag sedangkan Darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya *lift*. Sama halnya seperti HAWT, VAWT juga mempunyai beberapa kelebihan dan kekurangan. Kelebihannya, yaitu memiliki torsi tinggi sehingga dapat berputar pada kecepatan angin rendah, dinamo atau generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan, tidak bising, dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya yaitu pada kecepatan angin di ketinggian rendah sangat pelan sehingga apabila tidak menggunakan tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan HAWT. VAWT awalnya lebih berkembang untuk konversi energi mekanik, tetapi seiring dengan perkembangan desain, turbin tipe ini banyak digunakan untuk konversi energi listrik skala kecil.

2.2 Turbin Savonius

Turbin Angin Savonius Salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT) yang dapat digunakan pada angin dengan kecepatan rendah adalah turbin angin Savonius. Turbin ini ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Konstruksi turbin sangat sederhana, tersusun dari dua buah *blade* setengah silinder. Pada perkembangannya turbin Savonius ini banyak mengalami perubahan bentuk rotor, seperti desain rotor yang berbentuk huruf L (lihat Gambar 2.2).



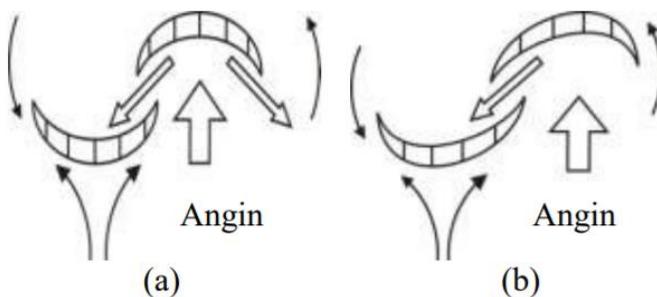
(a) Tipe U



(b) Tipe L

Gambar 2. 2 Tipe Rotor Savonius (Soelaiman, 2006)

Pada rotor Savonius, angin yang berhembus salah satu bilah rotor diharapkan lebih banyak mengalir ke bilah rotor lainnya melalui celah di sekitar poros sehingga menyediakan daya dorong tambahan pada bilah rotor ini, akibatnya rotor dapat berputar lebih cepat. Dari paten pengembangan rotor Savonius L oleh Sadaaki seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3 terlihat bahwa pada bentuk rotor Savonius setengah lingkaran (Savonius U), aliran udara di kedua sisi bilah sama besar, sementara pada rancangan kedua (Savonius L) aliran udara pada sisi bilah yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi bilah lengkung seperempat lingkaran (Soelaiman, 2006).



Gambar 2. 3 (a) Rotor Savonius U, dan (b) Rotor Savonius L
(Soelaiman, 2006)

2.3 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya yang bekerja pada benda yang paralel dengan arah aliran fluida. Gaya ini timbul ketika benda bergerak dalam medan fluida *viscous*. Dalam kehidupan sehari-hari gaya *drag* dapat merugikan dan menguntungkan. Gaya *drag* menguntungkan pada saat diaplikasikan untuk memperlambat laju dari benda, contohnya pada parasut. Parasut digunakan untuk memperlambat jatuhnya orang atau benda agar dapat selamat sampai permukaan bumi. Gaya *drag* dapat merugikan ketika

menahan laju dari benda. Salah satu contohnya adalah pada mobil. Gaya *drag* dalam hal ini menahan mobil untuk melaju, hal ini menyebabkan kerugian pada energi.

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

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

F_D : Gaya *drag*

ρ : Densitas fluida

U : Kecepatan fluida

C_D : Koefisien drag

A : Luas bidang yang terkena aliran fluida

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

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*. Persamaan dari Bilangan *Reynolds* adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.2)$$

- Re : Bilangan *Reynolds*
 ρ : Densitas dari fluida (Kg/m³)
L : Panjang karakteristik (m)
U : Kecepatan fluida (m/s)
 μ : Viskositas dinamik (Ns/m)

Klasifikasi dari bilangan *Reynolds* adalah sebagai berikut :

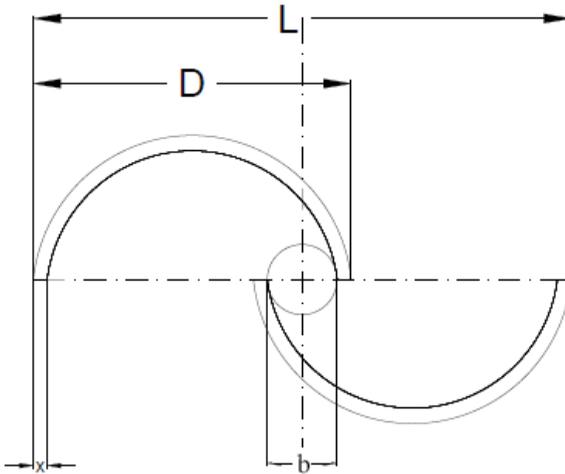
Pada dua plat datar bilangan *Reynoldsnya* adalah :

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

Pada silinder bilangan *Reynoldsnya* adalah :

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

Dalam penelitian ini, panjang karakteristik (L) dari turbin Savonius adalah sama dengan dua kali diameter *blade* (D) yaitu :



Gambar 2. 4 Ilustrasi tampak atas turbin Savonius

$$L = 2D - 2x - b \quad (2.3)$$

maka persamaan bilangan *Reynolds*nya menjadi:

$$Re = \frac{\rho U(2D - 2x - b)}{\mu} \quad (2.4)$$

2.5 Performa Turbin Savonius

2.5.1 *Coeffisient of Power*

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

$$CoP = \frac{P_A}{P_T} \quad (2.5)$$

dengan :

CoP : *Coefficient of power*

P_A : Daya aktual yang dihasilkan oleh turbin (Watt)

P_T : Daya teoritis yang dihasilkan akibat kecepatan angin (Watt)

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

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.6)$$

dengan :

ρ : Densitas udara (kg/m^3)

U : Kecepatan udara (m/s)

A : Luas bidang yang terkena aliran fluida (m^2)

Sedangkan untuk persamaan daya yang dihasilkan oleh turbin aktual adalah

$$P_A = T_D \omega \quad (2.7)$$

T : adalah torsi dinamis turbin yang diukur menggunakan *brake dynamometer* (N.m)

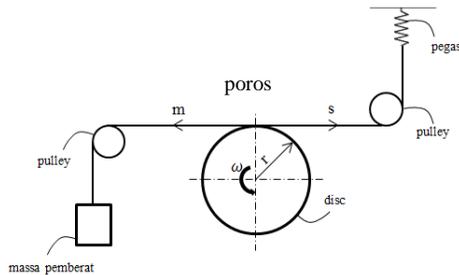
ω : kecepatan putaran poros turbin (Rad/s)

Besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$T_D = F r \quad (2.8)$$

Dengan:

r : Jari-jari poros turbin (m)



Gambar 2. 5 Free body diagram brake dynamometer (Rustam, 2018)

Gaya yang bekerja pada poros turbin yang diilustrasikan pada gambar 2.5 dapat diukur menggunakan rumus berikut:

$$F = |m - s| g \quad (2.9)$$

Dengan:

m : Massa pemberat (Kg)

s : Pembacaan neraca pegas (Kg)

g : Percepatan gravitasi (m/s^2)

T_D : Torsi Dinamis (N.m)

$$T_D = (|m - s|g) r \quad (2.10)$$

Kecepatan putaran turbin angin Savonius dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

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

Dengan :

n : gerak rotasi poros turbin angin Savonius (rpm)

maka Persamaan CoP dari persamaan (2.5) dapat menjadi :

$$CoP = \frac{T_D \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.12)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.9), (2.10), (2.11) maka didapatkan persamaan berikut :

$$CoP = \frac{|m - s| g r (2 \pi n)}{\frac{1}{2} \rho A U^3 60} \quad (2.13)$$

2.5.2 Coefficient of Moment

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

$$T_T = \frac{1}{2} \rho A U^2 R \quad (2.14)$$

Dengan :

- T_T : Torsi teoritis (N.m)
- ρ : Densitas fluida (Kg/m³)
- U : Kecepatan fluida (m/s)
- R : ½ Panjang karakteristik turbin angin Savonius (m)

Dengan r sama dengan D maka persamaan Coefficient of Momentnya menjadi :

$$CM = \frac{T_D}{T_T} \quad (2.15)$$

$$CM = \frac{|m - s| g r}{\frac{1}{2} \rho A U^2 R} \quad (2.16)$$

T_D : Hasil perhitungan torsi dinamis.

CM : Coefficient of Moment

2.6 Perhitungan Torsi Dinamis

Torsi merupakan nilai kuantitatif dari sebuah gaya yang menyebabkan gerak rotasi suatu benda. Pada turbin, besar torsi bergantung pada gaya drag dan sudu turbin yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_S = F_D r \quad (2.17)$$

Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.17 maka torsi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_S = \frac{1}{2} A C_D \rho U^2 r \quad (2.18)$$

dimana,

T_S : torsi yang dihasilkan dari putaran poros (N.m)
 r : jari-jari turbin (m)

2.7 *Tip Speed Ratio*

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. *TSR* dilambangkan dengan λ .

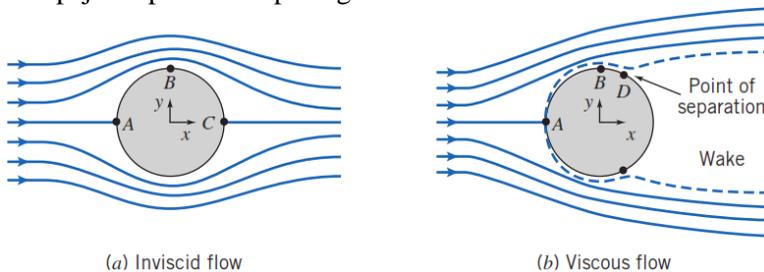
$$TSR = \frac{\omega \frac{L}{2}}{U} \quad (2.19)$$

Dengan :

TSR : *Tip Speed Ratio*
 ω : kecepatan *bladet* turbin (rad/s)
 U : kecepatan angin (m/s)
 L : panjang karakteristik (m)

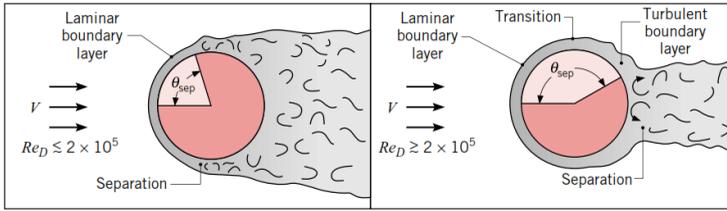
2.8 Aliran Melintasi Sebuah Silinder

Kekentalan (viskositas) suatu fluida adalah sifat yang menentukan besar daya tahannya terhadap gaya geser atau ukuran penolakan sebuah fluida terhadap perubahan bentuk di bawah tekanan *shear*. Aliran fluida jika dilihat dari pengaruh viskositasnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu aliran *viscous* dan aliran *inviscid*. Aliran *viscous* adalah aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser aliran pada dinding ($\tau_{yx} \neq 0$). Aliran *inviscid* adalah aliran dimana viskositas fluida dianggap nol, sehingga tegangan geser dianggap tidak berpengaruh ($\tau_{yx} = 0$). Aliran *viscous* dan aliran *inviscid* pada bola pejal dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Aliran Viscous dan Aliran Inviscid pada Bola Pejal
(Pritchard, 2011)

Pada gambar 2.6.b. menunjukkan aliran *viscous* pada suatu silinder. Titik A adalah titik stagnasi dimana aliran fluida menyentuh silinder sehingga kecepatan diperlambat hingga nol dan tekanan tinggi. Kemudian terjadi *boundary layer* di titik A. Dari titik A ke titik B terjadi peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan. Dari titik B ke titik D terjadi penurunan kecepatan dan peningkatan tekanan. Di titik D momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* (APG) sehingga *boundary layer* terpecah. Titik D disebut titik separasi. Diantara titik-titik pemisahan *boundary layer* membentuk daerah yang disebut *wake*.



Gambar 2. 7 Pengaruh Aliran Turbulensi terhadap Titik Separasi (Incropera, 2007)

Peristiwa separasi ditunjukkan pada gambar 2.7 yang mana munculnya daerah *wake* pada bagian belakang silinder. Daerah *wake* adalah daerah yang memiliki tekanan rendah akibat perbedaan tekanan antara *boundary layer* bagian atas dan bawah yang terpisah. Setiap aliran memiliki titik separasi yang berbeda, tergantung besarnya bilangan Reynolds. Aliran turbulen memiliki titik separasi yang lebih jauh (tertunda), hal ini disebabkan oleh momentum yang dimiliki aliran lebih mampu untuk melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga menunda terjadinya separasi. Besar daerah *wake* berbanding lurus dengan gaya *drag* yang dihasilkan pada daerah tersebut. Jika $ReD \leq 2 \times 10^5$, lapisan batas tetap laminar dan separasi terjadi pada $\theta \approx 80^\circ$, tetapi jika $ReD \geq 2 \times 10^5$, lapisan transisi dan separasi tertunda sampai $\theta \approx 140^\circ$.

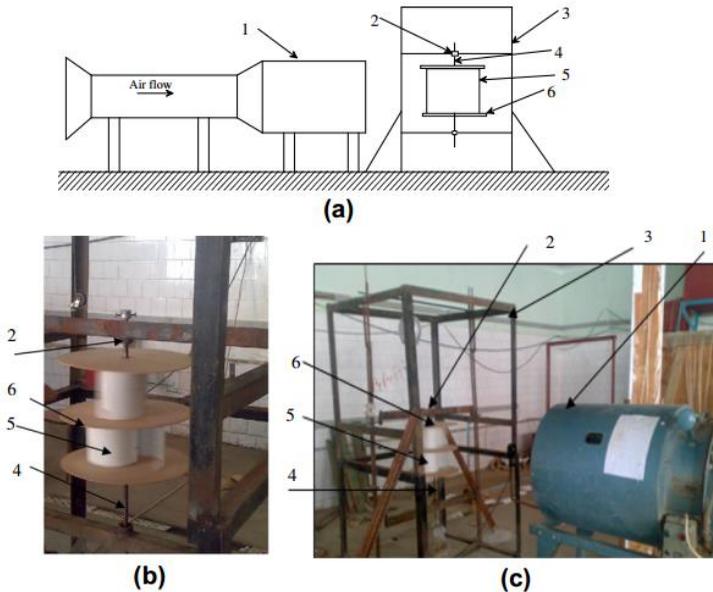
2.9 Penelitian Terdahulu

Dalam rangka mempermudah penelitian ini, maka diperlukan adanya referensi dari penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut akan dijelaskan dibawah ini:

2.9.1 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Savonius

Penelitian mengenai studi eksperimen ini telah dilakukan oleh N. H. Mahmood (2010) mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius dengan memvariasikan geometri turbin meliputi jumlah *blade*, tingkatan turbin (*stage*), penggunaan *end-*

plate, *overlap ratio* dan *aspect ratio*. Berbagai geometri dari turbin Savonius didesain dan ditempatkan di belakang *wind tunnel* berdiameter 49 cm dengan dilalui angin berkecepatan 0-13 m/s.

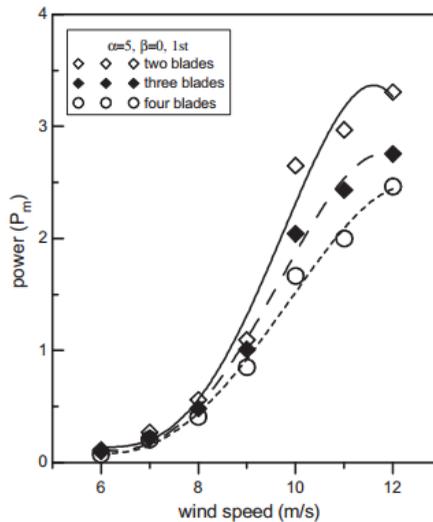


Gambar 2. 8 (a) Skematik Penelitian, (b) Foto Dari Double Stages Turbin Savonius, (c) Foto Dari Rangka Pengujian (Mahmoud, et al., 2012)

Keterangan gambar:

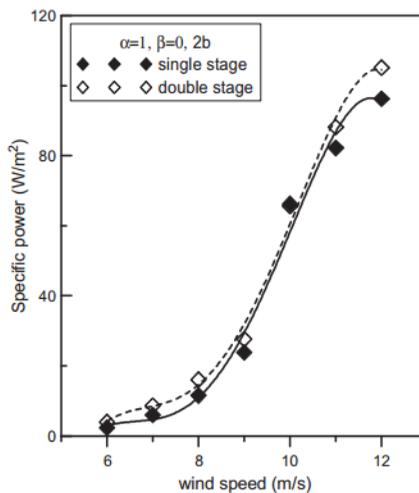
1. *Wind tunnel*
2. *Bearing*
3. *Steel housing*
4. *Steel shaft*
5. *Blades*
6. *End plate*

Pada percobaan ini, beberapa variasi geometri diuji diantaranya yaitu: jumlah *blade* angin (2 *blade*, 3 *blade*, dan 4 *blade*); tingkatan turbin (*single stage*, dan *double stages*); *overlap ratios* (0, 0.2, 0.25, 0.3 dan 0.35); *aspect ratios* (0.5, 1, 2, 4 dan 5); penggunaan *end-plate*. Turbin Savonius ditempatkan seperti pada gambar 2.9 menggunakan struktur rumah yang dibuat dari pelat baja ringan. Dua bantalan *bearing* (SKF) dipasang ke pelat baja ringan untuk menyokong turbin Savonius. Pada penelitian ini digunakan *studs*, mur dan baut untuk membantu penggantian berbagai geometri Savonius rotor yang telah diuji dan juga dalam menentukan posisi yang tepat dari sumbu rotor di garis tengah *wind tunnel*. *Blade* turbin angin dibuat dari tabung plastik ringan (PVC) dengan diameter berbeda (0,3, 0,2, 0,1 dan 0,08 m).



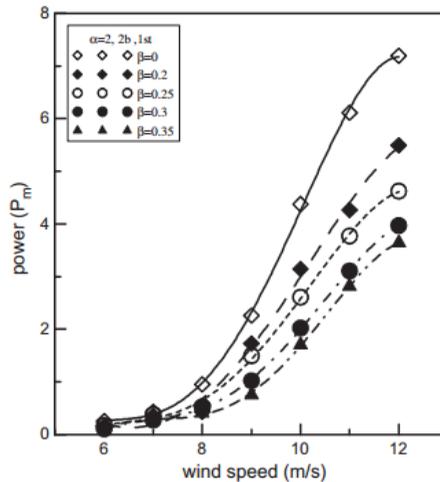
Gambar 2. 9 Grafik Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Savonius Dua, Tiga dan Empat Blades (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *blade* (*blade*) terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.9 menunjukkan hubungan nilai *coefficient of power* (*CoP*) dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; dan *single stage*. Coefficient of power dari turbin dengan dua *blades* lebih tinggi dan efisien dari turbin dengan tiga dan empat *blades*. Dari grafik diatas terlihat bahwa *trend line* menunjukkan perbedaan signifikan pada kecepatan angin mulai dari 8-12 m/s. Pada kecepatan angin 10m/s dengan menggunakan dua *blades* menghasilkan power $\approx 1,58$ W, dengan menggunakan tiga *blades* menghasilkan power ≈ 2 W, sedangkan empat *blades* menghasilkan power $\approx 2,3$ W.



Gambar 2. 10 Grafik *Specific of Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Savonius *Single Stage* dan *Double Stages* (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh jumlah *stage* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.10 menunjukkan hubungan nilai *specific power* dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0 dan turbin dua *blade* (*blades*) (2b). *Specific power* turbin dengan dua *stage* lebih tinggi daripada turbin dengan satu *stage*.



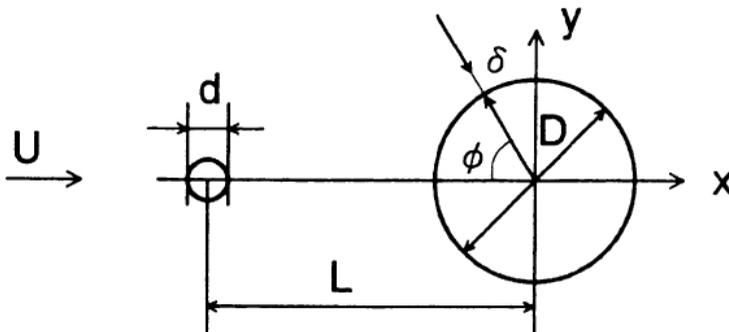
Gambar 2. 11 Grafik *Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi (β) *overlap ratio* (Mahmoud, et al., 2012)

Dari penelitian ini didapatkan pengaruh *overlap ratio* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius. Pada gambar 2.11 menunjukkan hubungan nilai *Coefficient of Power* dan kecepatan angin dengan *aspect ratio* 2; turbin dua *blade* (*blades*) (2b); dan *single stage*. *Coefficient of Power* turbin dengan *overlap ratio* 0 (tanpa *overlap*) lebih tinggi daripada turbin yang memiliki nilai *overlap ratio* (0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35). Dari grafik diatas terlihat bahwa *trend line* menunjukkan perbedaan signifikan pada kecepatan angin mulai dari 8-12 m/s.

2.9.2 Studi Ekperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Menggunakan Plat Pengganggu

2.9.2.1 Pengurangan Drag Pada Silinder Sirkular Dalam Aliran Udara

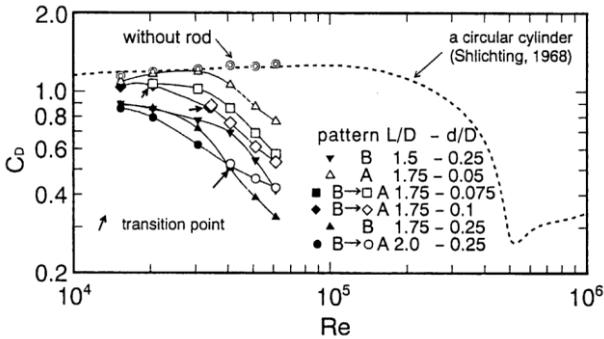
Penelitian tentang aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder sirkular pernah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)**. Penelitian tersebut memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu (d/D), dan harga bilangan Reynolds pada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



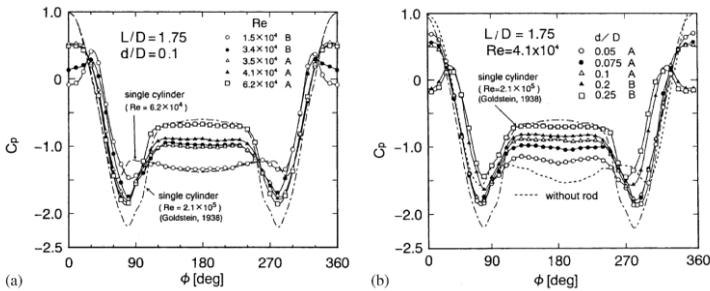
Gambar 2. 12 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002)

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) yang disebabkan oleh peningkatan bilangan Reynolds (Re) dan peningkatan d/D serta penurunan harga L/D . Dengan peningkatan bilangan Reynolds di atas 3×10^4 , maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, tebal *shear layer* berkurang, sehingga koefisien *drag* daerah *wake* menyempit (koefisien *drag* menurun). Gambar 2.13 merupakan

grafik hubungan koefisien drag dengan bilangan Reynolds yang dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 2. 13 Grafik Koefisien Drag Terhadap Re (Tsutsui & Igarashi, 2002)



Gambar 2. 14 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkuler Utama (Tsutsui & Igarashi, 2002)

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 2.14 diatas. Pada gambar 2.14 (a) percobaan dilakukan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada $L/D = 1,75$

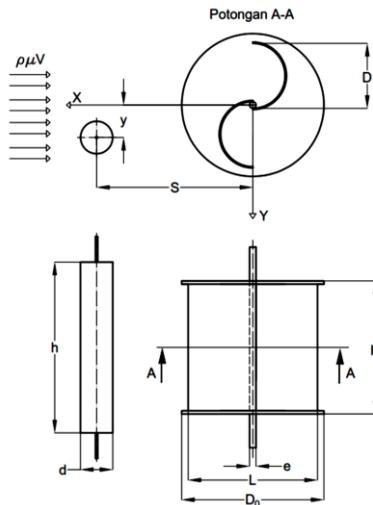
dan $d/D = 0,1$ dengan dua pola aliran yaitu pola aliran A dengan adanya *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu dan pola aliran B yaitu tanpa *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu maka C_p pada bagian 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 2.14 (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 2.14 (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 2.14 (b) dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

2.9.2.2 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius, Studi Kasus $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; dengan Bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; $y/D = 0,0$; $0,25$, $0,5$ "

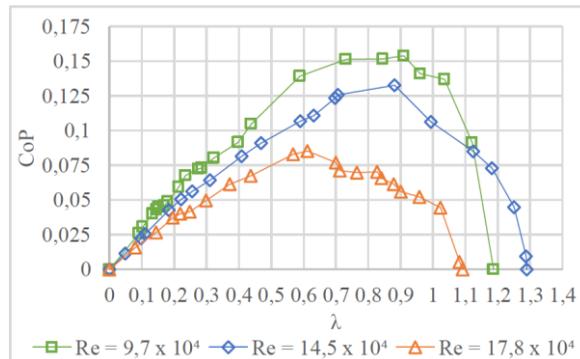
Studi eksperimen yang dilakukan oleh Rustam (2018) ini dilakukan sebagai upaya meningkatkan performa turbin angin Savonius menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan didepan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua buah sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2mm, tinggi (H) sebesar 294,4mm, diameter poros (e) sebesar 19mm dan diameter *endplate* (D_0) sebesar

321mm dengan silinder pengganggu berdiameter (d) sebesar 88,8mm dan tinggi (h) sebesar 500mm yang diletakkan di depan *returning blade*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jarak S/D sebesar 2,0 dengan variasi bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; dan $17,8 \times 10^4$, dan variasi $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$. Penelitian ini dilakukan pada area terbuka dengan sumber angin yang dihembuskan oleh *axial fan*. Beberapa alat ukur yang digunakan antara lain anemometer untuk mengukur kecepatan angin, tachometer untuk mengukur putaran poros, *torque meter* untuk mengukur torsi statis dan *brake dynamometer* untuk mengukur torsi dinamis. Dari kecepatan sudut dan torsi dinamis akan diperoleh daya aktual dari turbin angin Savonius. Gambar 2.15 menunjukkan skema penelitian dan dimensi alat yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. 15 Skema Turbin Angin Savonius Dengan Peletakan Silinder Penghalang di Depan Returning Blade (Rustam, 2018)

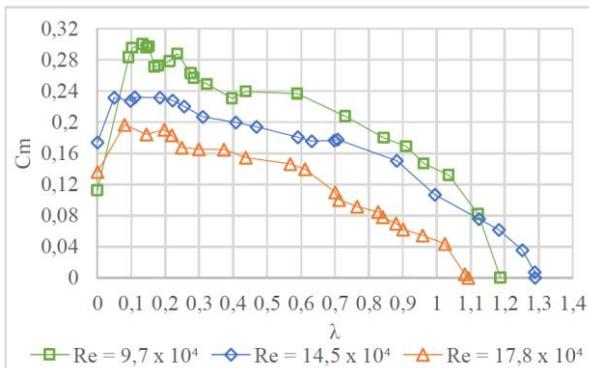
Dari penelitian ini, dilakukan analisa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan juga dengan menggunakan silinder pengganggu dimana analisa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini menggunakan kecepatan angin masuk yaitu 5,01 m/s; 7,5 m/s dan 9,2 m/s sesuai dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$.



Gambar 2. 16 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) (Rustam, 2018)

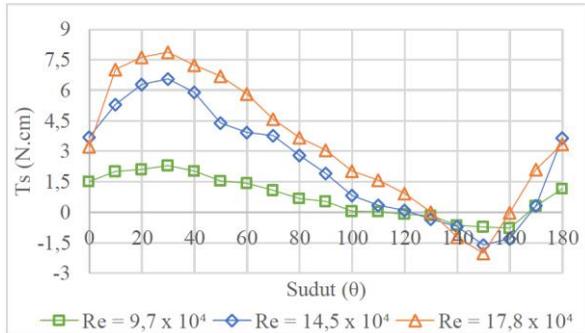
Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ tanpa menggunakan silinder pengganggu. Pada gambar 2.16 dapat dilihat *trendline* berbentuk parabolik, dimana nilai *coefficient of power* (CoP) naik kemudian turun seiring dengan bertambahnya *Tip Speed Ratio* (λ). Pada puncak *trendline* didapatkan nilai maksimal CoP di λ optimum. Nilai maksimal CoP pada $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 0,1539 pada $\lambda = 0,91$; pada $Re = 14,5 \times 10^4$ sebesar 0,1328 pada $\lambda = 0,881$ dan pada $Re = 17,8 \times 10^4$ sebesar 0,0853 pada $\lambda = 0,612$. Pada *trendline* nilai CoP maksimal

tertinggi pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan nilai CoP maksimal terendah pada $Re = 17,8 \times 10^4$. Semakin meningkatnya bilangan Reynolds maka semakin menurun nilai CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$, peningkatan torsi dinamis diiringi nilai putaran turbin dan kecepatan angin yang tidak besar mengakibatkan daya *output* yang dihasilkan oleh turbin meningkat sehingga nilai CoP pada turbin angin Savonius mengalami peningkatan, namun pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ peningkatan kecepatan aliran fluida dan nilai putaran turbin tidak diiringi dengan torsi dinamis yang signifikan dari turbin angin Savonius, sehingga daya *output* turbin angin Savonius menurun. Pada $Re = 17,8 \times 10^4$ putaran yang terjadi sangat cepat sehingga turbin dapat membentuk silinder sirkular, sehingga selisih gaya *drag* menurun dan mengakibatkan daya *output* menurun. Dari perbandingan daya teoritis yang meningkat dengan daya *output* yang menurun, menghasilkan nilai CoP yang menurun.



Gambar 2. 17 Grafik Coefficient of Moment Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CM_0) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) (Rustam, 2018)

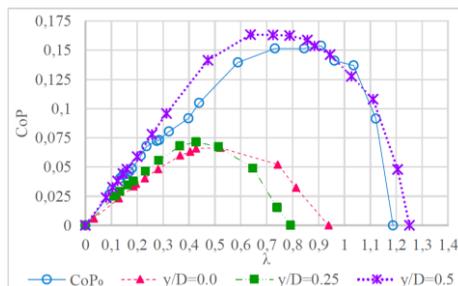
Didapatkan juga data nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ tanpa menggunakan silinder pengganggu seperti yang terlihat di Gambar 2.17. Pada gambar 2.17 *trendline* naik sampai di nilai maksimal *coefficient of moment* (CM) di *Tip Speed Ratio* (λ) optimal, kemudian *trendline* terus menurun seiring bertambahnya *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai maksimal *coefficient of moment* (CM) pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ sebesar 0,3003 di $\lambda = 0,134$ pada bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$ sebesar 0,2318 di $\lambda = 0,11$ dan pada bilangan Reynolds $17,8 \times 10^4$ sebesar 0,1967 di $\lambda = 0,08$. Torsi dinamis maksimal di setiap bilangan Reynolds didapat saat turbin angin Savonius akan berhenti, sehingga pada saat tersebut didapatkan nilai *coefficient of moment* (CM) maksimal. Pada *trendline* nilai CM maksimal tertinggi pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan nilai CM maksimal terendah pada $Re = 17,8 \times 10^4$. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$, peningkatan torsi dinamis diiringi nilai putaran turbin dan kecepatan angin yang tidak besar mengakibatkan nilai CM yang dihasilkan oleh turbin mengalami peningkatan. Namun pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$, peningkatan kecepatan angin tidak diiringi dengan peningkatan torsi dinamis, sehingga nilai CM yang dihasilkan menurun. Dan nilai CM pada $Re = 17,8 \times 10^4$ lebih kecil daripada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $14,5 \times 10^4$. Hal ini terjadi karena putaran turbin angin Savonius yang cepat sehingga turbin membentuk silinder sirkular, sehingga selisih gaya *drag* menurun dan mengakibatkan torsi dinamis menurun dan nilai CM yang menurun.



Gambar 2. 18 Grafik Torsi Statis Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (TS_0) sebagai Fungsi Sudut (θ) (Rustam, 2018)

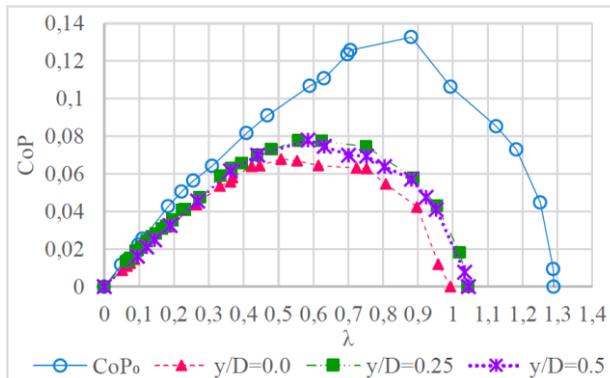
Didapat juga data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ) dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ tanpa menggunakan silinder pengganggu. Pada gambar 2.18 meningkatnya bilangan Reynolds seiring dengan peningkatan torsi statis dan *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ torsi statis mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° , kemudian mengalami penurunan hingga sudut 160° pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ penurunan hingga sudut 150° , lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ torsi statis maksimum sebesar 2,3 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -0,78 Ncm di sudut 160° . Pada $Re = 14,5 \times 10^4$ torsi statis maksimum sebesar 6,56 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -1,61 Ncm di sudut 150° . Pada $Re = 17,8 \times 10^4$ torsi statis maksimum sebesar 7,88 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -2,03 Ncm di sudut 150° . Torsi statis tertinggi dan terendah pada $Re = 17,8 \times 10^4$, karena semakin besar bilangan Reynolds, semakin besar kecepatan dan gaya *drag*. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*,

sehingga turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin berputar. Torsi statis negatif pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ saat sudut 120° hingga 160° ; bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$ saat sudut 130° hingga 160° dan bilangan Reynolds $17,8 \times 10^4$ saat sudut 140° hingga 160° . Penurunan nilai torsi statis dari sudut 30° hingga sudut 160° disebabkan karena posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil. Sisi *returning blade* mendekati arah datangnya angin mengakibatkan gaya *drag* pada *returning blade* semakin besar, sehingga selisih gaya *drag* yang terjadi mengalami penurunan dan torsi statis yang dihasilkan juga mengalami penurunan. Pada sudut 160° hingga 180° dan 0° hingga 30° , gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat, dan pada sisi *returning blade* gaya *drag* menurun, sehingga selisih gaya *drag* kedua sisi akan meningkat dan torsi statis yang dihasilkan akan meningkat. Posisi 30° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis tertinggi.



Gambar 2. 19 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP₀) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio(λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

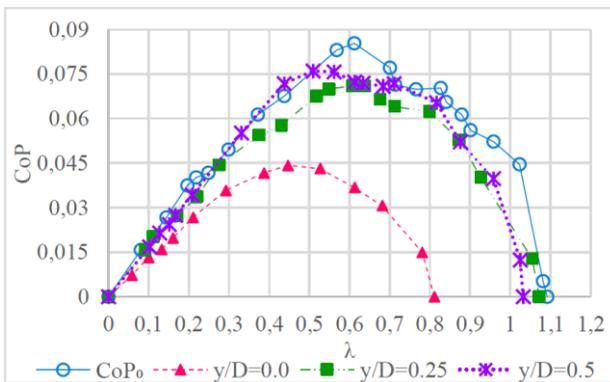
Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0; 0,25; \text{ dan } 0,5$. Pengukuran *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$. Dilakukan analisa perbandingan antara performa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu (CoP) dan performa turbin angin Savonius tanpa menggunakan silinder pengganggu (CoP₀). Pada gambar 2.19 dapat dilihat *trendline* berbentuk parabolik, dimana nilai *coefficient of power* (CoP) akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya *Tip Speed Ratio* (λ). Pada puncak *trendline* didapatkan nilai maksimal CoP di λ optimum. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP₀) sebesar 0,1539 di $\lambda = 0,91$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar 0,0665 di $\lambda = 0,521$; pada $y/D = 0,25$ sebesar 0,0715 di $\lambda = 0,428$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar 0,1634 di $\lambda = 0,637$. Pada *trendline* nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ dan nilai CoP maksimal terendah pada $y/D = 0,0$. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dengan peletakan silinder pengganggu dengan $y/D = 0,5$ efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen. Penambahan silinder pengganggu juga diduga efektif menyebabkan penurunan tekanan didepan *returning blade* dan juga efektif mengarahkan aliran menuju *advancing blade* sehingga gaya drag pada *advancing blade* meningkat. Penambahan silinder pengganggu $y/D = 0,25$ dan $0,0$ tidak efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* karena semakin menghalangi aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya drag pada *advancing blade* semakin menurun.



Gambar 2. 20 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP₀) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

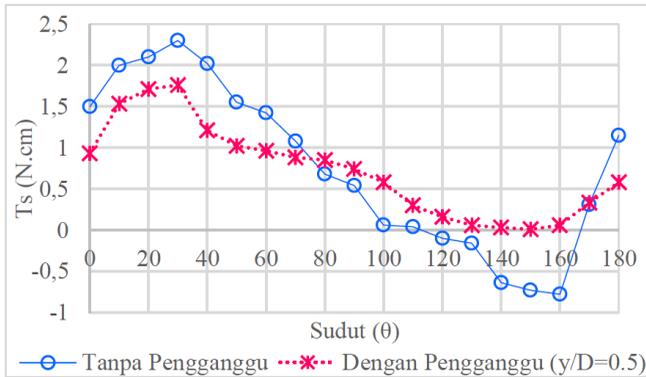
Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0$; $0,25$; dan $0,5$. Pengukuran *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $14,5 \times 10^4$. Pada gambar 2.20 dapat dilihat bahwa *trendline* berbentuk parabolik, dimana nilai *coefficient of power* (CoP) akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya *Tip Speed Ratio* (λ). Pada puncak *trendline* didapatkan nilai maksimal CoP di λ optimum. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP₀) sebesar $0,1328$ di $\lambda = 0,881$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar $0,0679$ di $\lambda = 0,507$; pada $y/D = 0,25$ sebesar $0,0776$ di $\lambda = 0,558$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar $0,0779$ di $\lambda = 0,584$. Pada *trendline* dapat dilihat bahwa nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin tanpa silinder

pengganggu dan nilai CoP maksimal terendah turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D = 0,0$. *Trendline* CoP tanpa silinder pengganggu nilainya lebih tinggi dari pada nilai CoP dengan silinder pengganggu di semua posisi y/D , sehingga penambahan silinder pengganggu di *returning blade* tidak efektif pada $Re = 14,5 \times 10^4$ di semua posisi y/D . Nilai maksimal CoP di $y/D = 0,5$ lebih tinggi daripada di $y/D = 0,25$ dan $0,0$ serta nilai maksimal CoP di $y/D = 0,25$ lebih tinggi daripada di $y/D = 0,0$. Pada $Re = 14,5 \times 10^4$ peningkatan kecepatan angin dan putaran turbin tidak diiringi peningkatan torsi dinamis yang signifikan mengakibatkan daya *output* turbin menurun, dan nilai CoP menurun. Sehingga pada $Re 14,5 \times 10^4$ penambahan silinder pengganggu di semua posisi y/D tidak efektif meningkatkan nilai CoP.



Gambar 2. 21 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP₀) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

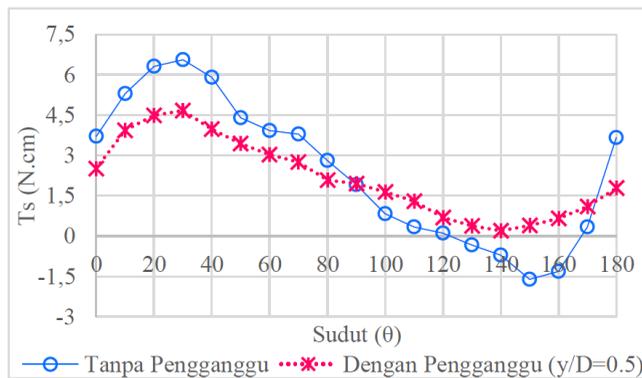
Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0; 0,25; \text{ dan } 0,5$. Pengukuran *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $14,5 \times 10^4$. Pada gambar 2.21 dapat dilihat *trendline* berbentuk parabolik, dimana nilai *coefficient of power* (CoP) akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya *Tip Speed Ratio* (λ). Pada puncak *trendline* didapatkan nilai maksimal CoP di λ optimum. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP0) sebesar 0,0853 di $\lambda = 0,612$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar 0,0443 di $\lambda = 0,447$; pada $y/D = 0,25$ sebesar 0,071 di $\lambda = 0,607$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar 0,076 di $\lambda = 0,509$. Nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin tanpa silinder pengganggu dan nilai CoP maksimal terendah turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D = 0,0$. *Trendline* CoP tanpa silinder pengganggu nilainya lebih tinggi dari nilai CoP dengan silinder pengganggu di semua posisi y/D , sehingga penambahan silinder pengganggu di *returning blade* tidak efektif pada $Re = 17,8 \times 10^4$ di semua posisi y/D . Pada $Re = 17,8 \times 10^4$ peningkatan kecepatan angin dan putaran turbin tidak diiringi peningkatan torsi dinamis yang signifikan mengakibatkan daya *output* turbin menurun, dan nilai CoP menurun. Dan pada $Re = 17,8 \times 10^4$ putaran turbin sangat tinggi sehingga turbin dapat membentuk silinder sirkular, mengakibatkan gaya *drag* turun, daya *output* menurun dan nilai CoP menurun. Sehingga pada $Re 17,8 \times 10^4$ penambahan silinder pengganggu di semua posisi y/D tidak efektif meningkatkan nilai CoP.



Gambar 2. 22 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s_0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$. Pada gambar 2.22 dapat dilihat *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Pada *trendline* torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s_0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 2,3 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 160° dengan nilai torsi minimal sebesar -0,78 Ncm lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 1,76 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar 0,01 Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Torsi statis maksimal tertinggi dan torsi statis minimal terendah saat turbin tidak menggunakan silinder

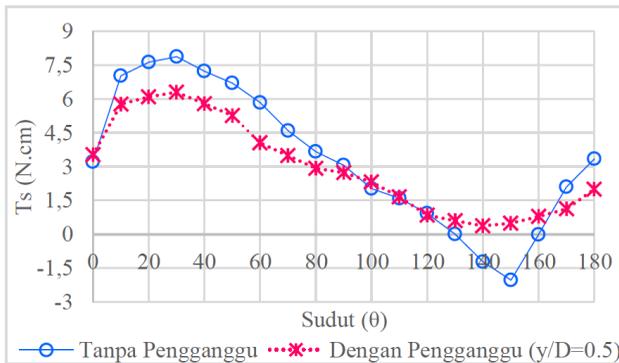
pengganggu. Terdapat nilai torsi statis berupa negatif menandakan *no-self starting*, sehingga turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin. Torsi statis negatif juga terjadi pada T_{s0} saat sudut 120° hingga 160° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.



Gambar 2. 23 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$. Pada gambar 2.23 dapat dilihat *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Pada *trendline* torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal

sebesar 6,56 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar -1,61 Ncm lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 4,67 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 140° dengan nilai torsi minimal sebesar 0,2 Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Torsi statis maksimal tertinggi dan torsi statis minimal terendah saat turbin tidak menggunakan silinder pengganggu. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*, sehingga turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin berputar. Torsi statis negatif juga terjadi pada T_{s0} saat sudut 130° hingga 160° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.



Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Rustam, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $17,8 \times 10^4$. Pada gambar 2.24 dapat dilihat *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Pada *trendline* torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar $7,88$ Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar $-2,03$ Ncm lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar $6,3$ Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 140° dengan nilai torsi minimal sebesar $0,37$ Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Torsi statis maksimal tertinggi dan torsi statis minimal terendah saat turbin tidak menggunakan silinder pengganggu. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*, sehingga turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin. Torsi statis negatif juga terjadi pada T_{s0} saat sudut 140° hingga 160° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

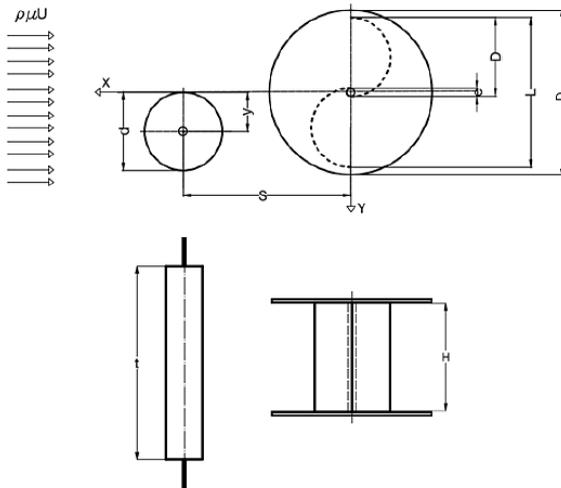
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. *Setting Experimental*

3.1.1 Analisa Parameter

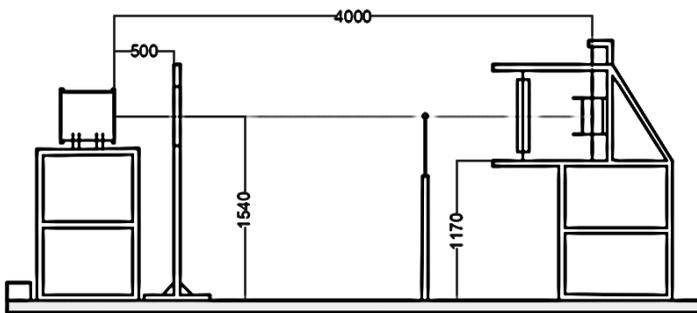
Pada gambar di bawah ini gambar 3.1 dapat dilihat skema penelitian (tampak atas) dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini. Fungsi dari analisa ini adalah untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap suatu penelitian atau tidak. Parameter yang mempengaruhi penelitian kali ini adalah diameter pengganggu (d), densitas udara (ρ), kecepatan fluida (v), viskositas udara (μ), diameter turbin (D), dan jarak antara *returning blade* turbin Savonius dengan silinder sirkular pengganggu (S/D) dan putaran *blade*.



Gambar 3. 1 Skema Turbin dan Parameter Ukur

Dimana:

- D : Diameter *blade* Turbin Savonius (m)
 S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius berposisi paralel dengan datangnya angin (m)
 d : Diameter silinder pengganggu (m)
 t : Tinggi silinder pengganggu (m)
 x : Tebal *blade* Turbin Savonius (m)
 b : Poros turbin Savonius (m)
 H : Tinggi turbin Savonius (m)
 D_o : Diameter Turbin Savonius (m)
 U : Kecepatan aliran angin (m/s)
 ρ : Densitas udara (kg/m^3)
 μ : Viskositas dinamik udara (N.s/m^2)
 y/D : 0,5
 d/D : 0,1; 0,2 ; 0,3; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1,0.
 S/D : 2,0
 Re : $9,7 \times 10^4$; $13,6 \times 10^4$



Gambar 3. 2 Skema Penelitian Turbin Savonius

Pada penelitian ini benda uji akan dialiri udara dari *fan* yang ditempatkan sejauh 4 meter dari benda uji. Untuk menghasilkan aliran udara yang linier ditempatkan *honeycomb* diantara *fan* dan benda uji. Kecepatan aliran udara dari *fan* diatur dengan mengubah tegangan listrik menggunakan *voltage regulator*. Skema penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2.

3.1.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui variabel apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular. Metode analisa yang digunakan adalah dengan Teorema Phi Buckingham.

3.1.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Metodologi penentuan analisa dimensi yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter, yaitu:

P	: <i>power</i> (watt)
ρ	: massa jenis udara (kg/m^3)
μ	: viskositas absolut udara (N.s/m^2)
U	: kecepatan aliran udara (m/s)
D	: diameter <i>blade</i> turbin angin Savonius (m)
d	: diameter silinder pengganggu (m)
b	: Poros turbin Savonius (m)
n	: putaran turbin (rpm)
t	: tinggi silinder pengganggu (m)

- y : posisi silinder pengganggu terhadap *blade* Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
- S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan - pusat returning *blade* (m)
- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
- Menentukan grup dimensi primer yang akan digunakan, yaitu M, L, t
 - Membuat dimensi primer dari masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter *coefficient of power*

Parameter	P	ρ	μ	U	D	d	n	t	y	S	b	H
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^3}$	$\frac{M}{L}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	$\frac{1}{t}$	L	L	L	L	L

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

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

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

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

$$\pi_4 = \frac{n D}{U t}$$

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

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

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

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

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

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

- π_1 : *Coefficient of Power*
 π_2 : Bilangan Reynolds
 π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius
 π_4 : Rasio kecepatan tip
 π_5 : Rasio ketinggian silinder pengganggu dengan diameter *blade* turbin Savonius
 π_6 : Rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter *blade* turbin Savonius
 π_7 : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
 π_8 : Rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin Savonius
 π_9 : Rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter *blade* turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

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

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

Dalam penelitian ini nilai D sebanding dengan nilai L yaitu $L = 2D - 2x - b$. Nilai x pada kasus ini tetap sehingga didapatkan persamaan:

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

Atau dapat ditulis juga menjadi:

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

3.1.2.2 Analisa Dimensi *Coefficient of Moment* (C_M)

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter, yaitu:

- T : torsi (N.m)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas absolut udara (N.s/m^2)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- D : diameter *blade* turbin angin Savonius (m)
- d : diameter silinder pengganggu (m)
- n : putaran turbin (rpm)
- t : tinggi silinder pengganggu (m)
- y : posisi silinder pengganggu terhadap *blade* Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
- S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning *blade* (m)

- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
 b : diameter poros turbin (m)

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

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

Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter *coefficient of moment*

Parameter	T	ρ	μ	U	D	d	n	t	y	S	H	b
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^2}$	$\frac{M}{L}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	$\frac{1}{t}$	L	L	L	L	L

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

$$\pi_1 = \frac{T}{\rho U^2 D^3} \quad \pi_4 = \frac{n D}{U} \quad \pi_8 = \frac{H}{D}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U D} \quad \pi_5 = \frac{t}{D} \quad \pi_9 = \frac{b}{D}$$

$$\pi_3 = \frac{d}{D} \quad \pi_6 = \frac{y}{D} \quad \pi_7 = \frac{S}{D}$$

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

- π_1 : *Coefficient of Moment*
 π_2 : Bilangan Reynolds
 π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

- π_4 : Rasio kecepatan tip
 π_5 : Rasio ketinggian silinder pengganggu dengan diameter *blade* turbin Savonius
 π_6 : Rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter *blade* turbin Savonius
 π_7 : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
 π_8 : Rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin Savonius
 π_9 : Rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius dengan diameter turbin Savonius

5. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

Pada penelitian ini, $\frac{S}{D}, \frac{t}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}$ merupakan variabel tetap, sedangkan $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{n D}{U}$ dan $\frac{d}{D}$ merupakan variabel yang divariasikan.

Sehingga persamannya dapat ditulis sebagai berikut:

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

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

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

Atau dapat juga ditulis menjadi:

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

3.2 Peralatan Penelitian

Pada pelaksanaan penelitian ini, digunakan peralatan-peralatan guna menunjang agar didapatkan hasil penelitian yang baik. Berikut merupakan peralatan-peralatan yang digunakan yaitu:

3.2.1 Axial Fan

Pada penelitian ini menggunakan *fan* untuk menghasilkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin Savonius. *Fan* yang digunakan yaitu **CKE SPV-18**. *Fan* ini tidak terdapat pengaturan kecepatan putaran kipas, sehingga diperlukan *voltage regulator* untuk mengatur aliran udara dengan cara pengaturan kecepatan kipas pada *fan*. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.3



Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18

Tabel 3. 3 Spesifikasi *fan* CKE SPV-18

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

3.2.2 *Honeycomb*

Pada penelitian ini menggunakan *honeycomb* untuk menyearahkan aliran udara yang akan melewati turbin angin Savonius. *Honeycomb* berfungsi untuk mengembangkan atau menghasilkan aliran udara yang halus sehingga aliran udaranya lebih *uniform*. *Honeycomb* yang digunakan berbentuk persegi dengan dimensi panjang sisi *honeycomb* sebesar 468 mm, panjang sisi *frame* sebesar 508 mm, tebal *honeycomb* sebesar 20 mm, tebal *frame* sebesar 50mm, dan ukuran *meshing* sebesar 16 lubang/in².

Gambar 3. 4 *Honeycomb*

3.2.3 Benda Uji

Pada penelitian ini menggunakan turbin angin tipe Savonius dengan pengganggu berupa silinder sirkular. Turbin angin Savonius menggunakan *bearing high speed KSM tipe RMS 4*.

Profil turbin angin tipe Savonius sebagai berikut :

- Diameter *blade* turbin (D) : 167,1 mm
- Tinggi (H) : 298 mm
- Diameter Poros Turbin (b) : 19,3 mm
- Tebal sudu turbin (x) : 2,95 mm
- Diameter *end-plate* (Do) : 320 mm
- Tebal *end-plate* : 2 mm



Gambar 3. 5 Turbin Savonius

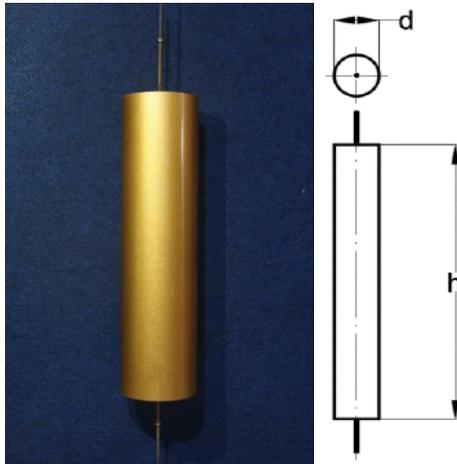
3.2.4 Silinder Pengganggu

Silinder pengganggu pada penelitian kali ini digunakan untuk mengurangi gaya drag pada turbin Savonius sehingga diharapkan

torsi dari turbin ini dapat meningkat. Silinder ini diletakkan didepan returning blade dari turbin Savonius sejauh 304,8 mm dari diameter turbin.

a. Profil silinder pengganggu sebagai berikut :

- Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu dan diameter sudu turbin Savonius (S/D) : 2,0
- Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu dan diameter sudu turbin Savonius (S/D) : 334,2 mm
- Variasi rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin (d/D) : 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0



Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu

3.2.5 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini penyangga turbin angin digunakan sebagai tempat diletakkannya turbin Savonius dan silinder pengganggu seperti gambar 3.7.



Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius

3.3 Alat Ukur

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

3.3.1 Anemometer

Anemometer adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin (*airflow velocity*). Pada penelitian ini

menggunakan anemometer tipe OMEGA HHF141 Digital Anemometer seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Anemometer

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

3.3.2 Tachometer

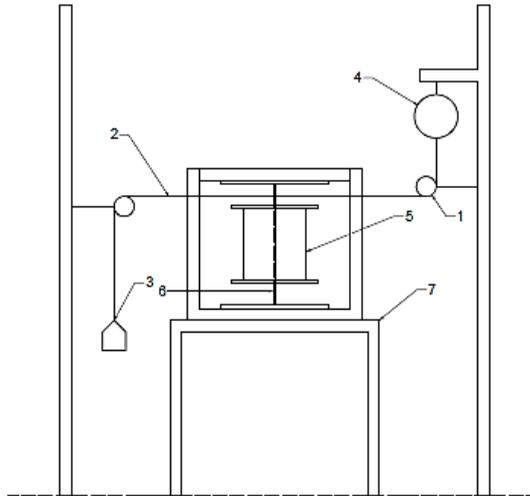
Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek yang berputar. Pada penelitian ini menggunakan tachometer tipe *Economical Non-Contact Pocket Optical* Tachometer OMEGA seri HHT12 seperti pada gambar 3.9. Dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit dengan range pengukuran antara 5 hingga 200.000 rpm.



Gambar 3. 9 Tachometer

3.3.3 Brake dynamometer

Brake dynamometer adalah alat ukur manual yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis. Nilai torsi ini tidak didapatkan secara langsung namun melalui perhitungan selisih antara massa pemberat dan nilai yang terbaca oleh neraca pegas. Skema dari *brake dynamometer* dapat dilihat dari gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Skema *Brake dynamometer*

Keterangan:

1. Sistem pulley
2. Benang nilon
3. Massa pemberat (Gambar 3.14)
4. Neraca pegas (Gambar 3.13)
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

Pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius dengan *brake dynamometer* seperti pada skema diatas yang terdiri

dari sistem *pulley*, massa pemberat dan neraca pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dan dikaitkan pada poros turbin angin Savonius. Pengukuran dengan cara menambahkan massa pemberat yang disambungkan dengan neraca pegas secara bertahap saat turbin sedang berputar hingga turbin berhenti berputar. Setiap menambahkan massa pemberat, putaran dari turbin diukur dengan menggunakan *tachometer*. Nilai torsi dinamis didapatkan dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang terbaca.

3.3.4 *Torque meter*

Torque meter adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Pada penelitian ini menggunakan torque meter tipe LUTRON TQ-8800 dengan *high resolution* 0,1 N.cm seperti pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 Torque meter

3.3.5 *Voltage Regulator*

Voltage regulator digunakan untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan. Pada penelitian ini, *voltage regulator* digunakan untuk mengatur kecepatan putaran *axial fan*. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Voltage Regulator* Model TDGC 2J-3 seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Voltage Regulator

3.3.6 Neraca Pegas

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



Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA tipe C-5

3.3.7 Massa Pemberat

Pada penelitian ini digunakan pemberat untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dan variasi *Tip Speed Ratio* pada brake dynamometer. Pemberat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Massa Pemberat

3.4 Prosedur Penelitian

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

3.4.1 Torsi Dinamis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan *termometer*.
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 $9,7 \times 10^4$.
6. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros turbin tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *tachometer*.
7. Mengukur torsi dinamis tanpa beban dan silinder pengganggu menggunakan *brake dynamometer*.

8. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 5 gr dan 10 gr; $Re = 13,6 \times 10^4$ sebesar 10 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 = $13,6 \times 10^4$.
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio diameter turbin Savonius dan diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,1.
14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$.
15. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan *tachometer*.
16. Mengukur torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan *brake dynamometer*.
17. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan yaitu untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 5 gr dan 10 gr; $Re = 13,6 \times 10^4$ sebesar 10 gr.
18. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *tachometer*.
19. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
20. Mengulangi langkah 17 – 19 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
21. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$.
22. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi d/D menjadi 0,2 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 ; 0,9 ; 1,0.
23. Mematikan *axial fan*.

24. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran (n) terhadap λ serta bilangan Reynolds, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ .

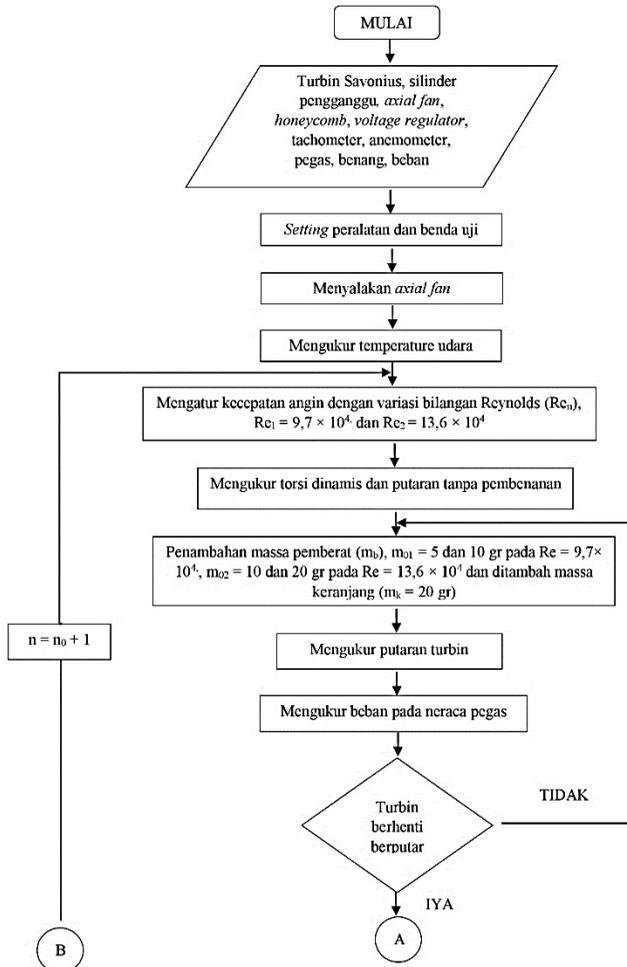
3.4.2 Torsi Statis

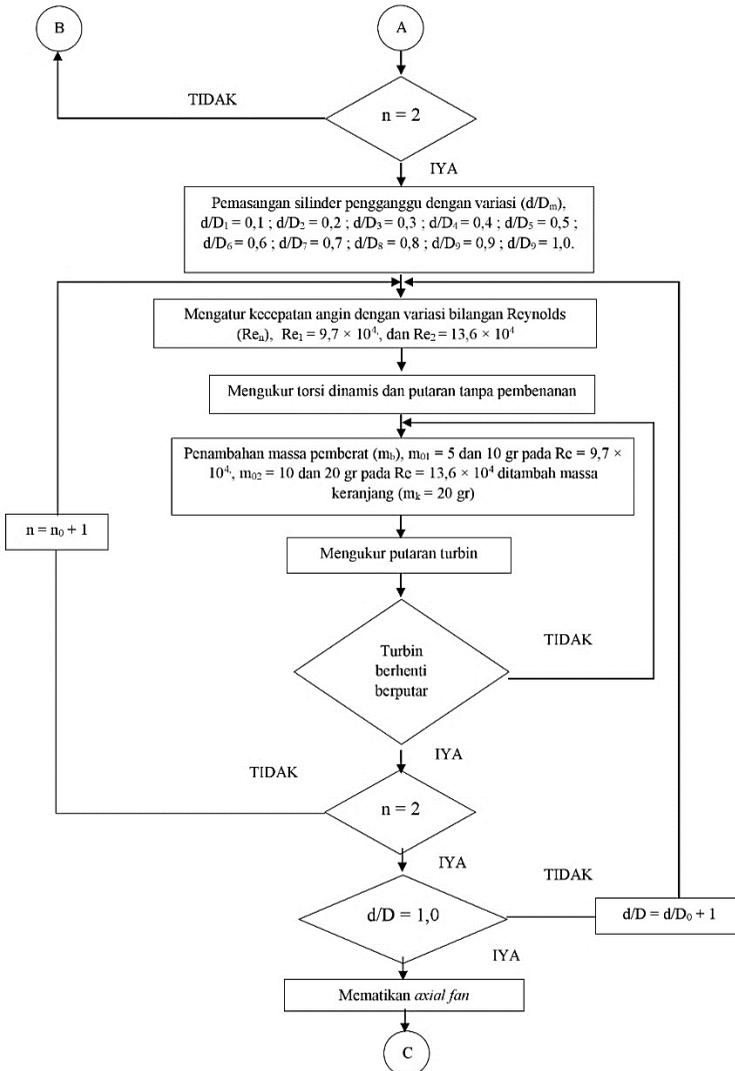
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Mengatur *bladet* bukaan *blade* turbin Savonius sebesar 0° .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan menggunakan *voltage regulator* sehingga mendapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan *Reynolds* yang diinginkan, yaitu $9,7 \times 10^4$.
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 *blade* turbin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (kenaikan 10° tiap pengamatan).
9. Mengulangi langkah 3 - 8 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi $13,6 \times 10^4$.
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio diameter turbin Savoius dan diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,5.
11. Mengatur *bladet* bukaan *blade* turbin Savonius sebesar 0° .

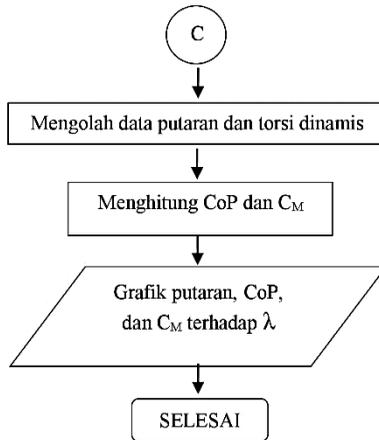
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
13. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angina yang *steady*, kemudian mengukur torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.
14. Mematikan *axial fan*.
15. Mengulangi langkah 11 - 14 dengan mengubah *bladet* tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (kenaikan 10° tiap pengamatan).
16. Mengulangi langkah 11 - 15 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi $13,6 \times 10^4$.
17. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting* grafik perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap θ .

3.5 Flowchart Penelitian

3.5.1 Flowchart Prosedur Penelitian Torsi Dinamis

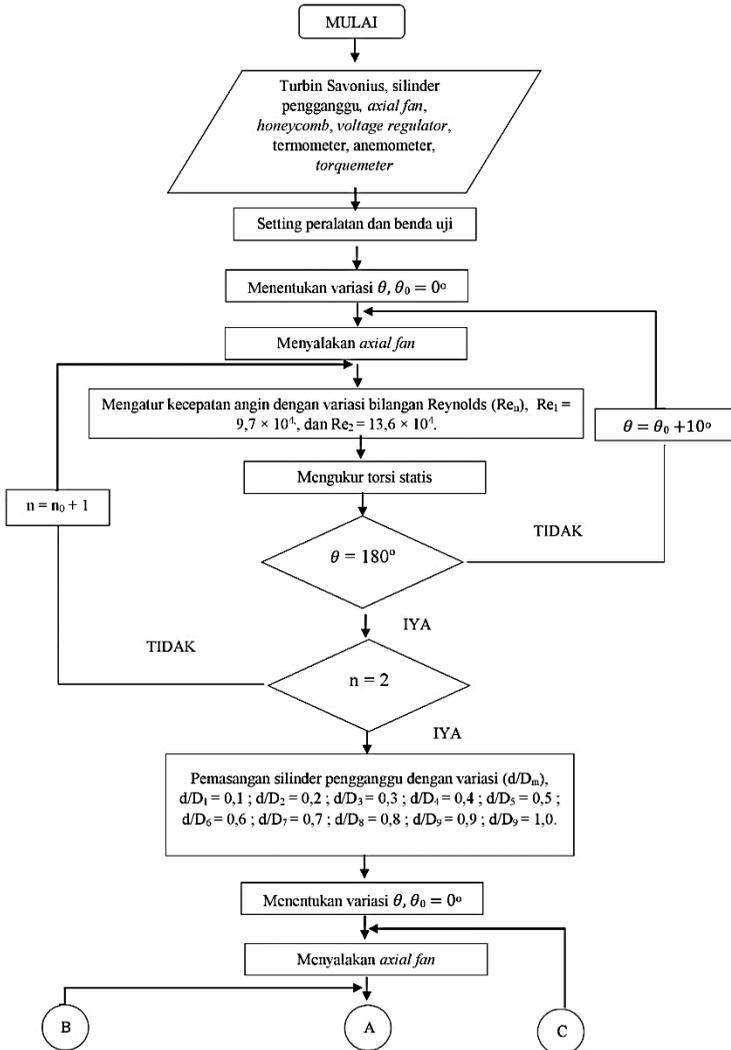


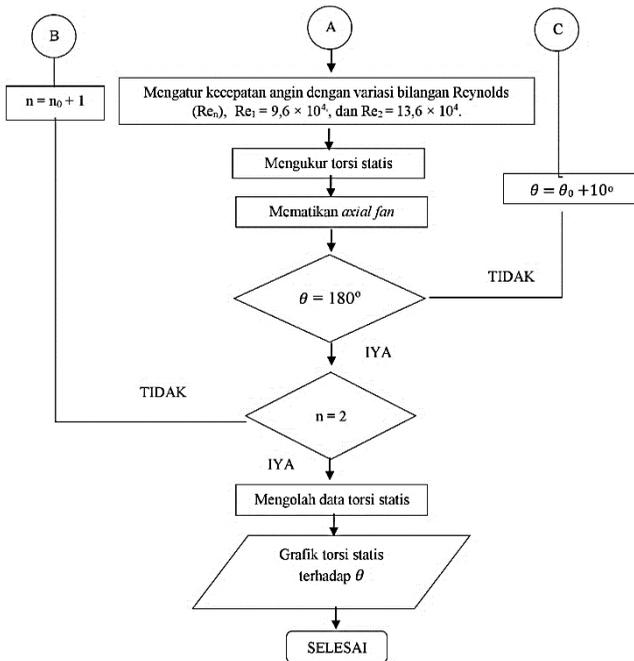




Gambar 3. 15 Flowchart Torsi Dinamis

3.5.2 Flowchart Penelitian Torsi Statis





Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis

3.6. Perhitungan Uncertainty

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

- *Uncertainty* pada pembacaan kecepatan (U)

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

- *Uncertainty* pada pembacaan putaran (ω)

$$u_\omega = \pm \frac{0,1}{241,94} = \pm 4,1 \times 10^{-4}$$

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

$$u_R = \pm \frac{0,1}{154,5} = \pm 3,24 \times 10^{-3}$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *tip speed ratio* (λ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_\lambda = \pm \{ 0,0004133^2 + [3,24 \times 10^{-3}]^2 + 0,002^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

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

$$u_\lambda = \pm 0,38\%$$

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

Tabel 3. 4 Data *Uncertainty*

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<i>Coefficient of Power (CoP)</i>	4,61%
<i>Coefficient of Moment (C_M)</i>	4,62%
<i>Tip Speed Ratio (λ)</i>	0,38%
<i>Reynolds Number (Re)</i>	0,49%

3.7 Hasil yang Diperoleh

Pada penelitian ini, hasil yang akan diperoleh adalah:

1. Grafik torsi statis (T_s dan T_{s_0}) seabjadwagai fungsi blade (θ)
2. Grafik Coefficient of Power (CoP dan CoP_0) sebagai fungsi Tip Speed Ratio (λ)
3. Grafik Coefficient of Moment (C_m dan C_{m0}) sebagai fungsi Tip Speed Ratio (λ)
4. Grafik perbandingan *Coefficient of Power* maksimum dengan dan tanpa pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi d/D

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

Pengambilan data menggunakan udara sebagai *fluida* kerja dimana pada penelitian ini beberapa hal diasumsikan seperti aliran *steady* dan *incompressible* yang memiliki nilai sebagai berikut:

1. Tekanan *absolute* udara dalam keadaan standar ($P_{\text{std}} = 1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$)
2. Temperatur udara dalam keadaan standar ($T_{\text{std}} = 288,2 \text{ K}$)
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar ($\rho_{\text{std}} = 1,225 \text{ Kg/m}^3$)

Data diatas merupakan data *standart* yang digunakan untuk contoh perhitungan dan perhitungan pada penelitian yang dilakukan. Adapun perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah:

4.1.1 Perhitungan Bilangan *Reynolds*

- **Massa Jenis Udara (ρ)**

Perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai massa jenis udara pada saat penelitian dapat digunakan persamaan **Boyle – Gay Lusacc** mengenai pemuain gas. Dimana persamaannya adalah sebagai berikut:

Digunakan persamaan gaya *drag* sesuai persamaan 2.1 bahwa:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A$$

Dari persamaan Boyle – Gay Lussac mengenai pemuaiian gas didapatkan bahwa:

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

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

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

Dimana:

P_1 = tekanan absolut udara pada keadaan 1 (acuan)
= $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

T_1 = temperatur udara pada keadaan 1 (acuan)
= 288,2 K

ρ_1 = massa jenis udara pada keadaan 1 (acuan)
= $1,225 \text{ Kg/m}^3$

m_1 = massa udara pada keadaan 1 (acuan)

P_2 = tekanan absolut udara pada keadaan 2 (penelitian)

T_2 = temperatur udara pada keadaan 2 (penelitian)
= $28,5^\circ\text{C} = 301,5 \text{ K}$

ρ_2 = massa jenis udara pada keadaan 2 (penelitian)

m_2 = massa udara pada keadaan 2 (penelitian)

Keadaan 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga $P_1 = P_2$ dan massa udara pada keadaan 1 dan 2 maka $m_1 = m_2$. Dari batasan tersebut, maka persamaan 4.2 menjadi :

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

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

$$\rho_2 = 1,1709 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Viskositas Udara (μ)**

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

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

Untuk udara b adalah $1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/m.s.K}^{1/2}$ dan S adalah $110,4 \text{ K}$. Dengan menggunakan temperatur saat melakukan uji eksperimen yaitu $301,5 \text{ K}$. Maka viskositas udara didapatkan :

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

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

- **Bilangan Reynolds (Re)**

Berdasarkan persamaan 2.2, maka langkah untuk mencari Bilangan *Reynolds* pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

Dimana:

$$\begin{aligned}
 L &= \text{Panjang karakteristik turbin angin Savonius} \\
 &= 2D - b - 2x = (2 \times 167,1 \text{ mm}) - 19 \text{ mm} - 2 (2,95 \\
 &\quad \text{mm}) = 309,3 \text{ mm} \\
 U &= 5 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Maka nilai bilangan *Reynolds* sesuai persamaan 2.2 adalah:

$$Re = \frac{1,1772 \frac{kg}{m^3} \times 5 \frac{m}{s} \times 309,3 \text{ mm}}{1,86 \times 10^{-5} kg/ms} = 97.000$$

4.1.2 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (λ)

Berdasarkan persamaan 2.19 didapatkan persamaan *Tip Speed Ratio* pada $Re = 97.000$ adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \frac{L}{2}}{U}$$

Dimana:

- ω = kecepatan radial turbin

$$= \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi r(186,4)}{60} = 19,51 \left(\frac{rad}{s}\right)$$
- n = kecepatan putar turbin (rpm)
- $\frac{L}{2}$ = jari jari sudu turbin angin savonius = $\frac{L}{2}$

$$= \frac{2D - b - 2x}{2}$$

$$= \frac{(2 \times 167,1) - (19) - (2)(2,95)}{2}$$

$$= 154,65 \text{ mm}$$
- U = kecepatan udara pada $Re 97.000 = 5 \text{ m/s}$

Maka nilai λ pada $Re = 97.000$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{19,51 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 154,65 \text{ mm}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,603$$

4.1.3 Perhitungan *Coefficient of Power*

- **Torsi Dinamis**

Berdasarkan persamaan 2.10 didapatkan persamaan torsi dinamis sebagai berikut:

$$T_D = (|m - s|g) r$$

Dimana:

s	= massa yang terbaca pada pegas (kg) = 0,46 kg
m	= massa beban (kg) = 0,0339 kg
g	= gravitasi (9,81 m/s ²)
r	= jari-jari poros menerima beban (m) = 12,5 mm

Maka nilai torsi dinamis pada $Re = 97.000$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_D = \left(\left| \frac{33,9}{1000} \text{ kg} - \frac{460}{1000} \text{ kg} \right| 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \times \frac{12,5}{1000} \text{ m} \\ = 0,05225 \text{ Nm}$$

- ***Coefficient of power (CoP)***

Berdasarkan persamaan 2.12 didapatkan persamaan *Coefficient of Power* sebagai berikut:

$$CoP = \frac{T_D \omega}{\frac{1}{2} \rho U^3 A}$$

Dimana:

- A = luas permukaan turbin angin savonius yang terpapar angin
 $= L \times h = 0,309 \text{ m} \times 0,298 \text{ m} = 0,092 \text{ m}^2$
- U = kecepatan udara free stream (m/s)
- ρ = densitas udara pada saat uji eksperimen (kg/m^3)
- ω = kecepatan radial turbin (rad/s)
- T_D = torsi dinamis (Nm)

Maka nilai CoP pada $Re = 97.000$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$CoP = \frac{(0,05225 \text{ Nm})(19,51 \text{ rad/s})}{\frac{1}{2}(1,177 \text{ kg/m}^3)(5 \text{ m/s})^3 (0,092 \text{ m}^2)} = 15,15 \%$$

4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Moment*

Berdasarkan persamaan 2.14 didapatkan persamaan *Coefficient of Moment* sebagai berikut:

$$CM = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \rho A U^2 R}$$

Dimana:

- T_D = torsi dinamis = 0,05225 N.m
- ρ = densitas udara pada saat uji eksperimen = 1,172 Kg/m^3
- U = kecepatan fluida = 5 m/s

$$\begin{aligned}
 R &= \text{jari-jari turbin Savonius} = \frac{1}{2} \text{ panjang karakteristik turbin} \\
 &= \frac{1}{2} (0,3093) \text{ m} = 0,15465 \text{ m} \\
 A &= \text{luasan yang terkena angin} = 0,092 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Maka nilai CM pada $Re = 97.000$ dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 CM &= \frac{(0,05225 \text{ Nm})}{\frac{1}{2} (1,172 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}) (0,092 \text{ m}^2) (5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 (0,15465 \text{ m})} \\
 &= 0,2509
 \end{aligned}$$

4.2 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu Dengan Variasi Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

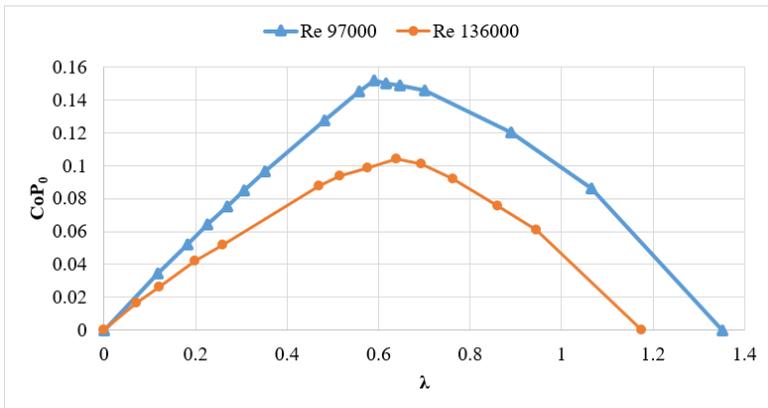
Hasil studi eksperimen turbin angin savonius tanpa pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ akan dibahas pada sub bab ini. Pengukuran performa turbin angin tanpa pengganggu dilakukan untuk mengetahui performa awal dari turbin yang selanjutnya akan dibandingkan dengan data hasil eksperimen menggunakan silinder pengganggu. Analisa yang akan dibahas meliputi *Coefficient of Performance*, *Coefficient Of Moment* dan torsi statis yang dihasilkan turbin. Data yang telah didapatkan ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data turbin angin Savonius Tanpa Penghalang Silinder

Bilangan Reynolds	Ts_0 (N.cm)	CoP ₀ Max (%)	λ (Pada CoP ₀ Max)	CM ₀ Max (%)	λ (Pada CM ₀ Max)
$9,7 \times 10^4$	3,28	15,15	0,603	28,37	0,121
$13,6 \times 10^4$	4,96	10,4	0,64	23,45	0,072

4.2.1 Analisa Coefficient of Power (CoP₀) terhadap Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Dari hasil pengujian eksperimen turbin Savonius tanpa pengganggu didapatkan data CoP₀ terhadap TSR. Bilangan Reynolds yang dipakai adalah $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Pengukuran torsi dinamis menggunakan *brake dynamometer*. Dari hasil pengukuran didapatkan gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik CoP₀ terhadap Tip Speed Ratio pada Re 97,000 dan 136.000

Dari grafik (gambar 4.1) diatas dapat dilihat bahwa grafik berbentuk parabolik dimana terdapat titik puncak (nilai CoP_0 tertinggi) lalu setelah melewati titik puncak didapatkan nilai CoP_0 yang semakin menurun seiring dengan naiknya bilangan *Reynolds*. Titik CoP_0 maksimum terdapat pada Bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$ dengan nilai 15,15%. Nilai CoP maksimum terendah ada pada Bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ dengan nilai 10,4% .

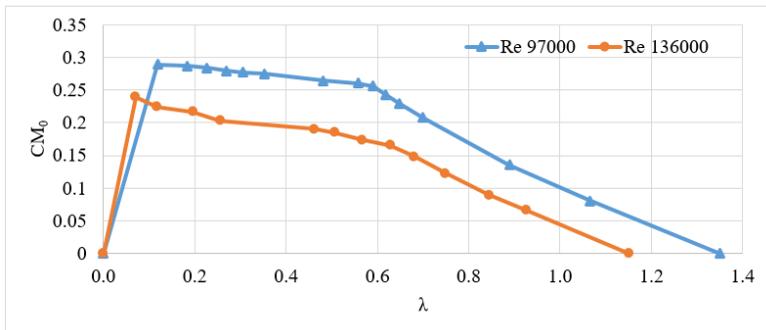
Pada Bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$ turbin dapat berputar pada *Tip Speed Ratio* maksimum 1,378 sedangkan nilai CoP maksimumnya terdapat pada *Tip Speed Ratio* = 0,603 dengan nilai 15,15%. Pada bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ turbin memiliki *Tip Speed Ratio* tertinggi sebesar 1,174, nilai CoP maksimum jatuh pada *Tip Speed Ratio* = 0,64 dengan nilai 10,4% .

Nilai CoP_0 maksimum tertinggi pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$, dikarenakan hal itu maka turbin angin Savonius pada penelitian ini dinilai lebih efisien digunakan pada kecepatan 5 m/s. Pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ terjadi penurunan nilai CoP . Hal ini dikarenakan meningkatnya kecepatan angin akan membuat putaran turbin semakin cepat dan turbin akan membentuk seperti *solid wall* dimana fluida tidak dapat mengenai *blade* turbin. Sehingga selisih gaya *drag* pada turbin angin menurun dan menyebabkan daya turbin yang dihasilkan lebih rendah.

4.2.2 Analisa Coefficient of Moment (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Dari pengukuran torsi dinamis dengan menggunakan *brake dynamometer*, data yang diperoleh dapat dianalisa untuk mendapatkan *Coefficient of Moment*. *Coefficient of Moment*

merupakan perbandingan antara torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin. Percobaan menggunakan bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Dari hasil pengukuran didapatkan grafik seperti berikut:



Gambar 4.2 Grafik CM_0 terhadap *Tip Speed Ratio* tanpa Penghalang

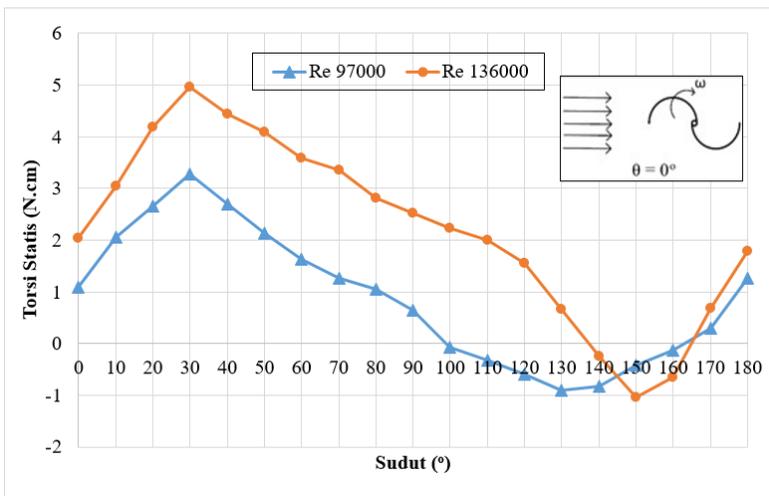
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik menunjukkan *trendline* menurun yang berarti semakin tinggi TSR, maka nilai CM_0 akan semakin rendah. Nilai CM_0 maksimum terbesar berada pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$ dengan nilai 0,283. Sedangkan pada bilangan Reynolds = $17,8 \times 10^4$, CM_0 bernilai lebih rendah dengan nilai 0,234. Nilai CM_0 akan menurun seiring bertambahnya bilangan Reynolds.

Nilai CM_0 mengalami penurunan seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds. Hal ini dikarenakan konstruksi turbin angin yang bekerja lebih efisien pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$. Dan pada bilangan Reynolds tinggi, kecepatan angin tinggi menyebabkan turbin angin Savonius berputar dengan sangat cepat sehingga turbin angin seakan menyerupai *solid wall*. Sehingga, berakibat pada selisih gaya *drag* berkurang dan menyebabkan torsi

yang dihasilkan turbin angin Savonius ikut berkurang lalu nilai CM_0 pun berkurang.

4.2.3 Torsi Statis (TS_0) terhadap Posisi Sudut *Blade* (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini, didapatkan data torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan alat ukur torsi statis Lutron TQ 8800. Pengukuran ini dilakukan pada saat *blade* turbin berada pada posisi sudut 0° hingga 180° terhadap arah datangnya angin. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah $9,7 \times 10^4$, dan $13,6 \times 10^4$. Dari hasil pengukuran tersebut didapatkan data dan grafik sebagai berikut:



Gambar 4.3 Grafik TS_0 terhadap Sudut θ

Tabel 4.2 Data T_{S_0} terhadap Sudut θ

Bilangan Reynolds	T_{S_0} Max (N.cm)	θ (Pada T_{S_0} Max)	T_{S_0} Min (N.cm)	θ (Pada T_{S_0} Min)
$9,7 \times 10^4$	3,28	30°	-0,9	130°
$13,6 \times 10^4$	4,96		-1,04	150°

Pada gambar 4.3 dapat dilihat grafik yang menunjukkan nilai dari torsi statis akan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Nilai torsi statis minimum terendah berada pada bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ dengan nilai = -1,04 N.cm pada posisi sudut *blade* 150°. Dan nilai tertinggi didapatkan juga pada bilangan Reynolds yang sama yaitu $Re = 13,6 \times 10^4$ dengan nilai 4,96 N.cm pada posisi sudut *blade* 30°. Pada bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ didapatkan nilai tertinggi dan terendah, disebabkan semakin tinggi bilangan Reynolds, maka kecepatan angin yang mengenai turbin akan semakin tinggi. Dan hal ini akan menyebabkan gaya drag pada turbin semakin tinggi, sehingga dibutuhkan torsi statis yang semakin tinggi untuk menahan putaran. Sedangkan pada bilangan Reynolds 97.000 didapatkan nilai T_{S_0} maksimal pada posisi angular 30° dengan nilai 3,28 N.cm, lalu didapatkan nilai T_{S_0} minimum bernilai -0,9 N.cm pada posisi angular 130°.

Berdasarkan gambar 4.3, pada posisi angular *blade* 30° didapatkan nilai Torsi Statis tertinggi pada semua variasi bilangan Reynolds. Hal ini diduga pada posisi angular *blade* tersebut, *advancing blade* menerima gaya drag lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah demikian juga *returning blade* menerima gaya drag lebih rendah sehingga perbedaan gaya drag pada kedua *blade* lebih tinggi dan dibutuhkan torsi yang tinggi untuk menahan putaran turbin. Sedangkan nilai

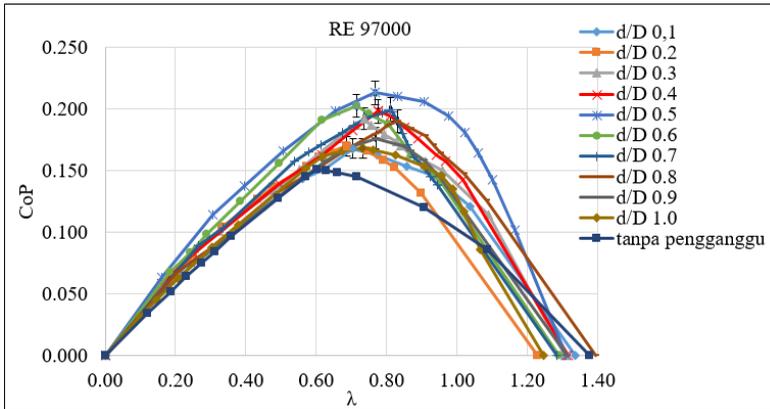
terendah torsi statis didapatkan pada posisi sudut 130° ($Re = 9,7 \times 10^4$) dan 150° ($Re = 13,6 \times 10^4$). Diduga pada posisi tersebut, gaya *drag* pada *advancing blade* bernilai lebih rendah dibandingkan pada *returning blade* sehingga menghasilkan selisih torsi yang bernilai negatif. Nilai negatif pada torsi statis menandakan bahwa torsi berputar berlawanan arah turbin, maka hal ini menunjukkan bahwa kemampuan *self starting* rendah sehingga pada posisi angular yang bernilai negatif, turbin tidak dapat berputar dengan sendirinya.

4.3 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Pengganggu dengan Variasi d/D ($0,1 \leq \frac{d}{D} \leq 1.0$)

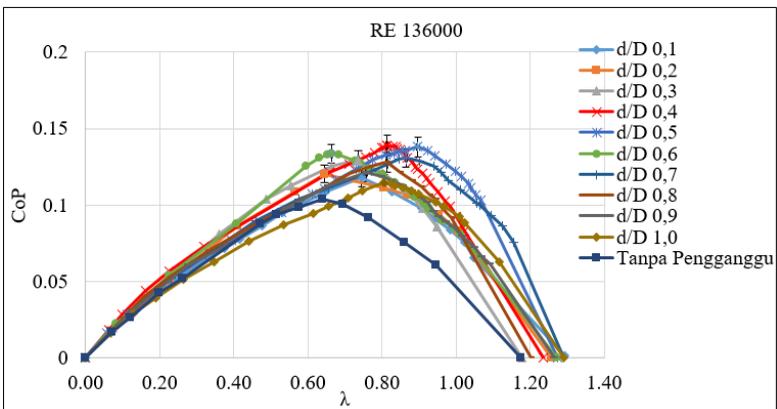
4.3.1 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Pengganggu dengan Variasi d/D ($0,1 \leq \frac{d}{D} \leq 1.0$) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Setelah melakukan analisa performa turbin tanpa pengganggu dilakukan analisa performa turbin dengan pengganggu. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ditambahnya pengganggu didepan *returning blade*. Silinder pengganggu diletakkan pada jarak $S/D = 2,0$, $y/D = 0,5$ dan menggunakan variasi d/D yaitu 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0. Penelitian dilakukan pada variasi bilangan Reynolds yang digunakan $9,7 \times 10^4$, $13,6 \times 10^4$.

4.3.1.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu



(a)



(b)

Gambar 4. 4 Grafik CoP dan CoP_0 terhadap (λ) dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; \text{ dan } 1,0$ dengan $S/D=2,0$ pada (a) $Re = 97000$; (b) $Re = 136.000$

Gambar 4.4 (a) dan (b) menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP₀) pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$, dapat dilihat bahwa grafik berbentuk parabolik, dimana nilai *coefficient of power* (CoP) pada awalnya akan terus naik sampai pada titik optimumnya dan kemudian akan turun seiring dengan bertambahnya *tip speed ratio* (λ).

Pada puncak grafik didapatkan nilai CoP maksimum di λ optimum setelah menggunakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penempatan silinder pengganggu dengan variasi d/D 0,1 s/d 1,0 menghasilkan *Coefficient of Power* (CoP) lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan silinder pengganggu. Nilai CoP pada turbin Savonius naik seiring dengan bertambahnya nilai d/D sampai mencapai titik optimum pada silinder pengganggu $d/D=0,5$ dengan nilai CoP 0,213 (Re=97.000) dan lalu mengalami penurunan sampai pada silinder pengganggu $d/D=1,0$ yang bernilai CoP 0,168 (16,8%) sesuai pada tabel 4.3. Begitu pula pada bilangan Reynold 136.000, CoP maksimum diperoleh pada $d/D=0,4$ senilai 0,139 lalu mengalami penurunan sampai pada silinder $d/D=1,0$ bernilai CoP 0,114.

Nilai CoP maksimum sesuai pada tabel 4.3 pada turbin dengan silinder pengganggu untuk semua rasio diameter d/D memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Penambahan silinder pengganggu pada rasio diameter $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ pada bilangan kedua bilangan Reynolds efektif meningkatkan *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius. Hal ini dibuktikan dengan persentase nilai kenaikan pada masing-masing bilangan Reynolds sesuai pada tabel 4.3. Presentase kenaikan

nilai CoP_{max} pada bilangan $Re=97.000$ paling tinggi diperoleh menggunakan silinder pengganggu berdiameter d/D 0,5 dengan nilai 40,82% sedangkan presentase kenaikan terendah senilai 10,99% pada diameter d/D 0,1. Pada $Re=136.000$, kenaikan nilai CoP_{max} paling tinggi menggunakan silinder pengganggu berdiameter 0,4 dengan presentase kenaikan nilai 33,69% sedangkan presentase kenaikan terendah menggunakan silinder pengganggu d/D 1,0 bernilai 10,11%.

Tabel 4.3 Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ pada S/D 2,0

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				% Kenaikan	
	Re 97000		Re 136000		Re 97000		Re 136000		Re 97000	Re 136000
	CoP_{max}	λ	CoP_{max}	λ	CoP_{max}	λ	CoP_{max}	λ		
0.1	15.15%	0.60	10.40%	0.63	16.82%	0.70	11.78%	0.75	10.99%	13.31%
0.2					17.02%	0.69	12.04%	0.64	12.31%	15.73%
0.3					19.23%	0.74	12.95%	0.74	26.92%	24.50%
0.4					19.84%	0.78	13.90%	0.81	30.94%	33.69%
0.5					21.34%	0.77	13.80%	0.90	40.82%	32.69%
0.6					20.26%	0.71	13.35%	0.66	33.70%	28.35%
0.7					19.99%	0.81	13.00%	0.85	31.95%	24.97%
0.8					19.02%	0.83	12.79%	0.81	25.54%	22.97%
0.9					17.65%	0.77	12.13%	0.76	16.48%	16.65%
1.0					16.84%	0.73	11.45%	0.81	11.16%	10.11%

Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa dengan adanya silinder pengganggu akan menyebabkan *boundary layer* pada *returning blade* terganggu dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen, sehingga momentum aliran yang digunakan untuk menggerakkan fluida lebih mampu menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient*. Penambahan silinder pengganggu pada posisi $y/D = 0,5$ tepat berada pada titik stagnasi *returning blade* sehingga gaya drag pada *returning blade* akan turun dan membuat selisih gaya drag antara kedua *blades*

akan meningkat yang kemudian menyebabkan torsi dan daya yang didapat semakin besar. Selain itu adanya silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat mengakibatkan tekanan pada bagian depan *returning blade* mengalami penurunan sehingga selisi tekanan pada bagian depan dan belakang meningkat. Hal ini mengakibatkan gaya hambat pada *returning blade* mengalami penurunan dan secara otomatis meningkatkan selisi gaya drag antara *returning blade* dan *advancing blade*.

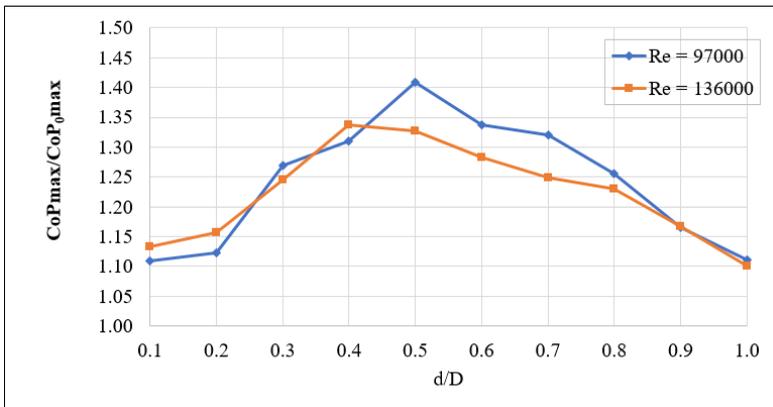
Tabel 4. 4 Tabel Uncertainty nilai CoP

d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CoP _{max}	Uncertainty (%)	Range	CoP _{max}	Uncertainty (%)	Range
0.1	16.82%	4.79	16.00%-17.60%	11.78%	4.51	11.26%-12.32%
0.2	17.02%	4.74	16.21%-17.83%	12.04%	4.39	11.51%-12.57%
0.3	19.23%	4.67	18.33%-20.13%	12.95%	4.42	12.38%-13.52%
0.4	19.84%	4.70	18.91%-20.77%	13.90%	4.45	13.29%-14.52%
0.5	21.34%	4.61	20.36%-22.32%	13.80%	4.53	13.18%-14.43%
0.6	20.26%	4.59	19.33%-21.19%	13.35%	4.34	12.77%-13.93%
0.7	19.99%	4.74	19.04%-20.94%	13.00%	4.54	12.41%-13.59%
0.8	19.02%	4.84	18.10%-19.94%	12.79%	4.51	12.21%-13.37%
0.9	17.65%	4.84	16.80%-18.50%	12.13%	4.50	11.59%-12.68%
1.0	16.84%	4.84	16.03%-17.65%	11.45%	4.60	10.93%-11.98%

Tabel 4.4 diatas menunjukkan bahwa perhitungan nilai CoP memiliki nilai uncertainty. Nilai uncertainty diatas merupakan nilai ketidakpastian pada sebuah proses pengukuran dan perhitungan nilai CoP dimana setiap nilai CoP memiliki range nilai yang diperoleh dari interval uncertainty. Pada gambar 4.4, terlihat bahwa beberapa nilai CoP_{max} pada d/D = 0,1 – 1,0 berada pada range nilai yang sama. Pada bilangan Reynold 97.000 range nilai CoP_{max} hampir sama pada diameter: (d/D = 0,1;0,2); (d/D = 0,3; 0,4); (d/D = 0,6;0,7) dan (d/D = 0,9;1,0). Lalu pada bilangan Reynold 136.000 yang memiliki nilai range CoP_{max} yang hampir sama adalah diameter (d/D = 0,1;0,2;0,9); selanjutnya (d/D =

0,3;0,6;0,7;0,8); dan ($d/D = 0,4; 0,5$). Hal ini menandakan bahwa performa turbin tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan pada beberapa ukuran d/D . Pada studi eksperimen penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 2,0$ disarankan hanya menggunakan beberapa variasi d/D yaitu (pada $Re = 97.000$ menggunakan $d/D = 0,1; 0,3; 0,6; 0,8; 0,9$); (pada $Re = 136.000$ menggunakan $d/D = 0,1; 0,4; 0,6; 1,0$) yang menghasilkan range nilai CoP berbeda.

4.3.1.2 Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maksimum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max})



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) menggunakan $d/D = 0.1 - 1.0$ pada $S/D 2,0$, bilangan Reynolds 97.000 dan 136.000

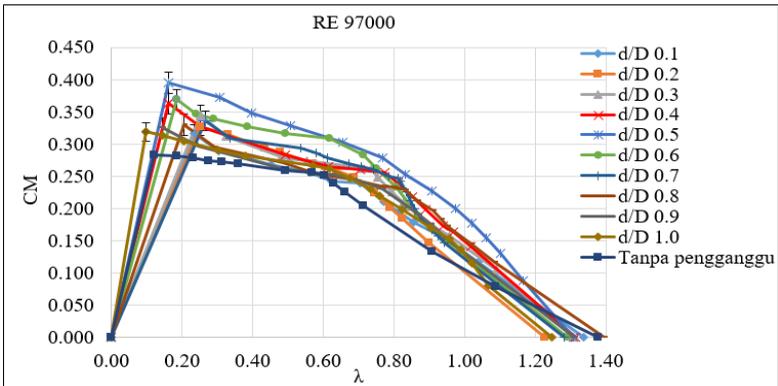
Dari penelitian yang dilakukan, didapatkan grafik (gambar 4.5) perbandingan nilai CoP_{max} pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) pada $Re = 97000$ dan $Re = 136.000$. Pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa grafik memiliki bentuk parabolik dimana nilai perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya ukuran diameter silinder pengganggu sehingga puncak dari grafik tersebut adalah nilai tertinggi dari CoP_{max}/CoP_{0max} . Pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi berada pada $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 1,408 yang artinya nilai CoP turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,1515 menjadi 0,2134. Selanjutnya pada $Re = 13,6 \times 10^4$, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi berada pada $d/D = 0,4$ yaitu sebesar 1,337 yang artinya nilai CoP mengalami presentase kenaikan sebesar 33,69% terhadap nilai CoP_{0max} turbin angin tanpa silinder pengganggu.

Dari hasil-hasil tersebut, dibuktikan bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius karena nilai CoP_{max}/CoP_{0max} lebih dari 1 (100%) di seluruh variasi d/D sehingga diameter silinder pengganggu terbukti mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Hal ini sesuai dengan hipotesa ketiga bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin dapat menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat yang mengakibatkan daya turbin meningkat. Dari hasil-hasil tersebut juga didapatkan bahwa peningkatan terbesar berada pada $d/D = 0,5$ ($Re = 97.000$) dan $d/D = 0,4$ ($Re = 136.000$). Hasil penelitian ini membuktikan hipotesa ketiga bahwa ukuran diameter silinder pengganggu yang terlalu kecil/besar akan

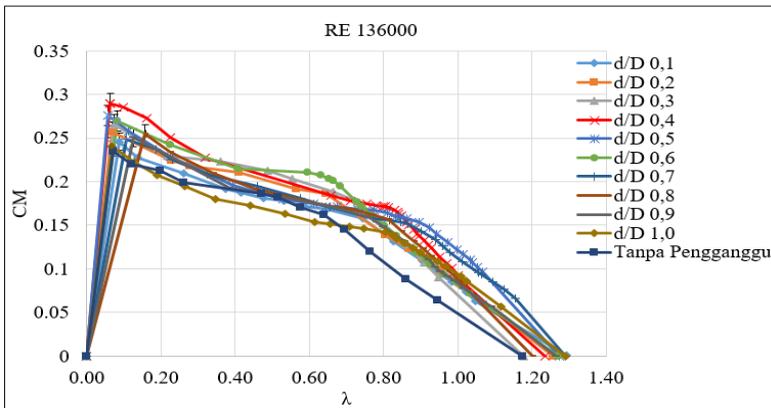
memperkecil pengaruh dari penambahan silinder pengganggu terhadap performa yang dihasilkan. Sehingga hanya terdapat satu ukuran diameter d/D yang optimal untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius secara efektif.

4.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (CM) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ)

4.3.2.1 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (CM) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dengan variasi d/D



Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan CM dan CM_0 terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) 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 S/D $2,0$ pada bilangan Reynolds 97000



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan CM dan CM_0 terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) 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 $S/D 2,0$ pada bilangan Reynolds 136000

Dari Pengukuran torsi dinamis turbin angin Savonius pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dengan menggunakan *brake dynamometer*, dapat dianalisa untuk mendapatkan *Coefficient of Moment*. *Coefficient of Moment* adalah perbandingan antara torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin. Percobaan dilakukan menggunakan variasi d/D 0,1 sampai dengan 1,0 dan didapatkan grafik dan data seperti diatas.

Gambar 4.6 dan 4.7 merupakan grafik hubungan antara *Coefficient of Moment* terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin angin Savonius berpenghalang pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dengan variasi posisi d/D . Dari grafik diatas dapat dilihat *trendline* dari kedua grafik menunjukkan bahwa nilai CM mengalami penurunan seiring kenaikan nilai *tip speed ratio* (λ). Nilai CM maksimum didapatkan ketika nilai torsi dinamis yang

dihasilkan paling tinggi pada saat pembeban paling berat ketika turbin masih berputar.

Tabel 4. 5 Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				%Kenaikkan C_M	
	Re = 97.000		Re = 136.000		Re = 97.000		Re = 136.000		Re =	Re =
	CM_{0max}	λ	CM_{0max}	λ	CM_{max}	λ	CM_{max}	λ	97.000	136.000
0,1	28.37%	0.12	23.45%	0.07	31.59%	0.23	24.58%	0.09	11.33%	4.81%
0,2					32.73%	0.25	25.74%	0.07	15.36%	9.74%
0,3					34.48%	0.25	26.56%	0.07	21.51%	13.26%
0,4					36.30%	0.16	28.92%	0.06	27.93%	23.28%
0,5					39.51%	0.16	27.58%	0.06	39.25%	17.59%
0,6					36.88%	0.18	26.94%	0.08	29.97%	14.84%
0,7					33.56%	0.27	24.87%	0.11	18.28%	6.05%
0,8					32.98%	0.21	25.49%	0.16	16.25%	8.67%
0,9					32.59%	0.15	25.04%	0.13	14.85%	6.74%
1,0					31.88%	0.10	24.02%	0.07	12.37%	2.40%

Selanjutnya, dari tabel 4.5 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum tertinggi pada Re 97.000 didapatkan pada diameter silinder pengganggu $d/D = 0,5$ dengan nilai = 39,51%. Sedangkan nilai *Coefficient of Moment* maksimum terkecil adalah pada diameter $d/D = 0,1$ dengan nilai 31,59%. Lalu dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum tertinggi pada Re 136.000 didapatkan pada diameter silinder pengganggu $d/D = 0,4$ dengan nilai = 28,92. Sedangkan nilai *Coefficient of Moment* maksimum terkecil adalah pada diameter $d/D = 1,0$ dengan nilai 24,02.

Berdasarkan tabel 4.5, diketahui bahwa presentase kenaikan nilai CM tertinggi diperoleh menggunakan silinder pengganggu berdiameter $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds 97.000 dengan %kenaikkan 39,25%, sementara kenaikan terendah pada diameter $d/D = 0,4$ dengan %kenaikkan 2,04%. Pada bilangan Reynolds 136.000, presentase kenaikan nilai CM diperoleh

dengan menggunakan silinder pengganggu berdiameter d/D 0,4 sebesar 23,28%, dan presentase nilai CM kenaikan terendah diperoleh pada diameter d/D 0,7 sebesar 3,43%.

Coefficient of Moment (CM) dipengaruhi oleh kecepatan angin dan torsi dinamis. Pada kedua bilangan Reynold 97.000 dan 136.000, penempatan silinder pengganggu efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen, sehingga momentum aliran di dekat dinding *returning blade* meningkat dan aliran dapat menahan gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, akibatnya titik separasi mundur dan *wake* mengecil. Sehingga gaya drag pada *returning blade* akan menurun dan membuat selisih gaya drag antara kedua *blades* akan meningkat dan menyebabkan torsi yang dihasilkan meningkat. Selain itu, pemberian silinder pengganggu juga diduga efektif menyebabkan penurunan tekanan didepan *returning blade*, jika tekanan dibelakang *returning blade* diasumsikan sama dengan tekanan ketika belum diberi silinder pengganggu maka selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* akan menyebabkan *pressure drag* menurun dan selisih gaya drag antara kedua *blade* meningkat. Semakin besar selisih gaya drag, torsi yang dihasilkan semakin besar. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada Re 97.000 dan $d/D = 0,4$ pada Re 136.000 ini diduga paling efektif mengarahkan aliran menuju *advancing blade* sehingga gaya drag pada *advancing blade* meningkat dan selisih gaya drag antara kedua *blades* akan meningkat. Lalu menyebabkan torsi yang dihasilkan juga meningkat. Hal ini diketahui dari perolehan nilai CM yang meningkat dibandingkan nilai CM_0 sebelum digunakannya silinder pengganggu. Ini mengakibatkan meningkatnya selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* seiring dengan kenaikan nilai torsi dinamis.

Tabel 4.6 dibawah menunjukkan bahwa perhitungan nilai CM memiliki nilai uncertainty. Nilai uncertainty diatas merupakan nilai ketidakpastian pada sebuah proses pengukuran dan perhitungan nilai CM dimana setiap nilai CM memiliki range yang ditunjukkan pada tabel 4.6. Pada gambar 4.6, terlihat bahwa beberapa nilai CMmax pada $d/D = 0,1 - 1,0$ berada pada range nilai yang sama. Pada gambar 4.6 dan 4.7, terlihat bahwa beberapa nilai CM_{max} pada $d/D = 0,1 - 1,0$ berada pada range nilai yang sama. Pada bilangan Reynold 97.000 nilai CM_{max} memiliki range nilai hampir sama pada diameter sebagai berikut: ($d/D = 0,2;0,8;0,9$); ($d/D = 0,1; 1,0$); ($d/D = 0,6;0,7$) dan ($d/D = 0,9;1,0$). Lalu pada bilangan Reynold 136.000 yang memiliki nilai range CM_{max} yang hampir sama adalah diameter ($d/D = 0,1;0,7;0,9$); selanjutnya ($d/D = 0,3;0,6$); dan ($d/D = 0,2; 0,8$). Hal ini menandakan bahwa performa turbin tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan pada beberapa ukuran d/D .

Tabel 4. 6 Tabel Uncertainty CM

d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CM_{max}	Uncertainty (%)	Range	CM_{max}	Uncertainty (%)	Range
0.1	31.60%	4.511	30.17%-33.03%	24.58%	4.287	23.53%-25.63%
0.2	32.70%	4.482	31.23%-34.17%	25.73%	4.280	24.63%-26.83%
0.3	34.50%	4.445	32.97%-36.03%	26.56%	4.267	25.43%-27.70%
0.4	36.30%	4.416	34.70%-37.90%	28.92%	4.250	27.69%-30.14%
0.5	39.50%	4.368	37.77%-41.23%	27.58%	4.269	26.40%-28.76%
0.6	36.90%	4.404	35.27%-38.53%	26.93%	4.257	25.78%-28.08%
0.7	33.60%	4.464	32.10%-35.10%	24.87%	4.277	23.81%-25.94%
0.8	33.00%	4.478	31.52%-34.48%	25.49%	4.263	24.40%-26.57%
0.9	32.60%	4.493	31.14%-34.06%	25.04%	4.272	23.97%-26.11%
1.0	31.90%	4.522	30.46%-33.34%	24.02%	4.306	22.98%-25.05%

Pada studi eksperimen pada $S/D = 2,0$ disarankan hanya menggunakan beberapa variasi d/D (pada $Re = 97.000$ menggunakan $d/D = 0,1; 0,3; 0,4; 0,6; 0,9$); (pada $Re = 136.000$

menggunakan $d/D = 0,1; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0$) yang menghasilkan range nilai CM berbeda.

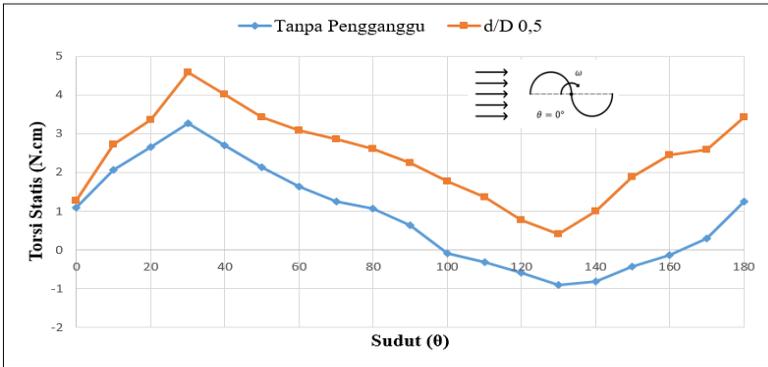
4.3.3 Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Sudut *Blade* (θ)

4.3.3.1 Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) terhadap Sudut *Blade* (θ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

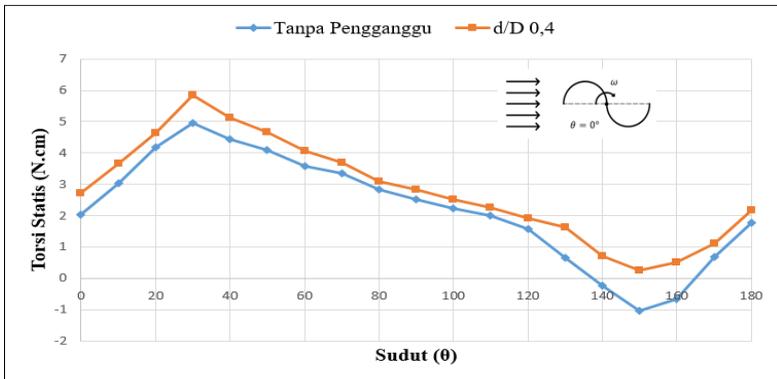
Pada penelitian kali ini dilakukan pengukuran data Torsi Statis dengan penambahan Silinder pengganggu dengan diameter $d/D=0,5$ pada saat bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan penambahan silinder dengan diameter $d/D=0,4$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$. Pengukuran dilakukan pada posisi S/D 2,0 dan y/D 0,5 dikarenakan pada posisi ini, CoP pada setiap bilangan Reynolds memiliki nilai yang tertinggi dari rasio diameter d/D lainnya. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur *torque meter* untuk mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius. Pengambilan data torsi statis ini dilakukan saat kondisi turbin angin Savonius diam yang kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds tertentu dimana posisi angular *blade* (θ) dimulai pada sudut 0° (*blade* searah dengan aliran) sampai dengan 180° dengan kenaikan 10° pada setiap bilangan Reynolds. Data yang yang didapatkan dibuat grafik pada gambar 4.8 dan gambar 4.9.

Berdasarkan gambar 4.8, torsi statis turbin angin Savonius setelah menggunakan silinder pengganggu berdiameter $d/D=0,5$ saat $Re=97.000$ menghasilkan kenaikan torsi statis maksimum dari awalnya 3,28 N.cm menjadi 4,58 N.cm pada posisi angular *blade* (θ) 30° sedangkan torsi statis minimum mengalami kenaikan nilai dari awalnya sebesar -0,9 N.cm menjadi 0,4 N.cm pada posisi angular *blade* (θ) 130° . Hal ini membuktikan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin

Savonius efektif meningkatkan selisih gaya drag sehingga dapat meningkatkan nilai torsi statis pada bilangan Reynold 97000.



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan T_s dan T_{s0} terhadap sudut (θ) dengan variasi $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; pada $Re = 97.000$



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan T_s dan T_{s0} terhadap sudut (θ) dengan variasi $d/D = 0,4$; $S/D = 2,0$; pada $Re = 136.000$

Begitu juga pada $Re=136.000$, berdasarkan gambar 4.9, torsi statis maksimum turbin angin Savonius setelah menggunakan silinder pengganggu berdiameter $d/D=0,4$ naik dari awalnya $4,96$ N.cm menjadi $5,86$ N.cm pada posisi angular *blade* (θ) 30° sedangkan torsi statis minimum mengalami kenaikan nilai dari awalnya sebesar $-1,04$ N.cm menjadi $0,24$ N.cm pada posisi angular *blade* (θ) 150° . Hal ini membuktikan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius efektif meningkatkan selisih gaya *drag* sehingga dapat meningkatkan nilai torsi statis pada bilangan Reynold 136.000 .

Pada posisi angular *blade* (θ) 30° diperoleh torsi statis maksimum dikedua bilangan Reynolds karena pada posisi posisi angular *blade* tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar sehingga dibutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan turbin, sedangkan pada posisi angular *blade* (θ) 130° ($Re=97.000$) dan 150° ($Re=136.000$) diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi posisi angular *blade* tersebut, *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih rendah yang menyebabkan torsi positif berkurang dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil sehingga dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *advancing blade* sehingga perbedaan gaya *drag* kedua *blade* menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin. Sehingga, nilai negatif tersebut menunjukkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang rendah pada posisi angular *blade* (θ) 130° ($Re=97.000$) dan 150° ($Re=136.000$). Setelah ditamhkannya silinder pengganggu, didapatkan hasil perubahan nilai torsi statis yang awalnya negatif menjadi positif pada posisi

angular *blade* (θ) 130° ($Re=97.000$) dan 150° ($Re=136.000$), hal ini menandakan bahwa setelah pemberian pengganggu turbin angin memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik. Oleh karena itu, pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan jarak $S/D=2,0$ dan $d/D=0,5$ ($Re=97.000$) dan $d/D=0,4$ ($Re=136.000$) efektif meningkatkan torsi statis turbin angin Savonius.

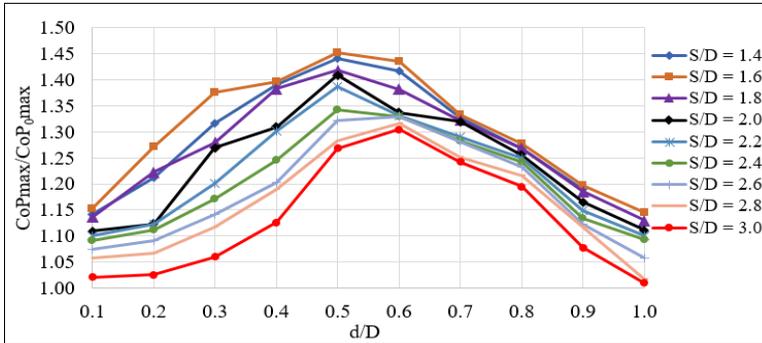
4.4 Analisa Perfoma Turbin Angin Savonius Menggunakan Silinder Penghalang dengan Variasi d/D ($0,1 \leq \frac{d}{D} \leq 1,0$) pada Bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Penelitian peningkatan performa turbin angin Savonius dilakukan selain menggunakan variasi bilangan Reynolds (97.000 dan 136.000), variasi d/D ($0,1 \leq d/D \leq 1,0$) juga menggunakan variasi S/D berbeda yaitu $S/D = 1,6$ yang dilakukan oleh M Rizky Ramadhan (2020), $S/D = 1,8$ oleh Markus Sarsanto (2020), $S/D = 2,0$ oleh Ghiyats Humam, $S/D = 2,2$ oleh Lazuardhi (2020), $S/D = 2,4$ oleh Prabasworo (2020), $S/D = 2,6$ oleh Ardy Makarim (2020), $S/D = 2,8$ oleh Hilda M. (2020) dan $S/D 3,0$ oleh Asri Melati (2020) dengan jumlah total 9 variasi. Berdasarkan data yang dikumpulkan, diperoleh grafik (gambar 4.10) perbandingan nilai CoP_{max} pada turbin angin Savonius terhadap d/D dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) pada $Re = 97000$ dan gambar 4.11 pada $Re = 136.000$ dengan variasi S/D .

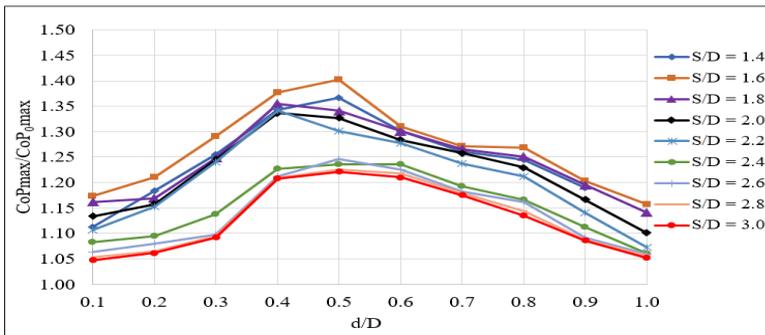
4.4.1 Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maksimum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) dengan variasi S/D terhadap d/D

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

pengganggu (CoP_{max}/CoP_0_{max}) terhadap d/D pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.10 dan 4.11 dibawah dalam bentuk grafik.



Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan CoP_{max}/CoP_0_{max} terhadap d/D dengan variasi $1,4 \leq S/D \leq 3,0$ pada bilangan Reynolds 97.000



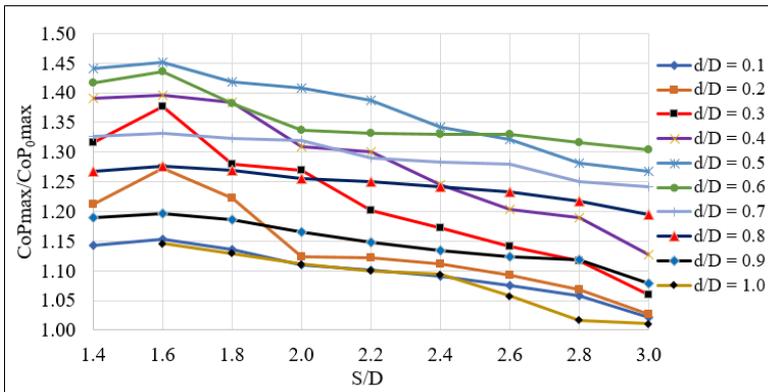
Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan CoP_{max}/CoP_0_{max} terhadap d/D dengan variasi $1,4 \leq S/D \leq 3,0$ pada bilangan Reynolds 136.000

Pada kedua grafik diatas gambar 4.10 dan 4.11 menunjukkan bahwa grafik memiliki bentuk parabolik dimana nilai perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya ukuran diameter silinder pengganggu sehingga puncak dari grafik tersebut adalah nilai tertinggi dari CoP_{max}/CoP_{0max} . Hal ini membuktikan hipotesa ketiga, bahwa didapatkan hasil nilai rasio diameter d/D optimum silinder pengganggu yang digunakan pada setiap S/D dalam menurunkan tekanan di depan *returning blade* dan menunda titik separasi. Pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* mengakibatkan torsi, daya, dan *CoP* turbin Savonius akan meningkat. Rasio diameter (d/D) yang telah melewati d/D optimum memiliki performa turbin yang lebih kecil. Hal ini seperti pada grafik gambar 4.10, setelah melewati d/D 0,5 terjadi penurunan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} , begitu juga pada grafik gambar 4.11 dimana penurunan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terjadi setelah d/D optimal 0,4 pada bilangan Re 136.000

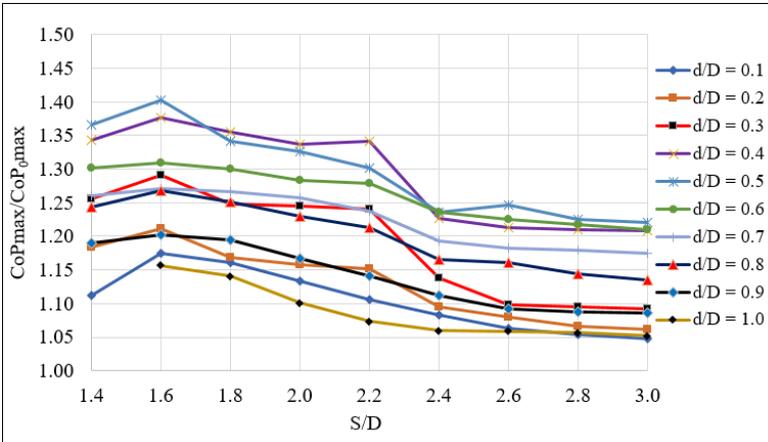
Melalui kedua grafik diatas, semua bentuk grafik pada setiap S/D bernilai CoP_{max}/CoP_{0max} lebih besar dari 1. Hal ini menandakan bahwa, setelah digunakannya silinder pengganggu dengan $d/D = 0,1$ sampai dengan $d/D = 1,0$ dapat menaikkan sehingga CoP_{0max} . Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa penambahan silinder pengganggu pada Bilangan Reynolds 97.000 dan 136.000 efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius.

4.4.2 Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maksimum (CoPmax) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Siliner Pengganggu (CoPmax/CoP₀max) dengan variasi d/D terhadap S/D

Pada gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan bahwa grafik memiliki *trendline* menurun dimana nilai perbandingan CoPmax/CoP₀max S/D = 1,4 meningkat sampai S/D = 1,6 lalu menurun seiring dengan bertambahnya jarak S/D pada penempatan silinder pengganggu sehingga puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai S/D 1,6.



Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan CoPmax/CoP₀max terhadap S/D dengan variasi $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ pada bilangan Reynolds 97.000



Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} terhadap S/D dengan variasi $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ pada bilangan Reynolds 136.000

Berdasarkan grafik 4.12 dan 4.13 penelitian pada kedua bilangan Reynolds ($Re = 97.0000$ dan 136.000) *trendline* tertinggi CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi berada pada $S/D = 1,6$. Dan penurunan *trendline* sebanding dengan perunan nilai S/D sampai pada $S/D 3,0$ yang memiliki *trendline* terbawah pada grafik. Berdasarkan hal tersebut, maka dapat dikatakan bahwa pada penelitian ini penempatan turbin pengganggu paling efektif pada jarak $S/D 1,6$ dan disimpulkan bahwa semakin besar jarak S/D pada silinder pengganggu yang ditempatkan maka nilai CoP yang diperoleh akan semakin menurun. Begitu juga apabila semakin sempit jarak S/D apabila melewati jarak optimal ($S/D = 1,6$) maka nilai CoP akan menurun. S

Dari hasil-hasil tersebut, dibuktikan bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds efektif

meningkatkan performa turbin angin Savonius karena nilai CoP_{max}/CoP_{0max} lebih dari 1 (100%) di seluruh variasi S/D sehingga jarak penempatan silinder pengganggu terbukti mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin dapat menurunkan gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat yang mengakibatkan daya turbin meningkat.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari studi eksperimen pengaruh silinder pengganggu didepan returning blade pada posisi $S/D = 2,0$ dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4; 13,6 \times 10^4$:

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* sebesar 40,82% dari nilai tanpa dengan silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ dengan $d/D = 0,4$ terjadi kenaikan sebesar 33,69% dari nilai *coefficient of power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.
2. Penempatan Silinder pengganggu dengan diameter $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ dapat meningkatkan nilai CM secara efektif pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4, 13,6 \times 10^4$. Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$, $d/D 0,5$ meningkatkan presentase nilai CM terbesar sebesar 39,25 % dari nilai tanpa pengganggu. Sama halnya pada bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ menggunakan $d/D 0,5$ mengalami kenaikan presentase nilai CM sebesar 23,28% dari nilai tanpa pengganggu.
3. Penambahan silinder pengganggu didepan returning blade terbukti efektif meningkatkan *self starting* turbin angin Savonius pada Re $9,7 \times 10^4$ dan $13,7 \times 10^4$. Pada diameter $d/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai torsi statis pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dari 3,28 N.cm menjadi 4,58 N.cm pada $\theta = 30^\circ$ dan -0,9 N.cm menjadi 0,4 N.cm pada $\theta = 130^\circ$. Nilai torsi setelah menggunakan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$ terjadi kenaikan nilai torsi statis dari awalnya 4,96 N.cm menjadi 5,86 N.cm pada $\theta = 30^\circ$ dan

kenaikkan nilai torsi dari -1,04 N.cm menjadi 0,24 N.cm pada $\theta = 150^\circ$.

4. Pada variasi 9 S/D mulai dari $1,4 \leq S/D \leq 3,0$, performa turbin angin Savonius menurun seiring meningkatnya nilai S/D. Performa paling tinggi didapatkan pada saat penempatan turbin pengganggu pada S/D 1,6.
5. Penambahan silinder pengganggu dengan variasi $0,1 \leq d/D \leq 1,0$ memperoleh hasil peningkatan performa turbin angin Savonius pada Re 97.000 maupun 136.000 dengan nilai $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$. Diameter d/D silinder pengganggu optimal didapatkan pada diameter d/D = 0,5 pada Re = 97.000 dan d/D = 0,4 pada Re = 136.000.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya berdasarkan studi eksperimen pengaruh silinder pengganggu didepan returning blade pada posisi S/D = 2,0 dengan variasi d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$; $13,6 \times 10^4$:

1. Melakukan kalibrasi pada alat penelitian yang digunakan sebelum melakukan penelitian
2. Menggunakan neraca pegas dengan ketelitian yang lebih besar.
3. Mengistirahatkan *voltage regulator* secara berkala (tidak dipakai dalam jangka waktu yang lama) selama melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

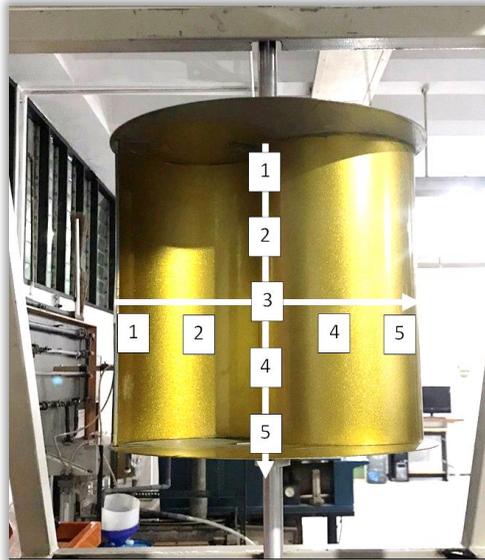
- Daryanto, Y. (2007). *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: Balai PPTAAG
- Incropera, et al. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Sixth Edition)*. New York: John Wiley & Sons, Inc.,
- J.Prichard, P., & C.Leylegian, J. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics (Eight Edition)*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Mahmoud, N. H. (2012). "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance". *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Rustam, Jasmi Aprillia & Yuwono, T. (2018). "*Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu terhadap Performa Turbin Angin Savonius*". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Soelaiman. (2006). "*Pengaruh bentuk Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Savonius*". Majalah Ilmiah STTR, Cepu.
- Tsutsui, T and Igarashi, T. (2002). "*Drag Reduction on Circular Cylinder in an Air-Stream*", *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamic*, Vol 90, Page Paper 527-541.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

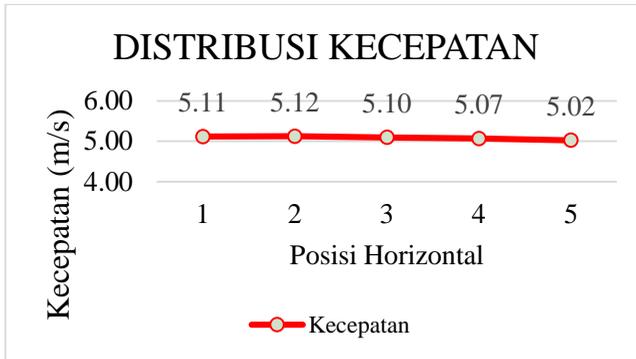
LAMPIRAN

A. *UNIFORMITY FLOW TEST*

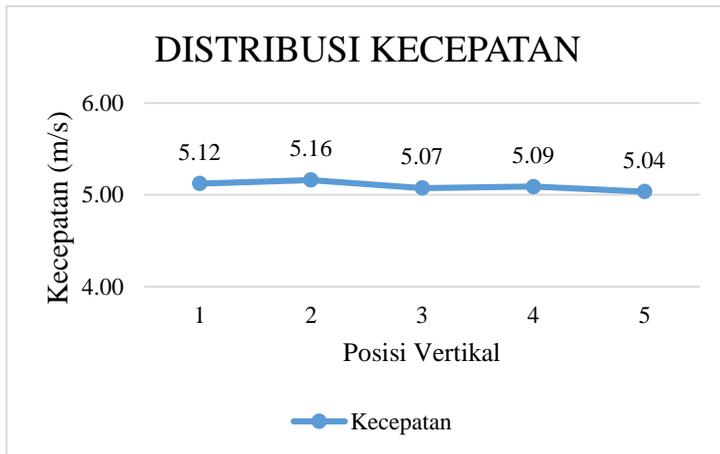
Uniformity flow test (Pengetesan keseragaman aliran) dibutuhkan dalam sebuah penelitian agar didapatkan hasil yang paling ideal. Dalam penelitian ini digunakan sebuah *honeycomb* yang berfungsi untuk menyeragamkan aliran karena penelitian dilakukan di kondisi terbuka. Pengetesan ini dilakukan untuk memastikan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



Gambar A. 1 Posisi titik *sample* pengambilan kecepatan angin



Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal



Gambar A. 3 Grafik Distribusi Kecepatan Vertikal

Tabel A. 1 Data Keseragaman Kecepatan Angin

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

B. DATA PENELITIAN TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGGANGGU

Tabel B. 1 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan *Reynolds* 97.000.

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28.5	5	426	44.588	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.378	0.000	0.000	0.000
28.5	5	336.1	35.178	6	140	0.0125	0.092	1.17	1.087	0.016	0.086	0.079
28.5	5	280.38	29.346	15.3	240	0.0125	0.092	1.17	0.907	0.028	0.120	0.133
28.5	5	220.74	23.104	24.6	370	0.0125	0.092	1.17	0.714	0.042	0.145	0.204
28.5	5	203.98	21.350	27.7	410	0.0125	0.092	1.17	0.660	0.047	0.149	0.226
28.5	5	194.6	20.368	30.8	435	0.0125	0.092	1.17	0.629	0.050	0.150	0.238
28.5	5	186.4	19.510	33.9	460	0.0125	0.092	1.17	0.603	0.052	0.152	0.251
28.5	5	175.86	18.407	37	470	0.0125	0.092	1.17	0.569	0.053	0.145	0.255
28.5	5	151.96	15.905	40.1	480	0.0125	0.092	1.17	0.491	0.054	0.128	0.259
28.5	5	110.84	11.601	43.2	500	0.0125	0.092	1.17	0.358	0.056	0.097	0.269
28.5	5	96.58	10.109	49.4	510	0.0125	0.092	1.17	0.312	0.056	0.085	0.272
28.5	5	85.06	8.903	55.6	520	0.0125	0.092	1.17	0.275	0.057	0.075	0.274
28.5	5	71.4	7.473	68	540	0.0125	0.092	1.17	0.231	0.058	0.064	0.278
28.5	5	57.5	6.018	83.5	560	0.0125	0.092	1.17	0.186	0.058	0.052	0.281
28.5	5	37.36	3.910	99	580	0.0125	0.092	1.17	0.121	0.059	0.034	0.284
28.5	5	0	0.000	130	560	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.053	0.000	0.000

Tabel B. 2 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan *Reynolds* 136.000.

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28.5	7	508.4	53.213	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.174	0.000	0.000	0.000
28.5	7	409.2	42.830	6	220	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.026	0.061	0.064
28.5	7	372.66	39.005	18.4	310	0.0125	0.092	1.17	0.861	0.036	0.076	0.088
28.5	7	330.54	34.597	30.8	430	0.0125	0.092	1.17	0.764	0.049	0.092	0.120
28.5	7	300.26	31.427	37	520	0.0125	0.092	1.17	0.694	0.059	0.101	0.145
28.5	7	277.08	29.001	40.1	580	0.0125	0.092	1.17	0.640	0.066	0.104	0.162
28.5	7	249.9	26.156	43.2	610	0.0125	0.092	1.17	0.577	0.070	0.098	0.171
28.5	7	223.6	23.403	46.3	650	0.0125	0.092	1.17	0.517	0.074	0.094	0.182
28.5	7	203.46	21.295	49.4	670	0.0125	0.092	1.17	0.470	0.076	0.088	0.187
28.5	7	112.74	11.800	58.7	720	0.0125	0.092	1.17	0.260	0.081	0.052	0.199
28.5	7	86.14	9.016	74.2	780	0.0125	0.092	1.17	0.199	0.087	0.042	0.212
28.5	7	51.8	5.422	89.7	820	0.0125	0.092	1.17	0.120	0.090	0.026	0.220
28.5	7	30.96	3.240	120.7	900	0.0125	0.092	1.17	0.072	0.096	0.017	0.235
28.5	7	0	0.000	151.7	950	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.098	0.000	0.000

Tabel B. 3 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan *Reynolds* 97.000 dan 136.000

Sudut (θ)	T _{s0} (N.cm)	
	Re = 97.000	Re = 136.000
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 *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,1 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	421.32	44.098	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.336	0.000	0.000	0.000
28.5	5	327.02	34.228	6	200	0.0125	0.092	1.17	1.037	0.024	0.121	0.117
28.5	5	293.86	30.757	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	0.932	0.032	0.146	0.157
28.5	5	269.92	28.252	12.2	310	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.037	0.153	0.179
28.5	5	243.62	25.499	15.3	365	0.0125	0.092	1.17	0.773	0.043	0.163	0.210
28.5	5	222.28	23.265	18.4	415	0.0125	0.092	1.17	0.705	0.049	0.168	0.239
28.5	5	196.68	20.586	21.5	425	0.0125	0.092	1.17	0.624	0.049	0.151	0.243
28.5	5	177.18	18.545	24.6	450	0.0125	0.092	1.17	0.562	0.052	0.144	0.256
28.5	5	142.7	14.936	33.9	480	0.0125	0.092	1.17	0.453	0.055	0.121	0.268
28.5	5	96.12	10.061	49.4	530	0.0125	0.092	1.17	0.305	0.059	0.088	0.289
28.5	5	74.02	7.747	64.9	590	0.0125	0.092	1.17	0.235	0.064	0.074	0.316
28.5	5	0	0.000	95.9	650	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.068	0.000	0.000

Tabel C. 2 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,2 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	387.3	40.537	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.228	0.000	0.000	0.000
28.5	5	283.3	29.652	6	250	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.030	0.132	0.147
28.5	5	259.72	27.184	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	0.824	0.038	0.153	0.185
28.5	5	249.14	26.077	15.3	350	0.0125	0.092	1.17	0.790	0.041	0.159	0.201
28.5	5	234.88	24.584	18.4	390	0.0125	0.092	1.17	0.745	0.046	0.167	0.224
28.5	5	216.36	22.646	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.686	0.051	0.170	0.248
28.5	5	201.56	21.097	30.8	460	0.0125	0.092	1.17	0.639	0.053	0.165	0.258
28.5	5	191.48	20.042	33.9	475	0.0125	0.092	1.17	0.607	0.054	0.161	0.265
28.5	5	180.26	18.867	43.2	490	0.0125	0.092	1.17	0.572	0.055	0.154	0.269
28.5	5	150.76	15.780	52.5	530	0.0125	0.092	1.17	0.478	0.059	0.137	0.287
28.5	5	136.66	14.304	61.8	550	0.0125	0.092	1.17	0.433	0.060	0.127	0.294
28.5	5	104.4	10.927	77.3	600	0.0125	0.092	1.17	0.331	0.064	0.104	0.314
28.5	5	79.16	8.285	95.9	640	0.0125	0.092	1.17	0.251	0.067	0.082	0.327
28.5	5	0	0.000	141.5	690	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.067	0.000	0.000

Tabel C. 3 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,3 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	412.24	43.148	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.307	0.000	0.000	0.000
28.5	5	341.9	35.786	6	180	0.0125	0.092	1.17	1.084	0.021	0.113	0.105
28.5	5	302.04	31.614	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.032	0.150	0.157
28.5	5	287	30.039	12.2	300	0.0125	0.092	1.17	0.910	0.035	0.158	0.173
28.5	5	273.22	28.597	15.3	330	0.0125	0.092	1.17	0.866	0.039	0.164	0.189
28.5	5	264.88	27.724	18.4	355	0.0125	0.092	1.17	0.840	0.041	0.170	0.202
28.5	5	260.76	27.293	21.5	370	0.0125	0.092	1.17	0.827	0.043	0.173	0.210
28.5	5	250.4	26.209	24.6	400	0.0125	0.092	1.17	0.794	0.046	0.179	0.226
28.5	5	238.08	24.919	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.755	0.051	0.187	0.248
28.5	5	232.16	24.299	30.8	465	0.0125	0.092	1.17	0.736	0.053	0.192	0.261
28.5	5	224.42	23.489	33.9	470	0.0125	0.092	1.17	0.712	0.053	0.187	0.262
28.5	5	208.28	21.800	37	480	0.0125	0.092	1.17	0.661	0.054	0.176	0.266
28.5	5	174.54	18.269	40.1	495	0.0125	0.092	1.17	0.554	0.056	0.151	0.274
28.5	5	159.22	16.665	49.4	510	0.0125	0.092	1.17	0.505	0.056	0.140	0.277
28.5	5	151.64	15.872	64.9	530	0.0125	0.092	1.17	0.481	0.057	0.135	0.280
28.5	5	102.1	10.686	95.9	615	0.0125	0.092	1.17	0.324	0.064	0.101	0.312
28.5	5	79.7	8.342	126.9	700	0.0125	0.092	1.17	0.253	0.070	0.087	0.345
28.5	5	0	0.000	157.9	800	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.079	0.000	0.000

Tabel C. 4 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,4 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	414.7	43.405	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.315	0.000	0.000	0.000
28.5	5	320.6	33.556	6	240	0.0125	0.092	1.17	1.017	0.029	0.143	0.141
28.5	5	305.52	31.978	9.1	280	0.0125	0.092	1.17	0.969	0.033	0.158	0.163
28.5	5	296.72	31.057	12.2	300	0.0125	0.092	1.17	0.941	0.035	0.163	0.173
28.5	5	280.76	29.386	15.3	345	0.0125	0.092	1.17	0.890	0.040	0.177	0.198
28.5	5	268.5	28.103	18.4	380	0.0125	0.092	1.17	0.852	0.044	0.185	0.218
28.5	5	255.98	26.793	21.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.812	0.049	0.195	0.240
28.5	5	244.48	25.589	24.6	450	0.0125	0.092	1.17	0.775	0.052	0.198	0.256
28.5	5	221.7	23.205	27.7	460	0.0125	0.092	1.17	0.703	0.053	0.183	0.260
28.5	5	194.04	20.310	30.8	470	0.0125	0.092	1.17	0.615	0.054	0.163	0.264
28.5	5	155.78	16.305	40.1	510	0.0125	0.092	1.17	0.494	0.058	0.140	0.283
28.5	5	79.48	8.319	55.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.252	0.067	0.083	0.327
28.5	5	51.06	5.344	86.6	690	0.0125	0.092	1.17	0.162	0.074	0.059	0.363
28.5	5	0	0.000	117.6	760	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.079	0.000	0.000

Tabel C. 5 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,5 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	412.96	43.223	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.310	0.000	0.000	0.000
28.5	5	367.24	38.438	6	152	0.0125	0.092	1.17	1.165	0.018	0.102	0.088
28.5	5	347.18	36.338	9.1	225	0.0125	0.092	1.17	1.101	0.026	0.143	0.130
28.5	5	334.84	35.047	12.2	270	0.0125	0.092	1.17	1.062	0.032	0.165	0.155
28.5	5	322.26	33.730	15.3	310	0.0125	0.092	1.17	1.022	0.036	0.181	0.177
28.5	5	307.42	32.177	18.4	350	0.0125	0.092	1.17	0.975	0.041	0.194	0.199
28.5	5	285.8	29.914	21.5	400	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.046	0.206	0.228
28.5	5	262.32	27.456	24.6	445	0.0125	0.092	1.17	0.832	0.052	0.210	0.253
28.5	5	241.94	25.323	27.7	490	0.0125	0.092	1.17	0.767	0.057	0.213	0.278
28.5	5	206.26	21.589	30.8	535	0.0125	0.092	1.17	0.654	0.062	0.198	0.303
28.5	5	159.58	16.703	33.9	580	0.0125	0.092	1.17	0.506	0.067	0.166	0.329
28.5	5	125.08	13.092	37	615	0.0125	0.092	1.17	0.397	0.071	0.138	0.348
28.5	5	96.76	10.128	40.1	660	0.0125	0.092	1.17	0.307	0.076	0.114	0.373
28.5	5	51.04	5.342	43.2	700	0.0125	0.092	1.17	0.162	0.081	0.064	0.395
28.5	5	0	0.000	58.7	735	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.083	0.000	0.000

Tabel C. 6 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,6 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	406.92	42.591	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.291	0.000	0.000	0.000
28.5	5	301.46	31.553	6	250	0.0125	0.092	1.17	0.956	0.030	0.140	0.147
28.5	5	274.72	28.754	9.1	320	0.0125	0.092	1.17	0.871	0.038	0.163	0.187
28.5	5	254.04	26.590	12.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.806	0.048	0.188	0.233
28.5	5	236.52	24.756	15.3	450	0.0125	0.092	1.17	0.750	0.053	0.196	0.262
28.5	5	225.18	23.569	18.4	490	0.0125	0.092	1.17	0.714	0.058	0.203	0.284
28.5	5	194.82	20.391	21.5	535	0.0125	0.092	1.17	0.618	0.063	0.191	0.309
28.5	5	155.68	16.295	24.6	550	0.0125	0.092	1.17	0.494	0.064	0.156	0.316
28.5	5	121.12	12.677	27.7	570	0.0125	0.092	1.17	0.384	0.066	0.125	0.326
28.5	5	91.3	9.556	30.8	595	0.0125	0.092	1.17	0.290	0.069	0.098	0.339
28.5	5	76.06	7.961	33.9	610	0.0125	0.092	1.17	0.241	0.071	0.084	0.347
28.5	5	58.3	6.102	37	650	0.0125	0.092	1.17	0.185	0.075	0.068	0.369
28.5	5	0	0.000	40.1	690	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.080	0.000	0.000

Tabel C. 7 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,7 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	404.66	42.354	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.283	0.000	0.000	0.000
28.5	5	297.62	31.151	6	250	0.0125	0.092	1.17	0.944	0.030	0.139	0.147
28.5	5	291.66	30.527	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	0.925	0.032	0.145	0.157
28.5	5	286.5	29.987	12.2	290	0.0125	0.092	1.17	0.909	0.034	0.152	0.167
28.5	5	277.04	28.997	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	0.879	0.037	0.161	0.183
28.5	5	270.84	28.348	18.4	350	0.0125	0.092	1.17	0.859	0.041	0.171	0.199
28.5	5	266.84	27.929	21.5	375	0.0125	0.092	1.17	0.846	0.043	0.180	0.213
28.5	5	263.32	27.561	24.6	400	0.0125	0.092	1.17	0.835	0.046	0.189	0.226
28.5	5	257.7	26.973	27.7	430	0.0125	0.092	1.17	0.817	0.049	0.198	0.242
28.5	5	256.12	26.807	30.8	440	0.0125	0.092	1.17	0.812	0.050	0.200	0.246
28.5	5	248.14	25.972	33.9	450	0.0125	0.092	1.17	0.787	0.051	0.197	0.250
28.5	5	233.88	24.479	37	470	0.0125	0.092	1.17	0.742	0.053	0.193	0.260
28.5	5	222.74	23.313	40.1	480	0.0125	0.092	1.17	0.706	0.054	0.187	0.265
28.5	5	212.28	22.219	43.2	490	0.0125	0.092	1.17	0.673	0.055	0.181	0.269
28.5	5	193.24	20.226	46.3	510	0.0125	0.092	1.17	0.613	0.057	0.171	0.279
28.5	5	182.54	19.106	55.6	530	0.0125	0.092	1.17	0.579	0.058	0.165	0.285
28.5	5	169.5	17.741	71.1	560	0.0125	0.092	1.17	0.538	0.060	0.158	0.294
28.5	5	105.84	11.078	86.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.336	0.063	0.104	0.309
28.5	5	84.08	8.800	102.1	660	0.0125	0.092	1.17	0.267	0.068	0.089	0.336
28.5	5	0	0.000	133.1	720	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.072	0.000	0.000

Tabel C. 8 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,8 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	439.84	46.037	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.395	0.000	0.000	0.000
28.5	5	341.7	35.765	6	200	0.0125	0.092	1.17	1.084	0.024	0.126	0.117
28.5	5	321.32	33.631	9.1	250	0.0125	0.092	1.17	1.019	0.030	0.148	0.145
28.5	5	300.32	31.433	12.2	300	0.0125	0.092	1.17	0.952	0.035	0.165	0.173
28.5	5	294.3	30.803	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	0.933	0.037	0.171	0.183
28.5	5	286.8	30.018	18.4	345	0.0125	0.092	1.17	0.910	0.040	0.179	0.196
28.5	5	273.8	28.658	21.5	375	0.0125	0.092	1.17	0.868	0.043	0.185	0.213
28.5	5	262.12	27.435	24.6	405	0.0125	0.092	1.17	0.831	0.047	0.190	0.229
28.5	5	252.76	26.456	27.7	415	0.0125	0.092	1.17	0.802	0.047	0.187	0.233
28.5	5	244.48	25.589	30.8	420	0.0125	0.092	1.17	0.775	0.048	0.182	0.234
28.5	5	240.26	25.147	33.9	425	0.0125	0.092	1.17	0.762	0.048	0.179	0.235
28.5	5	215.28	22.533	43.2	450	0.0125	0.092	1.17	0.683	0.050	0.167	0.245
28.5	5	184.54	19.315	58.7	480	0.0125	0.092	1.17	0.585	0.052	0.148	0.253
28.5	5	153.38	16.054	89.7	540	0.0125	0.092	1.17	0.486	0.055	0.132	0.271
28.5	5	92.58	9.690	120.7	610	0.0125	0.092	1.17	0.294	0.060	0.086	0.294
28.5	5	64.78	6.780	151.7	700	0.0125	0.092	1.17	0.205	0.067	0.068	0.330
28.5	5	0	0.000	182.7	790	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.074	0.000	0.000

Tabel C. 9 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,9 pada rasio jarak S/D = 2,0 pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	413.82	43.313	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.312	0.000	0.000	0.000
28.5	5	299.34	31.331	6	260	0.0125	0.092	1.17	0.949	0.031	0.145	0.153
28.5	5	285.54	29.887	9.1	300	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.036	0.158	0.175
28.5	5	274.1	28.689	12.2	330	0.0125	0.092	1.17	0.869	0.039	0.166	0.191
28.5	5	266.46	27.889	15.3	350	0.0125	0.092	1.17	0.845	0.041	0.170	0.201
28.5	5	242.44	25.375	18.4	400	0.0125	0.092	1.17	0.769	0.047	0.177	0.230
28.5	5	216.98	22.711	21.5	430	0.0125	0.092	1.17	0.688	0.050	0.169	0.246
28.5	5	197.44	20.665	30.8	450	0.0125	0.092	1.17	0.626	0.051	0.158	0.252
28.5	5	156.2	16.349	46.3	480	0.0125	0.092	1.17	0.495	0.053	0.129	0.261
28.5	5	77.38	8.099	77.3	570	0.0125	0.092	1.17	0.245	0.060	0.073	0.296
28.5	5	45.76	4.790	108.3	650	0.0125	0.092	1.17	0.145	0.066	0.047	0.326
28.5	5	0	0.000	139.3	730	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.072	0.000	0.000

Tabel C. 10 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 1,0 pada rasio jarak S/D = 2,0 pada bilangan *Reynolds* 97.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	393.36	41.172	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.248	0.000	0.000	0.000
28.5	5	336.2	35.189	6	140	0.0125	0.092	1.17	1.066	0.016	0.086	0.081
28.5	5	321.82	33.684	9.1	200	0.0125	0.092	1.17	1.021	0.023	0.117	0.115
28.5	5	311.58	32.612	12.2	240	0.0125	0.092	1.17	0.988	0.028	0.135	0.137
28.5	5	301.54	31.561	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	0.956	0.031	0.147	0.153
28.5	5	285.46	29.878	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	0.905	0.035	0.153	0.169
28.5	5	260.04	27.218	21.5	350	0.0125	0.092	1.17	0.825	0.040	0.163	0.198
28.5	5	239.82	25.101	24.6	390	0.0125	0.092	1.17	0.761	0.045	0.167	0.220
28.5	5	230.94	24.172	27.7	410	0.0125	0.092	1.17	0.732	0.047	0.168	0.230
28.5	5	212.82	22.275	30.8	440	0.0125	0.092	1.17	0.675	0.050	0.166	0.246
28.5	5	195.06	20.416	33.9	470	0.0125	0.092	1.17	0.619	0.053	0.162	0.262
28.5	5	179.8	18.819	37	480	0.0125	0.092	1.17	0.570	0.054	0.152	0.266
28.5	5	119.4	12.497	52.5	520	0.0125	0.092	1.17	0.379	0.057	0.106	0.281
28.5	5	95.12	9.956	68	550	0.0125	0.092	1.17	0.302	0.059	0.087	0.290
28.5	5	65	6.803	83.5	590	0.0125	0.092	1.17	0.206	0.062	0.063	0.305
28.5	5	45.94	4.808	99	620	0.0125	0.092	1.17	0.146	0.064	0.046	0.313
28.5	5	30.88	3.232	130	660	0.0125	0.092	1.17	0.098	0.065	0.031	0.319
28.5	5	0	0.000	161	700	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.066	0.000	0.000

Tabel C. 11 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,1 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	570.38	59.700	3.1	0	0.0125	0.092	1.17	1.292	0.00038	0.00123	0.00095
28.5	7	463.02	48.463	6.2	210	0.0125	0.092	1.17	1.049	0.02499	0.06561	0.06255
28.5	7	451.36	47.242	9.3	250	0.0125	0.092	1.17	1.022	0.02952	0.07554	0.07388
28.5	7	434.38	45.465	12.4	290	0.0125	0.092	1.17	0.984	0.03404	0.08384	0.0852
28.5	7	416.52	43.596	15.5	330	0.0125	0.092	1.17	0.944	0.03857	0.09108	0.09653
28.5	7	400.54	41.923	18.6	370	0.0125	0.092	1.17	0.907	0.04309	0.09786	0.10785
28.5	7	364.6	38.161	21.7	450	0.0125	0.092	1.17	0.826	0.05252	0.10857	0.13145
28.5	7	329.06	34.442	24.8	540	0.0125	0.092	1.17	0.745	0.06318	0.11787	0.15813
28.5	7	285.56	29.889	27.9	575	0.0125	0.092	1.17	0.647	0.06709	0.10862	0.16792
28.5	7	259.62	27.174	31	590	0.0125	0.092	1.17	0.588	0.06855	0.1009	0.17157
28.5	7	235.26	24.624	40.3	620	0.0125	0.092	1.17	0.533	0.07109	0.09482	0.17792
28.5	7	210.9	22.074	49.6	640	0.0125	0.092	1.17	0.478	0.0724	0.08657	0.18121
28.5	7	183.82	19.240	65.1	675	0.0125	0.092	1.17	0.416	0.07479	0.07795	0.18719
28.5	7	165.52	17.324	96.1	720	0.0125	0.092	1.17	0.375	0.07651	0.0718	0.19149
28.5	7	115.08	12.045	127.1	810	0.0125	0.092	1.17	0.261	0.08374	0.05464	0.2096
28.5	7	60.54	6.337	158.1	900	0.0125	0.092	1.17	0.137	0.09098	0.03123	0.2277
28.5	7	38.58	4.038	189.1	990	0.0125	0.092	1.17	0.087	0.09821	0.02148	0.24581
28.5	7	0	0.000	220.1	1080	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10545	0	0

Tabel C. 12 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,2 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	554.66	58.054	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.256	0	0	0
28.5	7	444.5	46.524	6	275	0.0125	0.092	1.17	1.007	0.033	0.08313	0.08256
28.5	7	420.82	44.046	9.1	330	0.0125	0.092	1.17	0.953	0.039	0.09389	0.09849
28.5	7	398.92	41.754	12.2	380	0.0125	0.092	1.17	0.904	0.045	0.10201	0.11289
28.5	7	383.08	40.096	15.3	415	0.0125	0.092	1.17	0.868	0.049	0.10646	0.12268
28.5	7	355.4	37.199	18.4	470	0.0125	0.092	1.17	0.805	0.055	0.11159	0.13861
28.5	7	284.52	29.780	21.5	630	0.0125	0.092	1.17	0.645	0.075	0.12037	0.18676
28.5	7	249.14	26.077	24.6	650	0.0125	0.092	1.17	0.564	0.077	0.10833	0.19195
28.5	7	181.72	19.020	33.9	720	0.0125	0.092	1.17	0.412	0.084	0.08668	0.21058
28.5	7	122.46	12.817	49.4	760	0.0125	0.092	1.17	0.277	0.087	0.0605	0.2181
28.5	7	101.22	10.594	80.4	810	0.0125	0.092	1.17	0.229	0.089	0.05135	0.22393
28.5	7	30.6	3.203	111.4	950	0.0125	0.092	1.17	0.069	0.103	0.01784	0.25738
28.5	7	0	0.000	142.4	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.117	0	0

Tabel C. 13 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,3 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	519.32	54.355	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.176	0	0	0
28.5	7	418.8	43.834	6	300	0.0125	0.092	1.17	0.949	0.03605	0.08561	0.09023
28.5	7	401.56	42.030	9.1	360	0.0125	0.092	1.17	0.910	0.04303	0.09797	0.1077
28.5	7	380.8	39.857	12.2	430	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.05123	0.11062	0.12823
28.5	7	354.1	37.062	15.3	505	0.0125	0.092	1.17	0.802	0.06005	0.12056	0.1503
28.5	7	335.6	35.126	18.4	560	0.0125	0.092	1.17	0.760	0.06641	0.12637	0.16623
28.5	7	324.76	33.992	21.5	595	0.0125	0.092	1.17	0.736	0.07033	0.12949	0.17602
28.5	7	293.14	30.682	24.6	640	0.0125	0.092	1.17	0.664	0.07546	0.12542	0.18888
28.5	7	244.1	25.549	27.7	690	0.0125	0.092	1.17	0.553	0.08121	0.1124	0.20327
28.5	7	215.34	22.539	37	730	0.0125	0.092	1.17	0.488	0.08498	0.10375	0.2127
28.5	7	159.8	16.726	52.5	780	0.0125	0.092	1.17	0.362	0.08921	0.08083	0.22329
28.5	7	96.24	10.073	83.5	830	0.0125	0.092	1.17	0.218	0.09154	0.04995	0.22912
28.5	7	32.6	3.412	114.5	980	0.0125	0.092	1.17	0.074	0.10613	0.01962	0.26564
28.5	7	0	0.000	145.5	1130	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.12072	0	0

Tabel C. 14 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,4 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	545.04	57.048	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.235	0	0	0
28.5	7	452.2	47.330	6	270	0.0125	0.092	1.17	1.024	0.03237	0.083	0.08103
28.5	7	441.68	46.229	9.1	310	0.0125	0.092	1.17	1.001	0.0369	0.0924	0.09235
28.5	7	434.2	45.446	12.2	340	0.0125	0.092	1.17	0.984	0.0402	0.09896	0.10061
28.5	7	428.66	44.866	15.3	360	0.0125	0.092	1.17	0.971	0.04227	0.10273	0.1058
28.5	7	420.1	43.970	18.4	390	0.0125	0.092	1.17	0.952	0.04557	0.10854	0.11405
28.5	7	409.8	42.892	21.5	425	0.0125	0.092	1.17	0.928	0.04948	0.11496	0.12384
28.5	7	406.48	42.545	24.6	440	0.0125	0.092	1.17	0.921	0.05094	0.1174	0.12749
28.5	7	402.06	42.082	27.7	460	0.0125	0.092	1.17	0.911	0.05301	0.12084	0.13268
28.5	7	395.4	41.385	30.8	480	0.0125	0.092	1.17	0.896	0.05508	0.12349	0.13787
28.5	7	393.54	41.191	33.9	490	0.0125	0.092	1.17	0.891	0.05593	0.1248	0.13999
28.5	7	389.32	40.749	37	510	0.0125	0.092	1.17	0.882	0.058	0.12803	0.14517
28.5	7	383.92	40.184	40.1	530	0.0125	0.092	1.17	0.870	0.06007	0.13077	0.15036
28.5	7	381.08	39.886	43.2	545	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.06153	0.13295	0.15401
28.5	7	374.98	39.248	46.3	570	0.0125	0.092	1.17	0.849	0.06422	0.13653	0.16073
28.5	7	371.16	38.848	49.4	580	0.0125	0.092	1.17	0.841	0.06506	0.13692	0.16285
28.5	7	369.88	38.714	52.5	590	0.0125	0.092	1.17	0.838	0.06591	0.13823	0.16497
28.5	7	365.82	38.289	55.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.829	0.06676	0.13846	0.16709
28.5	7	359.5	37.628	58.7	615	0.0125	0.092	1.17	0.814	0.06822	0.13905	0.17074
28.5	7	355.26	37.184	61.8	620	0.0125	0.092	1.17	0.805	0.06845	0.13788	0.17132
28.5	7	352.7	36.916	64.9	625	0.0125	0.092	1.17	0.799	0.06868	0.13735	0.17191
28.5	7	344.14	36.020	68	630	0.0125	0.092	1.17	0.780	0.06892	0.13447	0.17249
28.5	7	333.24	34.879	71.1	640	0.0125	0.092	1.17	0.755	0.06976	0.13181	0.17461
28.5	7	314.1	32.876	80.4	660	0.0125	0.092	1.17	0.712	0.07107	0.12657	0.17789
28.5	7	291.22	30.481	89.7	690	0.0125	0.092	1.17	0.660	0.07361	0.12155	0.18424
28.5	7	141.02	14.760	99	840	0.0125	0.092	1.17	0.319	0.09087	0.07265	0.22743
28.5	7	99.54	10.419	108.3	925	0.0125	0.092	1.17	0.225	0.10015	0.05652	0.25066
28.5	7	71.22	7.454	117.6	1005	0.0125	0.092	1.17	0.161	0.10882	0.04394	0.27236
28.5	7	43.98	4.603	126.9	1055	0.0125	0.092	1.17	0.100	0.11381	0.02838	0.28485
28.5	7	28.12	2.943	157.9	1100	0.0125	0.092	1.17	0.064	0.11553	0.01842	0.28915
28.5	7	0	0.000	188.9	1160	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11908	0	0

Tabel C. 15 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,5 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	562.68	58.894	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.275	0	0	0
28.5	7	471.34	49.334	6	320	0.0125	0.092	1.17	1.068	0.0385	0.1029	0.09637
28.5	7	464.72	48.641	9.1	340	0.0125	0.092	1.17	1.053	0.04058	0.10691	0.10156
28.5	7	459.26	48.069	12.2	360	0.0125	0.092	1.17	1.040	0.04265	0.11105	0.10675
28.5	7	456.08	47.736	15.3	375	0.0125	0.092	1.17	1.033	0.04411	0.11406	0.1104
28.5	7	447.68	46.857	18.4	400	0.0125	0.092	1.17	1.014	0.04679	0.11878	0.11712
28.5	7	441.02	46.160	21.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.999	0.04887	0.12219	0.12231
28.5	7	429.9	44.996	24.6	450	0.0125	0.092	1.17	0.974	0.05216	0.12715	0.13056
28.5	7	416.04	43.546	27.7	485	0.0125	0.092	1.17	0.942	0.05608	0.13228	0.14035
28.5	7	407.52	42.654	30.8	510	0.0125	0.092	1.17	0.923	0.05876	0.13577	0.14708
28.5	7	396.12	41.461	33.9	535	0.0125	0.092	1.17	0.897	0.06145	0.13801	0.1538
28.5	7	380.46	39.821	37	550	0.0125	0.092	1.17	0.862	0.06291	0.1357	0.15745
28.5	7	373	39.041	40.1	560	0.0125	0.092	1.17	0.845	0.06375	0.13483	0.15957
28.5	7	367.82	38.498	43.2	565	0.0125	0.092	1.17	0.833	0.06399	0.13344	0.16015
28.5	7	358.22	37.494	46.3	580	0.0125	0.092	1.17	0.811	0.06544	0.13292	0.1638
28.5	7	341.82	35.777	55.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.774	0.06676	0.12938	0.16709
28.5	7	322.14	33.717	64.9	615	0.0125	0.092	1.17	0.730	0.06746	0.12321	0.16884
28.5	7	298.04	31.195	80.4	640	0.0125	0.092	1.17	0.675	0.06862	0.11596	0.17175
28.5	7	284.36	29.763	95.9	655	0.0125	0.092	1.17	0.644	0.06856	0.11054	0.1716
28.5	7	270.68	28.331	111.4	680	0.0125	0.092	1.17	0.613	0.06972	0.10701	0.17452
28.5	7	233.34	24.423	142.4	730	0.0125	0.092	1.17	0.529	0.07205	0.09533	0.18035
28.5	7	173.94	18.206	173.4	810	0.0125	0.092	1.17	0.394	0.07806	0.07699	0.19539
28.5	7	99.22	10.385	204.4	950	0.0125	0.092	1.17	0.225	0.09143	0.05143	0.22884
28.5	7	49.14	5.143	235.4	1075	0.0125	0.092	1.17	0.111	0.10296	0.02869	0.25769
28.5	7	25.54	2.673	266.4	1165	0.0125	0.092	1.17	0.058	0.11019	0.01596	0.2758
28.5	7	0	0.000	297.4	1255	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11743	0	0

Tabel C. 16 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,6 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	560.7	58.687	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.270	0	0	0
28.5	7	456.96	47.828	6	240	0.0125	0.092	1.17	1.035	0.02869	0.07434	0.07182
28.5	7	447.04	46.790	9.1	270	0.0125	0.092	1.17	1.013	0.03199	0.08109	0.08008
28.5	7	439.16	45.965	12.2	290	0.0125	0.092	1.17	0.995	0.03407	0.08482	0.08526
28.5	7	425.06	44.490	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.03736	0.09005	0.09352
28.5	7	409.34	42.844	18.4	360	0.0125	0.092	1.17	0.927	0.04189	0.09722	0.10484
28.5	7	403.62	42.246	21.5	380	0.0125	0.092	1.17	0.914	0.04396	0.1006	0.11003
28.5	7	391.7	40.998	24.6	410	0.0125	0.092	1.17	0.887	0.04726	0.10496	0.11829
28.5	7	378.02	39.566	27.7	450	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.05178	0.11099	0.12961
28.5	7	368.26	38.545	30.8	480	0.0125	0.092	1.17	0.834	0.05508	0.11501	0.13787
28.5	7	354.68	37.123	33.9	520	0.0125	0.092	1.17	0.803	0.05961	0.11987	0.14919
28.5	7	339.88	35.574	37	560	0.0125	0.092	1.17	0.770	0.06413	0.12359	0.16052
28.5	7	327.48	34.276	40.1	600	0.0125	0.092	1.17	0.742	0.06866	0.12748	0.17185
28.5	7	321.54	33.655	43.2	620	0.0125	0.092	1.17	0.728	0.07073	0.12895	0.17703
28.5	7	301.62	31.570	46.3	680	0.0125	0.092	1.17	0.683	0.07771	0.13289	0.1945
28.5	7	292.86	30.653	49.4	705	0.0125	0.092	1.17	0.663	0.08039	0.13349	0.20122
28.5	7	287.8	30.123	52.5	715	0.0125	0.092	1.17	0.652	0.08124	0.13256	0.20334
28.5	7	279.14	29.217	55.6	730	0.0125	0.092	1.17	0.632	0.0827	0.13088	0.20699
28.5	7	263.24	27.552	64.9	750	0.0125	0.092	1.17	0.596	0.08401	0.12539	0.21027
28.5	7	180.04	18.844	80.4	780	0.0125	0.092	1.17	0.408	0.08579	0.08757	0.21472
28.5	7	99	10.362	111.4	900	0.0125	0.092	1.17	0.224	0.0967	0.05428	0.24204
28.5	7	36.62	3.833	142.4	1020	0.0125	0.092	1.17	0.083	0.10762	0.02234	0.26935
28.5	7	0	0.000	173.4	1140	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11853	0	0

Tabel C. 17 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,7 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	569.22	59.578	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.289	0	0	0
28.5	7	509.94	53.374	6	220	0.0125	0.092	1.17	1.155	0.02624	0.07587	0.06568
28.5	7	496.54	51.971	9.1	260	0.0125	0.092	1.17	1.125	0.03077	0.08662	0.07701
28.5	7	483.42	50.598	12.2	290	0.0125	0.092	1.17	1.095	0.03407	0.09337	0.08526
28.5	7	470.3	49.225	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	1.065	0.03736	0.09963	0.09352
28.5	7	465.84	48.758	18.4	330	0.0125	0.092	1.17	1.055	0.03821	0.10092	0.09564
28.5	7	446.9	46.776	21.5	375	0.0125	0.092	1.17	1.012	0.04335	0.10984	0.1085
28.5	7	431.82	45.197	24.6	410	0.0125	0.092	1.17	0.978	0.04726	0.11571	0.11829
28.5	7	423.04	44.278	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.05056	0.12127	0.12654
28.5	7	415.14	43.451	30.8	465	0.0125	0.092	1.17	0.940	0.05324	0.12532	0.13327
28.5	7	398.16	41.674	33.9	500	0.0125	0.092	1.17	0.902	0.05716	0.12903	0.14306
28.5	7	381.74	39.955	37	530	0.0125	0.092	1.17	0.865	0.06045	0.13085	0.15131
28.5	7	373.96	39.141	40.1	540	0.0125	0.092	1.17	0.847	0.0613	0.12997	0.15343
28.5	7	360.46	37.728	43.2	550	0.0125	0.092	1.17	0.817	0.06215	0.12701	0.15555
28.5	7	341.28	35.721	46.3	560	0.0125	0.092	1.17	0.773	0.06299	0.12189	0.15767
28.5	7	289	30.249	55.6	610	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.06798	0.1114	0.17016
28.5	7	254.18	26.604	71.1	660	0.0125	0.092	1.17	0.576	0.07221	0.10407	0.18075
28.5	7	203.26	21.275	86.6	720	0.0125	0.092	1.17	0.460	0.07767	0.08951	0.1944
28.5	7	143.84	15.055	102.1	780	0.0125	0.092	1.17	0.326	0.08313	0.06779	0.20806
28.5	7	102.18	10.695	117.6	850	0.0125	0.092	1.17	0.231	0.08981	0.05203	0.22479
28.5	7	82.4	8.625	148.6	920	0.0125	0.092	1.17	0.187	0.09459	0.04419	0.23676
28.5	7	46.64	4.882	179.6	990	0.0125	0.092	1.17	0.106	0.09938	0.02628	0.24873
28.5	7	0	0.000	210.6	1140	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11397	0	0

Tabel C. 18 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,8 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	530.54	55.530	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.202	0	0	0
28.5	7	435.2	45.551	6	310	0.0125	0.092	1.17	0.986	0.03728	0.09198	0.0933
28.5	7	425.24	44.508	9.1	340	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.04058	0.09783	0.10156
28.5	7	417.14	43.661	12.2	370	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.04388	0.10377	0.10982
28.5	7	410.22	42.936	15.3	390	0.0125	0.092	1.17	0.929	0.04595	0.10687	0.115
28.5	7	400.38	41.906	18.4	420	0.0125	0.092	1.17	0.907	0.04925	0.11179	0.12326
28.5	7	389.66	40.784	21.5	450	0.0125	0.092	1.17	0.883	0.05254	0.11609	0.13152
28.5	7	375.06	39.256	24.6	490	0.0125	0.092	1.17	0.850	0.05707	0.12136	0.14284
28.5	7	359.08	37.584	27.7	540	0.0125	0.092	1.17	0.813	0.06282	0.1279	0.15724
28.5	7	340.26	35.614	30.8	560	0.0125	0.092	1.17	0.771	0.06489	0.12519	0.16242
28.5	7	315.06	32.976	40.1	590	0.0125	0.092	1.17	0.714	0.06743	0.12046	0.16878
28.5	7	280.34	29.342	55.6	620	0.0125	0.092	1.17	0.635	0.06921	0.11001	0.17323
28.5	7	200.16	20.950	86.6	710	0.0125	0.092	1.17	0.453	0.07644	0.08675	0.19133
28.5	7	150.5	15.752	117.6	800	0.0125	0.092	1.17	0.341	0.08368	0.0714	0.20944
28.5	7	100.12	10.479	148.6	910	0.0125	0.092	1.17	0.227	0.09337	0.053	0.23369
28.5	7	69.54	7.279	179.6	1010	0.0125	0.092	1.17	0.158	0.10183	0.04015	0.25487
28.5	7	0	0.000	210.6	1170	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11765	0	0

Tabel C. 19 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 0,9 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	559.2	58.530	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.267	0	0	0
28.5	7	482.1	50.460	6	190	0.0125	0.092	1.17	1.092	0.02256	0.06167	0.05647
28.5	7	471.9	49.392	9.1	210	0.0125	0.092	1.17	1.069	0.02464	0.06591	0.06166
28.5	7	464.2	48.586	12.2	235	0.0125	0.092	1.17	1.052	0.02732	0.07191	0.06838
28.5	7	449.7	47.069	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	1.019	0.03123	0.07963	0.07817
28.5	7	438.28	45.873	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	0.993	0.03453	0.08581	0.08643
28.5	7	429.92	44.998	21.5	320	0.0125	0.092	1.17	0.974	0.0366	0.08922	0.09162
28.5	7	421.22	44.088	24.6	340	0.0125	0.092	1.17	0.954	0.03868	0.09237	0.0968
28.5	7	415.2	43.458	27.7	360	0.0125	0.092	1.17	0.941	0.04075	0.09593	0.10199
28.5	7	408.26	42.731	30.8	390	0.0125	0.092	1.17	0.925	0.04405	0.10196	0.11025
28.5	7	400.12	41.879	33.9	410	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.04612	0.10463	0.11543
28.5	7	390.02	40.822	37	440	0.0125	0.092	1.17	0.884	0.04942	0.10928	0.12369
28.5	7	378	39.564	40.1	470	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.05272	0.11298	0.13195
28.5	7	365.02	38.205	43.2	500	0.0125	0.092	1.17	0.827	0.05602	0.11593	0.1402
28.5	7	353.1	36.958	46.3	530	0.0125	0.092	1.17	0.800	0.05931	0.11875	0.14846
28.5	7	335.2	35.084	49.4	570	0.0125	0.092	1.17	0.759	0.06384	0.12133	0.15978
28.5	7	290.06	30.360	52.5	610	0.0125	0.092	1.17	0.657	0.06836	0.11243	0.17111
28.5	7	240.02	25.122	61.8	650	0.0125	0.092	1.17	0.544	0.07213	0.09816	0.18053
28.5	7	170.34	17.829	77.3	705	0.0125	0.092	1.17	0.386	0.07697	0.07434	0.19265
28.5	7	123.22	12.897	108.3	815	0.0125	0.092	1.17	0.279	0.08666	0.06054	0.2169
28.5	7	55.32	5.790	139.3	955	0.0125	0.092	1.17	0.125	0.10003	0.03137	0.25036
28.5	7	0	0.000	170.3	1095	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11339	0	0

Tabel C. 20 Data *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu rasio diameter d/D 1,0 pada rasio jarak $S/D = 2,0$ pada bilangan *Reynolds* 136.000

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	570.28	59.689	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.292	0	0	0
28.5	7	492.74	51.573	6	190	0.0125	0.092	1.17	1.116	0.02256	0.06304	0.05647
28.5	7	451.5	47.257	9.1	290	0.0125	0.092	1.17	1.023	0.03445	0.08818	0.08621
28.5	7	445.32	46.610	12.2	310	0.0125	0.092	1.17	1.009	0.03652	0.0922	0.0914
28.5	7	426.92	44.684	15.3	350	0.0125	0.092	1.17	0.967	0.04104	0.09935	0.10273
28.5	7	417.06	43.652	18.4	370	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.04311	0.10195	0.10791
28.5	7	396.32	41.481	21.5	410	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.04764	0.10705	0.11924
28.5	7	388.58	40.671	24.6	430	0.0125	0.092	1.17	0.880	0.04971	0.10953	0.12443
28.5	7	378.72	39.639	27.7	450	0.0125	0.092	1.17	0.858	0.05178	0.1112	0.12961
28.5	7	369.3	38.653	30.8	470	0.0125	0.092	1.17	0.837	0.05386	0.11277	0.1348
28.5	7	364.28	38.128	33.9	485	0.0125	0.092	1.17	0.825	0.05532	0.11425	0.13845
28.5	7	355.78	37.238	37	500	0.0125	0.092	1.17	0.806	0.05678	0.11453	0.1421
28.5	7	330.22	34.563	40.1	515	0.0125	0.092	1.17	0.748	0.05823	0.10903	0.14576
28.5	7	312.9	32.750	43.2	525	0.0125	0.092	1.17	0.709	0.05908	0.10481	0.14787
28.5	7	289.22	30.272	46.3	540	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.06054	0.09928	0.15153
28.5	7	271.1	28.375	49.4	550	0.0125	0.092	1.17	0.614	0.06139	0.09436	0.15364
28.5	7	235.4	24.639	58.7	590	0.0125	0.092	1.17	0.533	0.06515	0.08696	0.16307
28.5	7	194.42	20.349	68	630	0.0125	0.092	1.17	0.440	0.06892	0.07597	0.17249
28.5	7	153.58	16.075	83.5	670	0.0125	0.092	1.17	0.348	0.07192	0.06263	0.18001
28.5	7	116.56	12.200	114.5	750	0.0125	0.092	1.17	0.264	0.07793	0.0515	0.19505
28.5	7	83.875	8.779	145.5	820	0.0125	0.092	1.17	0.190	0.08271	0.03933	0.20702
28.5	7	57.28	5.995	176.5	900	0.0125	0.092	1.17	0.130	0.08872	0.02881	0.22206
28.5	7	29.84	3.123	207.5	990	0.0125	0.092	1.17	0.068	0.09595	0.01623	0.24017
28.5	7	0	0.000	238.5	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10564	0	0

Tabel C. 21 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 2,0$ serta bilangan *Reynolds* 97.000 dan 136000.

Sudut (θ)	Ts (N.cm)	
	Re = 97.000	Re = 136000
	d/D 0,5	d/D 0,4
0	1.28	2.72
10	2.72	3.66
20	3.36	4.64
30	4.58	5.86
40	4.02	5.12
50	3.42	4.66
60	3.08	4.06
70	2.86	3.7
80	2.62	3.1
90	2.24	2.84
100	1.78	2.52
110	1.36	2.26
120	0.78	1.92
130	0.4	1.62
140	1	0.72
150	1.88	0.24
160	2.46	0.52
170	2.58	1.1
180	3.42	2.18

D. UNCERTAINTY• *Uncertainty A* (u_A):

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

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

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

$$= u_L$$

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

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

$$= u_H$$

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

$$u_A = \pm \{[1,62 \times 10^{-3}]^2 + [1,68 \times 10^{-3}]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

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

$$u_A = \pm 0,0023\%$$

• *Uncertainty ρ* (u_ρ):

$$\rho \times T = C$$

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

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

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

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

$$= -u_T$$

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

$$u_\rho = \pm u_T$$

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

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

• **Uncertainty Re (u_{Re}):**

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

$$\mu = b T^{\frac{3}{2}} (S+T)^{-1}$$

$$d\mu = \frac{\partial \mu}{T} + \frac{\partial \mu}{(S+T)}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = \left(\frac{3}{2} T\right)^{0.5} \times b \times (S+T)^{-1}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial (S+T)} = -(S+T)^{-2} \times b \times T^{\frac{3}{2}}$$

$$\triangleright U_{\mu,T} = \frac{\partial_{\mu,T}}{\mu} = \frac{T \partial \mu}{\mu \partial T} U_T = \frac{T}{\mu} \left[\frac{3}{2} T^{0.5} b (S+T)^{-1} \right] U_T = \frac{\frac{3}{2} T^{\frac{3}{2}} b (S+T)^{-1}}{\mu} U_T = \frac{3}{2} U_T$$

$$\triangleright U_{\mu,(S+T)} = \frac{(S+T)}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial (S+T)} U_{(S+T)} = \frac{(S+T)}{\mu} \left[-(S+T)^{-2} b T^{\frac{3}{2}} \right] U_{(S+T)} = \frac{-(S+T)^{-1} b T^{\frac{3}{2}}}{\mu} U_{(S+T)} = -U_{(S+T)}$$

$$U_{\mu} = \pm \left[\left(\frac{3}{2} U_T \right)^2 + \left(-U_{(S+T)} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$U_{\mu} = \pm \left[\left(\frac{3}{2} 3.509 \times 10^{-3} \right)^2 + \left(7.46 \times 10^{-4} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$U_{\mu} = \pm 5.316 \times 10^{-3}$$

$$Re = Re(\rho, V, L, \mu) = \frac{\rho V L}{\mu}$$

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

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

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

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

$$\checkmark \frac{\partial Re}{\partial \mu} = -\frac{\rho V L}{\mu^2}$$

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

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

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

$$u_{Re,\mu} = \frac{\delta_{Re,\mu}}{Re} = \frac{\mu}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \mu} u_{\mu}$$

$$= \mu \frac{\mu}{\rho V L} \left(-\frac{\rho V L}{\mu^2} \right) u_{\mu} = -u_{\mu}$$

$$u_{Re} = [(u_\rho)^2 + (u_\nu)^2 + (u_L)^2 + (-u_\mu)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = [u_\rho^2 + u_\nu^2 + u_L^2 + u_\mu^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 0,00491$$

$$u_{Re} = \pm 0,49\%$$

• **Uncertainty $T_d(u_{T_d})$:**

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{T_d} = \pm \left\{ [0,0216]^2 + [4 \times 10^{-2}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{T_d} = \pm 0,0454$$

$$u_{T_d} = \pm 4,55\%$$

• **Uncertainty Tip Speed Ratio (u_λ):**

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

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

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

$$\checkmark \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = R V^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial \lambda}{\partial R} = \omega V^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial \lambda}{\partial V} = -V^{-2} R \omega$$

$$\begin{aligned} u_{\lambda, \omega} &= \frac{\delta \lambda, \omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} u_\omega \\ &= \frac{\omega}{\omega R V^{-1}} \cdot (R V^{-1}) \cdot u_\omega \\ &= u_\omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{\lambda, R} &= \frac{\delta \lambda, R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R} u_R \\ &= \frac{R}{\omega R V^{-1}} \cdot (\omega V^{-1}) \cdot u_R \\ &= u_R \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{\lambda, V} &= \frac{\delta \lambda, V}{\lambda} = \frac{V}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial V} u_V \\ &= \frac{V}{\omega R V^{-1}} \cdot (-V^{-2} R \omega) \cdot u_V \\ &= u_V \end{aligned}$$

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

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

$$u_\lambda = \pm \{ 0.0004^2 + [3.2 \times 10^{-3}]^2 + 0.002^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 3.8 \times 10^{-3}$$

$$u_\lambda = \pm 0.38\%$$

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

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

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

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

$$\begin{aligned} dCoP &= \frac{\partial CoP}{\partial T_d} + \frac{\partial CoP}{\partial \omega} + \frac{\partial CoP}{\partial \rho} + \frac{\partial CoP}{\partial A} \\ &\quad + \frac{\partial CoP}{\partial V} \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{CoP} = \pm \left\{ [u_{T_d}]^2 + [u_\omega]^2 + [-u_\rho]^2 \right. \\ \left. + [-3u_V]^2 + [-u_A]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm \left\{ [0.045]^2 + [0.000413]^2 \right. \\ \left. + [-0.00351]^2 \right. \\ \left. + [(-3)0.002]^2 \right. \\ \left. + [-0.00233]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0.04606$$

$$u_{CoP} = \pm 4.61\%$$

• **Uncertainty Coefficient of Moment (u_{Cm}):**

$$Cm = \frac{CoP}{\lambda}$$

$$Cm = CoP x \lambda^{-1}$$

$$dCm = \frac{\partial Cm}{\partial CoP} + \frac{\partial Cm}{\partial \lambda}$$

$$\checkmark \frac{\partial Cm}{\partial CoP} = \lambda^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial Cm}{\partial \lambda} = CoP x - \lambda^{-2}$$

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

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

$$u_{Cm,CoP} = \frac{CoP}{CoP x \lambda^{-1}} (\lambda^{-1}) u_{CoP}$$

$$u_{Cm,CoP} = u_{CoP}$$

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

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

$$u_{Cm,\lambda} = \frac{\lambda}{CoP x \lambda^{-1}} (CoP x - \lambda^{-2}) u_\lambda$$

$$u_{Cm,\lambda} = -u_\lambda$$

$$u_{Cm} = \pm \left\{ [u_{CoP}]^2 + [-u_\lambda]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Cm} = \pm [u_{CoP}^2 + u_\lambda^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Cm} = \pm [0.046^2 + 0.00383^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Cm} = \pm 0.04622$$

$$u_{Cm} = \pm 4.62\%$$

BIODATA PENULIS



Muhammad Ghiyats Humam merupakan anak yang dilahirkan di Jakarta pada tanggal 15 Mei 1997 dari orang tua yang bernama Ahamad Suhanda dan Siti Masnah. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar Negeri 01 Gunung Jakarta Selatan, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 19 Jakarta dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 47 Jakarta. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015.

Semasa kuliah penulis aktif dalam seluruh kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis pernah aktif di unit kegiatan mahasiswa jurusan di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Penulis pernah menjadi staff divisi kewirausahaan LBMM pada periode 2016/2017 lalu diamanahkan menjadi Kepala Divisi Kewirausahaan pada tahun 2017/2018.

Selain itu, penulis juga memiliki ketertarikan pada dunia usaha dan musik. Di tahun 2019, penulis membuat brand Suweger yang bergerak di bidang *food and beverage industry*. Dalam menekuni hobbinya, penulis merupakan *bassist* dari anggota grup band Sunns, dimana seluruh personel grup band Sunns berkuliah di teknik mesin ITS.

Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis dapat melalui email :
mghiyatsh@gmail.com