



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

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

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

MUHAMMAD ARDY MAKARIM  
NRP 0211154000082

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

**“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu  
 $S/D = 2.6$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  
 $1.0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”**

Muhammad Ardy Makarim  
NRP. 0211154000082

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 SAVONIUS WIND TURBINE  
PERFORMANCE IMPROVEMENT WITH CIRCULAR  
CYLINDER PLACEMENT IN FRONT OF RETURNING  
BLADE**

**“Case Study of Circular Cylinder Configuration of  $S/D = 2.6$ ;  
 $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; at  $Re =$   
 $9,7 \times 10^4$  and  $13,6 \times 10^4$ ”**

Muhammad Ardy Makarim  
0211154000082

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 Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2.6$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; pada  $Re = 9.7 \times 10^4$  dan  $13.6 \times 10^4$ ”**

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh:

**Muhammad Ardy Makarim**

NRP. 02111540000082

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA..... (Pembimbing)  
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. SUTARDI, M.Eng, PhD..... (Penguji 1)  
NIP. 196412281990031002
3. Deddy Zulhidayat Noor, ST, MT..... (Penguji 2)  
NIP. 197512062005011002
4. Vivien Suphandani, ST, M.E, Ph.D..... (Penguji 3)  
NIP. 198105292003122001

**SURABAYA  
JANUARI, 2020**

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

“Studi Kasus Peletakkan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2.6$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”

**Nama Mahasiswa** : Muhammad Ardy Makarim  
**NRP** : 021 1 15 4000 0082  
**Departemen** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

**ABSTRAK**

Indonesia merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di Kawasan Asia Tenggara, yaitu sebesar 213.4 miliar kWh pertahun. Konsumsi energi final tersebut saat ini didominasi oleh batu bara, minyak, dan gas dengan persentase sebesar 70.48%. Berdasarkan Peraturan Pemerintah nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, Indonesia memiliki target untuk menggunakan bauran energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Salah satu sumber energi yang menjadi bagian dari target tersebut adalah sumber energi angin dengan potensi sebesar 978 MW. Salah satu metode pemanfaatan energi angin tersebut adalah dengan menggunakan turbin angin. Indonesia memiliki kecepatan angin sebesar 3-7 m/s, jenis turbin yang cocok untuk kondisi tersebut adalah tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

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

diameter sudu turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0 dan letak silinder pengganggu terhadap *returning blade* ( $S/D$ ) sebesar 2,6 serta variasi Reynolds Number sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Alat ukur yang digunakan adalah *anemometer*, *torque meter*, *tachometer*, dan *brake dynamometer*.

Hasil yang didapatkan dari penelitian adalah bahwa dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di depan *returning blade* di posisi  $S/D = 2,6$  paling efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan  $d/D = 0,6$  pada  $Re = 97 \times 10^4$ . Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya *Coefficient of power* maksimum sebesar 32,57%, dan meningkatnya *Coefficient of Moment* maksimum sebesar 14,25%, serta meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius di semua posisi sudu turbin dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

**Kata Kunci:** Turbin Angin Savonius, *coefficient of power*, *coefficient of moment*, silinder pengganggu

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

“Case Study of Circular Cylinder Configuration of  $S/D = 2.6$ ;  $y/D = 0.5$ ;  $d/D = 0.1; 0.2; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$  dan  $1.0$ ; at  $Re = 9,7 \times 10^4$  and  $13,6 \times 10^4$ ”

**Student's Name** : Muhammad Ardy Makarim  
**NRP** : 021 1 15 4000 0082  
**Department** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

## ABSTRACT

*Indonesia currently sits as Southeast Asia's largest energy consumption with 213.4 billion kWh energy bill per year. The final energy consumption is dominated by coal, oil, and gas with a percentage of 70.48% from overall consumption. Based on Government Regulation number 79 that was issued on 2014 concerning the national energy policy, Indonesia is currently under ambitious goal to reach 23% mixture of renewable energy from its national energy mix by 2025 with wind energy serves as one of the options with potential of 978 MW. One of the most popular method of harvesting wind energy is by altering its kinetic energy through wind turbine. Since Indonesia has typical wind speed ranging from 3 to 7 m/s, vertical axis wind turbine is proven to be the most suitable for this condition.*

*This research used Savonius wind turbine with 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 mm. The research conducted with a variation of the diameter of circular cylinder ( $d/D$ ) of 0.1; 0.2; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; and 1.0. The circular cylinder will put be against the returning blade with  $S/D$*

*configuration of 2,6 and Reynolds number variation of  $9.7 \times 10^4$  and  $13.6 \times 10^4$ . Measurements were performed using anemometer, torquemeter, tachometer, and brake dynamometer.*

*The results obtained from the study were then compared to Savonius wind turbines without circular cylinders which shows that Savonius wind turbines with circular cylinders in front of the returning blade in the position of  $S / D = 2.6$  most effectively improve the performance of Savonius wind turbines with  $d / D = 0.6$  at  $Re = 97 \times 10^4$ . This statement is proven by the increase in the maximum Coefficient of power by 32.57%, and the increase in the maximum Coefficient of Moment by 14.25%, as well as the improvement self-starting ability of Savonius wind turbines in all turbine blade positions compared with Savonius wind turbines without a circular cylinder.*

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



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadirat Allah SWT yang maha pengasih lagi maha penyayang, karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI UKURAN DIAMETER SILINDER PENGGANGGU DIDEPAN SISI RETURNING BLADE TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS, Studi Kasus Variasi Rasio  $S/D = 2,6$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$ ;  $0,8$ ;  $0,9$  dan  $1,0$  Pada  $Re = 97000$  dan  $136000$ ”**. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem – Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam penyusunan Tugas Akhir ini penulis mendapatkan dukungan dari beberapa pihak dan pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberikan dorongan dan bantuan serta motivasi hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Prof. Ir. Sutardi, PhD., Bapak Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT, ST, M.Eng. dan Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, PhD selaku dosen penguji proposal tugas akhir dan tugas akhir yang telah memberikan arahan, masukan serta kritik yang membangun terhadap tugas akhir ini.
3. Bapak Sutrisno dan Bapak Faisal yang telah membantu pengerjaan alat tugas akhir ini.
4. Bapak Nur Yuniarto ST, MSc.Eng, PhD selaku dosen wabli penulis serta kepada seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS atas segala bantuan dan bimbingan yang diberikan.

5. Keluarga penulis atas segala doa serta dorongan untuk menjadi manusia yang lebih baik dan berguna bagi bangsa dsetiap harinya.
6. Teman-teman Savonius kelompok 6, Hilda, Kiki, Markus, Prub, Ipul, Ardong dan Asri serta kelompok 5, Dhayant, Okky, Gibas, dan Fikri atas segala diskusi dan semangat yang diberikan.
7. Teman Tacha yang membuat tahun terakhir penulis sangat berwarna serta senantiasa menjadi pengingat bahwa dunia yang ditinggali penulis berbentuk spektrum dan semua manusia memiliki tempatnya masing-masing.
8. SPE ITS SC yang telah memperkenalkan penulis pada berbagai kesempatan untuk menjadi pribadi yang lebih baik dan mendorong penulis untuk menciptakan budaya berbakti kepada sesama melalui berbagai program dan memori yang telah dibuat.
9. ITS MUN Club yang telah memberikan penulis kesempatan untuk bertemu orang-orang terbaik di kampus ITS, merambah bidang non-teknik, membawa penulis meninggalkan pulau jawa, serta memberikan pelajaran yang tak terlupakan.
10. Teman-teman Angkatan M58 Departemen Teknik Mesin ITS atas segala informasi, diskusi, pertikaian, perselisihan dan segala bentuk dukungan yang diberikan.
11. Semua pihak yang telah membantu proses penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan penelitian yang dilakukan selajutnya. Semoga penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Januari 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Batasan Masalah.....	7
1.4. Tujuan Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	9
2.1. Turbin Angin .....	9
2.1.1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT).....	10
2.1.2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT).....	11
2.1.3. Turbin Angin Savonius.....	12
2.2. Bilangan Reynolds .....	13
2.3. Coefficient of Power (CoP).....	15
2.4. Coefficient of Moment ( $C_M$ ).....	18
2.5. Tip Speed Ratio .....	19
2.6. Gaya Drag pada Aliran Silinder .....	20
2.7. Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	35

3.1.	Analisa Parameter.....	35
3.2.	Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP) .....	37
3.3.	Analisa Dimensi Coefficient of Moment ( $C_M$ ) .....	40
3.4.	Peralatan Penelitian .....	43
3.4.1.	Axial Fan.....	43
3.4.2.	Honeycomb.....	44
3.4.3.	Turbin Angin Savonius.....	45
3.4.4.	Silinder Pengganggu.....	45
3.4.5.	Penyangga Turbin Angin Savonius.....	46
3.4.6.	Alat Ukur.....	47
3.5.	Prosedur Penelitian.....	54
3.5.1.	Torsi Dinamis.....	54
3.5.2.	Torsi Statis.....	56
3.6.	Flowchart Penelitian .....	58
3.6.1.	Torsi Dinamis.....	58
3.6.2.	Torsi Statis.....	61
3.7.	Perhitungan Uncertainty .....	63
3.8.	Hasil yang Diperoleh.....	65
	Pada penelitian ini, hasil yang akan diperoleh adalah: .....	65
1.	Grafik torsi statis .....	65
3.	Grafik <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_m$ dan $C_{m_0}$ ) sebagai fungsi <i>tip speed ratio</i> .....	65
4.	Grafik perbandingan antara $CoP_{max}$ terhadap $CoP_{0max}$ .....	65
BAB IV PEMBAHASAN .....		67

4.1.	Contoh Perhitungan.....	67
4.1.1.	Perhitungan Reynolds Number.....	67
4.1.2.	Perhitungan Tip Speed Ratio.....	69
4.1.3.	Perhitungan Coefficient of Power.....	70
4.1.4.	Perhitungan Coefficient of Moment.....	71
4.2.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	71
4.2.1.	Analisis Nilai Coefficient of Power (CoP <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	72
4.2.2.	Analisis Nilai Coefficient of Moment (CM <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	73
4.2.3.	Analisis Nilai Torsi Statis (Ts <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	75
4.3.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu.....	77
4.3.1.	Analisis Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	77
4.3.2.	Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power Maksimum (CoP <sub>max</sub> ) antara Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP <sub>max</sub> / CoP <sub>0max</sub> ) Terhadap Fungsi Variasi d/D pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $Re = 13,6 \times 10^4$	82
4.3.3.	Analisis Nilai Coefficient of Moment (C <sub>M</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	83

4.3.4. Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $Re = 13,6 \times 10^4$ .....	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	95
5.1. Kesimpulan.....	95
5.2. Saran.....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	97
LAMPIRAN .....	95
BIODATA PENULIS.....	117

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin angin sumbu horizontal.....	10
Gambar 2. 2 Turbin angin sumbu vertical ( <a href="https://www.easyengineering.org/archive/Berkas:Vertical_Wind_Turbine.jpg">https://www.easyengineering.org/archive/Berkas:Vertical_Wind_Turbine.jpg</a> ) .....	11
Gambar 2. 3 Turbin angin Savonius ( <b>Hemami, 2012</b> ) .....	13
Gambar 2. 4 Skema turbin Savonius .....	14
Gambar 2. 5 skema dynamometer .....	16
Gambar 2. 6 Hubungan antara coefficient of power (CoP) dan Coefficient of Moment (CM) dengan tip speed ratio ( <b>Pritchard, 1998</b> ).....	19
Gambar 2. 7 aliran inviscid dan aliran viscous pada bola pejal. (a) aliran inviscid, (b) aliran viscous .....	21
Gambar 2. 8 Skema Turbin Angin Savonius Single Stage tampak samping (a) dan tampak atas (b) ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) .....	22
Gambar 2. 9 Dampak dari jumlah blade terhadap coefficient of power ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) .....	23
Gambar 2. 10 Dampak dari variasi jumlah stage dan kecepatan angin terhadap specific power ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) .....	24
Gambar 2. 11 Dampak dari variasi overlap ratio dan kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) .....	25
Gambar 2. 12 Dampak dari variasi aspect ratio dan kecepatan angin terhadap coefficient of power ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) ....	26
Gambar 2. 13 Dampak dari variasi keberadaan end plate dan kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin ( <b>Mahmoud et al, 2012</b> ) .....	27
Gambar 2. 14 Geometri benda uji ( <b>Lee et al, 2004</b> ) .....	28
Gambar 2. 15 Pengaruh diameter silinder penghalang terhadap distribusi tekanan pada silinder utama. (a) $L/D = 1.5$ , (b) $L/D =$ 2.17. ( <b>Lee et al, 2004</b> ).....	28

Gambar 2. 16 Dampak dari L/D terhadap distribusi tekanan di silinder utama. (a) $d/D = 0.133$ , (b) $d/D = 0.233$ (Lee et al, 2004)	29
Gambar 2. 17 Pengaruh diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) terhadap pengurangan drag pada silinder utama. (Lee et al, 2004)	30
Gambar 2. 18 Skema Penelitian Pandangan Atas dan Samping (J. A. Rustam, 2018)	31
Gambar 2. 19 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR). (a) $Re = 9.7 \times 10^4$ ; (b) $Re = 14.5 \times 10^4$ ; (c) $Re = 17.8 \times 10^4$ (J. A. Rustam, 2018)	32
Gambar 2. 20 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR). (a) $Re = 9.7 \times 10^4$ ; (b) $Re = 14.5 \times 10^4$ ; (c) $Re = 17.8 \times 10^4$ (J. A. Rustam, 2018)	33
Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius	35
Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur	36
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18	43
Gambar 3. 4 Honeycomb	44
Gambar 3. 5 Turbin Savonius	45
Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu	46
Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius	46
Gambar 3. 8 Tachometer	47
Gambar 3. 9 Anemometer	48
Gambar 3. 10 Brake Dynamometer	50
Gambar 3. 11 Torquemeter	51
Gambar 3. 12 Voltage Regulator	52
Gambar 3. 13 Neraca Pegas	53
Gambar 3. 14 Pemberat	54
Gambar 3. 15 Flowchart Torsi Dinamis	60



Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis.....	62
Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power (CoP <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	72
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment (CM <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	74
Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis (Ts <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.....	75
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan S/D = 2,6; d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; pada (a) Re = $9,7 \times 10^4$ dan (b) Re = $13,6 \times 10^4$ .....	78
Gambar 4. 5 Perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap variasi d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0 ...	83
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan S/D = 2,6; d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; pada (a) Re = $9,7 \times 10^4$ dan (b) Re = $13,6 \times 10^4$ .....	85
Gambar 4. 7 Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Sudut ( $\lambda$ ) dengan S/D = 2,6; d/D = 0,6; pada Re = $9,7 \times 10^4$ .....	88
Gambar 4. 8 Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Sudut ( $\lambda$ ) dengan S/D = 2,6; d/D = 0,5; pada Re = $13,6 \times 10^4$ .....	88
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa	

silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$   
pada (a)  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan (b)  $Re = 13,6 \times 10^4$ .....91  
Gambar A. 1 Posisi titik pengambilan uniformity test.....95  
Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal .....96  
Gambar A. 3 Grafik distribusi kecepatan vertikal .....96

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP.....	38
Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM .....	41
Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18.....	44
Tabel 3. 4 Spesifikasi Honeycomb.....	44
Tabel 3. 5 Spesifikasi turbin Savonius .....	45
Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12 .....	47
Tabel 3. 7 Spesifikasi Anemometer OMEGA HH141 .....	49
Tabel 3. 8 Spesifikasi Torque meter LUTRON model TQ-8800 .....	51
Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage Regulator .....	52
Tabel 3. 10 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA tipe C-5 .....	53
Tabel 4. 1 Perbandingan CoP Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	79
Tabel 4. 2 Uncertainty nilai coefficient of power pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	81
Tabel 4. 3 Perbandingan Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	85
Tabel 4. 4 Uncertainty nilai coefficient of moment pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	86
Tabel A. 1 Data keseragaman kecepatan angin.....	96
Tabel B. 1 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ .....	97
Tabel B. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ .....	97
Tabel B. 3 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ .....	98

Tabel C. 1 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ .....99

Tabel C. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,2$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ ..99

Tabel C. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 100

Tabel C. 4 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,4$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ ...100

Tabel C. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 101

Tabel C. 6 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,6$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 102

Tabel C. 7 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,7$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 103

Tabel C. 8 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 104

Tabel C. 9 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,9$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 104

Tabel C. 10 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 1,0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ 105

Tabel C. 11 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  105

Tabel C. 12 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,2$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  106

Tabel C. 13 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  106

Tabel C. 14 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,4$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  107

Tabel C. 15 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  108

Tabel C. 16 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,6$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  108

Tabel C. 17 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,7$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  109

Tabel C. 18 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  109

Tabel C. 19 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,9$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  110

Tabel C. 20 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 1,0$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  111

Tabel C. 21 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,6$ ;  $d/D = 0,6$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ ; dan  $d/D = 0,5$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  ..... 112

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*





# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di Kawasan Asia Tenggara dan urutan kelima di Asia Pasifik. Pertumbuhan GDP yang mencapai 6.04% per tahun serta pertumbuhan populasi sebesar 0.8% per tahun selama periode 2017-2050 diperkirakan akan semakin mendorong peningkatan kebutuhan energi Indonesia di masa depan (**BPPT Outlook Energi Indonesia, 2018**). Konsumsi energi final Indonesia saat ini didominasi oleh batu bara, minyak, dan gas dengan persentase sebesar 70.48%. Menurunnya potensi dari energi fosil membuat pemerintah menggerakkan Dewan Energi Nasional untuk membuat kebijakan baru dengan target capaian penggunaan energi baru dan terbarukan sebesar 23% pada tahun 2030.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, wilayah Jawa dan Sulawesi memiliki potensi energi angin sebesar 978 MW. Akan tetapi, pemanfaatannya masih sangat rendah akibat biaya produksi yang sangat tinggi serta masalah-masalah domestik seperti perizinan lahan, lokasi, serta kurangnya dukungan dari industri (**Indonesia Energy Outlook, 2016**). Untuk menghadapi masalah tersebut, pemanfaatan turbin angin jenis Savonius yang mudah dibuat serta mampu bekerja pada kecepatan angin rendah menjadi salah satu solusi yang cocok. Turbin Angin Savonius merupakan jenis turbin yang diciptakan oleh **J. Savonius** pada tahun 1922 berupa potongan silinder yang diletakkan dengan sumbu putar kearah vertikal. Turbin ini memiliki dua jenis *blade* yang disebut sebagai *advancing blade* dan

*returning blade*. Perbedaan gaya *drag* yang terjadi pada kedua *blade* dimanfaatkan untuk menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Kondisi Indonesia yang memiliki kecepatan angin relatif rendah, berkisar diantara 2.5 m/s hingga 7.0 m/s (**Global Wind Atlas, 2018**), membuat turbin ini cocok untuk digunakan pada wilayah Indonesia. Turbin Savonius memiliki efisiensi paling rendah dibandingkan dengan turbin tipe lain. Oleh karena itu, banyak penelitian dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin tipe Savonius.

**Lee et al (2004)** melakukan penelitian terhadap karakteristik *drag* dan struktur *wake* di bagian belakang silinder dengan menempatkan silinder pengganggu kecil pada bagian *upstream* dari silinder sirkular. Pada penelitian ini digunakan bilangan Reynolds sebesar 20.000 dengan variasi  $d/D = 0.133$  hingga  $0.267$  dan  $L/D = 1.5$  hingga  $4.0$ . Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapati bahwa tekanan dan gaya *drag* berubah secara drastic pada jarak *critical pitch*. Koefisien *drag* pada silinder utama menurun sebesar 29% ketika silinder pengganggu dengan  $d/D = 0.233$  digunakan pada posisi mendekati jarak kritis, yaitu  $L_c/D = 2.081$ . Akan tetapi, pengurangan gaya *drag* sistem yang meliputi silinder utama dan pengganggu terjadi pada  $L/D = 1.833$  dan  $d/D = 0.233$  dengan reduksi sebesar 25%.

**N.H. Mahmoud et al (2012)** melakukan penelitian mengenai percobaan untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan menggunakan beberapa variasi. Variasi pertama adalah variasi dari jumlah *blades* yaitu dengan menggunakan dua *blades*, tiga *blades*, dan empat *blades*. Variasi kedua adalah variasi jumlah stage turbin yaitu *single stage* dan *double stages*. Variasi ketiga adalah variasi *overlap ratio* ( $\beta$ ) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3;

dan 0,35 dan *aspect ratio* ( $a$ ) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5 dengan ada tidaknya *end plates*. Pada penelitian ini turbin Savonius mempunyai diameter poros 14 mm dan panjang 62 cm untuk semua variasi yang diletakkan di depan *exit wind tunnel* dengan jarak 125 cm. Peletakkan diperhatikan sehingga *vertikal axis* dari turbin Savonius harus berhadapan lurus dengan *centre line* dari *wind tunnel*. *Blades* dari turbin Savonius dibuat dari pipa PVC dengan diameter 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,008 m. *End plates* yang digunakan terbuat dari plat kayu ringan dengan tebal 2,5 mm. Dari penelitian didapatkan bahwa turbin dengan dua *blades* menghasilkan efisiensi lebih besar daripada turbin dengan jumlah *blades* tiga dan empat. Lalu turbin Savonius dengan *double stages* menghasilkan hasil yang lebih optimum daripada *single stage*. Lalu turbin Savonius dengan tanpa *overlap ratio* menghasilkan tenaga yang lebih tinggi. Lalu turbin Savonius dengan *aspect ratio* yang tinggi menghasilkan  $C_p$  yang lebih tinggi. Lalu turbin Savonius yang menggunakan *end plate* menghasilkan efisiensi lebih tinggi daripada tanpa *end plate*.

Pada studi eksperimen **A.J. Rustam (2018)** digunakan silinder pengganggu di depan *returning blade* untuk memperbesar selisih gaya *drag*. Hal tersebut dilakukan bertujuan untuk mengurangi gaya *drag* pada *returning blade*. Studi eksperimen ini dilakukan dengan variasi parameter  $d/D = 0.5$ ; jarak  $S/D = 2.0$ ; Bilangan Reynolds ( $Re$ ) =  $9.7 \times 10^4$ ;  $14.5 \times 10^4$ ;  $17.8 \times 10^4$ ; dengan  $y/D = 0$ ; 0.25; 0.5. Hasil dari studi eksperimen ini menunjukkan bahwa peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya *coefficient of power*, *coefficient of moment*, dan torsi statis setelah diberikan silinder

pengganggu di depan *returning blade*. Namun penambahan silinder pengganggu  $d/D = 1$ ;  $S/D = 1.6$  didepan *returning blade* tidak efektif dalam meningkatkan putaran turbin angin Savonius untuk semua konfigurasi bilangan Reynolds dan  $s/D = 2,6$  dan  $y/D$  dikarenakan tidak terjadinya peningkatan nilai putaran pada turbin dengan pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu.

Berdasarkan penelitian yang disebutkan diatas, dapat disimpulkan bahwa dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius. Penelitian yang dilakukan oleh penulis menggunakan penghalang berupa silinder yang diletakkan di depan *returning blade* dengan jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder penghalang terhadap diameter *blade* turbin ( $S/D$ ) sebesar 2.6 dan variasi rasio antara diameter silinder penghalang dengan diameter *blade* turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, dan 1.0. Penelitian ini dilakukan dengan bilangan Reynolds sebesar 97,000 dan 136,000 serta kecepatan angin sebesar 5 m/s dan 7 m/s.

## 1.2. Perumusan Masalah

Turbin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal yang mampu merubah energi angin dari sumbu horizontal menjadi energi kinetic rotasi. Desain dasar dari *blade* dibuat berdasarkan bentuk setengah silinder yang disebut *advancing blade* berbentuk cekung dan *returning blade* berbentuk cembung. Profil cekung dari *advancing blade* berfungsi sebagai penangkap aliran angin sedangkan profil cembung *returning blade* berfungsi sebagai pemantul aliran kearah sekitarnya. Turbin Savonius merupakan turbin jenis *drag* yang memanfaatkan selisih

antara *drag force* antara *returning blade* dan *advancing blade* untuk menciptakan torsi. Semakin besar torsi yang muncul, maka akan semakin besar *coefficient of power* (CoP) dari turbin Savonius. Untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius tersebut, penulis meletakkan penghalang di depan *returning blade* untuk mengganggu lajur dari aliran angin dan mengurangi *drag force* pada *returning blade*.

Pada penelitian ini, penghalang yang digunakan berbentuk silinder sirkuler dengan variasi rasio ukuran turbin dan penghalang ( $d/D$ ). Hipotesa awal dari penelitian ini adalah:

- (1) Penghalang yang diletakkan di depan *returning blade* akan mengeliminasi titik stagnasi pada *returning blade* sehingga menimbulkan *wake* di belakang penghalang. Hal tersebut akan menyebabkan tekanan pada *returning blade* menurun dan menurunkan selisih *pressure drag* antara bagian depan dan belakang *returning blade*. Hal tersebut akan menyebabkan selisih *pressure drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* membesar dan meningkatkan torsi serta daya pada turbin Savonius.
- (2) Penghalang berupa silinder diletakkan di depan *returning blade*. *Shear layer* yang terlepas dari silinder penghalang akan mengenai permukaan *returning blade* dan menyebabkan *boundary layer* pada permukaan *returning blade* terganggu. Hal tersebut mempercepat terbentuknya *turbulent boundary layer*. Aliran turbulen mampu menahan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser lebih baik daripada aliran laminar. Hal tersebut menyebabkan mundurnya titik separasi pada *returning blade*, sehingga *wake* menyempit dan menurunkan *drag force* pada *returning blade*.

Fenomena tersebut akan menyebabkan peningkatan selisih *drag force* diantara kedua *blade* dan sehingga meningkatkan torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

- (3) Penghalang yang diletakkan di depan *returning blade* memiliki variasi rasio  $d/D$  sebesar 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, dan 1.0. Variasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh rasio diameter turbin terhadap diameter penghalang sehingga didapatkan diameter optimum terhadap rasio  $S/D$  sebesar 2.6 dimana *wake* yang dihasilkan oleh silinder penghalang menjadi efektif menunda titik separasi pada *returning blade*. Fenomena ini diharapkan mampu memperkecil *drag force* pada *returning blade* sehingga selisih *drag force* dari kedua *blade* menjadi semakin besar sehingga torsi, daya, dan CoP turbin Savonius turut membesar. Selain itu, penghalang yang diletakkan di depan *returning blade* mampu membelokkan aliran ke *advancing blade* sehingga *drag force* yang terjadi menjadi semakin besar. Diharapkan efek yang diberikan oleh penghalang mampu meningkatkan torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius. Hipotesa sementara adalah ketika  $d/D$  yang diuji terlalu kecil, maka penurunan tekanan serta penundaan titik separasi pada *returning blade* tidak signifikan. Sedangkan ketika nilai  $d/D$  terlalu besar, aliran dari silinder penghalang akan mengalami defleksi dan menghalangi *free stream* yang bergerak menuju *advancing blade*. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan nilai  $d/D$  optimum yang dapat menghasilkan daya tertinggi.

### 1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, digunakan batasan masalah berupa:

- a) Penelitian menggunakan analisa *external flow*;
- b) Aliran yang mengalir adalah *steady, incompressible* dan *uniform flow*;
- c) Perpindahan panas akibat gesekan diabaikan;
- d) Analisis dilakukan dengan perbandingan jarak antara pusat turbin angin dengan pusat silinder penghalang ( $S/D$ ) sebesar 2.6;
- e) Analisis dilakukan dengan menggunakan variasi rasio antara diameter silinder penghalang terhadap diameter *blade* turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, dan 1.0.
- f) Kecepatan angin yang digunakan adalah sebesar 5 m/s dan 7 m/s.
- g) Bilangan Reynolds yang digunakan adalah sebesar 97,000 dan 136,000.

### 1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius dengan memberikan penghalang berupa silinder dengan variasi rasio antara diameter silinder penghalang terhadap diameter *blade* turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, dan 1.0. Jarak antara pusat turbin angin dengan pusat silinder penghalang ( $S/D$ ) adalah sebesar 2.6. Kecepatan angin yang digunakan adalah 5 m/s dan 7 m/s. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah 97,000 dan 136,000 Penelitian ini dilakukan dengan metode:

- i) Mengukur torsi statis dan dinamis pada turbin angin tipe Savonius pada saat dialirkan udara;

- ii) Mengukur kecepatan putaran dari turbin angin Savonius;
- iii) Menghitung *coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius;
- iv) Menghitung *coefficient of moment* ( $C_M$ ) turbin angin Savonius.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu solusi untuk menjawab tantangan ekonomi hijau (*green economy*) karena tingkat ketersediaan angin sebagai media penggerak yang sangat tinggi serta tingkat polusi yang sangat rendah. Akan tetapi, daya yang dihasilkan relatif lebih rendah apabila dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga batu bara. Maka dari itu, turbin angin umumnya hanya digunakan pada lingkup yang kecil.

Turbin angin terdiri atas *blade*, rotor, generator dan menara. *Blade* adalah bagian berbentuk pisau yang melekat pada rotor dan berfungsi untuk merubah aliran angin menjadi energi kinetik dengan memanfaatkan perbedaan tekanan yang terjadi pada bagian atas dan bawahnya. Rotor berfungsi untuk menciptakan medan elektromagnetik dengan memanfaatkan energi kinetik dari *blade* untuk berputar dan menciptakan flux terhadap generator. Generator merupakan komponen yang berfungsi untuk merubah energi kinetik yang dihantarkan melalui *blade* menjadi aliran listrik dengan memanfaatkan flux untuk menciptakan perbedaan potensial. Menara adalah komponen yang berfungsi untuk memberikan ketinggian pada *blade* untuk mendapatkan aliran laminar. Angin yang mengalami kontak dengan *blade* akan memutar rotor yang kemudian menciptakan flux. Kemudian flux tersebut akan menciptakan perbedaan potensial pada generator dan menghasilkan aliran listrik.

Berdasarkan bentuk rotornya, turbin angin dibagi menjadi dua jenis, yaitu yaitu turbin angin sumbu horizontal (*horizontal axis wind turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*vertical axis wind turbine*).

### 2.1.1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (HAWT)

Turbin jenis HAWT merupakan jenis turbin yang mengalami perputaran pada sumbu horizontal, hal tersebut menyebabkan poros utama dari turbin bergerak mengikuti arah angin. Poros turbin diletakkan tegak lurus terhadap arah putaran rotor dan sejajar dengan arah angin untuk mencapai efisiensi tertinggi. *Blade* yang terletak pada ujung poros akan menangkap turbulensi aliran yang timbul akibat posisinya yang melawan arah angin. Aliran angin tersebut kemudian dirubah menjadi energi kinetik yang menggerakkan *gearbox* pada *nacelle*. *Gearbox* akan meningkatkan laju perputaran rotor dan menghasilkan aliran listrik.



*Gambar 2. 1 Turbin angin sumbu horizontal*

([https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Turbin\\_Angin.jpg](https://id.wikipedia.org/wiki/Berkas:Turbin_Angin.jpg))

Turbin HAWT umumnya digunakan pada lapangan dengan kecepatan angin sedang dan tinggi dalam skala besar. Kelebihan dari turbin jenis ini adalah kemampuannya untuk menangkap angin dengan kecepatan yang relatif kuat. Akan tetapi, pemasangan yang sulit, frekuensi kerusakan akibat turbulensi yang

tinggi serta biaya transportasi yang tinggi menjadi hambatan bagi pengguna turbin jenis HAWT.

### 2.1.2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)



*Gambar 2. 2 Turbin angin sumbu vertikal*  
([https://www.easyengineering.org/archive/Berkas:Vertical\\_Wind\\_Turbine.jpg](https://www.easyengineering.org/archive/Berkas:Vertical_Wind_Turbine.jpg))

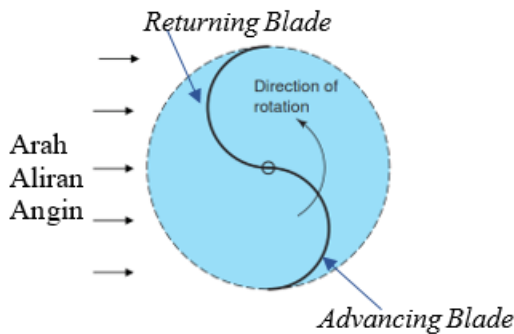
Turbin jenis VAWT berputar searah dengan sumbu vertikal karena poros dari rotor terletak pada posisi *omni-directional* yang mampu memberdayakan angin dari segala arah. Karena tidak membutuhkan arah sejajar dengan angin, turbin VAWT mampu bekerja pada ketinggian dan kecepatan rendah. Turbin jenis VAWT memiliki 3 jenis, yaitu Darrenius, H dan Savonius. Turbin Darrenius dan H memanfaatkan *drag* dan *lift force* untuk menggerakkan *blade* sedang Savonius hanya menggunakan *drag force*. Karena torsinya yang rendah, turbin jenis VAWT mampu bergerak pada kecepatan rendah sehingga lebih mudah digunakan dibandingkan dengan HAWT. Selain itu, generator jugadapat diletakkan pada bagian bawah

turbin sehingga proses perawatan dapat dilakukan dengan lebih mudah. Akan tetapi, teknologi yang tergolong baru membuat perkembangannya lambat dan kecepatan angin yang rendah menyebabkan efisiensi dari turbin jenis VAWT lebih rendah dibandingkan dengan HAWT.

### 2.1.3. Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius merupakan jenis turbin angin tipe *drag* yang memanfaatkan *drag force* yang dihasilkan tiap *blade*. Turbin yang diciptakan oleh Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922 ini tersusun atas 2 *blade* berbentuk setengah silinder yang disusun berseling sehingga membentuk huruf 'S' (Gambar 2.3).

*Blade* yang terletak tegak lurus terhadap aliran angin menerima aliran angin pada permukaan cekung disebut sebagai *advancing blade*, sedangkan *blade* yang terletak membelakangi aliran angin dan menerima aliran angin pada permukaan cembung disebut sebagai *returning blade*. Perbedaan geometris pada masing-masing *blade* memberikan perbedaan nilai *drag coefficient*, dimana *advancing blade* memiliki koefisien yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade*. Perbedaan koefisien tersebut akan mengakibatkan perbedaan *drag force* pada kedua permukaan yang kemudian menghasilkan torsi yang memutar poros turbin angin.



Gambar 2. 3 Turbin angin Savonius (Hemami, 2012)

Desain turbin Savonius yang memiliki *solidity*, ratio area *blade* aktual terhadap area turbin yang tertutup angin, tinggi mendukung turbin untuk bekerja pada *tip speed ratio* rendah. Hal tersebut membuat turbin Savonius memiliki torsi awal yang besar dan kemampuan *self-starting* yang relatif baik.

## 2.2. Bilangan Reynolds

Aliran fluida dapat diklasifikasikan berdasarkan karakter aliran sebagai laminar, transisi dan turbulen. Aliran laminar adalah aliran yang bersifat lembut, turbulen bersifat acak, sedangkan transisi adalah titik tengah antara keduanya. Untuk mempermudah pengkategorian aliran yang ada di dunia, Osborne Reynolds pada abad 18 menciptakan bilangan Reynolds, bilangan tidak berdimensi yang mampu menentukan tipe aliran pada fluida *incompressible*. Persamaan dari bilangan Reynolds adalah sebagai berikut:

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

Dimana:

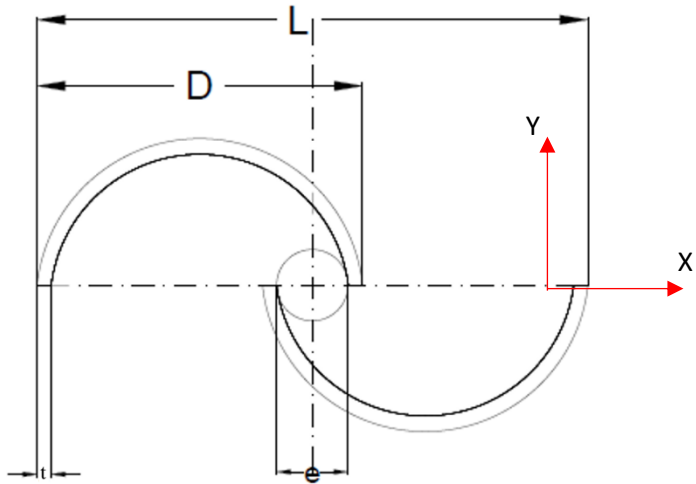
$Re$  = Bilangan Reynolds

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)

$L$  = Panjang karakteristik (m)

$\mu$  = Koefisien gesek statis (Ns/m)



*Gambar 2. 4 Skema turbin Savonius*

Pada penelitian ini, panjang karakteristik didefinisikan sebagai:

$$L = 2D - 2t - e \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana:

$D$  = Diameter sudu turbin Savonius (m)

$e$  = Diameter poros (m)

$t$  = Tebal *blade* turbin Savonius (m)

Adapun nilai bilangan Reynolds pada plat datar adalah:

- $Re < 5 \times 10^5$  untuk bilangan laminar
- $Re > 5 \times 10^5$  untuk bilangan turbulen

### 2.3. Coefficient of Power (CoP)

*Coefficient of power* merupakan parameter performa turbin angin yang dipengaruhi oleh daya mekanik dari turbin karena terkena angin dan daya kinetik dari aliran udara berupa *drag*. Semakin besar nilai CoP, maka nilai daya yang dihasilkan semakin besar pula. Nilai CoP didefinisikan sebagai:

$$CoP = \frac{P_r}{P_w} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

CoP = *Coefficient of Power*

$P_r$  = Daya mekanik aktual turbin (Watt)

$P_w$  = Daya teoritis akibat kecepatan angin (Watt)

Daya mekanik aktual turbin ( $P_r$ ) dihitung berdasarkan torsi dinamis dan putaran turbin yang diukur dengan menggunakan *brake dynamometer*. Hasil pengukuran kemudian diolah dengan menggunakan persamaan:

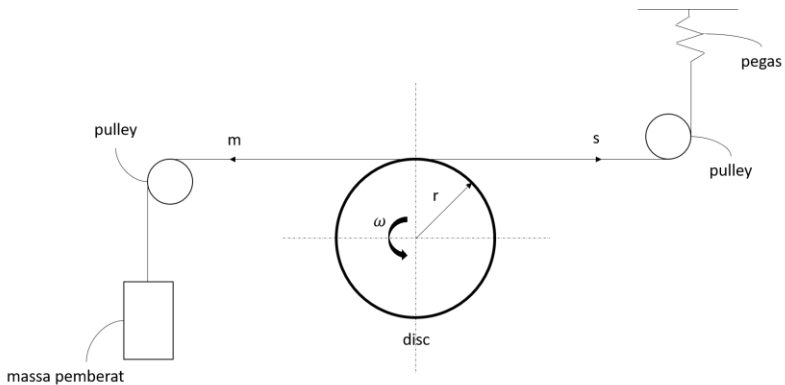
$$P_r = \tau \times \omega \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana:

$P_r$  = Daya mekanik aktual turbin (Watt)

$\tau$  = Torsi dinamis (Nm)

$\omega$  = Putaran turbin angin (rad/s)



Gambar 2. 5 skema dynamometer

Berdasarkan gambar 2.5, nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh melalui persamaan:

$$\tau = \{(s - m)g\} \times r \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

s = massa yang terbaca pada pegas (kg)

m = Massa beban (kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)

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

Daya yang dihasilkan oleh angin ( $P_w$ ) merupakan besarnya energi kinetik yang dibawa terhadap waktu, sehingga daya yang dihasilkan adalah:



$$P_w = \frac{E_k}{t} \dots \dots \dots (2.6)$$

Besarnya laju angin dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin angin secara teoritis. Nilai dari energi kinetik yang dimiliki udara adalah:

$$E_k = \frac{1}{2} m' U^2 \dots \dots \dots (2.7)$$

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

$$\dot{m} = \frac{m'}{t} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$\dot{m} = \rho U A \dots \dots \dots (2.9)$$

Maka persamaan daya yang dihasilkan udara menjadi:

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

$$P_w = \frac{1}{2} (\rho U A) U^2 \dots \dots \dots (2.11)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \dots \dots \dots (2.12)$$

Setelah dilakukan analisa terhadap daya aktual turbin dan angin, maka nilai *coefficient of performance* didapati sebagai:

$$CoP = \frac{\{(s-m)g\}rw}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$CoP = \frac{\{(s-m)g\}r\frac{2\pi n}{60}}{\frac{1}{2}\rho AU^3} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$CoP = \frac{\{(s-m)g\}r\pi n}{15\rho AU^3} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

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

#### 2.4. Coefficient of Moment ( $C_M$ )

*Coefficient of Moment* adalah parameter yang digunakan untuk menentukan performa turbin dengan membandingkan antara nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin terhadap torsi teoritis hasil perhitungan. Torsi turbin didapatkan melalui pembacaan alat torsi statis, sedangkan nilai torsi teoritis didapatkan menggunakan persamaan:

$$T_\infty = \frac{1}{2} \rho A v^2 R \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

- $T_\infty$  = Torsi teoritis (Nm)  
 $\rho$  = Massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)  
 $v$  = Kecepatan fluida (m/s)  
 $R$  = Jari-jari rotor Savonius (m)

Dengan demikian, persamaan dari *coefficient of moment* menjadi:

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2}\rho Av^2 R} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana:

$T_D$  = Torsi dinamis (Nm)

$C_M$  = *Coefficient of Moment*

### 2.5. Tip Speed Ratio

*Tip speed ratio* atau rasio kecepatan ujung adalah rasio kecepatan tangensial bagian ujung *blade* turbin terhadap kecepatan angin. Pada kecepatan tertentu, *tip speed ratio* dapat berpengaruh terhadap kecepatan rotor. *Tip speed ratio* didefinisikan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \dots\dots\dots(2.18)$$

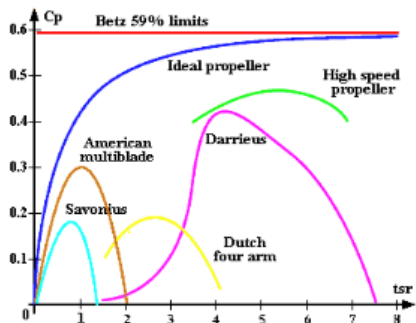
Dimana:

$\lambda$  = *Tip speed ratio*

$\omega$  = Kecepatan sudut turbin (rad/s)

$R$  = Jari-jari turbin (m)

$U$  = Kecepatan angin (m/s)



Gambar 2. 6 Hubungan antara *coefficient of power* (*CoP*) dan *Coefficient of Moment* (*CM*) dengan *tip speed ratio* (Pritchard, 1998)

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa batas maksimal dari *coefficient of power* suatu turbin adalah sebesar 59.3%. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa setiap tipe turbin angin memiliki karakter masing-masing terkait hubungan antara *coefficient of power* dan *coefficient of moment* terhadap *tip speed ratio*. Apabila titik mula operasi berada pada *tip speed ratio* rendah, maka turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin rendah dan sebaliknya.

## 2.6. Gaya Drag pada Aliran Silinder

*Drag force* adalah sifat gaya yang menghambat pergerakan benda pada melalui fluida dimana gaya tersebut memiliki arah yang sejajar dengan sumbu kecepatan aliran terhadap luas penampang dari suatu benda yang berlawanan dengan arah aliran tersebut. Gaya tersebut muncul ketika benda yang bergerak dalam medan fluida yang bersifat *viscous*.

*Drag force* didefinisikan sebagai:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_d A \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana:

$F_D$  = *Drag force* (N)

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

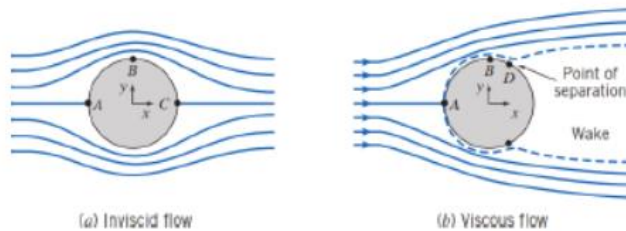
$v$  = Kecepatan fluida (m/s)

$C_d$  = *Drag coefficient*

$A$  = Luas bidang aliran yang terkena aliran fluida ( $\text{m}^2$ )

Analisa *drag force* pada fluida juga dapat diamati melalui pendekatan kekentalannya. Berdasarkan pengaruh

tersebut, aliran dibagi menjadi dua jenis, yaitu aliran *inviscid* dan *viscous*. Aliran *inviscid* merupakan aliran yang kekentalan fluidanya dianggap nol, sehingga pengaruh dari tegangan geser diabaikan ( $\tau_{yx} = 0$ ). Sedangkan aliran *viscous* merupakan aliran yang kekentalannya dianggap berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser pada dinding ( $\tau_{yx} \neq 0$ ). Contoh dari perbandingan aliran *inviscid* dan aliran *viscous* ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 aliran *inviscid* dan aliran *viscous* pada bola pejal. (a) aliran *inviscid*, (b) aliran *viscous*

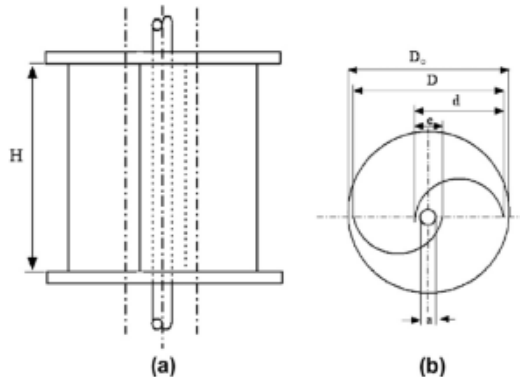
Gambar 2.8 (b) menunjukkan bahwa pada aliran *viscous*, terjadi titik stagnasi (titik A) dimana aliran fluida menyentuh silinder sehingga kecepatan diperlambat hingga menjadi nol dan tekanan meningkat, hal tersebut menyebabkan timbulnya *boundary layer*. Kemudian pada lajur antara titik A dan titik B terjadi peningkatan kecepatan dan tekanan yang kemudian menurun pada lajur antara titik B dan titik D. Pada titik D, momentum aliran tidak lagi mampu melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga *boundary layer* terpecah, titik tersebut disebut sebagai titik separasi. Ruang kosong yang disisakan oleh titik-titik pemisah tersebut disebut sebagai *wake*.

## 2.7. Penelitian Terdahulu

Sebagai referensi untuk mendapatkan hasil yang valid pada penelitian ini, maka dilakukan studi terhadap penelitian terdahulu yang berkaitan. Penelitian yang digunakan sebagai referensi adalah:

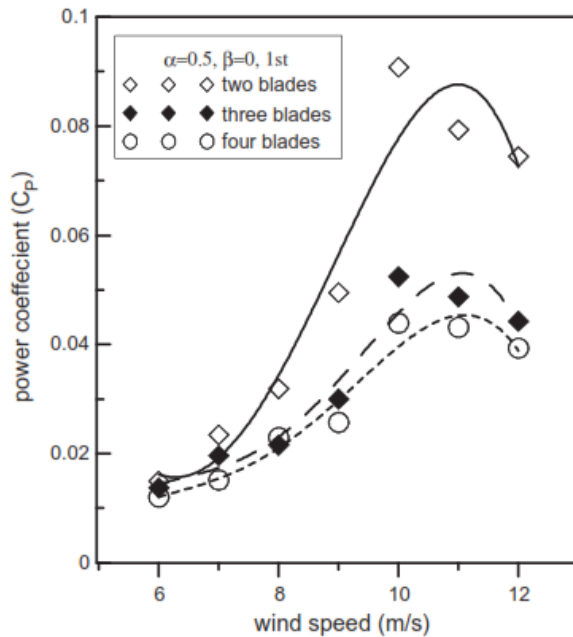
### a. Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius

Pada penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al** (2012), percobaan untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan skema yang ditampilkan pada Gambar 2.8. Variasi yang digunakan pada percobaan ini adalah jumlah *blade*, jumlah *stage* turbin, *aspect ratio* ( $\beta$ ), *aspect ratio* ( $\alpha$ ), dan keberadaan *end plate*. Variasi jumlah *blade* yang digunakan yaitu dua *blade*, tiga *blade*, dan empat *blade*. Variasi *stage* turbin yang digunakan adalah *single stage* dan *double stage*. Variasi *overlap ratio* yang digunakan adalah sebesar 0.00, 0.20, 0.30, dan 0.35 sedangkan variasi *aspect ratio* adalah sebesar 0.5, 1, 2, 4, dan 5.



Gambar 2. 8 Skema Turbin Angin Savonius Single Stage tampak samping (a) dan tampak atas (b) (Mahmoud et al, 2012)

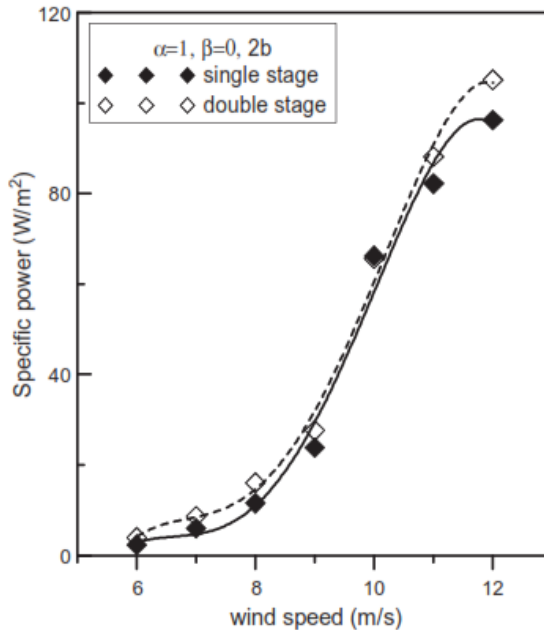
Batasan pada penelitian ini adalah panjang poros 62 cm dan diameter sebesar 14 mm. Seluruh variasi diletakkan di depan *exit wind tunnel* dengan jarak 125 cm dan berhadapan tegak lurus terhadap *centre line*. Diameter *blade* digunakan dengan variasi 0.3, 0.2, 0.1, dan 0.008 m dan *end plate* yang terbuat dari plat kayu setebal 2.5 mm.



Gambar 2. 9 Dampak dari jumlah blade terhadap coefficient of power  
(Mahmoud et al, 2012)

Pada pengujian ini digunakan variasi jumlah *blade* dengan *aspect ratio* sebesar 0.5, *overlap ratio* sebesar 0 dan *single stage rotor*. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa *coefficient of power* tertinggi dimiliki oleh

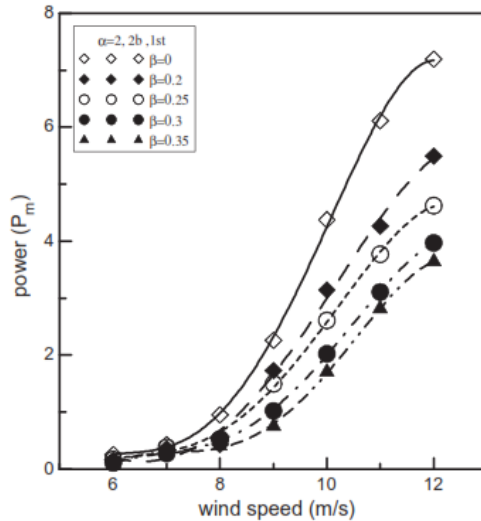
turbin dengan dua *blade*. Adapaun *coefficient of power* tertinggi pada masing-masing *blade* didapati pada kecepatan angin sebesar 10 m/s.



Gambar 2. 10 Dampak dari variasi jumlah stage dan kecepatan angin terhadap specific power (Mahmoud et al, 2012)

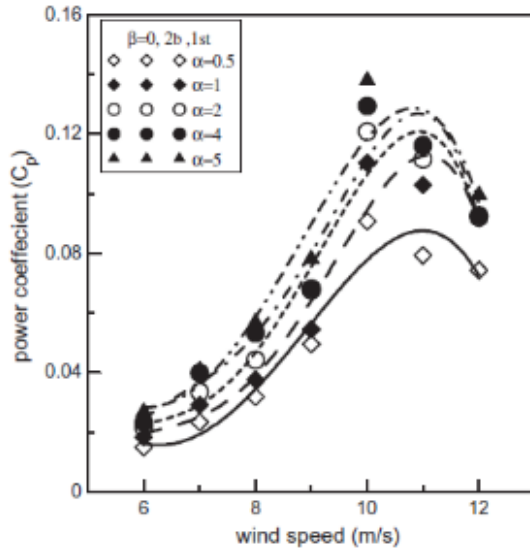
Pada pengujian ini digunakan variasi jumlah *stage* berupa *single* dan *double* dan kecepatan angin dengan rentang sebesar 0 hingga 12 m/s untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *specific power* yang dihasilkan. Gambar 2.10 menunjukkan bahwa turbin *double stage* menghasilkan *specific power* yang lebih besar dibandingkan dengan turbin *single stage*.





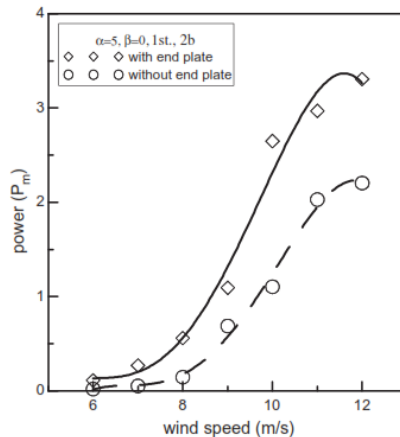
*Gambar 2. 11* Dampak dari variasi *overlap ratio* dan kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin (Mahmoud et al, 2012)

Pada pengujian ini digunakan variasi *overlap ratio* sebesar 0.00, 0.20, 0.25, 0.30, dan 0.35 serta kecepatan angin dengan rentang sebesar 0 hingga 12 m/s untuk mengetahui pengaruhnya terhadap daya yang dihasilkan. Gambar 2.11 menunjukkan bahwa peningkatan *overlap ratio* berbanding terbalik dengan nilai daya yang dihasilkan oleh turbin.



*Gambar 2. 12* Dampak dari variasi *aspect ratio* dan kecepatan angin terhadap *coefficient of power* (Mahmoud et al, 2012)

Pada pengujian ini digunakan variasi *aspect ratio* sebesar 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, dan 5.0 serta kecepatan angin dengan rentang sebesar 0 hingga 12 m/s untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *coefficient of power*. Gambar 2.12 menunjukkan bahwa peningkatan nilai *aspect ratio* berbanding lurus terhadap nilai *coefficient of power* dari turbin.



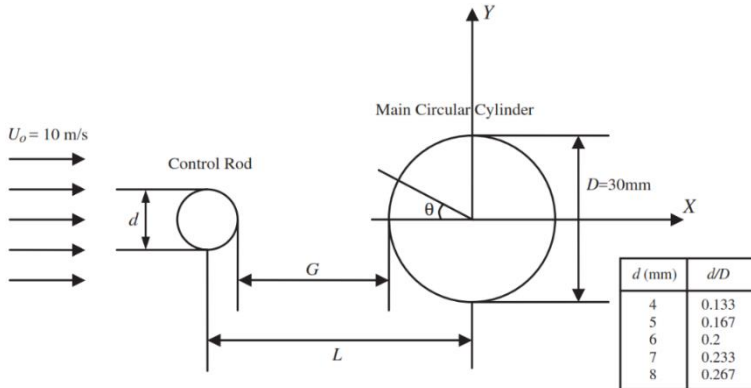
Gambar 2. 13 Dampak dari variasi keberadaan *end plate* dan kecepatan angin terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin (Mahmoud et al, 2012)

Pada pengujian ini digunakan variasi berupa keberadaan *end plate* dan kecepatan angin dengan rentang sebesar 0 hingga 12 m/s untuk mengetahui pengaruhnya terhadap coefficient of power. Gambar 2.13 menunjukkan bahwa turbin yang memiliki *end plate* menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan turbin yang tidak memiliki *end plate*.

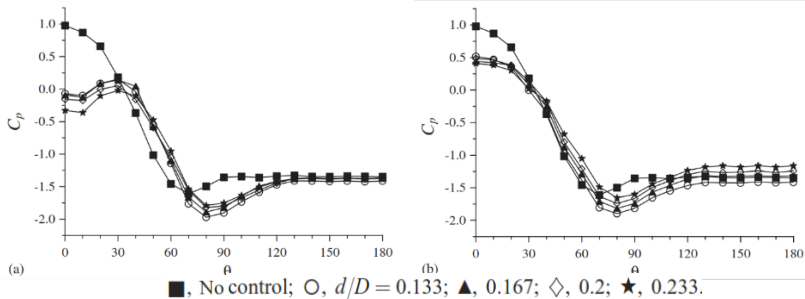
**b. Pengurangan Drag pada Silinder Sirkuler dengan Instalasi Silinder Pengganggu Kecil di Wilayah Aliran Upstream**

Lee et al (2004) melakukan eksperimen pada *wind tunnel* tipe *closed-return* dan area uji  $0.72W \times 0.6H \times 6L$  ( $m^3$ ). Pada penelitian ini digunakan kecepatan angin sebesar 10 m/s, nilai bilangan Reynolds sebesar 20.000,  $0.133 \leq d/D \leq 0.0.267$ , dan  $1.5 \leq L/D \leq 4.0$ .

Geometri dari benda uji ditampilkan pada Gambar 2.14.



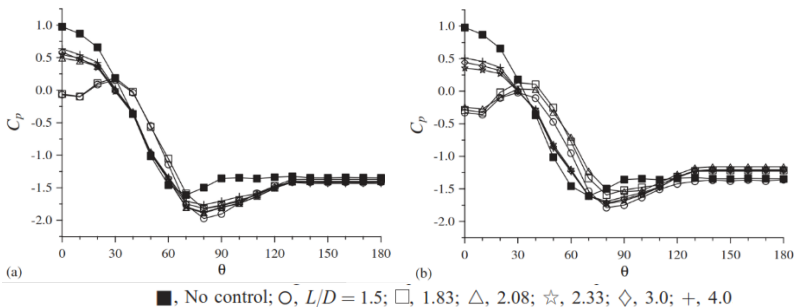
Gambar 2. 14 Geometri benda uji (Lee et al, 2004)



Gambar 2. 15 Pengaruh diameter silinder penghalang terhadap distribusi tekanan pada silinder utama. (a)  $L/D = 1.5$ , (b)  $L/D = 2.17$ . (Lee et al, 2004)

Pada penelitian ini didapati bahwa pada  $L/D = 1.5$  (mode cavity), titik stagnasi mundur dan selisih *pressure coefficient* mengecil. Tekanan maksimum terjadi pada sudut  $30^\circ$  akibat kontak dengan *shear*

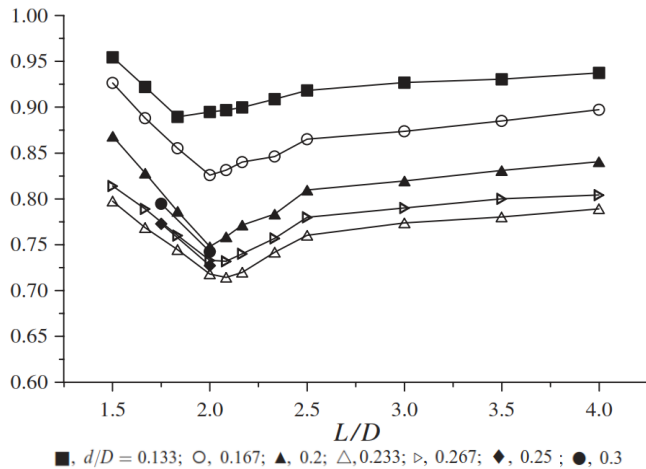
layer. Saat diameter dari silinder pengganggu diperbesar, nilai *pressure coefficient* semakin menurun. Adapun titik separasi dari aliran mundur dari sudut  $70^\circ$  ke  $80^\circ$  pada seluruh  $L/D$  dan  $d/D$ . Fenomena tersebut ditampilkan pada Gambar 2.15 (a). Adapun pada konfigurasi  $L/D = 2.17$  (mode *wake impingement*) yang ditampilkan pada Gambar 2.15 (b), *pressure coefficient* saat stagnasi memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan  $L/D = 1.5$ . Pada penggunaan rasio  $d/D$  yang lebih besar, tekanan pada bagian belakang dari silinder utama lebih besar daripada mode *cavity*. Fenomena ini diduga dampak dari kemunduran titik separasi akibat kontak dengan *vortice* dari silinder pengganggu.



■, No control; ○,  $L/D = 1.5$ ; □, 1.83; △, 2.08; ☆, 2.33; ◇, 3.0; +, 4.0  
**Gambar 2. 16 Dampak dari  $L/D$  terhadap distribusi tekanan di silinder utama. (a)  $d/D = 0.133$ , (b)  $d/D = 0.233$  (Lee et al, 2004)**

Pada analisa dari  $L/D$  terhadap distribusi tekanan di silinder utama (Gambar 2.16), diketahui bahwa tekanan pada titik stagnasi meningkat pada seluruh diameter silinder pengganggu. Distribusi tekanan pada permukaan dapat dibagi menjadi 2 bagian dengan menggunakan *critical pitch ratio* sebagai

dasarnya. Perbedaan mencolok dari distribusi tekanan pada permukaan terlihat signifikan pada bagian depan silinder utama. Sedangkan, bagian belakang silinder utama memiliki pola yang mirip pada seluruh nilai  $L/D$ . Perbedaan pada bagian depan silinder utama ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ) dengan peningkatan nilai  $L/D$  menunjukkan transisi pada pola aliran dari mode *cavity* ke mode *wake impingement*.



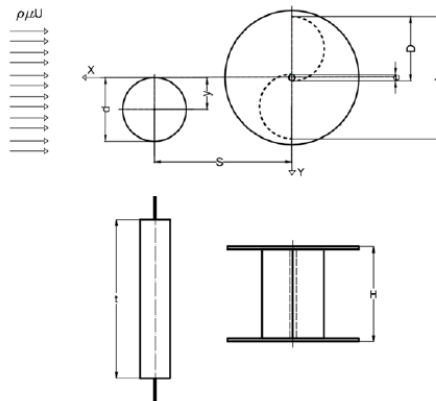
Gambar 2.17 Pengaruh diameter silinder pengganggu ( $d/D$ ) terhadap pengurangan drag pada silinder utama. (Lee et al, 2004)

Pada penelitian ini didapati bahwa keberadaan silinder pengganggu mampu mengurangi *drag* yang terjadi pada silinder utama. Jika dibandingkan dengan keadaan tanpa silinder pengganggu, silinder utama mengalami penurunan *drag coefficient* pada  $d/D = 0.233$  secara signifikan, yaitu 29% pada  $L/D = 2.083$ . Akan tetapi, penambahan nilai  $d/D$  tidak

menghasilkan penurunan *drag* yang lebih signifikan sebagaimana ditampilkan pada gambar 2.17.

**c. Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius**

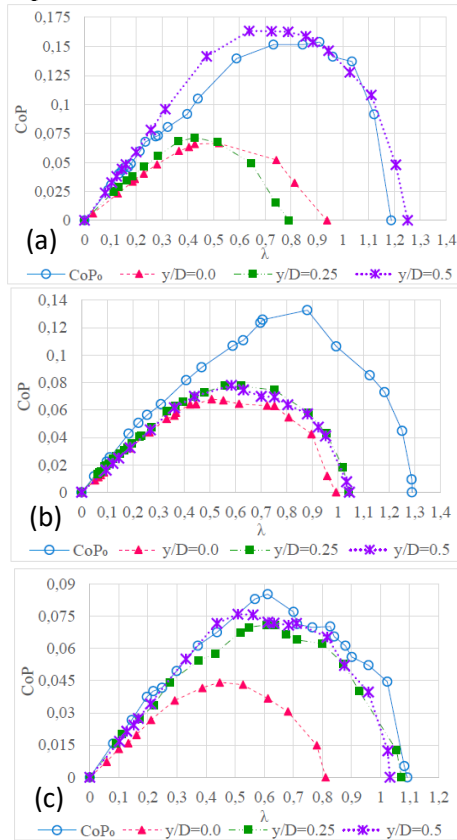
**J. A. Rustam (2018)** melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan diameter ( $d$ ) sebesar 152 mm dan tinggi ( $t$ ) sebesar 400 mm. Turbin angin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dua buah sudu dengan diameter sudu turbin ( $D$ ) sebesar 152,4 mm, tinggi ( $H$ ) sebesar 300,3 mm, diameter poros ( $e$ ) sebesar 19 mm, dan diameter end plate ( $D_0$ ) sebesar 321 mm. Gambar 2.18 menunjukkan skema penelitian yang dilakukan oleh J. A. Rustam.



Gambar 2. 18 Skema Penelitian Pandangan Atas dan Samping (**J. A. Rustam, 2018**)

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jarak  $S/D$  sebesar 2.0 dan rasio diameter silinder dengan diameter

turbin  $d/D$  sebesar 0,5, dengan variasi bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$ ;  $14,5 \times 10^4$ ; dan  $17,8 \times 10^4$ , dan variasi  $y/D = 0,0$ ;  $0,25$ ;  $0,5$ . Berikut ini merupakan beberapa hasil dari penelitian yang didapat dari penelitian ini:

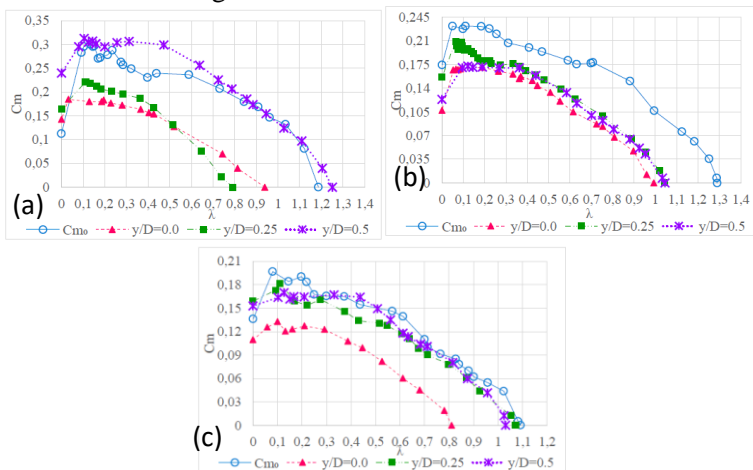


Gambar 2. 19 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR). (a)  $Re = 9.7 \times 10^4$ ; (b)  $Re = 14.5 \times 10^4$ ; (c)  $Re = 17.8 \times 10^4$  (J. A. Rustam, 2018)

Coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada



variasi Reynolds number  $9.7 \times 10^4$ ,  $14.5 \times 10^4$ ,  $17.8 \times 10^4$  ditunjukkan oleh gambar 2.23. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi  $s/D = 2,6$  dan  $y/D = 0.5$  pada  $Re = 9.7 \times 10^4$  memiliki nilai *coefficient of power* maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *coefficient of power* turbin Savonius tanpa penghalang. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.062 kali. Sehingga dapat dikatakan pada variasi jarak  $y/D = 0.5$  untuk ketiga variasi Re diatas efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.



Gambar 2. 20 Grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR). (a)  $Re = 9.7 \times 10^4$ ; (b)  $Re = 14.5 \times 10^4$ ; (c)  $Re = 17.8 \times 10^4$  (J. A. Rustam, 2018)

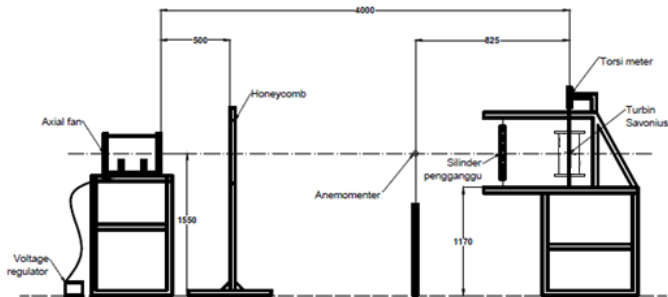
*Coefficient of moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi Reynolds number  $9.7 \times 10^4$ ,  $14.5 \times 10^4$ ,  $17.8 \times 10^4$  ditunjukkan oleh gambar 2.24. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi  $s/D = 2,6$  dan  $y/D = 0.5$  memiliki nilai *coefficient of moment* maksimum yang lebih besar dibandingkan

dengan nilai *coefficient of moment* turbin Savonius tanpa penghalang. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.041 kali. Peningkatan nilai *coefficient of moment* ini mengindikasikan peningkatan nilai torsi dinamis turbin angin Savonius.

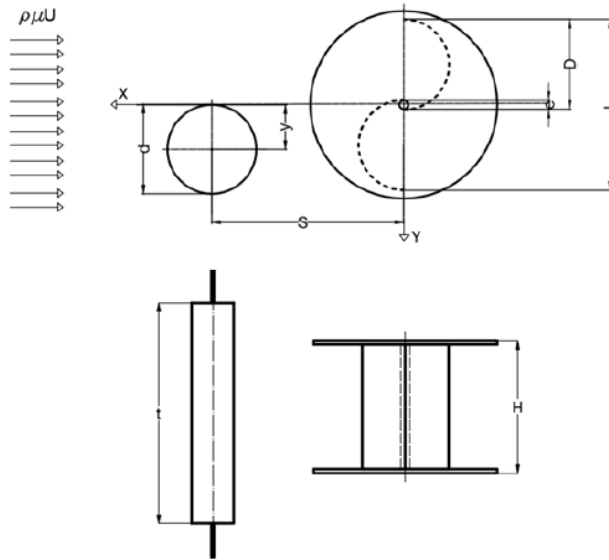
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1. Analisa Parameter

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



*Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius*



*Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur*

Dimana:

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

S/D : 2,6  
 Re : 97.000 dan 136.000

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

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter, yaitu:

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

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

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

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\pi_1$  : *Coefficient of Power*

$\pi_2$  : Bilangan Reynolds

- $\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_4$  : Rasio kecepatan tip
- $\pi_5$  : Rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_6$  : Rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_7$  :  $S/D = 2,6$  dan pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_8$  : Rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin Savonius
- $\pi_9$  : Rasio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu 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,  $\frac{S}{D}, \frac{t}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}$  dan  $\frac{b}{D}$  merupakan variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{n D}{U}$  dan  $\frac{d}{D}$  merupakan variabel yang divariasikan. Sehingga 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  $L = 2D - e - 2t$ , 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:

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

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

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Jumlah parameter ( $n$ ) = 11 parameter, yaitu:

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



2. Menentukan grup dimensi primer yang akan digunakan, yaitu M, L, t
3. Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM

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

4. Memilih *repeating parameter* (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan, yaitu:  $\rho$ , U, D sama dengan 3.
5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan yaitu  $11 - 3 = 8$  grup tak berdimensi.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$\pi_1$  : *Coefficient of Moment*

$\pi_2$  : Bilangan Reynolds

$\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan

diameter turbin Savonius

- $\pi_4$  : S/D = 2,6 dan pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_5$  : Rasio tinggi dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_6$  : *Tip Speed Ratio*
- $\pi_7$  : Rasio ketinggian silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius
- $\pi_8$  : S/D = 2,6 dan titik pusat silinder pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin dengan diameter sudu turbin Savonius

7. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

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

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

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

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

Atau dapat juga ditulis menjadi:

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

### 3.4. Peralatan Penelitian

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

#### 3.4.1. Axial Fan

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



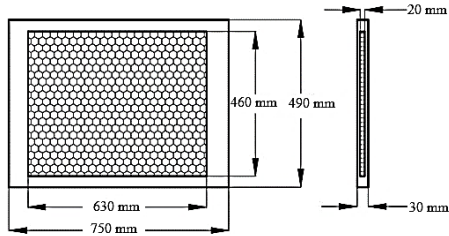
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18

Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18

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

### 3.4.2. Honeycomb

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



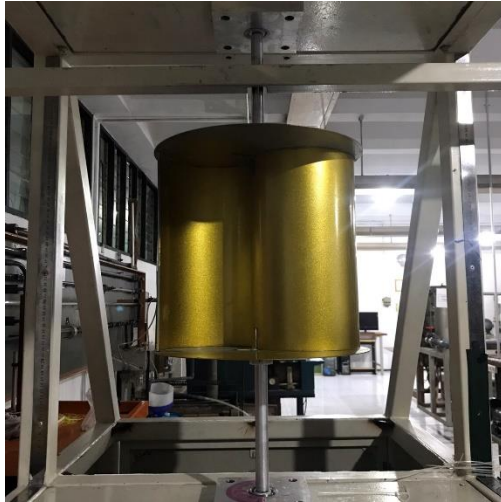
Gambar 3. 4 Honeycomb

Tabel 3. 4 Spesifikasi Honeycomb

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

### 3.4.3. Turbin Angin Savonius

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



Gambar 3. 5 Turbin Savonius

Tabel 3. 5 Spesifikasi turbin Savonius

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

### 3.4.4. 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 2,8 dari diameter turbin. Variasi rasio ( $d/D$ ) pada penelitian ini yaitu 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0.



*Gambar 3. 6 Silinder Pengganggu*

#### **3.4.5. Penyangga Turbin Angin Savonius**

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



*Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Savonius*

### 3.4.6. Alat Ukur

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

#### a) Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari objek yang berputar. Pada penelitian ini menggunakan tachometer tipe *Economical Non-Contact Pocket Optical* Tachometer OMEGA seri HHT12 seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Tachometer

Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12

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

**b) Anemometer**

Anemometer adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin (*airflow velocity*). Pada penelitian ini menggunakan anemometer tipe OMEGA HHH141 Digital Anemometer seperti pada gambar 3.9.



*Gambar 3. 9 Anemometer*



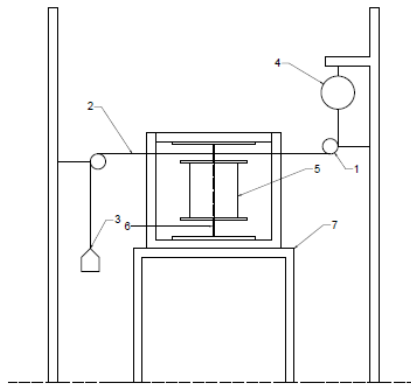
*Tabel 3. 7 Spesifikasi Anemometer OMEGA HH141*

Range	2.75 inch air probe	40 to 7800 ft/min
		0.2 to 40.00 m/sec
	Air Probe AP 100	300 to 40.00 ft/min
		1.5 to 35.00 m/sec
Accuracy	Air Velocity	<b>AP275:</b> $\pm 1.0\%$ of reading $\pm 1$ digit
		<b>AP100:</b> $\pm(0.50\%$ of F.S. $+0.75\%$ of reading $\pm 1$ digit
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/sec	
Operating Temperature	Instrument	0 to 50 C
	Probes	-20 to 100 C
Power Supply	3 AA Alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours without backlight	
Battery Check	Automatic low battery display	
Display	0.5-inch LCD, 4 digits, LED Backlight	

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

c) **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. Ilustrasi dari *brake dynamometer* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3. 10 Brake Dynamometer

Keterangan:

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

#### d) Torquemeter

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 Torquemeter

Tabel 3. 8 Spesifikasi Torque meter LUTRON model TQ-8800

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

**e) Voltage Regulator**

*Voltage regulator* digunakan untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Voltage Regulator* Model TDGC 2J-3 seperti pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Voltage Regulator

Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage Regulator

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

**f) Neraca Pegas**

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



Gambar 3. 13 Neraca Pegas

Tabel 3. 10 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA tipe C-5

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

**g) Massa Pemberat**

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



*Gambar 3. 14 Pemberat*

### **3.5. Prosedur Penelitian**

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

#### **3.5.1. Torsi Dinamis**

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dengan termometer.
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.
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 diameter turbin Savoius 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.
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  $\lambda$  serta bilangan Reynolds, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap  $\lambda$ .

### 3.5.2. Torsi Statis

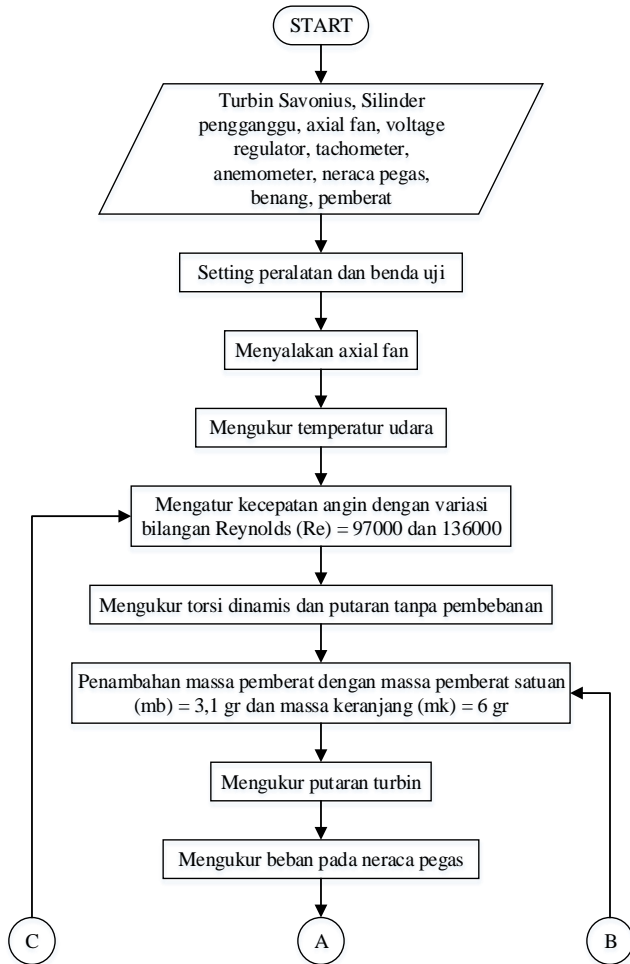
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar  $0^\circ$ .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan menggunakan *voltage regulator* sehingga mendapatkan kecepatan angin sesuai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

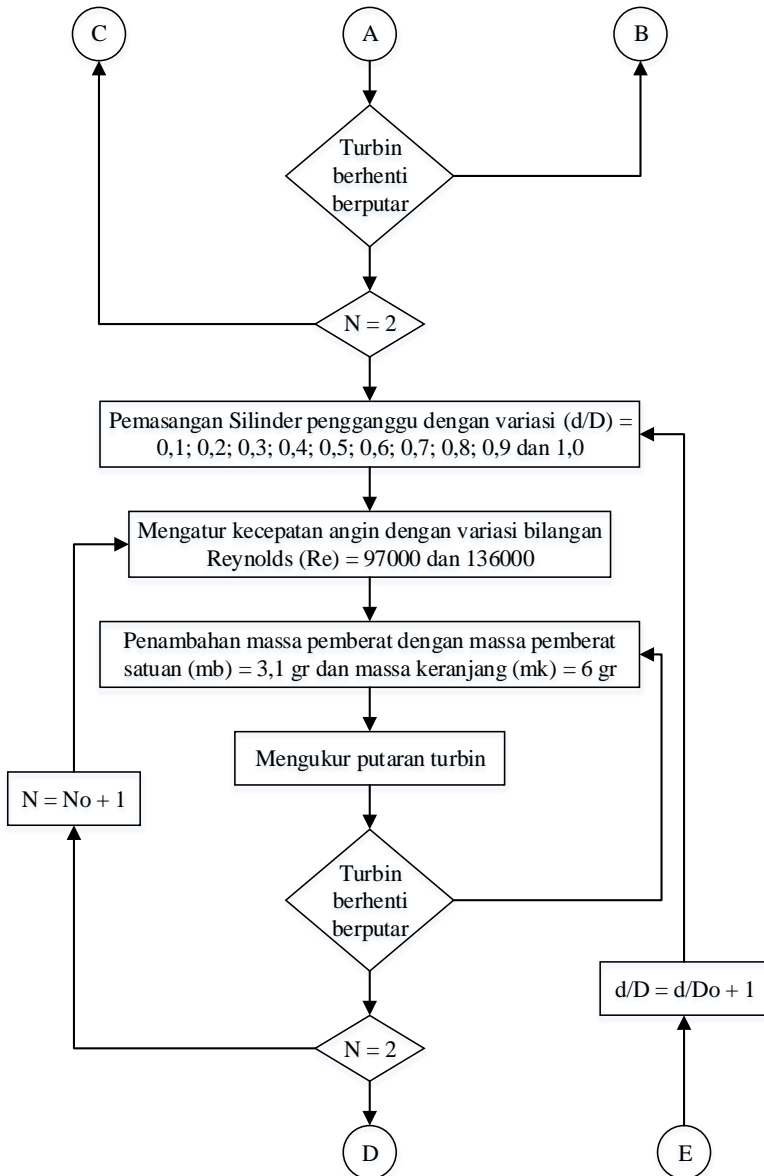


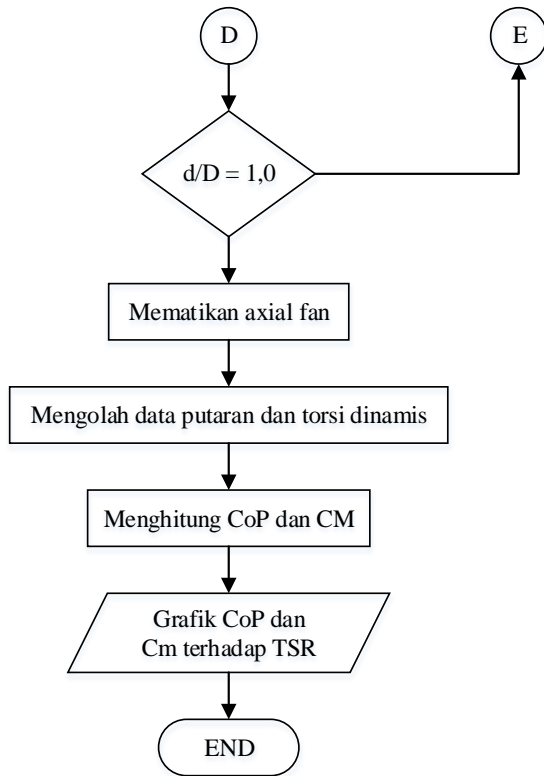
12. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$ .
13. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* dan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.
14. Mematikan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

### 3.6. Flowchart Penelitian

#### 3.6.1. Torsi Dinamis

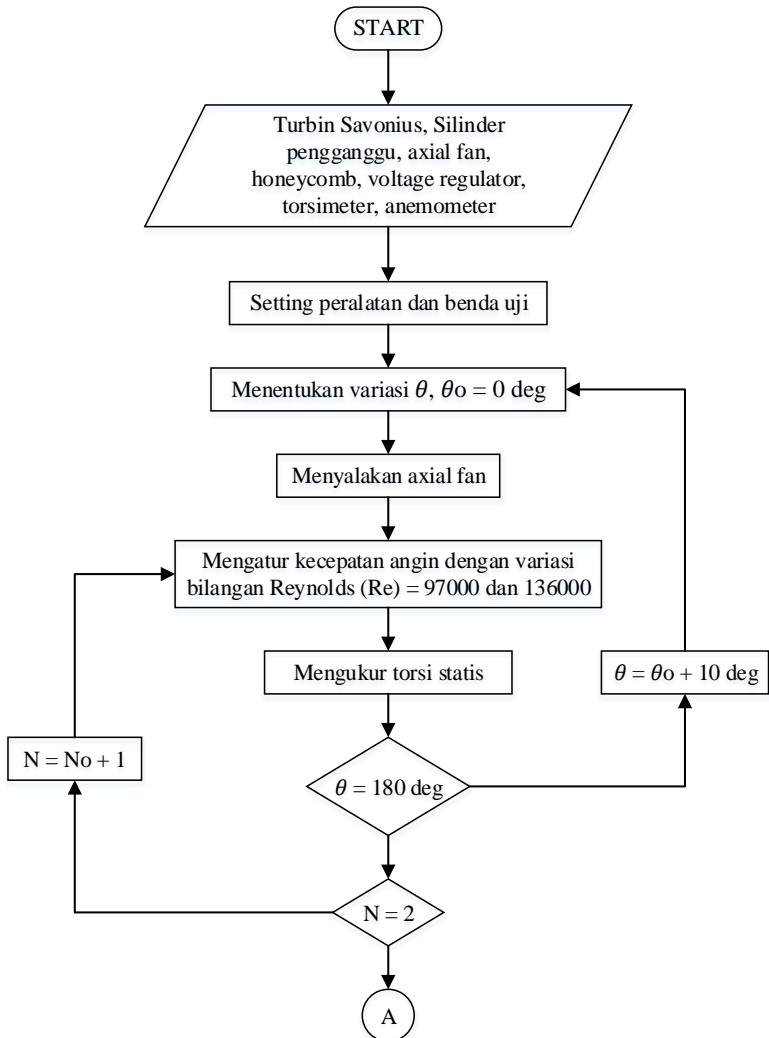


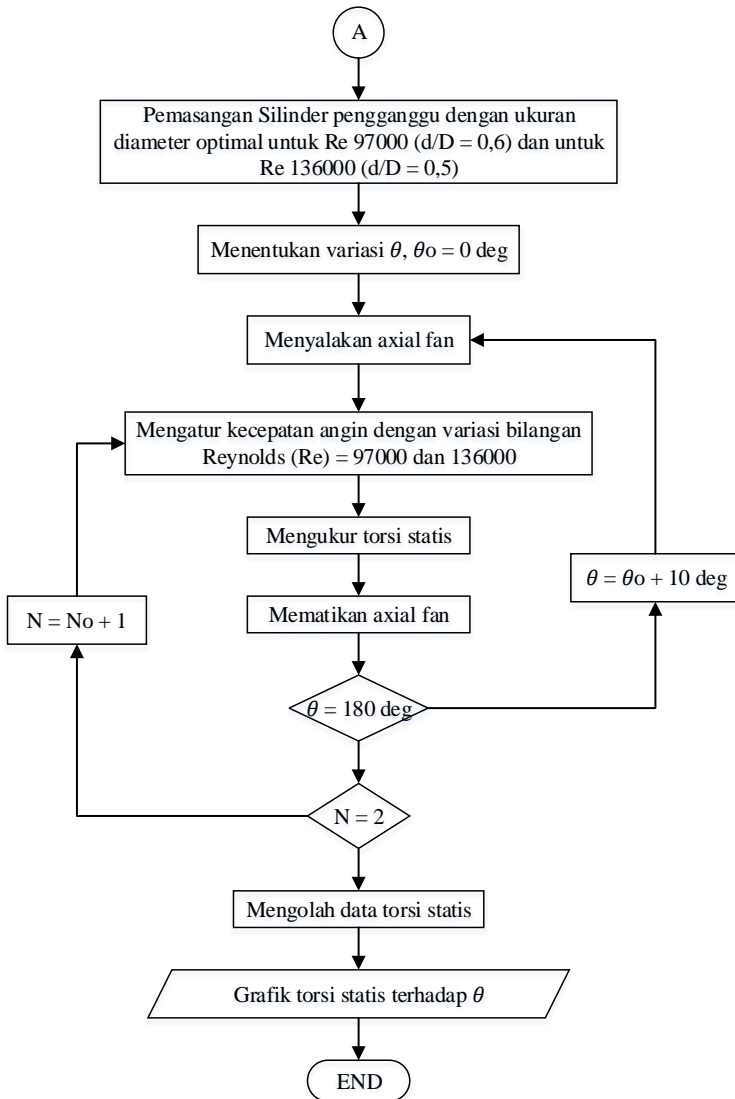




*Gambar 3. 15 Flowchart Torsi Dinamis*

### 3.6.2. Torsi Statis





Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis

### 3.7. Perhitungan Uncertainty

Dilakukan perhitungan *uncertainty* yang bertujuan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan *uncertainty*, diambil dari data *coefficient of power* di titik maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di  $d/D = 0,6$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$ . Berikut ini merupakan contoh perhitungan *uncertainty tip speed ratio* ( $\lambda$ ) pada titik maksimum *coefficient of power*.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{\omega} = \pm \frac{0,1}{28,09} = \pm 3,55 \times 10^{-3}$$

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

$$u_R = \pm \frac{0,5}{154,5} = \pm 3,23 \times 10^{-4}$$

*Uncertainty* pada pembacaan kecepatan (U)

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

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

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

$$u_\lambda = \pm \{ (3,55 \times 10^{-3})^2 + (3,23 \times 10^{-5})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 5,21 \times 10^{-3}$$

$$u_\lambda = \pm 0,52\%$$

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

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (4,74 \times 10^{-2})^2 + (3,55 \times 10^{-3})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2$$

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

$$u_{CoP} = \pm 4,81 \times 10^{-2}$$

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

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



$$u_{CM} = \pm \{ (4,74 \times 10^{-2})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-5})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 4,84 \times 10^{-2}$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

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

$$u_{RE} = \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,61 \times 10^{-5})^2 + (0,00124)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

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

Berikut nilai dari *uncertainty* yang didapatkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada CoP maksimum turbin angin Savonius dengan penempatan silinder pada ukuran diameter  $d/D = 0,6$  dan jarak  $S/D = 2,6$  sebagai berikut.

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<i>Tip Speed Ratio (<math>\lambda</math>)</i>	0,52%
<i>Coefficient of Power (CoP)</i>	4,81%
<i>Coefficient of Moment (<math>C_M</math>)</i>	4,84%
<i>Reynolds Number (Re)</i>	0,45%

### 3.8. Hasil yang Diperoleh

Pada penelitian ini, hasil yang akan diperoleh adalah:

1. Grafik torsi statis ( $T_s$  dan  $T_{s0}$ ) sebagai fungsi sudut ( $\theta$ ).
2. Grafik *Coefficient of Power* ( $CoP$  dan  $CoP_0$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).
3. Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_m$  dan  $C_{m0}$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).
4. Grafik perbandingan antara  $CoP_{max}$  terhadap  $CoP_{0max}$  terhadap variasi  $d/D$  dan  $S/D$ .

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV PEMBAHASAN

### 4.1. Contoh Perhitungan

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

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar ( $P_{std}$ ) =  $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .
2. Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_1$ ) = 288,2 K.
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_1$ ) = 1,225  $\text{kg/m}^3$ .

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

#### 4.1.1. Perhitungan Reynolds Number

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

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

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

Karena  $V = \frac{m}{\rho}$ , maka persamaan 4.2 berubah menjadi:

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

Keadaan 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga  $P_1 = P_2$  dan massa udara pada keadaan 1 dan 2 maka  $m_1 = m_2$ .

Dimana:

$T_2 =$  Temperatur udara saat penelitian = 301,5 K

Berdasarkan batasan tersebut, maka persamaan 4.3 menjadi:

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

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

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

- **Viskositas Udara**

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

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

dimana untuk udara:

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

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

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

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

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

- **Reynolds Number**

Berdasarkan persamaan 2.1, maka kecepatan pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah sebagai berikut:

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

dimana:

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

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

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

#### 4.1.2. Perhitungan Tip Speed Ratio

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

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

dimana:

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

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi (333,2)}{60} = 34,87 \text{ rad/s}$$

R = jari-jari turbin angin Savonius

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

$$\frac{L}{2} = 151,5 \text{ mm} = 0,1546 \text{ m}$$

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

Sehingga didapatkan nilai:

$$\lambda = \frac{34,87 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1546 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,078$$

#### 4.1.3. Perhitungan Coefficient of Power

Persamaan untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) pada bilangan Reynolds  $17,3 \times 10^4$  adalah sebagai berikut:

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

dimana:

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

$$= L.H = 0,309 \text{ m} \times 0,298 \text{ m} = 0,092 \text{ m}^2$$

r = Jari-jari silinder yang menerima beban = 0,0125 m

$\omega$  = Kecepatan sudut turbin angin Savonius

m = beban yang diberikan pada *brake dynamometer*

$$= 6 \text{ g}$$

s = beban yang terbaca pada neraca pegas = 150 g

Sehingga didapatkan nilai CoP:

$$CoP = \frac{\left| \frac{150 - 6}{1000} \right| kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,0125 m \cdot 34,87 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,092 m^2 \cdot \left(5 \frac{m}{s}\right)^3}$$

$$CoP = 0,092$$

#### 4.1.4. Perhitungan Coefficient of Moment

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

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

$$C_M = \frac{|m - s|g r}{T_\infty}$$

dimana:

$$T_\infty = T \quad g = \text{percepatan gravitasi (m/s}^2\text{)}$$

$$s = m \quad = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$= 0, \quad r = \text{jari-jari silinder yang menerima}$$

beban (m)

$$\text{Sehingga di} \quad = 0,0125 \text{ m}$$

$$C_M = \frac{|0,006 - 0,15| \cdot 9,81 \cdot 0,0125}{0,2038} = 0,08$$

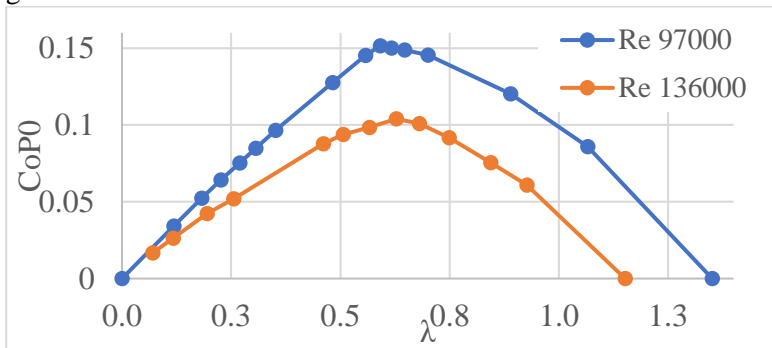
## 4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pengukuran performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bertujuan untuk mengetahui kondisi awal performa turbin angin Savonius yang diuji. Hasil performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini akan dianalisis perbandingan performa turbin angin Savonius dengan

menggunakan silinder pengganggu. Analisis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dilakukan dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s dan 7 m/s sesuai dengan bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Analisis yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan Torsi Statis yang dihasilkan turbin.

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

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



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

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai CoP pada setiap



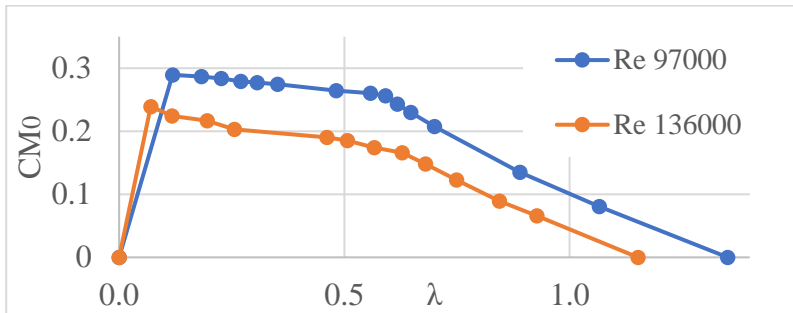
bilangan Reynolds akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR. Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari CoP dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai CoP maksimum yang terjadi adalah sebesar 0,150 pada  $TSR = 0,617$ . Lalu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai CoP maksimum yang terjadi sebesar 0,104 pada  $TSR = 0,627$ . Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa nilai CoP maksimum tertinggi terjadi pada saat bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan nilai CoP maksimum terendah terjadi pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ .

Sudah diketahui bahwa nilai CoP dipengaruhi oleh daya *output* aktual dari turbin angin savonius dan daya *input* dari angin. Daya *output* dipengaruhi oleh torsi dinamis dan putaran sedangkan daya *input* dipengaruhi oleh kecepatan angin. Penurunan CoP dari Re  $9,7 \times 10^4$  menuju  $13,6 \times 10^4$  diakibatkan oleh kecepatan angin yang sangat tinggi sehingga turbin berputar sangat cepat dan seolah membentuk *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai *blade* turbin secara sempurna. Fenomena tersebut membuat daya yang dihasilkan oleh turbin menjadi lebih rendah dibandingkan dengan bilangan Reynolds yang lebih kecil. Penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al (2012) menunjukkan fenomena serupa dimana nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius dengan fungsi kecepatan membentuk kurva parabolik. Hal tersebut membuktikan bahwa semakin tinggi nilai Reynolds tidak selalu menghasilkan nilai *coefficient of power* yang lebih tinggi.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $C_M$  terhadap TSR pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran ini

dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.2.

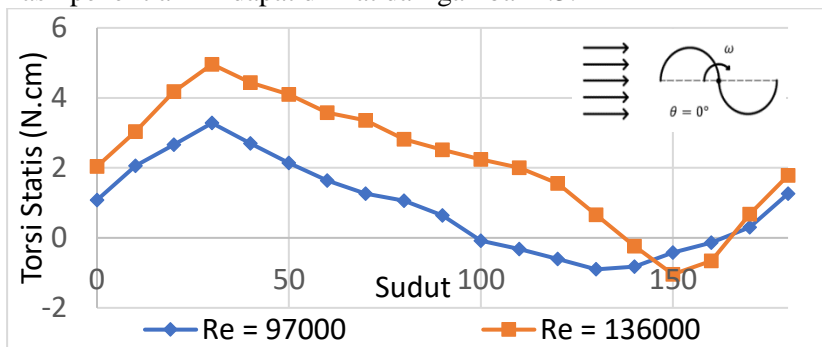


Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment ( $CM_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai  $C_M$  pada setiap bilangan Reynolds akan naik dan relatif turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR. Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari  $C_M$  dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai  $C_M$  maksimum yang terjadi adalah sebesar 0,28955 pada TSR = 0,118. Lalu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai  $C_M$  maksimum yang terjadi sebesar 0,23918 pada TSR = 0,070. Dapat dilihat dari grafik diatas bahwa nilai  $C_M$  maksimal terjadi pada saat bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan nilai  $C_M$  minimal terjadi pada bilangan Reynolds sebesar  $13,6 \times 10^4$ . Data tersebut menunjukkan bahwa bilangan Reynolds mempengaruhi nilai *coefficient of moment* ( $C_M$ ) dari turbin angin Savonius.

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

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



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

Pada gambar 4.3 terlihat bahwa *trendline* grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada setiap bilangan Reynolds. Pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  didapatkan bahwa nilai torsi statis mengalami peningkatan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ . Nilai torsi statis tersebut kemudian menurun hingga sudut  $130^\circ$  pada bilangan  $9,7 \times 10^4$  dan  $150^\circ$  pada bilangan Reynolds sebesar

$13,6 \times 10^4$ . Nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds kemudian mengalami kenaikan hingga sudut  $180^\circ$ . Aliran dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  memiliki torsi statis maksimum pada sudut  $30^\circ$  dengan nilai sebesar  $3,28 \text{ N.cm}$  dan mencapai nilai negatif pada sudut  $100^\circ$  hingga  $160^\circ$  dengan nilai torsi statis minimum sebesar  $-0,9 \text{ N.cm}$  pada sudut  $130^\circ$ . Pada aliran dengan bilangan Reynolds sebesar  $13,6 \times 10^4$  didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar  $4,96 \text{ N.cm}$  pada sudut  $30^\circ$  dan mencapai nilai negatif pada sudut  $140^\circ$  hingga  $160^\circ$  dengan nilai torsi statis minimum sebesar  $-1,04 \text{ N.cm}$  pada sudut  $140^\circ$ . Torsi statis maksimum dan minimum terjadi pada saat bilangan Reynolds sebesar  $13,6 \times 10^4$  karena semakin besar bilangan Reynolds semakin besar pula kecepatan dan gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Berdasarkan data tersebut, didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut  $30^\circ$  dan torsi negatif terbesar pada sudut  $140^\circ$ . Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut  $30^\circ$  sampai dengan sudut  $140^\circ$  dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekat datangnya angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua *blades* akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga. Pada sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$  dan pada sudut  $140^\circ$  sampai  $180^\circ$  terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut

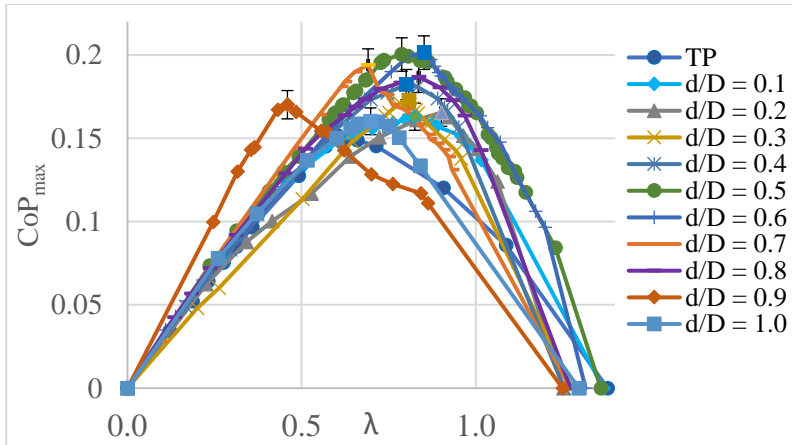
30° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis maksimum.

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

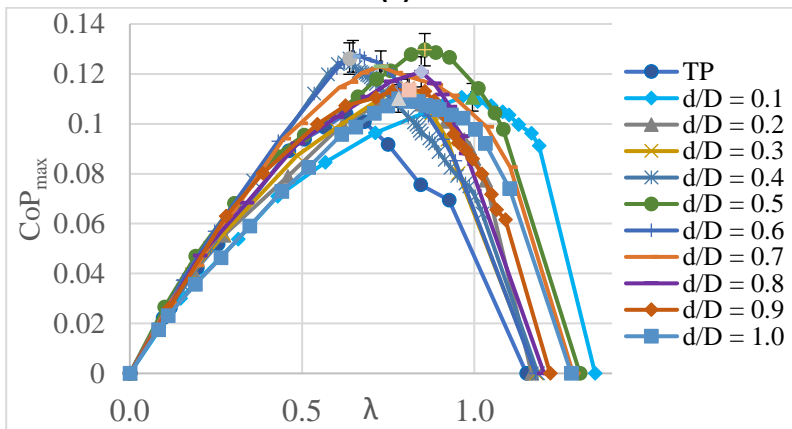
Analisis ini dilakukan dengan peletakan silinder pengganggu di depan *returning* blade turbin angin Savonius. Silinder pengganggu diletakkan pada jarak  $S/D = 2,6$  dan turbin yang digunakan memiliki diameter sudu turbin sebesar  $(d) = 167,1$  mm dengan tinggi  $(h) = 293$  mm. Variasi diameter antara silinder pengganggu terhadap turbin  $(d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$ . Analisis yang dilakukan meliputi *coefficient of power* terhadap TSR, *coefficient of moment* terhadap TSR, dan Torsi Statis yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai CoP terhadap TSR pada bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dengan  $S/D = 2,6$  dengan menggunakan variasi diameter silinder pengganggu sebesar  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$ . Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Pada penelitian dilakukan analisis perbandingan antara performa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu (CoP) dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>). Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.4.



(a)



(b)

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

Pada gambar 4.4 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai CoP akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR. Pada puncak grafik ini akan didapatkan nilai maksimum dari CoP dari turbin angin Savonius pada  $d/D$  optimum. Berikut merupakan setiap titik puncak pada setiap  $S/D$  pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ . Berdasarkan grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pada seluruh  $d/D$ , nilai CoP maksimum lebih tinggi daripada nilai CoP maksimum tanpa silinder pengganggu.

Tabel 4. 1 Perbandingan CoP Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu					
	Re = 97000		Re = 136000		Re = 97000			Re = 136000		
	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>0max</sub>	$\lambda$	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$	▲ CoP <sub>max</sub> (%)	CoP <sub>max</sub>	$\lambda$	▲ CoP <sub>max</sub> (%)
0.1	0.152	0.591	0.104	0.028	0.163	0.825	7.23	0.111	0.995	6.35
0.2					0.1655	0.901	8.87	0.112	0.788	7.98
0.3					0.1728	0.805	13.68	0.114	0.806	9.81
0.4					0.1822	0.8	19.87	0.126	0.637	21.25
0.5					0.2003	0.786	31.78	0.130	0.856	24.71
0.6					0.2014	0.856	32.50	0.127	0.784	22.12
0.7					0.194	0.704	27.63	0.123	0.728	18.27
0.8					0.1869	0.506	22.96	0.121	0.846	16.15
0.9					0.1702	0.506	11.96	0.114	0.81	9.23
1					0.1602	0.689	5.40	0.110	0.78	5.87

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu memiliki nilai *coefficient of power* yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa penghalang, membuktikan bahwa penempatan silinder pengganggu efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Peletakkan silinder pengganggu pada  $S/D = 2,6$  dengan variasi  $d/D = 0,1 - 1,0$  diduga efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga mempercepat transisi dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Dikarenakan aliran turbulen membuat momentum aliran di dekat

dinding *returning blade* meningkat dan dapat menahan gaya gesek dan *adverse pressure gradient*, akibatnya titik separasi pada *returning blade* mundur dan *wake* yang terjadi mengecil. Hal ini menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* menurun yang mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius meningkat. Selain itu, pemberian silinder pengganggu pada  $S/D = 2,6$  dengan variasi  $d/D = 0,1 - 1,0$  diduga efektif menyebabkan tekanan di depan *returning blade* menurun. Hal ini menyebabkan selisih tekanan antara di depan dan di belakang *returning blade* akan menurun sehingga *pressure drag* juga akan menurun. Fenomena ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat sehingga torsi dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius juga meningkat.

Pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dengan  $d/D = 0,6$ , didapati bahwa terjadi peningkatan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 32,50% pada TSR sebesar 0,856. Kemudian pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  dengan  $d/D = 0,5$ , didapati peningkatan nilai *coefficient of power* maksimum sebesar 24,7% pada TSR sebesar 0,856. Fenomena ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Lee et al pada tahun 2004 dimana pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* mampu menurunkan gaya *drag* yang diterima oleh turbin.



Tabel 4. 2 *Uncertainty* nilai *coefficient of power* pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/ D	Bilangan Reynolds			
	97000		136000	
	Uncertaint y	CopMax	Uncertaint y	CopMax
0. 1	0.163 ± 0.0081	0.15488 – 0.17112	0.110 ± 0.0052	0.10530 – 0.11590
0. 2	0.165 ± 0.0083	0.15662 – 0.17338	0.112 ± 0.0050	0.10721 – 0.11739
0. 3	0.173 ± 0.0083	0.16466 – 0.18134	0.114 ± 0.0052	0.10899 – 0.11941
0. 4	0.182 ± 0.0085	0.17341 – 0.19059	0.126 ± 0.0053	0.12072 – 0.13148
0. 5	0.200 ± 0.0090	0.19098 – 0.20902	0.129 ± 0.0058	0.12388 – 0.13552
0. 6	0.201 ± 0.0097	0.19129 – 0.21071	0.127 ± 0.0054	0.12151 – 0.13249
0. 7	0.192 ± 0.0087	0.18328 – 0.20072	0.123 ± 0.0054	0.11758 – 0.12842
0. 8	0.187 ± 0.0090	0.17799 – 0.19601	0.120 ±0.0054	0.11532 – 0.12628
0. 9	0.170 ± 0.0080	0.16213 – 0.17827	0.113 ± 0.0051	0.10847 – 0.11873
1	0.160 ± 0.0076	0.15253 – 0.16787	0.110 ± 0.0049	0.10512 – 0.11508

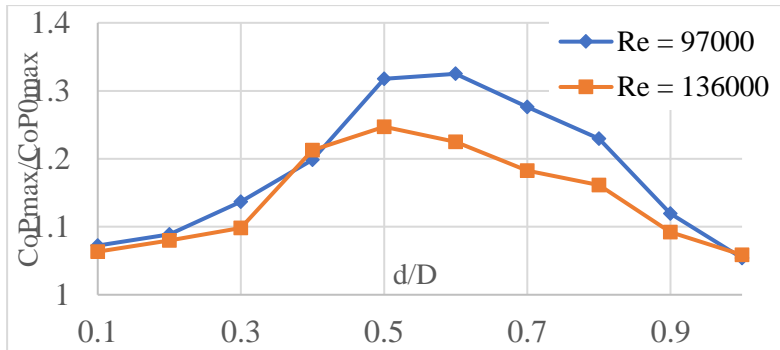
Pada penelitian ini, perhitungan CoP memiliki nilai *uncertainty* seperti yang ditampilkan pada tabel 4.2. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang didapatkan dari ketelitian alat ukur. Nilai *uncertainty* yang telah diolah menghasilkan *range* nilai CoPmax yang menunjukkan batas toleransi nilai CoPmax yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

Nilai  $CoP_{max}$  yang bersinggungan dengan batas toleransi dianggap sama, sehingga tidak perlu diambil datanya pada penelitian berikutnya. Berdasarkan data *uncertainty* tersebut, direkomendasikan bagi penelitian berikut untuk hanya mengambil data  $d/D = 0,3; 0,4; \text{ dan } 0,6$  bagi aliran dengan  $Re = 9,7 \times 10^4$  serta  $d/D = 0,3; 0,5; \text{ dan } 0,7$  bagi aliran dengan  $Re = 13,6 \times 10^4$ .

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

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan antara nilai  $CoP_{max}$  yang dihasilkan dari turbin yang telah diberikan silinder pengganggu terhadap  $CoP_{0max}$  yang dihasilkan oleh turbin tanpa pengganggu. Hasil tersebut ditampilkan pada gambar 4.5.

Berdasarkan gambar 4.5, diketahui bahwa *trendline* grafik tersebut merupakan parabolik dimana nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  akan naik dan kemudian turun seiring dengan meningkatnya diameter silinder pengganggu. Pada aliran dengan  $Re$  sebesar  $9,7 \times 10^4$ , didapati bahwa  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D$  sebesar 0,6, yaitu sebesar 1,325. Angka tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai  $CoP$  turbin savonius dari 0,152 menjadi 0,2014 setelah diberikan silinder pengganggu. Lalu pada aliran dengan  $Re$  sebesar  $13,6 \times 10^4$ , didapati bahwa  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  tertinggi berada pada  $d/D$  sebesar 0,5, yaitu sebesar 1.247. Angka tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai  $CoP$  turbin angin dari 0,104 menjadi 0,129.



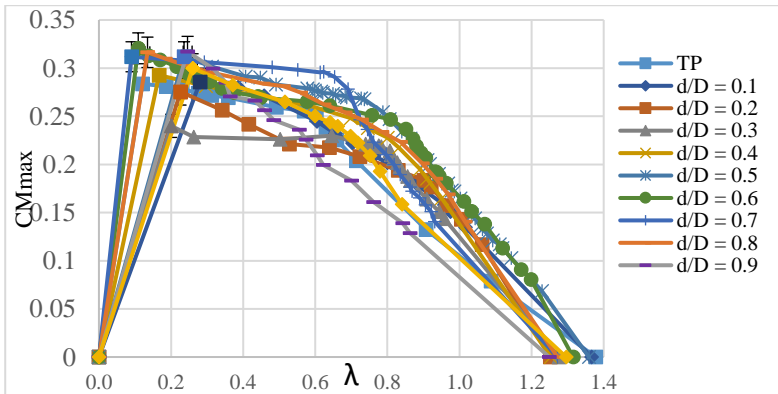
Gambar 4. 5 Perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap variasi  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; \text{ dan } 1,0$

Berdasarkan hasil yang menunjukkan seluruh  $CoP_{\max}/CoP_{0\max} > 1$ , diketahui bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua konfigurasi bilangan Reynolds efektif dalam meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Hal tersebut sesuai dengan hipotesa yang menyatakan bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* mampu menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* meningkat, mengakibatkan peningkatan daya yang dihasilkan oleh turbin. Hasil tersebut juga mendukung hipotesa yang menyatakan bahwa nilai  $d/D$  yang terlalu besar atau kecil akan menyebabkan dampak dari keberadaan silinder pengganggu menjadi tidak signifikan.

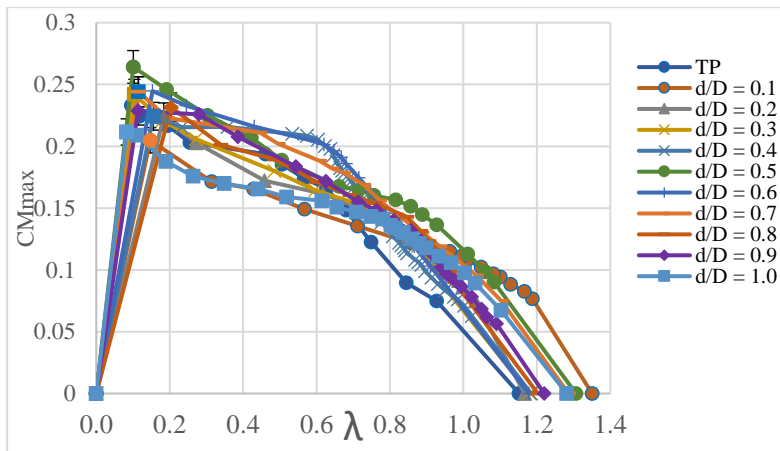
#### 4.3.3. Analisis Nilai Coefficient of Moment ( $C_M$ ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Pada penelitian ini didapatkan nilai  $C_M$  terhadap TSR pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran  $C_M$  turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan  $S/D = 2,6$  dengan menggunakan variasi diameter silinder pengganggu sebesar  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$ . Pengukuran torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan alat ukur *brake dynamometer* dan kecepatan sudut turbin diukur dengan *tachometer*. Pada penelitian dilakukan analisis perbandingan antara performa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ). Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.6 dan 4.7.

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa *trendline* kedua grafik tersebut memiliki kecenderungan untuk mencapai titik puncak lalu kemudian menurun seiring dengan bertambahnya nilai TSR. *Coefficient of Moment* maksimum didapatkan ketika torsi dinamis mencapai titik maksimum, yaitu ketika turbin akan berhenti berputar. Data dari *coefficient of moment* maksimum pada seluruh variasi  $d/D$  di aliran dengan bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  ditampilkan pada tabel 4.2.



(a)



(b)

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

Tabel 4. 3 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				Dengan Silinder Pengganggu					
	Re = 97000		Re = 136000		Re = 97000			Re = 136000		
	$CM_{0max}$	$\lambda$	$CM_{0max}$	$\lambda$	$CM_{Max}$	$\lambda$	Peningkatan (%)	$CM_{Max}$	$\lambda$	Peningkatan (%)
0.1	0.28	0.591	0.224	0.117	0.2856	0.28	2.00	0.2243	0.995	0.13
0.2					0.2995	0.226	6.96	0.23	0.788	2.68
0.3					0.3002	0.2	7.21	0.242	0.806	8.04
0.4					0.308	0.8	10.00	0.244	0.637	8.93
0.5					0.3117	0.235	11.32	0.2461	0.856	9.87
0.6					0.3199	0.179	14.25	0.2447	0.784	9.24
0.7					0.3178	0.704	13.50	0.2441	0.728	8.97
0.8					0.3172	0.506	13.29	0.2316	0.846	3.39
0.9					0.306	0.506	9.29	0.2286	0.81	2.05
1					0.299	0.689	6.79	0.228	0.78	1.79

Tabel 4,2 menunjukkan bahwa nilai  $CM_{max}$  pada seluruh variasi  $d/D$  memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan  $CM_{0max}$  pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada

aliran dengan bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$ , didapati bahwa terjadi peningkatan maksimum sebesar 14,25% pada  $d/D$  sebesar 0,6. Lalu pada aliran dengan bilangan Reynolds sebesar  $13,6 \times 10^4$ , terjadi peningkatan sebesar 9,87% pada  $d/D$  sebesar 0,5. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan silinder pengganggu efektif meningkatkan nilai dari *coefficient of moment* turbin angin Savonius.

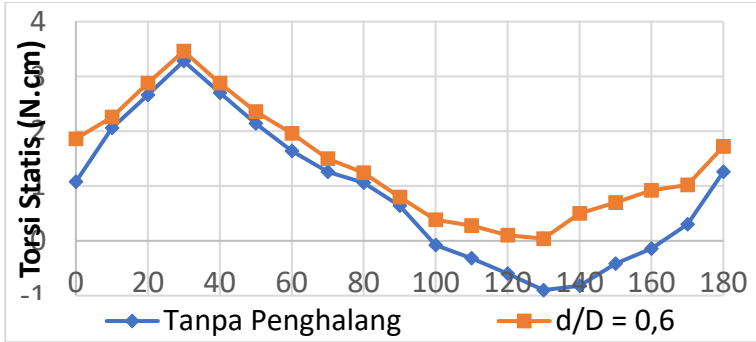
Tabel 4. 4 *Uncertainty* nilai *coefficient of moment* pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$

d/ D	Bilangan Reynolds			
	97000		136000	
	Uncertaint y	Cmmax	Uncertaint y	Cmmax
0.	0.286 ±	0.27129 –	0.224 ±	0.21351 –
1	0.0143	0.29990	0.0108	0.23509
0.	0.299 ±	0.28419 –	0.230 ±	0.21951 –
2	0.0153	0.31480	0.0105	0.24049
0.	0.300 ±	0.28565 –	0.242 ±	0.23092 –
3	0.0145	0.31476	0.0111	0.25308
0.	0.308 ±	0.29315 –	0.244 ±	0.23351 –
4	0.0148	0.32284	0.0105	0.25449
0.	0.311 ±	0.29754 –	0.246 ±	0.23500 –
5	0.0141	0.32585	0.0111	0.25720
0.	0.319 ±	0.30425 –	0.244 ±	0.23406 –
6	0.0146	0.33554	0.0106	0.25534
0.	0.317 ±	0.30324 –	0.244 ±	0.23326 –
7	0.0145	0.33235	0.0108	0.25494
0.	0.317 ±	0.30181 –	0.231 ±	0.22104 –
8	0.0153	0.33258	0.0106	0.24216
0.	0.306 ±	0.29134 –	0.228 ±	0.21822 –
9	0.0146	0.32065	0.0104	0.23898
1	0.299 ±	0.28455 –	0.228 ±	0.21765 –
	0.0144	0.31344	0.0104	0.23835

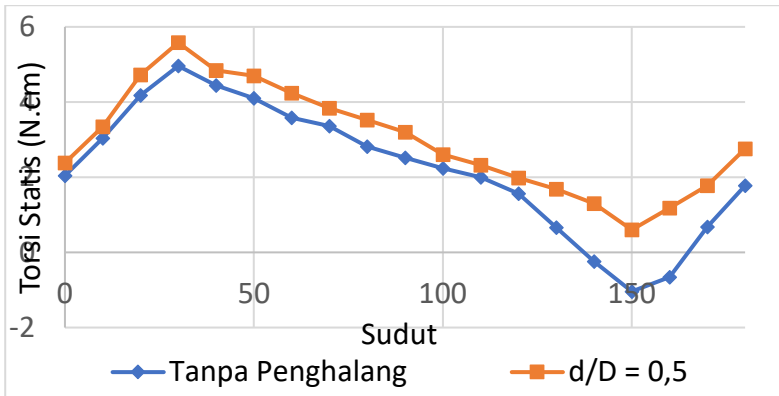
Pada penelitian ini, perhitungan CM memiliki nilai *uncertainty* seperti yang ditampilkan pada tabel 4.2. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang didapatkan dari ketelitian alat ukur. Nilai *uncertainty* yang telah diolah menghasilkan *range* nilai CoPmax yang menunjukkan batas toleransi nilai CMmax yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Nilai CMmax yang bersinggungan dengan batas toleransi dianggap sama, sehingga tidak perlu diambil datanya pada penelitian berikutnya. Berdasarkan data *uncertainty* tersebut, direkomendasikan bagi penelitian berikut untuk hanya mengambil data  $d/D = 0,3; 0,4; \text{ dan } 0,6$  bagi aliran dengan  $Re = 9,7 \times 10^4$  serta  $d/D = 0,3; 0,5; \text{ dan } 0,7$  bagi aliran dengan  $Re = 13,6 \times 10^4$ .

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi statis terhadap sudut ( $\theta$ ) pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Pengukuran Ts turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* pada  $S/D = 2,6$  dengan diameter  $d/D = 0,6$  dan  $0,5$ . Pada penelitian dilakukan analisis perbandingan antara torsi statis turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu (Ts) dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $Ts_0$ ). Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur *torque meter* untuk mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius. Pengambilan data torsi statis ini dilakukan saat kondisi turbin angin Savonius diam yang kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds tertentu. Pengukuran ini dilakukan pada turbin angin Savonius berada pada sudut  $0^\circ$  searah dengan aliran udara hingga  $180^\circ$  dengan kenaikan sebesar  $10^\circ$ . Data hasil penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4. 7 Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder penghalang ( $T_s$ ) dan tanpa silinder penghalang ( $T_{s_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\lambda$ ) dengan  $S/D = 2,6$ ;  $d/D = 0,6$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$



Gambar 4. 8 Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder penghalang ( $T_s$ ) dan tanpa silinder penghalang ( $T_{s_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\lambda$ ) dengan  $S/D = 2,6$ ;  $d/D = 0,5$ ; pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada gambar 4.7 dan 4.8 dapat dilihat bahwa *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Gambar 4.7 menunjukkan nilai torsi



statis pada aliran dengan bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  pada  $d/D$  sebesar 0,6 yang efektif meningkatkan nilai torsi statis maksimum dari 3,28 N.cm menjadi 3,42 N.cm pada sudut  $30^\circ$  dan torsi statis minimum dari -0,91 N.cm menjadi 0,04 N.cm pada sudut  $130^\circ$ . Gambar 4.8 menunjukkan nilai torsi statis pada aliran dengan bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  pada  $d/D$  sebesar 0,5 yang efektif meningkatkan nilai torsi statis maksimum dari 4,96 N.cm menjadi 5,58 N.cm pada sudut  $30^\circ$  dan torsi statis minimum dari -1,04 N.cm menjadi 0,60 N.cm pada sudut  $140^\circ$ .

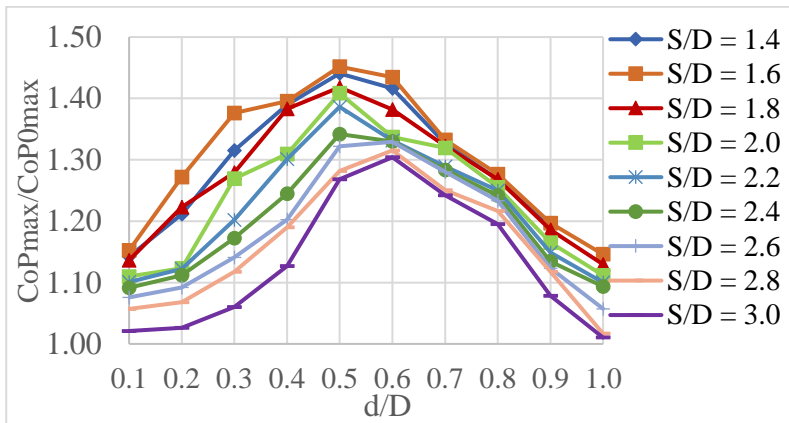
Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu dengan diameter  $d/D$  sebesar 0,5 pada aliran dengan bilangan Reynolds sebesar  $9,7 \times 10^4$  dan  $d/D$  sebesar 0,5 pada aliran dengan bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  efektif meningkatkan nilai torsi statis maksimum dan minimum dari turbin angin Savonius. Gambar 4.8 juga menunjukkan bahwa seluruh torsi statis pada turbin yang telah ditambahkan silinder pengganggu bernilai positif. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin angin Savonius yang telah diberikan silinder pengganggu memiliki kemampuan *self-starting* pada seluruh sudutnya.

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

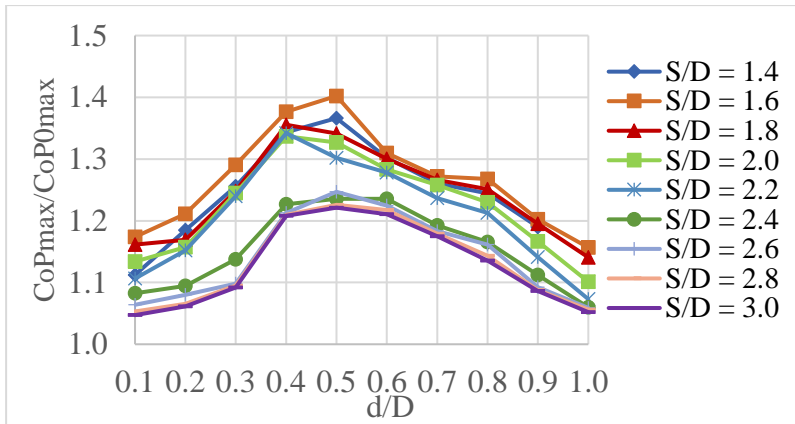
Pada penelitian ini didapatkan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap  $d/D$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$  dengan data yang didapatkan dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Muhammad Rizky Ramadhan ( $S/D = 1,6$ ), Markus Sarsanto ( $S/D = 1,8$ ), Muhammad Ghuyats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

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

Berdasarkan gambar 4.9 dan 4.10, diketahui bahwa pada setiap bilangan Reynolds mempunyai  $CoP$  maksimum pada  $S/D = 1,6$  dengan diameter silinder pengganggu sebesar  $d/D = 0,5$  yang menghasilkan peningkatan sebesar 45,17% pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan 40,21% pada  $Re = 13,6 \times 10^4$ .



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



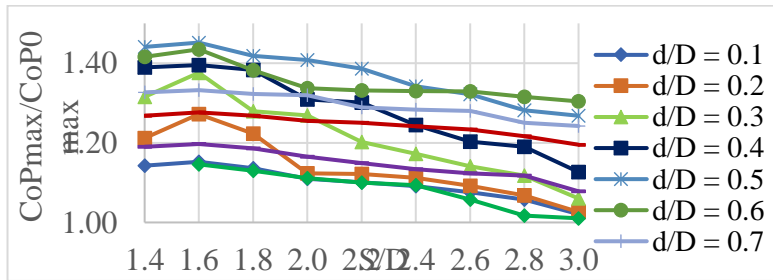
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap  $d/D = 0,1 - 1,0$  pada  $Re = 13,6 \times 10^4$

Pada penelitian ini didapati bahwa penambahan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds efektif meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang dibuktikan dengan seluruh nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} \geq 1$ . Berdasarkan gambar 4.9 juga dapat disimpulkan bahwa semakin jauh jarak antara *returning blade* terhadap silinder pengganggu ( $S/D$ ) akan berpengaruh terhadap selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade*. Dari analisis ini didapatkan bahwa penempatan jarak ( $S/D$ ) paling efektif untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah pada  $S/D = 1,6$ .

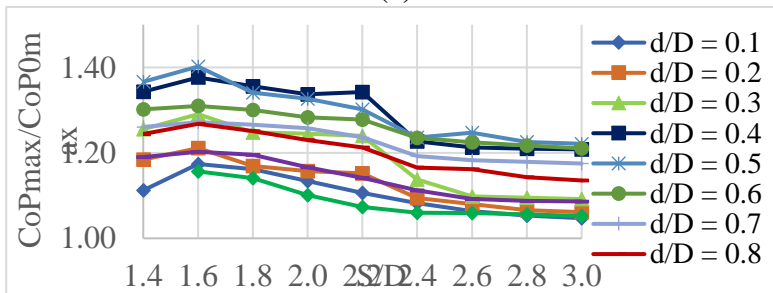
Gambar 4.9 dan 4.10 juga menunjukkan bahwa hipotesa yang mengatakan  $d/D$  terlalu kecil atau terlalu besar tidak memberikan dampak yang signifikan, dibuktikan dengan grafik  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  terhadap  $d/D$  yang berbentuk parabolik.

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

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



(a)



(b)

Gambar 4. 11 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) terhadap variasi  $S/D$  di  $d/D = 0,1$  s.d  $1,0$  pada (a)  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan (b)  $Re = 13,6 \times 10^4$

Dari gambar 4.11 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk parabolik dengan peningkatan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  pada  $S/D = 1,4$  hingga  $1,6$  dan kemudian terjadi penurunan hingga  $S/D = 3,0$ . *Trendline* menurun yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11 membuktikan bahwa semakin besar nilai  $S/D$ , maka akan semakin sedikit dampak yang diberikan pada performa turbin tersebut. Pernyataan tersebut didukung oleh penelitian yang telah dilakukan oleh Lee et al (2004).

Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius, dibuktikan dengan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max} \geq 1$  pada seluruh kombinasi  $S/D$  dan  $d/D$  dengan performa maksimum yang ditunjukkan pada konfigurasi  $S/D$  sebesar  $1,6$  dan  $d/D$  sebesar  $0,5$ .

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan pada penelitian pengaruh penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada  $S/D = 2,6$  dan  $y/D = 0,5$  dengan variasi  $(d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$  yang dilakukan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ , didapatkan kesimpulan berupa:

1. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds pada seluruh variasi  $d/D$ . Peningkatan nilai *coefficient of power* tertinggi pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  terletak pada  $d/D = 0,6$  dengan peningkatan sebesar 32,57% dan pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  terletak pada  $d/D = 0,5$  dengan peningkatan sebesar 24,71%.
2. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment* maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds pada seluruh variasi  $d/D$ . Peningkatan nilai *coefficient of moment* tertinggi pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  terletak pada  $d/D = 0,6$  dengan peningkatan sebesar 14,25% dan pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  terletak pada  $d/D = 0,5$  dengan peningkatan sebesar 9,24%.
3. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dari turbin angin Savonius pada  $d/D = 0,5$  efektif meningkatkan nilai torsi statis hingga turbin memiliki kemampuan *self-starting* di kedua bilangan Reynolds.
4. Diameter silinder pengganggu paling optimum meningkatkan performa turbin angin Savonius adalah  $d/D = 0,6$  untuk  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $d/D = 0,5$  untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$  dengan peningkatan nilai maksimum dari

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

5. Perbandingan terhadap penelitian serupa dengan variasi S/D sebesar 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; dan 3,0 menunjukkan bahwa konfigurasi S/D sebesar 1,6 dengan d/D sebesar 0,5 menghasilkan peningkatan performa maksimum sebesar 45.17% pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ .

## 5.2. Saran

Beberapa saran yang diberikan terhadap penelitian yang telah dilakukan adalah:

1. Melakukan pengambilan data pada  $d/D = 0,3; 0,4; \text{ dan } 0,6$  bagi aliran dengan  $Re = 9,7 \times 10^4$  serta  $d/D = 0,3; 0,5; \text{ dan } 0,7$  bagi aliran dengan  $Re = 13,6 \times 10^4$  untuk penelitian berikutnya.
2. Melakukan pengambilan data pada Melakukan pembersihan *bearing* sebelum dan setelah pengambilan data untuk mencegah terjadinya pengendapan pelumas yang menyebabkan putaran turbin angin Savonius terhambat.
3. Melakukan pengukuran kecepatan angin setiap kali melakukan penggantian penghalang untuk menjaga kecepatan angin yang konstan.
4. Mengganti benang pada *brake dynamometer* secara berkala untuk mencegah pemelaran pada benang yang menyebabkan data yang diambil tidak akurat.



## DAFTAR PUSTAKA

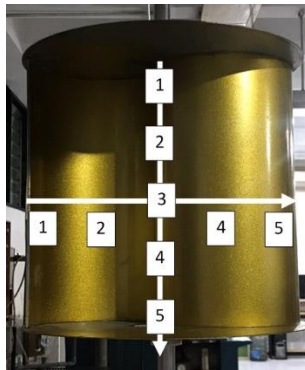
- Atlas, G. W. (2019, 10). *Global Wind Atlas*. Diambil kembali dari Global Wind Atlas: <http://www.globalwindatlas.org>
- BPPT. (2018). *BPPT Outlook Energi Indonesia 2018*.
- ESDM, K. E. (2016). *Indonesia Energy Outlook 2016*.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. "Introduction to Fluid Mechanics". 8th penyunt. USA: John Willey & Sons Inc..
- Lee, S.-J., Lee, S.-I., & Park, C.-W. (2004). Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of a Small Control Rod. *Fluid Dynamics Research* 34, 233-250.
- Mahmoud, N. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 19-25.
- Pritchard, P. (2011). *Fox and McDonalds's Introduction to Fluid Mechanics (eight)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rustam, J. (2018). Studi Eskperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

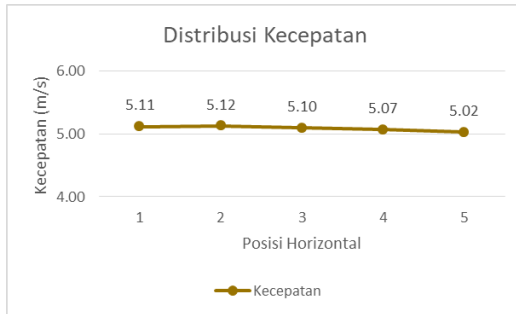
## LAMPIRAN

### 1. Uniformity Flow Test

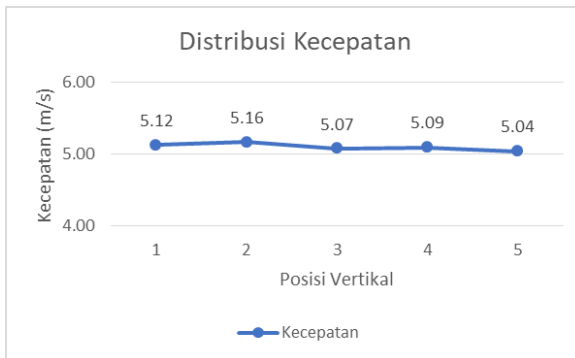
Uji *uniformity test* bertujuan untuk melihat keseragaman aliran pada titik-titik tertentu, keseragaman aliran dibutuhkan dalam penelitian ini agar didapatkan hasil yang ideal. Dalam penelitian ini digunakan *honeycomb* yang berfungsi sebagai penyeragam aliran karena penelitian dilakukan pada kondisi terbuka. *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).



Gambar A. 1 Posisi titik pengambilan uniformity test



Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal



Gambar A. 3 Grafik distribusi kecepatan vertikal

Tabel A. 1 Data keseragaman kecepatan angin

Data	(Horizontal)					(Vertikal)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>Kec. 5 m/s</b>										
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
<b>Rata-rata tiap titik</b>	5.11	5.12	5.10	5.07	5.02	5.12	5.16	5.07	5.09	5.04
<b>Rata-rata semua data</b>	5.08					5.10				
<b>SD Sampel</b>	0.11					0.15				
<b>Batas bawah</b>	4.89					4.82				
<b>Batas atas</b>	5.33					5.50				

## 2. Tanpa Silinder Pengganggu

Tabel B. 1 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	no (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	5	426	44.588	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,378	0	0	0
28,5	5	336.1	35.178	6	140	0,0125	0,092	1,17	1,087	0.01643	0.08592	0.07904
28,5	5	280.38	29.346	15.3	240	0,0125	0,092	1,17	0.907	0.02755	0.12019	0.13255
28,5	5	220.74	23.104	24.6	370	0,0125	0,092	1,17	0.714	0.04235	0.14546	0.20375
28,5	5	203.98	21.350	27.7	410	0,0125	0,092	1,17	0.660	0.04688	0.14877	0.22551
28,5	5	194.6	20.368	30.8	435	0,0125	0,092	1,17	0.629	0.04957	0.15006	0.23843
28,5	5	186.4	19.510	33.9	460	0,0125	0,092	1,17	0.603	0.05225	0.15153	0.25135
28,5	5	175.86	18.407	37	470	0,0125	0,092	1,17	0.569	0.0531	0.14527	0.25542
28,5	5	151.96	15.905	40.1	480	0,0125	0,092	1,17	0.491	0.05394	0.12753	0.25949
28,5	5	110.84	11.601	43.2	500	0,0125	0,092	1,17	0.358	0.05602	0.0966	0.26946
28,5	5	96.58	10.109	49.4	510	0,0125	0,092	1,17	0.312	0.05648	0.08487	0.2717
28,5	5	85.06	8.903	55.6	520	0,0125	0,092	1,17	0.275	0.05695	0.07536	0.27394
28,5	5	71.4	7.473	68	540	0,0125	0,092	1,17	0.231	0.05788	0.06429	0.27843
28,5	5	57.5	6.018	83.5	560	0,0125	0,092	1,17	0.186	0.05843	0.05227	0.28108
28,5	5	37.36	3.910	99	580	0,0125	0,092	1,17	0.121	0.05898	0.03428	0.28373
28,5	5	0	0.000	130	560	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.05273	0	0

Tabel B. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	no (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP <sub>0</sub>	Cm <sub>0</sub>
28,5	7	508.4	53.213	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.174	0	0	0
28,5	7	409.2	42.830	6	220	0,0125	0,092	1,17	0.945	0.02624	0.06088	0.06441
28,5	7	372.66	39.005	18.4	310	0,0125	0,092	1,17	0.861	0.03576	0.07555	0.08776
28,5	7	330.54	34.597	30.8	430	0,0125	0,092	1,17	0.764	0.04895	0.09174	0.12014
28,5	7	300.26	31.427	37	520	0,0125	0,092	1,17	0.694	0.05923	0.10083	0.14536
28,5	7	277.08	29.001	40.1	580	0,0125	0,092	1,17	0.640	0.06621	0.10401	0.16249
28,5	7	249.9	26.156	43.2	610	0,0125	0,092	1,17	0.577	0.0695	0.09848	0.17058
28,5	7	223.6	23.403	46.3	650	0,0125	0,092	1,17	0.517	0.07403	0.09385	0.18169
28,5	7	203.46	21.295	49.4	670	0,0125	0,092	1,17	0.470	0.0761	0.08779	0.18678
28,5	7	112.74	11.800	58.7	720	0,0125	0,092	1,17	0.260	0.08109	0.05184	0.19903
28,5	7	86.14	9.016	74.2	780	0,0125	0,092	1,17	0.199	0.08655	0.04227	0.21242
28,5	7	51.8	5.422	89.7	820	0,0125	0,092	1,17	0.120	0.08955	0.0263	0.21979
28,5	7	30.96	3.240	120.7	900	0,0125	0,092	1,17	0.072	0.09556	0.01677	0.23454
28,5	7	0	0.000	151.7	950	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.09789	0	0

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

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

### 3. Dengan Silinder Pengganggu

Tabel C. 1 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	430.8	45.090	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.366	0	0	0
28.5	5	320.36	33.531	6	230	0.0125	0.092	1.17	1.016	0.02747	0.13691	0.13475
28.5	5	307.34	32.168	9.1	260	0.0125	0.092	1.17	0.975	0.03077	0.14711	0.15093
28.5	5	302.04	31.614	12.2	275	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.03223	0.15143	0.15809
28.5	5	279.94	29.300	15.3	310	0.0125	0.092	1.17	0.888	0.03614	0.15739	0.17728
28.5	5	277.24	29.018	18.4	320	0.0125	0.092	1.17	0.879	0.03698	0.15952	0.18143
28.5	5	260.06	27.220	21.5	350	0.0125	0.092	1.17	0.825	0.04028	0.16298	0.19761
28.5	5	252.02	26.378	24.6	360	0.0125	0.092	1.17	0.799	0.04113	0.16126	0.20176
28.5	5	240.3	25.151	27.7	375	0.0125	0.092	1.17	0.762	0.04259	0.15922	0.20892
28.5	5	221.54	23.188	30.8	400	0.0125	0.092	1.17	0.703	0.04527	0.15604	0.2221
28.5	5	206.38	21.601	33.9	420	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.04735	0.15202	0.23226
28.5	5	190.7	19.960	43.2	450	0.0125	0.092	1.17	0.605	0.04988	0.148	0.24472
28.5	5	144.46	15.120	58.7	510	0.0125	0.092	1.17	0.458	0.05534	0.12438	0.27149
28.5	5	121.74	12.742	74.2	540	0.0125	0.092	1.17	0.386	0.05712	0.10818	0.28021
28.5	5	88.38	9.250	105.2	580	0.0125	0.092	1.17	0.280	0.05822	0.08006	0.28562
28.5	5	0	0.000	151.7	660	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06233	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	394.68	41.310	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.252	0	0	0
28.5	5	334.98	35.061	6	200	0.0125	0.092	1.17	1.062	0.024	0.12398	0.117
28.5	5	316.8	33.158	12.2	250	0.0125	0.092	1.17	1.005	0.02916	0.14372	0.14305
28.5	5	303.8	31.798	18.4	280	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.032	0.15162	0.157
28.5	5	290.4	30.395	21.5	315	0.0125	0.092	1.17	0.921	0.03599	0.16261	0.17656
28.5	5	284.02	29.727	24.6	330	0.0125	0.092	1.17	0.901	0.037	0.16548	0.184
28.5	5	261.68	27.389	27.7	350	0.0125	0.092	1.17	0.830	0.03952	0.1609	0.19388
28.5	5	228.06	23.870	33.9	380	0.0125	0.092	1.17	0.723	0.042	0.15059	0.208
28.5	5	201.48	21.088	43.2	405	0.0125	0.092	1.17	0.639	0.04437	0.13907	0.21765
28.5	5	166.42	17.419	52.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.528	0.045	0.11668	0.221
28.5	5	130.82	13.692	68	470	0.0125	0.092	1.17	0.415	0.0493	0.10033	0.24183
28.5	5	107.8	11.283	83.5	510	0.0125	0.092	1.17	0.342	0.052	0.08771	0.257
28.5	5	71.32	7.465	102.1	560	0.0125	0.092	1.17	0.226	0.05615	0.0623	0.27546
28.5	5	0	0.000	133.1	600	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.057	0	0.000

Tabel C. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	402.3	42.107	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.276	0	0	0
28.5	5	302.08	31.618	6	245	0.0125	0.092	1.17	0.958	0.02931	0.13774	0.14377
28.5	5	297.62	31.151	9.1	260	0.0125	0.092	1.17	0.944	0.03077	0.14246	0.15093
28.5	5	286.66	30.004	12.2	285	0.0125	0.092	1.17	0.909	0.03345	0.14919	0.16411
28.5	5	272.2	28.490	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.03736	0.15823	0.1833
28.5	5	269.82	28.241	18.4	330	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.03821	0.1604	0.18745
28.5	5	263.14	27.542	21.5	350	0.0125	0.092	1.17	0.835	0.04028	0.16491	0.19761
28.5	5	260.86	27.303	24.6	360	0.0125	0.092	1.17	0.827	0.04113	0.16692	0.20176
28.5	5	257.36	26.937	27.7	370	0.0125	0.092	1.17	0.816	0.04197	0.16807	0.20592
28.5	5	255.4	26.732	30.8	380	0.0125	0.092	1.17	0.810	0.04282	0.17015	0.21007
28.5	5	254.52	26.640	33.9	390	0.0125	0.092	1.17	0.807	0.04367	0.17291	0.21422
28.5	5	246.76	25.828	37	400	0.0125	0.092	1.17	0.783	0.04451	0.17089	0.21837
28.5	5	244.52	25.593	40.1	405	0.0125	0.092	1.17	0.775	0.04475	0.17022	0.21951
28.5	5	236.7	24.775	43.2	410	0.0125	0.092	1.17	0.751	0.04498	0.16564	0.22065
28.5	5	233.22	24.410	52.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.740	0.04506	0.16351	0.22108
28.5	5	203.34	21.283	68	450	0.0125	0.092	1.17	0.645	0.04684	0.14819	0.2298
28.5	5	158.34	16.573	99	475	0.0125	0.092	1.17	0.502	0.04611	0.11358	0.22619
28.5	5	82.86	8.673	130	510	0.0125	0.092	1.17	0.263	0.0466	0.06007	0.22859
28.5	5	63.08	6.602	161	560	0.0125	0.092	1.17	0.200	0.04893	0.04802	0.24002
28.5	5	0	0.000	192	680	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.05984	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	395.133	41.357	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.253	0	0	0
28.5	5	299.7	31.369	6	280	0.0125	0.092	1.17	0.950	0.034	0.15666	0.165
28.5	5	289.66	30.318	9.1	310	0.0125	0.092	1.17	0.919	0.0369	0.16628	0.18101
28.5	5	286.88	30.027	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	0.910	0.038	0.16846	0.185
28.5	5	280.68	29.378	15.3	340	0.0125	0.092	1.17	0.890	0.03982	0.17387	0.19553
28.5	5	262.34	27.458	18.4	380	0.0125	0.092	1.17	0.832	0.044	0.18098	0.218
28.5	5	252.36	26.414	21.5	400	0.0125	0.092	1.17	0.800	0.04641	0.18223	0.22769
28.5	5	235.06	24.603	24.6	420	0.0125	0.092	1.17	0.745	0.04849	0.17732	0.23786
28.5	5	220.22	23.050	27.7	440	0.0125	0.092	1.17	0.698	0.05056	0.17322	0.24803
28.5	5	186.2	19.489	37	470	0.0125	0.092	1.17	0.591	0.0531	0.15382	0.26048
28.5	5	93.32	9.767	52.5	520	0.0125	0.092	1.17	0.296	0.057	0.08323	0.281
28.5	5	52.64	5.510	83.5	570	0.0125	0.092	1.17	0.167	0.05966	0.04886	0.29266
28.5	5	0	0.000	114.5	655	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.066	0	0



Tabel C. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	V ( $\text{m/s}$ )	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A ( $\text{m}^2$ )	$\sigma$ ( $\text{kg/m}^2$ )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	428.5	44.850	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.359	0	0	0
28.5	5	387.22	40.529	6	120	0.0125	0.092	1.17	1.228	0.01398	0.08422	0.06858
28.5	5	360.48	37.730	9.1	180	0.0125	0.092	1.17	1.143	0.02096	0.11753	0.10281
28.5	5	352.6	36.905	12.2	200	0.0125	0.092	1.17	1.118	0.02303	0.12633	0.11297
28.5	5	344.28	36.035	18.4	220	0.0125	0.092	1.17	1.092	0.02472	0.13241	0.12128
28.5	5	326.06	34.128	40.1	285	0.0125	0.092	1.17	1.034	0.03003	0.15234	0.14732
28.5	5	316.06	33.081	71.1	345	0.0125	0.092	1.17	1.002	0.03359	0.16516	0.16477
28.5	5	310.76	32.526	74.2	360	0.0125	0.092	1.17	0.986	0.03505	0.16944	0.17193
28.5	5	308.52	32.292	77.3	365	0.0125	0.092	1.17	0.978	0.03528	0.16934	0.17307
28.5	5	305.28	31.953	80.4	380	0.0125	0.092	1.17	0.968	0.03674	0.17449	0.18023
28.5	5	287.2	30.060	89.7	430	0.0125	0.092	1.17	0.911	0.04173	0.18646	0.20471
28.5	5	272.2	28.490	92.8	470	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.04625	0.19588	0.22691
28.5	5	264.86	27.722	95.9	485	0.0125	0.092	1.17	0.840	0.04771	0.19661	0.23407
28.5	5	254.12	26.598	99	510	0.0125	0.092	1.17	0.806	0.0504	0.19926	0.24724
28.5	5	248.28	25.987	102.1	525	0.0125	0.092	1.17	0.787	0.05186	0.20031	0.2544
28.5	5	231.96	24.278	105.2	550	0.0125	0.092	1.17	0.736	0.05454	0.19684	0.26758
28.5	5	229.18	23.988	108.3	555	0.0125	0.092	1.17	0.727	0.05478	0.19531	0.26872
28.5	5	206.66	21.630	117.6	570	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.05548	0.17837	0.27215
28.5	5	204.62	21.417	120.7	575	0.0125	0.092	1.17	0.649	0.05571	0.17735	0.27329
28.5	5	195.6	20.473	123.8	580	0.0125	0.092	1.17	0.620	0.05594	0.17024	0.27443
28.5	5	194.24	20.330	126.9	585	0.0125	0.092	1.17	0.616	0.05617	0.16976	0.27558
28.5	5	188.54	19.734	130	590	0.0125	0.092	1.17	0.598	0.05641	0.16546	0.27672
28.5	5	154.86	16.209	139.3	610	0.0125	0.092	1.17	0.491	0.05772	0.13906	0.28316
28.5	5	141.02	14.760	142.4	625	0.0125	0.092	1.17	0.447	0.05918	0.12984	0.29032
28.5	5	128.08	13.406	145.5	630	0.0125	0.092	1.17	0.406	0.05941	0.11839	0.29146
28.5	5	98.78	10.339	148.6	650	0.0125	0.092	1.17	0.313	0.06148	0.09449	0.30162
28.5	5	74.4	7.787	151.7	670	0.0125	0.092	1.17	0.236	0.06356	0.07357	0.31179
28.5	5	0	0.000	154.8	690	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06563	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	414.68	43.403	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.315	0	0	0
28.5	5	377.88	39.551	6	140	0.0125	0.092	1.17	1.198	0.01643	0.0966	0.08061
28.5	5	369.24	38.647	9.1	160	0.0125	0.092	1.17	1.171	0.0185	0.1063	0.09078
28.5	5	352.86	36.933	12.2	200	0.0125	0.092	1.17	1.119	0.02303	0.12642	0.11297
28.5	5	337.14	35.287	15.3	245	0.0125	0.092	1.17	1.069	0.02817	0.14774	0.13818
28.5	5	325.76	34.096	18.4	270	0.0125	0.092	1.17	1.033	0.03085	0.15637	0.15135
28.5	5	319.1	33.399	21.5	290	0.0125	0.092	1.17	1.012	0.03292	0.16346	0.16152
28.5	5	303.6	31.777	24.6	325	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.03684	0.17399	0.18071
28.5	5	297.4	31.128	27.7	340	0.0125	0.092	1.17	0.943	0.0383	0.17719	0.18787
28.5	5	295.26	30.904	30.8	350	0.0125	0.092	1.17	0.936	0.03914	0.1798	0.19202
28.5	5	293.78	30.749	40.1	360	0.0125	0.092	1.17	0.932	0.03923	0.1793	0.19244
28.5	5	285.7	29.903	71.1	415	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.04217	0.18745	0.20688
28.5	5	283.98	29.723	74.2	420	0.0125	0.092	1.17	0.901	0.0424	0.18735	0.20802
28.5	5	281.44	29.457	77.3	430	0.0125	0.092	1.17	0.893	0.04325	0.18938	0.21217
28.5	5	277.74	29.070	80.4	445	0.0125	0.092	1.17	0.881	0.04471	0.19319	0.21933
28.5	5	274.58	28.739	83.5	460	0.0125	0.092	1.17	0.871	0.04617	0.19723	0.22649
28.5	5	268.38	28.090	86.6	480	0.0125	0.092	1.17	0.851	0.04824	0.20143	0.23666
28.5	5	254.92	26.682	89.7	500	0.0125	0.092	1.17	0.808	0.05031	0.19954	0.24682
28.5	5	238.6	24.973	92.8	510	0.0125	0.092	1.17	0.757	0.05116	0.18991	0.25097
28.5	5	201.86	21.128	95.9	530	0.0125	0.092	1.17	0.640	0.05323	0.16718	0.26114
28.5	5	181.98	19.047	99	540	0.0125	0.092	1.17	0.577	0.05408	0.15311	0.26529
28.5	5	141.42	14.802	102.1	550	0.0125	0.092	1.17	0.448	0.05492	0.12084	0.26944
28.5	5	138.98	14.547	105.2	555	0.0125	0.092	1.17	0.441	0.05516	0.11926	0.27058
28.5	5	118.12	12.363	108.3	565	0.0125	0.092	1.17	0.375	0.056	0.10292	0.27473
28.5	5	107.44	11.245	111.4	575	0.0125	0.092	1.17	0.341	0.05685	0.09503	0.27889
28.5	5	96.82	10.134	114.5	590	0.0125	0.092	1.17	0.307	0.05831	0.08783	0.28604
28.5	5	85.04	8.901	117.6	600	0.0125	0.092	1.17	0.270	0.05915	0.07826	0.2902
28.5	5	77.92	8.156	120.7	610	0.0125	0.092	1.17	0.247	0.06	0.07274	0.29435
28.5	5	67.9	7.107	123.8	625	0.0125	0.092	1.17	0.215	0.06146	0.06493	0.3015
28.5	5	53.46	5.595	126.9	640	0.0125	0.092	1.17	0.170	0.06292	0.05233	0.30866
28.5	5	43.26	4.528	130	650	0.0125	0.092	1.17	0.137	0.06377	0.04292	0.31281
28.5	5	34.42	3.603	133.1	665	0.0125	0.092	1.17	0.109	0.06522	0.03493	0.31997
28.5	5	0	0.000	148.6	690	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06639	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	400.92	41.963	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.271	0	0	0
28.5	5	293.68	30.739	6	240	0.0125	0.092	1.17	0.931	0.02869	0.13111	0.14077
28.5	5	290.5	30.406	9.1	260	0.0125	0.092	1.17	0.921	0.03077	0.13905	0.15093
28.5	5	285.5	29.882	12.2	275	0.0125	0.092	1.17	0.905	0.03223	0.14314	0.15809
28.5	5	280.5	29.359	15.3	290	0.0125	0.092	1.17	0.890	0.03369	0.147	0.16525
28.5	5	273.64	28.641	18.4	305	0.0125	0.092	1.17	0.868	0.03514	0.14962	0.17241
28.5	5	272.16	28.486	21.5	315	0.0125	0.092	1.17	0.863	0.03599	0.15239	0.17656
28.5	5	263.42	27.571	24.6	340	0.0125	0.092	1.17	0.835	0.03868	0.15851	0.18973
28.5	5	258.02	27.006	27.7	360	0.0125	0.092	1.17	0.818	0.04075	0.16358	0.1999
28.5	5	251.1	26.282	30.8	390	0.0125	0.092	1.17	0.796	0.04405	0.17207	0.21608
28.5	5	240.12	25.133	33.9	425	0.0125	0.092	1.17	0.762	0.04796	0.17916	0.23527
28.5	5	234.92	24.588	37	450	0.0125	0.092	1.17	0.745	0.05064	0.1851	0.24845
28.5	5	228.28	23.893	40.1	470	0.0125	0.092	1.17	0.724	0.05272	0.18723	0.25861
28.5	5	217.84	22.801	43.2	510	0.0125	0.092	1.17	0.691	0.05724	0.194	0.28081
28.5	5	205.96	21.557	46.3	530	0.0125	0.092	1.17	0.653	0.05931	0.19006	0.29098
28.5	5	196.54	20.571	49.4	540	0.0125	0.092	1.17	0.623	0.06016	0.18396	0.29513
28.5	5	193.36	20.238	58.7	550	0.0125	0.092	1.17	0.613	0.06025	0.18124	0.29555
28.5	5	173.66	18.176	74.2	570	0.0125	0.092	1.17	0.551	0.0608	0.16426	0.29826
28.5	5	151.32	15.838	89.7	590	0.0125	0.092	1.17	0.480	0.06135	0.14443	0.30096
28.5	5	92.08	9.638	120.7	620	0.0125	0.092	1.17	0.292	0.06123	0.08771	0.30036
28.5	5	28.54	2.987	151.7	650	0.0125	0.092	1.17	0.091	0.0611	0.02713	0.29976
28.5	5	0	0.000	182.7	720	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06589	0	0

Tabel C. 8 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	401.04	41.976	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.272	0	0	0
28.5	5	320.12	33.506	6	240	0.0125	0.092	1.17	1.015	0.02869	0.14291	0.14077
28.5	5	305.22	31.946	9.1	290	0.0125	0.092	1.17	0.968	0.03445	0.16357	0.16898
28.5	5	294.48	30.822	12.2	320	0.0125	0.092	1.17	0.934	0.03774	0.17293	0.18516
28.5	5	282.76	29.596	15.3	350	0.0125	0.092	1.17	0.897	0.04104	0.18055	0.20134
28.5	5	263.58	27.588	18.4	390	0.0125	0.092	1.17	0.836	0.04557	0.18686	0.22354
28.5	5	247.46	25.901	21.5	410	0.0125	0.092	1.17	0.785	0.04764	0.18341	0.23371
28.5	5	229.36	24.006	24.6	435	0.0125	0.092	1.17	0.727	0.05033	0.17958	0.24688
28.5	5	215.3	22.535	27.7	450	0.0125	0.092	1.17	0.683	0.05178	0.17346	0.25404
28.5	5	206.56	21.620	30.8	460	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.05263	0.16914	0.25819
28.5	5	197.32	20.653	33.9	470	0.0125	0.092	1.17	0.626	0.05348	0.16417	0.26234
28.5	5	176.16	18.438	43.2	500	0.0125	0.092	1.17	0.559	0.05602	0.15352	0.27479
28.5	5	166.2	17.396	52.5	520	0.0125	0.092	1.17	0.527	0.05733	0.14823	0.28123
28.5	5	143.22	14.990	68	550	0.0125	0.092	1.17	0.454	0.05911	0.1317	0.28995
28.5	5	98.12	10.270	99	620	0.0125	0.092	1.17	0.311	0.06389	0.09753	0.31342
28.5	5	74.8	7.829	130	650	0.0125	0.092	1.17	0.237	0.06377	0.07421	0.31281
28.5	5	57.74	6.043	161	700	0.0125	0.092	1.17	0.183	0.06609	0.05937	0.32424
28.5	5	42.42	4.440	192	750	0.0125	0.092	1.17	0.135	0.06842	0.04516	0.33567
28.5	5	0	0.000	223	800	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.07075	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	393.82	41.220	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.249	0	0	0
28.5	5	271.92	28.461	6	220	0.0125	0.092	1.17	0.862	0.02624	0.11102	0.12873
28.5	5	265.48	27.787	9.1	240	0.0125	0.092	1.17	0.842	0.02831	0.11695	0.1389
28.5	5	240	25.120	12.2	280	0.0125	0.092	1.17	0.761	0.03284	0.12262	0.1611
28.5	5	220.76	23.106	15.3	320	0.0125	0.092	1.17	0.700	0.03736	0.12833	0.1833
28.5	5	196.08	20.523	18.4	400	0.0125	0.092	1.17	0.622	0.04679	0.14275	0.22956
28.5	5	190.88	19.979	21.5	430	0.0125	0.092	1.17	0.605	0.05009	0.14876	0.24574
28.5	5	180.98	18.943	24.6	470	0.0125	0.092	1.17	0.574	0.05462	0.15379	0.26794
28.5	5	175.1	18.327	27.7	490	0.0125	0.092	1.17	0.555	0.05669	0.15443	0.2781
28.5	5	152.7	15.983	30.8	600	0.0125	0.092	1.17	0.484	0.0698	0.16582	0.34241
28.5	5	144.78	15.154	33.9	650	0.0125	0.092	1.17	0.459	0.07555	0.17017	0.37062
28.5	5	136.22	14.258	37	680	0.0125	0.092	1.17	0.432	0.07885	0.1671	0.38681
28.5	5	114.84	12.020	40.1	700	0.0125	0.092	1.17	0.364	0.08092	0.14458	0.39697
28.5	5	111.9	11.712	49.4	720	0.0125	0.092	1.17	0.355	0.08223	0.14316	0.40341
28.5	5	99.5	10.414	64.9	750	0.0125	0.092	1.17	0.316	0.08401	0.13005	0.41213
28.5	5	77.56	8.118	95.9	770	0.0125	0.092	1.17	0.246	0.08266	0.09975	0.40552
28.5	5	0	0.000	126.9	820	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.08499	0	0

Tabel C. 10 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 1,0$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	5	408.54	42.761	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.296	0	0	0
28.5	5	265.16	27.753	6	270	0.0125	0.092	1.17	0.841	0.03237	0.13355	0.15881
28.5	5	245.82	25.729	9.1	330	0.0125	0.092	1.17	0.780	0.03935	0.15049	0.19304
28.5	5	236.92	24.798	12.2	360	0.0125	0.092	1.17	0.751	0.04265	0.1572	0.20922
28.5	5	226.5	23.707	15.3	385	0.0125	0.092	1.17	0.718	0.04533	0.15975	0.2224
28.5	5	220.06	23.033	18.4	400	0.0125	0.092	1.17	0.698	0.04679	0.16021	0.22956
28.5	5	208.74	21.848	21.5	420	0.0125	0.092	1.17	0.662	0.04887	0.1587	0.23972
28.5	5	201.96	21.138	24.6	430	0.0125	0.092	1.17	0.640	0.04971	0.1562	0.24387
28.5	5	189	19.782	33.9	450	0.0125	0.092	1.17	0.599	0.05102	0.15004	0.25031
28.5	5	162.7	17.029	49.4	490	0.0125	0.092	1.17	0.516	0.05403	0.13676	0.26505
28.5	5	116.9	12.236	80.4	550	0.0125	0.092	1.17	0.371	0.05758	0.10473	0.2825
28.5	5	81.94	8.576	111.4	610	0.0125	0.092	1.17	0.260	0.06114	0.07794	0.29994
28.5	5	0	0.000	142.4	660	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06347	0	0

Tabel C. 11 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,1$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	596.24	62.406	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.351	0	0	0
28.5	7	524.5	54.898	6	256	0.0125	0.092	1.17	1.188	0.03066	0.09117	0.07673
28.5	7	514.6	53.861	9.1	278	0.0125	0.092	1.17	1.166	0.03297	0.09621	0.08253
28.5	7	498.26	52.151	12.2	300	0.0125	0.092	1.17	1.129	0.03529	0.0997	0.08833
28.5	7	485.84	50.851	15.3	322	0.0125	0.092	1.17	1.101	0.03761	0.1036	0.09413
28.5	7	477.44	49.972	18.4	334	0.0125	0.092	1.17	1.082	0.0387	0.10476	0.09686
28.5	7	462.66	48.425	21.5	355	0.0125	0.092	1.17	1.048	0.0409	0.10728	0.10236
28.5	7	445.78	46.658	24.6	376	0.0125	0.092	1.17	1.010	0.04309	0.10891	0.10785
28.5	7	439.22	45.972	27.7	390	0.0125	0.092	1.17	0.995	0.04443	0.11064	0.1112
28.5	7	425.02	44.485	30.8	405	0.0125	0.092	1.17	0.963	0.04589	0.11058	0.11485
28.5	7	401.2	41.992	33.9	420	0.0125	0.092	1.17	0.909	0.04735	0.1077	0.1185
28.5	7	378.86	39.654	43.2	440	0.0125	0.092	1.17	0.858	0.04866	0.10452	0.12179
28.5	7	314.22	32.888	58.7	500	0.0125	0.092	1.17	0.712	0.05411	0.09641	0.13544
28.5	7	250.22	26.190	89.7	576	0.0125	0.092	1.17	0.567	0.05963	0.0846	0.14926
28.5	7	189.12	19.795	120.7	660	0.0125	0.092	1.17	0.428	0.06613	0.07091	0.16552
28.5	7	138.6	14.507	151.7	710	0.0125	0.092	1.17	0.314	0.06846	0.0538	0.17135
28.5	7	64.84	6.787	182.7	850	0.0125	0.092	1.17	0.147	0.08183	0.03008	0.20481
28.5	7	0	0.000	213.7	900	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.08416	0	0

Tabel C. 12 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,2$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	515	53.903	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.167	0	0	0
28.5	7	455.86	47.713	6	250	0.0125	0.092	1.17	1.033	0.02992	0.07733	0.07489
28.5	7	440.56	46.112	9.1	290	0.0125	0.092	1.17	0.998	0.03445	0.08604	0.08621
28.5	7	435.36	45.568	12.2	310	0.0125	0.092	1.17	0.986	0.03652	0.09014	0.0914
28.5	7	428.3	44.829	15.3	330	0.0125	0.092	1.17	0.970	0.03859	0.09371	0.09659
28.5	7	417.02	43.648	18.4	355	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.04128	0.09759	0.10331
28.5	7	405.16	42.407	21.5	380	0.0125	0.092	1.17	0.918	0.04396	0.10099	0.11003
28.5	7	373.7	39.114	24.6	440	0.0125	0.092	1.17	0.847	0.05094	0.10793	0.12749
28.5	7	360.06	37.686	27.7	470	0.0125	0.092	1.17	0.816	0.05424	0.11072	0.13575
28.5	7	348	36.424	30.8	495	0.0125	0.092	1.17	0.788	0.05692	0.11231	0.14247
28.5	7	320.14	33.508	33.9	520	0.0125	0.092	1.17	0.725	0.05961	0.1082	0.14919
28.5	7	272.48	28.520	43.2	570	0.0125	0.092	1.17	0.617	0.0646	0.0998	0.16169
28.5	7	202.18	21.162	58.7	620	0.0125	0.092	1.17	0.458	0.06883	0.0789	0.17227
28.5	7	120.38	12.600	89.7	750	0.0125	0.092	1.17	0.273	0.08097	0.05526	0.20266
28.5	7	81.04	8.482	120.7	850	0.0125	0.092	1.17	0.184	0.08943	0.04109	0.22384
28.5	7	0	0.000	151.7	950	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.09789	0	0

Tabel C. 13 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,3$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	521.26	54.559	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.181	0	0	0
28.5	7	420.86	44.050	6	280	0.0125	0.092	1.17	0.953	0.0336	0.08017	0.0841
28.5	7	406.9	42.589	9.1	340	0.0125	0.092	1.17	0.922	0.04058	0.09361	0.10156
28.5	7	386.6	40.464	12.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.876	0.04755	0.10424	0.11902
28.5	7	370.14	38.741	15.3	450	0.0125	0.092	1.17	0.838	0.05331	0.11187	0.13342
28.5	7	355.88	37.249	18.4	480	0.0125	0.092	1.17	0.806	0.0566	0.11421	0.14167
28.5	7	330.28	34.569	21.5	510	0.0125	0.092	1.17	0.748	0.0599	0.11218	0.14993
28.5	7	263.62	27.592	24.6	560	0.0125	0.092	1.17	0.597	0.06565	0.09813	0.16433
28.5	7	214.12	22.411	33.9	620	0.0125	0.092	1.17	0.485	0.07187	0.08725	0.17989
28.5	7	120.02	12.562	49.4	720	0.0125	0.092	1.17	0.272	0.08223	0.05596	0.20582
28.5	7	79.3	8.300	80.4	800	0.0125	0.092	1.17	0.180	0.08824	0.03967	0.22086
28.5	7	45.74	4.787	111.4	900	0.0125	0.092	1.17	0.104	0.0967	0.02508	0.24204
28.5	7	0	0.000	142.4	1000	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10516	0	0

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

T (°C)	V (m/s)	$\omega$ (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	C <sub>p</sub>	C <sub>m</sub>
28.5	7	522.8	54.720	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.184	0	0	0
28.5	7	451.78	47.286	6	210	0.0125	0.092	1.17	1.023	0.02502	0.06408	0.06261
28.5	7	442.38	46.302	9.1	240	0.0125	0.092	1.17	1.002	0.02831	0.07102	0.07087
28.5	7	434.82	45.511	12.2	260	0.0125	0.092	1.17	0.985	0.03039	0.07491	0.07606
28.5	7	429.96	45.002	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	0.974	0.03123	0.07614	0.07817
28.5	7	419.44	43.901	18.4	290	0.0125	0.092	1.17	0.950	0.0333	0.0792	0.08336
28.5	7	410.86	43.003	21.5	310	0.0125	0.092	1.17	0.931	0.03538	0.08241	0.08855
28.5	7	403.24	42.206	24.6	330	0.0125	0.092	1.17	0.913	0.03745	0.08562	0.09373
28.5	7	395.4	41.385	27.7	350	0.0125	0.092	1.17	0.896	0.03952	0.0886	0.09892
28.5	7	390.68	40.691	30.8	370	0.0125	0.092	1.17	0.885	0.04159	0.09214	0.10411
28.5	7	387.24	40.531	33.9	380	0.0125	0.092	1.17	0.877	0.04244	0.09318	0.10623
28.5	7	383.68	40.159	37	390	0.0125	0.092	1.17	0.869	0.04329	0.09417	0.10834
28.5	7	373.78	39.122	40.1	410	0.0125	0.092	1.17	0.847	0.04536	0.09613	0.11353
28.5	7	371.16	38.848	43.2	420	0.0125	0.092	1.17	0.841	0.04621	0.09723	0.11565
28.5	7	369.88	38.714	46.3	430	0.0125	0.092	1.17	0.838	0.04705	0.09867	0.11777
28.5	7	367.06	38.419	49.4	440	0.0125	0.092	1.17	0.831	0.0479	0.09968	0.11988
28.5	7	364.1	38.109	52.5	450	0.0125	0.092	1.17	0.825	0.04874	0.10063	0.122
28.5	7	356.72	37.337	55.6	470	0.0125	0.092	1.17	0.808	0.05082	0.10278	0.12719
28.5	7	343.08	35.969	58.7	510	0.0125	0.092	1.17	0.777	0.05534	0.10765	0.13851
28.5	7	335.08	35.072	61.8	535	0.0125	0.092	1.17	0.759	0.05803	0.11024	0.14524
28.5	7	324	33.912	64.9	565	0.0125	0.092	1.17	0.734	0.06132	0.11266	0.15349
28.5	7	320.58	33.554	68	580	0.0125	0.092	1.17	0.726	0.06278	0.11412	0.15714
28.5	7	315.26	32.997	71.1	600	0.0125	0.092	1.17	0.714	0.06486	0.11593	0.16233
28.5	7	310.96	32.547	74.2	620	0.0125	0.092	1.17	0.704	0.06693	0.118	0.16752
28.5	7	308.72	32.313	77.3	630	0.0125	0.092	1.17	0.699	0.06777	0.11863	0.16964
28.5	7	306.68	32.099	80.4	640	0.0125	0.092	1.17	0.695	0.06862	0.11932	0.17175
28.5	7	304.02	31.821	83.5	650	0.0125	0.092	1.17	0.689	0.06947	0.11974	0.17387
28.5	7	301.9	31.599	86.6	660	0.0125	0.092	1.17	0.684	0.07031	0.12036	0.17599
28.5	7	298.08	31.199	89.7	670	0.0125	0.092	1.17	0.675	0.07116	0.12026	0.17811
28.5	7	295.74	30.954	92.8	680	0.0125	0.092	1.17	0.670	0.07201	0.12074	0.18022
28.5	7	293.34	30.703	95.9	690	0.0125	0.092	1.17	0.664	0.07285	0.12117	0.18234
28.5	7	288.74	30.221	99	710	0.0125	0.092	1.17	0.654	0.07492	0.12266	0.18753
28.5	7	284.82	29.811	102.1	730	0.0125	0.092	1.17	0.645	0.077	0.12434	0.19272
28.5	7	281.36	29.449	105.2	750	0.0125	0.092	1.17	0.637	0.07907	0.12614	0.1979
28.5	7	274.94	28.777	108.3	760	0.0125	0.092	1.17	0.623	0.07991	0.12458	0.20002
28.5	7	266.5	27.894	111.4	780	0.0125	0.092	1.17	0.604	0.08199	0.12388	0.20521
28.5	7	253.6	26.543	120.7	800	0.0125	0.092	1.17	0.574	0.0833	0.11977	0.20849
28.5	7	235.92	24.693	136.2	820	0.0125	0.092	1.17	0.534	0.08385	0.11216	0.20987
28.5	7	158.18	16.556	167.2	870	0.0125	0.092	1.17	0.358	0.08618	0.07729	0.2157
28.5	7	103.1	10.791	198.2	900	0.0125	0.092	1.17	0.234	0.06606	0.05031	0.2154
28.5	7	68.88	7.209	229.2	960	0.0125	0.092	1.17	0.156	0.06861	0.035	0.2243
28.5	7	0	0.000	260.2	1050	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.06685	0	0

Tabel C. 15 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,5$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	576.82	60.374	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.307	0	0	0
28.5	7	478.3	50.062	6	300	0.0125	0.092	1.17	1.083	0.03605	0.09777	0.09023
28.5	7	467.64	48.946	9.1	330	0.0125	0.092	1.17	1.059	0.03935	0.10434	0.09849
28.5	7	446.54	46.738	12.2	380	0.0125	0.092	1.17	1.012	0.0451	0.11419	0.11289
28.5	7	409.48	42.859	15.3	460	0.0125	0.092	1.17	0.928	0.05453	0.1266	0.13649
28.5	7	391.96	41.025	18.4	490	0.0125	0.092	1.17	0.888	0.05783	0.12852	0.14474
28.5	7	377.98	39.562	21.5	515	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.06052	0.12969	0.15147
28.5	7	360.22	37.703	24.6	535	0.0125	0.092	1.17	0.816	0.06259	0.12783	0.15665
28.5	7	333.88	34.946	27.7	550	0.0125	0.092	1.17	0.756	0.06405	0.12124	0.1603
28.5	7	315.96	33.070	43.2	580	0.0125	0.092	1.17	0.716	0.06583	0.11792	0.16476
28.5	7	292.02	30.565	74.2	620	0.0125	0.092	1.17	0.662	0.06693	0.11081	0.16752
28.5	7	223.22	23.364	105.2	720	0.0125	0.092	1.17	0.506	0.07539	0.09541	0.1887
28.5	7	186.34	19.504	136.2	810	0.0125	0.092	1.17	0.422	0.08262	0.08729	0.2068
28.5	7	133.82	14.006	167.2	900	0.0125	0.092	1.17	0.303	0.08986	0.06818	0.22491
28.5	7	84.32	8.825	198.2	1000	0.0125	0.092	1.17	0.191	0.09832	0.04701	0.24609
28.5	7	44.34	4.641	229.2	1090	0.0125	0.092	1.17	0.100	0.10556	0.02654	0.2642
28.5	7	0	0.000	260.2	1200	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11524	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	520.04	54.431	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.178	0	0	0
28.5	7	416.96	43.642	6	300	0.0125	0.092	1.17	0.945	0.03605	0.08523	0.09023
28.5	7	401.64	42.038	9.1	345	0.0125	0.092	1.17	0.910	0.04119	0.0938	0.10309
28.5	7	382.48	40.033	12.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.866	0.04755	0.10313	0.11902
28.5	7	348.08	36.432	15.3	490	0.0125	0.092	1.17	0.789	0.05821	0.11488	0.1457
28.5	7	329.94	34.534	18.4	550	0.0125	0.092	1.17	0.747	0.06519	0.12195	0.16316
28.5	7	315.8	33.054	21.5	590	0.0125	0.092	1.17	0.715	0.06971	0.12482	0.17448
28.5	7	300.22	31.423	24.6	630	0.0125	0.092	1.17	0.680	0.07424	0.12637	0.18581
28.5	7	294.44	30.818	27.7	650	0.0125	0.092	1.17	0.667	0.07631	0.12739	0.191
28.5	7	285.88	29.922	30.8	670	0.0125	0.092	1.17	0.648	0.07838	0.12705	0.19618
28.5	7	273.94	28.672	33.9	690	0.0125	0.092	1.17	0.621	0.08045	0.12496	0.20137
28.5	7	265.24	27.762	37	700	0.0125	0.092	1.17	0.601	0.0813	0.12226	0.20349
28.5	7	190.04	19.891	46.3	750	0.0125	0.092	1.17	0.430	0.08629	0.09298	0.21598
28.5	7	108.2	11.325	61.8	820	0.0125	0.092	1.17	0.245	0.09297	0.05704	0.23271
28.5	7	67.38	7.052	92.8	890	0.0125	0.092	1.17	0.153	0.09776	0.03735	0.24468
28.5	7	0	0.000	68	1000	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.11429	0	0



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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	567.98	59.449	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.287	0	0	0
28.5	7	487.24	50.998	6	250	0.0125	0.092	1.17	1.104	0.02992	0.08266	0.07489
28.5	7	457.08	47.841	9.1	320	0.0125	0.092	1.17	1.035	0.03812	0.0988	0.09542
28.5	7	413.22	43.250	12.2	400	0.0125	0.092	1.17	0.936	0.04755	0.11141	0.11902
28.5	7	391.66	40.994	15.3	440	0.0125	0.092	1.17	0.887	0.05208	0.11565	0.13035
28.5	7	361.36	37.822	18.4	490	0.0125	0.092	1.17	0.819	0.05783	0.11849	0.14474
28.5	7	340.7	35.660	21.5	530	0.0125	0.092	1.17	0.772	0.06235	0.12045	0.15607
28.5	7	321.52	33.652	24.6	575	0.0125	0.092	1.17	0.728	0.06749	0.12304	0.16893
28.5	7	297.42	31.130	27.7	610	0.0125	0.092	1.17	0.674	0.0714	0.12041	0.17872
28.5	7	283.3	29.652	37	630	0.0125	0.092	1.17	0.642	0.07272	0.1168	0.182
28.5	7	268.38	28.090	46.3	660	0.0125	0.092	1.17	0.608	0.07525	0.11451	0.18836
28.5	7	218.94	22.916	61.8	720	0.0125	0.092	1.17	0.496	0.08071	0.10019	0.20202
28.5	7	196.86	20.605	92.8	780	0.0125	0.092	1.17	0.446	0.08427	0.09406	0.21092
28.5	7	85.8	8.980	123.8	850	0.0125	0.092	1.17	0.194	0.08905	0.04332	0.22289
28.5	7	50.8	5.317	154.8	950	0.0125	0.092	1.17	0.115	0.09751	0.02809	0.24406
28.5	7	0	0.000	185.8	1050	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10597	0	0

Tabel C. 18 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,8$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	530.86	55.563	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.203	0	0	0
28.5	7	431	45.111	6	300	0.0125	0.092	1.17	0.976	0.036052	0.0881	0.090235
28.5	7	426	44.588	9.1	330	0.0125	0.092	1.17	0.965	0.03935	0.095045	0.098491
28.5	7	415	43.437	12.2	360	0.0125	0.092	1.17	0.940	0.042649	0.100352	0.106747
28.5	7	410	42.913	15.3	390	0.0125	0.092	1.17	0.929	0.045948	0.106811	0.115003
28.5	7	400	41.867	18.4	420	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.049246	0.111687	0.123259
28.5	7	390	40.820	21.5	450	0.0125	0.092	1.17	0.883	0.052545	0.116189	0.131516
28.5	7	373.4	39.083	24.6	490	0.0125	0.092	1.17	0.846	0.05707	0.120823	0.142841
28.5	7	335	35.063	27.7	530	0.0125	0.092	1.17	0.759	0.061595	0.116992	0.154166
28.5	7	305	31.923	37	560	0.0125	0.092	1.17	0.691	0.064133	0.110905	0.16052
28.5	7	265	27.737	52.5	610	0.0125	0.092	1.17	0.600	0.068363	0.102717	0.171108
28.5	7	215	22.503	83.5	700	0.0125	0.092	1.17	0.487	0.075598	0.092155	0.189217
28.5	7	150	15.700	114.5	770	0.0125	0.092	1.17	0.340	0.080381	0.068362	0.201187
28.5	7	90	9.420	145.5	900	0.0125	0.092	1.17	0.204	0.092521	0.047212	0.231572
28.5	7	0	0.000	176.5	960	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.096077	0	#DIV/0!

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	538.6	56.373	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.220	0	0	0
28.5	7	481.2	50.366	6	190	0.0125	0.092	1.17	1.090	0.022563	0.061559	0.056473
28.5	7	469.8	49.172	9.1	210	0.0125	0.092	1.17	1.064	0.024635	0.065621	0.06166
28.5	7	463.2	48.482	12.2	235	0.0125	0.092	1.17	1.049	0.027321	0.071752	0.068382
28.5	7	451.1	47.215	15.3	270	0.0125	0.092	1.17	1.022	0.031233	0.079882	0.078173
28.5	7	439.1	45.959	18.4	300	0.0125	0.092	1.17	0.995	0.034531	0.08597	0.086429
28.5	7	430.7	45.080	21.5	320	0.0125	0.092	1.17	0.976	0.036604	0.089386	0.091616
28.5	7	421	44.065	24.6	340	0.0125	0.092	1.17	0.954	0.038676	0.092319	0.096803
28.5	7	415	43.437	27.7	360	0.0125	0.092	1.17	0.940	0.040748	0.09588	0.10199
28.5	7	408	42.704	30.8	390	0.0125	0.092	1.17	0.924	0.044047	0.101893	0.110246
28.5	7	400	41.867	33.9	410	0.0125	0.092	1.17	0.906	0.046119	0.104595	0.115433
28.5	7	390	40.820	37	440	0.0125	0.092	1.17	0.883	0.049418	0.109275	0.123689
28.5	7	378	39.564	40.1	470	0.0125	0.092	1.17	0.856	0.052716	0.112982	0.131945
28.5	7	357.7	37.439	43.2	500	0.0125	0.092	1.17	0.810	0.056015	0.113604	0.140202
28.5	7	337	35.273	46.3	530	0.0125	0.092	1.17	0.763	0.059314	0.113333	0.148458
28.5	7	315	32.970	55.6	560	0.0125	0.092	1.17	0.714	0.061852	0.110468	0.154811
28.5	7	276.1	28.898	71.1	630	0.0125	0.092	1.17	0.625	0.068535	0.107288	0.171538
28.5	7	240	25.120	102.1	700	0.0125	0.092	1.17	0.544	0.073317	0.099768	0.183508
28.5	7	170.3	17.825	133.1	810	0.0125	0.092	1.17	0.386	0.083005	0.080147	0.207755
28.5	7	123.2	12.895	164.1	900	0.0125	0.092	1.17	0.279	0.09024	0.063035	0.225863
28.5	7	50.3	5.265	195.1	940	0.0125	0.092	1.17	0.114	0.091343	0.02605	0.228625
28.5	7	0	0.000	226.1	1200	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.119424	0	#DIV/0!

Tabel C. 19 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada  $s/D = 2,6$  dan  $d/D = 0,9$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$

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

T (C)	V (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	Cm
28.5	7	565.72	59.212	0	0	0.0125	0.092	1.17	1.282	0	0	0
28.5	7	486.52	50.922	6	225	0.0125	0.092	1.17	1.102	0.02685	0.07408	0.06722
28.5	7	455.4	47.665	9.1	300	0.0125	0.092	1.17	1.032	0.03567	0.09211	0.08928
28.5	7	442.64	46.330	12.2	330	0.0125	0.092	1.17	1.003	0.03897	0.0978	0.09754
28.5	7	426.54	44.645	15.3	360	0.0125	0.092	1.17	0.966	0.04227	0.10222	0.1058
28.5	7	411.84	43.106	18.4	380	0.0125	0.092	1.17	0.933	0.04434	0.10354	0.11098
28.5	7	396.32	41.481	21.5	405	0.0125	0.092	1.17	0.898	0.04703	0.10567	0.1177
28.5	7	388.58	40.671	24.6	420	0.0125	0.092	1.17	0.880	0.04849	0.10682	0.12136
28.5	7	379.12	39.681	27.7	435	0.0125	0.092	1.17	0.859	0.04995	0.10736	0.12501
28.5	7	369.3	38.653	30.8	455	0.0125	0.092	1.17	0.837	0.05202	0.10892	0.1302
28.5	7	359.7	37.649	33.9	470	0.0125	0.092	1.17	0.815	0.05348	0.10906	0.13385
28.5	7	354.24	37.077	37	480	0.0125	0.092	1.17	0.802	0.05432	0.10911	0.13597
28.5	7	344.44	36.051	40.1	500	0.0125	0.092	1.17	0.780	0.0564	0.11014	0.14115
28.5	7	330.22	34.563	43.2	510	0.0125	0.092	1.17	0.748	0.05724	0.10717	0.14327
28.5	7	312.9	32.750	46.3	525	0.0125	0.092	1.17	0.709	0.0587	0.10414	0.14692
28.5	7	289.22	30.272	49.4	540	0.0125	0.092	1.17	0.655	0.06016	0.09865	0.15058
28.5	7	271.1	28.375	52.5	560	0.0125	0.092	1.17	0.614	0.06223	0.09566	0.15576
28.5	7	228.82	23.950	61.8	580	0.0125	0.092	1.17	0.518	0.06354	0.08244	0.15905
28.5	7	194.42	20.349	71.1	610	0.0125	0.092	1.17	0.440	0.06608	0.07284	0.1654
28.5	7	153.58	16.075	86.6	640	0.0125	0.092	1.17	0.348	0.06786	0.05909	0.16985
28.5	7	116.56	12.200	117.6	690	0.0125	0.092	1.17	0.264	0.07019	0.04639	0.17568
28.5	7	83.875	8.779	148.6	760	0.0125	0.092	1.17	0.190	0.07497	0.03565	0.18765
28.5	7	48.84	5.112	179.6	860	0.0125	0.092	1.17	0.111	0.08343	0.0231	0.20883
28.5	7	36.5	3.820	210.6	900	0.0125	0.092	1.17	0.083	0.08454	0.01749	0.21159
28.5	7	0	0.000	241.6	1100	0.0125	0.092	1.17	0.000	0.10526	0	0

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

Sudut ( $\theta$ )	$T_{s0}$ (N.cm)	
	$Re = 9,7 \times 10^4$	$Re = 13,6 \times 10^4$
0	1.86	2.38
10	2.26	3.34
20	2.88	4.72
30	3.46	5.58
40	2.88	4.84
50	2.36	4.7
60	1.96	4.24
70	1.5	3.84
80	1.24	3.52
90	0.8	3.2
100	0.38	2.6
110	0.28	2.32
120	0.1	1.98
130	0.04	1.68
140	0.5	1.3
150	0.7	0.6
160	0.92	1.18
170	1.02	1.78
180	1.72	2.76

D. UncertaintyUncertainty A ( $u_A$ ):

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

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

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

$$= u_L$$

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

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

$$= u_H$$

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

$$u_A = \pm \{[1,618 \times 10^{-3}]^2 + [1,677 \times 10^{-3}]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

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

$$\rho \times T = C$$

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

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

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

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

$$= -u_T$$

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

$$u_\rho = \pm u_T$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{T_d} = \pm \left\{ [0,0254]^2 + [4 \times 10^{-2}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{T_d} = \pm 0,0473$$

$$u_{T_d} = \pm 4,77\%$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial V} = -2 T_d \omega \rho^{-1} V^{-4} A^{-1}$$

$$\checkmark \frac{\partial CoP}{\partial A} = -6 T_d \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-2}$$

$$u_{CoP, T_d} = \frac{\partial CoP / T_d}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial T_d} u_{T_d}$$

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

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

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

$$u_{CoP, \omega} = \frac{\partial CoP / \omega}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \omega} u_{\omega}$$

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

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

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

$$u_{CoP, \rho} = \frac{\partial CoP / \rho}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \rho} u_{\rho}$$

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

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

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

$$u_{CoP, A} = \frac{\partial CoP / A}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial A} u_A$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (4,73 \times 10^{-2})^2 + (3,55 \times 10^{-3})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0481$$

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

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \rho A V^2 R}$$

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

$$dC_M = \frac{\partial C_M}{\partial T_D} + \frac{\partial C_M}{\partial \rho} + \frac{\partial C_M}{\partial A} + \frac{\partial C_M}{\partial V} + \frac{\partial C_M}{\partial R}$$

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

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

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

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

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

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

$$u_{C_M} = \pm \{ (4,73 \times 10^{-2})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-4})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,0484$$

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

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

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

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

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

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

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

$$> \frac{\partial Re}{\partial \mu} = (-\mu^{-2} \rho V L)$$

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

$$u_{\rho}$$

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

$$u_V$$

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

$$u_{Re, \mu} = \frac{\delta Re, \mu}{Re} = \frac{\mu}{Re} \frac{\delta Re}{\delta \mu} u_{\mu} =$$

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

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

Maka:

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

$$(3,2 \times 10^{-5})^2 + (0,00124)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 4,21 \times 10^{-3}$$

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BIODATA PENULIS



**Muhammad Ardy Makarim** lahir di Bekasi pada tanggal 19 Mei 1997. Penulis memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Bani Saleh 1 pada tahun 2003, kemudian dilanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 2 Kota Bekasi lulus tahun 2012 dengan kegiatan sampingan aktif membangun komunitas musik di Kota Bekasi dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 14 Jakarta lulus tahun 2015 dengan meninggalkan berbagai penghargaan di bidang seni dan informatika. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015 melalui jalur SNMPTN.

Semasa kuliah, penulis aktif di kegiatan bertema energi, geopolitik, dan seni. Pada bidang energi, penulis aktif mengikuti lomba bertema minyak, gas, dan energi terbarukan, menjabat sebagai *Director of Delegate Resource Management* di *Society of Petroleum Engineers* (SPE) ITS *Student Chapter* serta mendapat kesempatan mengikuti program *Vacation Trainee* Schlumberger. Pada bidang geopolitik, penulis aktif mengikuti lomba *Model United Nations* dan menjadi delegasi Indonesia di *Göttingen Model United Nations* pada tahun 2017. Pada bidang seni, penulis aktif menciptakan musik secara pribadi dan grup musik *sunms*.

Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis dapat melalui email: [ardymakarim97@gmail.com](mailto:ardymakarim97@gmail.com)