



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DI DEPAN *RETURNING BLADE*

“Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$ dengan Peletakan $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$ Pada Kecepatan Aliran Udara 3,8; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 (m/s)”

ELZA LISDARINA
NRP. 0211164000040

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

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



TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DI DEPAN *RETURNING BLADE*

“Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$ dengan Peletakan $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$ Pada Kecepatan Aliran Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 (m/s)”

ELZA LISDARINA
NRP. 0211164000040

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

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



FINAL PROJECT - TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF SAVONIUS
WIND TURBINE PERFORMANCE BY PLACING CIRCULAR
CYLINDER IN FRONT OF THE RETURNING BLADE**

“Case study for consideration of $d/D = 0,5$ $S/D = 1,8$; y/D
 $= 0,5$ at wind speed 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; and 9 (m/s)”

ELZA LISDARINA
NRP. 0211164000040

Advisor
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM
ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA - 2020**

**STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA
TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN
SILINDER SIRKULAR DI DEPAN *RETURNING BLADE***

“Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$
dengan Peletakan $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$ Pada Kecepatan Aliran
Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 (m/s)”

Nama Mahasiswa : Elza Lisdarina
NRP : 021 1 16 4000 0040
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

Abstrak

Penggunaan energi terbarukan atau *renewable energy* merupakan sebuah solusi permasalahan lingkungan yang diakibatkan oleh penggunaan bakar bakar fosil sebagai sumber energi utama di Indonesia. Pada Pasal 9 dalam Peraturan Pemerintahan No. 79 tahun 2014 disebutkan sasaran kebijakan energi nasional tentang energi terbarukan, yaitu pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% sepanjang keekonomian terpenuhi. Berdasarkan data ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 950 MW dengan kondisi kecepatan angin sekitar 3-6 m/s. Karena kondisi angin yang berkecepatan rendah ini, turbin angin Savonius lebih sesuai jika dipakai di Indonesia. Akan tetapi, turbin angin Savonius memiliki kekurangan, yaitu memiliki performa yang rendah. Penelitian ini dilakukan sebagai upaya meningkatkan performa turbin angin Savonius menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*.

Turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini memiliki 2 sudu turbin dengan diameter sudu turbin (D) 167 mm, tinggi turbin (H) 298 mm, diameter poros (b) 19 mm, dan diameter *end plate* (D_o) 321 mm. Penelitian ini menggunakan silinder

pengganggu yang memiliki diameter (d) 83 mm dan tinggi (h) 500 mm. *Axial fan* digunakan sebagai sumber angin yang kecepatannya diatur menggunakan *voltage regulator* hingga didapatkan kecepatan angin yang dibutuhkan, yaitu 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Agar didapatkan aliran udara yang *uniform*, digunakan *honeycomb* yang diletakkan di depan *axial fan*. Selanjutnya, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dengan rasio jarak (S/D) adalah 1,8. Pengukuran nilai torsi dinamis dilakukan dengan menggunakan *brake dynamometer* dan torsi statis menggunakan torsi meter. Alat bantu lain yang digunakan pada penelitian ini adalah anemometer untuk mengukur kecepatan angin dan *tachometer* untuk mengukur putaran turbin angin Savonius.

Hasil yang didapatkan pada eksperimen ini adalah dengan pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Pemberian silinder pengganggu paling efektif pada kecepatan 3,8 m/s, yaitu dengan peningkatan *Coefficient of Power* maksimum 168,1% dan *Coefficient of Moment* maksimum 89%. Penggunaan silinder pengganggu juga meningkatkan nilai *Coefficient of Static Torque* di semua sudut, dimana pada kecepatan 5-9 m/s tidak memiliki nilai negatif.

Kata kunci : turbin angin Savonius, silinder pengganggu, performa turbin angin Savonius

**EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF
SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE BY
PLACING CIRCULAR CYLINDER IN FRONT OF THE
RETURNING BLADE**

*“Case study for consideration of $d/D = 0.5$ $S/D = 1.8$; $y/D = 0.5$
at wind speed 3.8; 4.4; 5; 6; 7; 8; and 9 (m/s)”*

*Student Name : Elza Lisdarina
NRP : 021 1 16 4000 0040
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA*

Abstract

The use of renewable energy is a solution to environmental problems caused by the use of fossil fuels as the main energy source in Indonesia. In Article 9 of Government Regulation No. 79 of 2014 mentioned the national energy policy targets on renewable energy, namely in 2025 the role of New Energy and Renewable Energy at least 23% and in 2050 at least 31% throughout the economy is met. Based on data from the Directorate General of Renewable Energy and Energy Conservation, Indonesia has wind energy potential of 950 MW with wind speed conditions around 3-6 m/s. Because of these low-speed wind conditions, Savonius wind turbines are more suitable when used in Indonesia. However, Savonius wind turbines have their disadvantages, which are low performance. This research was carried out as an effort to improve the performance of Savonius wind turbines using a disturbing cylinder placed in front of the returning blade.

Savonius wind turbines used in this study have 2 turbine blades with turbine blade diameter (D) 167 mm, turbine height (H) 298 mm, shaft diameter (b) 19 mm, and end plate diameter (D_o) 321 mm. This research employed a disturbing cylinder with diameter (d) 83 mm and height (h) 500 mm. Axial fan is used as a source of wind speed whose is regulated using a voltage regulator

to obtain the required wind speed, 3.8; 4.4; 5; 6; 7; 8; and 9 m / s. In order to obtain a uniform air flow, honeycomb is used which is placed in front of the axial fan. Furthermore, the disturbing cylinder is placed in front of the returning blade with the ratio distance (S / D) of 1.8. Measurement of the dynamic torque value is using a brake dynamometer and the static torque is using a torque meter. Other tools used in this study are anemometer to measure wind speed and tachometer to measure Savonius wind turbine rotation.

The result obtained in this experiment is by giving a disturbing cylinder can improve the performance of Savonius wind turbines. Giving a disturbing cylinder most effective at a speed of 3.8 m/s, which is an increase the maximum Coefficient of Power of 168.1% and a maximum Coefficient of Moment of 89%. The use of a disturbing cylinder also increases the Coefficient of Static Torque in all angles, where at speeds of 5-9 m/s don't have negative value.

Keywords : Savonius wind turbine, disturbing cylinder, and performance of Savonius wind turbine

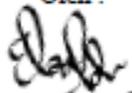
HALAMAN PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONTUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DI DEPAN RETURNING BLADE Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; pada $S/D=1,8$; $y/D=0,5$; Kecepatan Angin 3,8 ;4,4 ;5 ;6 ;7 ;8 ;dan 9 (m/s)

TUGAS AKHIR

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

Oleh :



Elza Lidarina

NRP. 0211164000040

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Nur Ikhwan, S.T, M.Eng (Penguji I)
NIP. 196709151995121001
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D (Penguji II)
NIP. 196412281990031002
4. Vivien Suphandani Djanali, S.T, M.E, Ph.D (Penguji III)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA
AGUSTUS, 2020

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan Rahmat dan Hidayahnya, sehingga Tugas Akhir yang berjudul Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di depan *Returning Blade* “Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$ dengan Peletakan $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$ Pada Kecepatan Aliran Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 (m/s)” dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat dan salam juga penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Di dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa penulis tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Keluarga penulis, Ayah Nurkholis, Ibu Kundari, Mbak Nadia Karlina dan Mbak Fania Yolanda Kholis yang selalu memberikan doa serta dukungan kepada penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., selaku dosen pembimbing tugas akhir ini yang telah memberikan ilmu, motivasi, dan waktu selama penyelesaian tugas akhir ini.
3. Sahabat penulis, Syifa' Zain Salsabila, Putri Nabila Aulia, Festy Merbasari Mahardina, Afiyah Shuhufam M., yang telah memberikan banyak bantuan serta semangat dan dukungan selama perkuliahan.
4. Sahabat kontrakan penulis, Shinta Syafiera, Dionissa J.J.Ro, Choirunnisa', Dewi Masruroh, Yane Aulia, yang telah menemani penulis dalam suka dan duka.
5. Seluruh anggota kelompok 6 Turbin Angin Savonius yang telah saling membantu dan memberi semangat dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman-teman M59 yang telah berjuang bersama penulis selama masa perkuliahan.
7. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, untuk itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan dari semua pihak untuk penyempurnaan penelitian penelitian berikutnya.

DAFTAR ISI

Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Batasan Masalah.....	9
1.4 Tujuan Penelitian.....	9
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
BAB II.....	11
DASAR TEORI.....	11
2.1 Turbin Angin.....	11
2.2 Turbin Angin Savonius.....	13
2.3 Gaya <i>Drag</i>	15
2.4 Bilangan Reynolds	16
2.5 Aliran Melintasi Sebuah Silinder.....	17
2.6 Torsi Statis	19
2.7 Perhitungan Daya Angin	19
2.8 Perhitungan Daya Rotor Turbin.....	21
2.9 <i>Tip Speed Ratio</i> (λ).....	23
2.10 <i>Coefficient of Moment</i> (C_M), <i>Coefficient of Static Torque</i> (C_{Tso}) dan <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	23
2.11 Penelitian Terdahulu.....	25
2.11.1 Mohamed et al (2010).....	25
2.11.2 Mahmoud et al (2010)	28
2.11.3 Altan et al (2008).....	32

2.11.4 Tsutsui dan Igarashi (2002)	35
2.11.5 Mudjahidin (2019).....	40
2.11.6 Sakti et al (2019)	42
2. 12 Perbandingan Penelitian Tugas Akhir Kelompok Turbin Angin Savonius	48
BAB III.....	51
METODOLOGI	51
3.1 Parameter yang Diukur.....	51
3.2 Analisa Dimensi	52
3.2.1 Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	52
3.2.2 Analisa Dimensi <i>Coefficient of Moment</i>	55
3.3 Peralatan	58
3.3.1 <i>Axial fan</i>	58
3.3.2 Benda Uji.....	60
3.3.4 <i>Honeycomb</i>	63
3.3.5 Alat Ukur.....	64
3.4 Prosedur Penelitian	70
3.4.1 Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis	70
3.4.2 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis	71
3.5 Flowchart Penelitian	73
3.5.1 Flowchart Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis	73
3.5.2 Flowchart Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Statis.....	75
3.6 <i>Uncertainty</i> Pengukuran	77
3.7 Uniformity Test	81
3.8 Jadwal Kegiatan	83
BAB IV.....	84
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	84
4.1 Contoh Perhitungan	84
4.1.1 Perhitungan <i>Reynolds Number</i>	84
4.1.2 Perhitungan <i>Tip speed ratio</i>	86
4.1.4 Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	87

4.2 Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	89
4.2.1 Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi <i>Tip speed ratio</i> (λ)	89
4.2.1 Analisa <i>Coefficient of Power</i> Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Sebagai Fungsi <i>Tip speed ratio</i> (λ).....	91
4.2.2 Analisa <i>Coefficient of Power</i> Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Sebagai Fungsi Kecepatan Angin (U)	93
4.3.4 Analisa <i>Coefficient of Statis Torque</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (C_{TS0}) Fungsi Sudut Sudu Turbin (Θ)	95
4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu	97
4.3.1 Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C_M) Fungsi <i>Tip speed ratio</i> (λ)	98
4.3.1 Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Fungsi <i>Tip speed ratio</i> (λ)	109
4.3.4 Analisa CoP_{max}/ CoP_0_{max} fungsi Reynold Number dengan Penelitian Sarsanto	132
4.3.5 Analisa nilai CoP_{max}/ CoP_0_{max} fungsi S/D	133
KESIMPULAN DAN SARAN	138
5.1 Kesimpulan	138
5.2 Saran	139
DAFTAR PUSTAKA	140
LAMPIRAN.....	143

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin angin horizontal	12
Gambar 2. 2 Penampang Savonius dari atas	14
Gambar 2. 3 Tabel koefisien drag pada beberapa bentuk permukaan bidang.....	16
Gambar 2. 4 Skema Turbin Angin Savonius tampak atas.....	17
Gambar 2. 5 Aliran melewati bola.....	18
Gambar 2. 6 Skema turbin angin Savonius tampak samping dan atas	21
Gambar 2. 7 Free body diagram Brake dynamometer	22
Gambar 2. 8 Grafik Hubungan CoP dan tip speed ratio pada beberapa jenis turbin angin.....	24
Gambar 2. 9 Skema alat penelitian pada simulasi turbin angin Savonius dengan 2 dan 3 sudu.....	25
Gambar 2. 10 Distribusi tekanan pada turbin angin Savonius a.) dua sudu b.) tiga sudu	26
Gambar 2. 11 Grafik hasil simulasi variasi peletakan <i>obstacle</i> ..	27
Gambar 2. 12 Grafik hubungan antara tip speed ratio dengan torque coefficient dan Power Coefficient pada turbin angin Savonius 2 sudu (kiri) dan 3 sudu (kanan).....	27
Gambar 2. 13 Skema pengujian performa turbin angin Savonius; (1)wind tunnel, (2)bearing, (3)penyangga besi, (4)poros, (5)turbin angin Savonius, (6)end plate	29
Gambar 2. 14 Skema pengukuran torsi mekanik, (1)pulley, (2)nylon string, (3)weighing pan, (4)spring balance, (5)Savonius rotor, (6)rotating shaft, (7)structure	29
Gambar 2. 15 Grafik hubungan antara Coefficient of Power (CoP) terhadap kecepatan angin dengan dua, tiga, dan empat sudu	30
Gambar 2. 16 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya spesifik pada single and double stage	30
Gambar 2. 17 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin pada variasi <i>overlap ratio</i>	31

Gambar 2. 18 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin pada variasi aspect ratio	32
Gambar 2. 19 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin dengan dan tanpa end plate	32
Gambar 2. 20 Skema alat turbin angin Savonius dengan curtain	33
Gambar 2. 21 Grafik perbandingan Power Coefficient dengan menggunakan 3 curtain	34
Gambar 2. 22 Pengaruh sudut kemiringan curtain terhadap kecepatan rotasi turbin	34
Gambar 2. 23 Pengaruh panjang curtain terhadap torsi pada sudut kemiringan optimum	35
Gambar 2. 24 Skema alat penelitian	36
Gambar 2. 25 Grafik distribusi tekanan pada silinder utama	36
Gambar 2. 26 Grafik hubungan Re dan koefisien drag (C_{DT})	38
Gambar 2. 27 Titik separasi.....	39
Gambar 2. 28 Total drag coefficient.....	39
Gambar 2. 29 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius.....	40
Gambar 2. 30 Grafik hubungan TSR terhadap CoP pada variasi rasio S/D pada bilangan Reynolds $9,6 \times 10^4$	41
Gambar 2. 31 Grafik Hubungan TSR dan CoP dengan variasi S/D pada (a) $Re = 13,4 \times 10^4$ (b) $Re = 17,3 \times 10^4$	41
Gambar 2. 32 Grafik Coefficient of Moment (C_m) pada (a) $Re=9,6 \times 10^4$ (b) $Re=13,4 \times 10^4$ dan (c) $Re = 17,3 \times 10^4$	42
Gambar 2. 33 Skema Penelitian	43
Gambar 2. 34 Grafik CoP turbin angin Savonius sebagai fungsi dari tip speed ratio pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$	44
Gambar 2. 35 Grafik C_M turbin angin Savonius sebagai fungsi dari tip speed ratio pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$	44
Gambar 2. 36 Grafik Torsi Statis terhadap blade angle pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$	45
Gambar 2. 37 Kontur tekanan statis antara turbin angin Savonius pada sudut a) 30° turbin konvensional b) 30° dengan silinder I- 65°	

c) 90° turbin konvensional d) 90° dengan silinder I-65° e) 150° turbin konvensional f) 150° dengan silinder I-65°	46
Gambar 2. 38 Kontur kecepatan antara turbin angin Savonius pada sudut a) 30° turbin konvensional b)30° dengan silinder I-65° c) 90° turbin konvensional d) 90° dengan silinder I-65° e) 150° turbin konvensional f) 150° dengan silinder I-65°	47
Gambar 3. 1 Skema penelitian turbin angin Savonius	51
Gambar 3. 2 Axial fan CKE SF-45.....	59
Gambar 3. 3 Skema turbin angin Savonius.....	60
Gambar 3. 4 Skema silinder pengganggu	61
Gambar 3. 5 Skema susunan peralatan penelitian dan dimensinya	62
Gambar 3. 6 Skema susunan penyangga turbin angin Savonius .	62
Gambar 3. 7 Skema Honeycomb beserta dimensinya.....	63
Gambar 3. 8 Pemasangan Brake dynamometer	64
Gambar 3. 9 Tachometer OMEGA seri HHT12	65
Gambar 3. 10 Anemometer	66
Gambar 3. 11 Torque meter LOTRON mode TQ-8800	67
Gambar 3. 12 Voltage regulator	68
Gambar 3. 13 Neraca Pegas.....	69
Gambar 3. 14 Pemberat	69
Gambar 3. 15 Flowchart penentuan putaran dan torsi dinamis ...	74
Gambar 3. 16 Flowchart penentuan putaran dan torsi statis	77
Gambar 4. 1 Skema posisi pengukuran uniform test.....	81
Gambar 4. 2 Hasil uniform test posisi (a) horizontal (b) vertical pada kecepatan 5m/s.....	82
Gambar 4. 3 Grafik nilai Coefficient of Moment sebagai fungsi dari tip speed ratio	90
Gambar 4. 4 Grafik CoP ₀ sebagai fungsi Tip speed ratio	92
Gambar 4. 5 Grafik hubungan Coefficient of Power turbin angin Savonius tanpa pengganggu (CoP ₀) maks sebagai fungsi kecepatan angin (U).....	93
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan hasil penelitian dengan penelitian oleh Mahmoud et al	95

Gambar 4. 7 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> turbin angin Savonius tanpa pengganggu (C_{TS0}) fungsi sudut sudu turbin (Θ)	96
Gambar 4. 8 Grafik nilai <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 3,8 m/s	99
Gambar 4. 9 Grafik nilai <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 4,4 m/s	100
Gambar 4. 10 Grafik nilai <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 5 m/s	102
Gambar 4. 11 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 6 m/s	103
Gambar 4. 12 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 7 m/s	105
Gambar 4. 13 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 8 m/s	107
Gambar 4. 14 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> sebagai fungsi dari tip speed ratio pada kecepatan 9 m/s	108
Gambar 4. 15 Grafik Nilai <i>Coefficient of Power</i> Fungsi Tip speed ratio pada kecepatan 3,8 m/s	110
Gambar 4. 16 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 4,4 m/s	112
Gambar 4. 17 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 5 m/s	113
Gambar 4. 18 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 6 m/s	115
Gambar 4. 19 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 7 m/s	117
Gambar 4. 20 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 8 m/s	118
Gambar 4. 21 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) sebagai fungsi tip speed ratio (λ) pada kecepatan 9 m/s	120
Gambar 4. 22 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 3,8m/s	122

Gambar 4. 23 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 4,4m/s.....	123
Gambar 4. 24 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 5 m/s.....	125
Gambar 4. 25 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 6 m/s.....	126
Gambar 4. 26 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 7 m/s.....	128
Gambar 4. 27 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 8 m/s.....	129
Gambar 4. 28 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> fungsi sudut pada kecepatan 9 m/s.....	131
Gambar 4. 29 Grafik perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu fungsi jarak $(S/D) = 1,2 - 2,6$	134

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 variasi curtain	33
Tabel 2. 2 Perbandingan Penelitian Kelompok Turbin Angin Savonius.....	49
Tabel 3. 1 Spesifikasi axial fan CKE SF-45	59
Tabel 3. 2 Spesifikasi turbin angin Savonius.....	60
Tabel 3. 3 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12	65
Tabel 3. 4 Spesifikasi Anemometer Digital OMEGA HHF141 ..	66
Tabel 3. 5 Spesifikasi torque meter LUTRON mode TQ-8800 ..	67
Tabel 3. 6 Spesifikasi voltage regulator.....	68
Tabel 3. 7 Spesifikasi neraca pegas	69
Tabel 3. 8 Hasil perhitungan <i>uncertainty</i>	80
Tabel 4. 1 $CoP_{max}/ CoP_{0 max}$ fungsi Reynold Number dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada jarak $S/D = 1,8$	132
Tabel 4. 2 Tabel Variasi Eksperimen Kelompok 7.....	134
Tabel A. 1 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s.....	143
Tabel A. 2 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s.....	143
Tabel A. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s	144
Tabel A. 4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s	144
Tabel A. 5 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s	145
Tabel A. 6 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s	145
Tabel A. 7 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s	146
Tabel B. 1 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 3,8 m/s	147

Tabel B. 2 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 4,4 m/s.....	147
Tabel B. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 5 m/s.....	148
Tabel B. 4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 6 m/s.....	148
Tabel B. 5 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 7m/s.....	149
Tabel B. 6 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 8m/s.....	149
Tabel B. 7 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 9 m/s.....	150
Tabel C. 1 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 3,8 m/s	151
Tabel C. 2 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 4,4 m/s.....	152
Tabel C. 3 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 5 m/s.....	153
Tabel C. 4 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 6 m/s.....	154
Tabel C. 5 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 7 m/s.....	155
Tabel C. 6 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 8 m/s.....	156
Tabel C. 7 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 9m/s.....	157

Tabel D. 1 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 3,8 m/s	158
Tabel D. 2 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 4,4 m/s	159
Tabel D. 3 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 5 m/s	160
Tabel D. 4 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 6m/s	161
Tabel D. 5 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 7 m/s	162
Tabel D. 6 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 8 m/s	163
Tabel D. 7 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 9 m/s	164

DAFTAR SIMBOL

A	: <i>cross sectional area</i> (m^2)
b	: diameter poros (mm)
C_D	: Koefisien <i>drag</i>
C_M	: <i>Coefficient of Moment</i>
CoP	: <i>Coefficient of Power</i>
C_{TS}	: <i>Coefficient of Static Torque</i>
D	: diameter sudu turbin angin Savonius (mm)
d	: diameter silinder pengganggu (mm)
D_o	: diameter <i>endplate</i> (mm)
Ek	: energi kinetik angin (Joule)
F	: gaya yang bekerja pada poros turbin (N)
F_D	: Gaya <i>drag</i> (N)
g	: percepatan gravitasi (m/s^2)
H	: tinggi turbin angin Savonius (mm)
h	: tinggi silinder pengganggu (mm)
L	: diameter turbin angin Savonius (mm)
m_a	: massa angin (kg)
m	: massa pemberat (kg)
\dot{m}	: laju alir massa angin (kg/s)
n	: jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)
P_T	: daya rotor turbin (Watt)
P_w	: daya angin (Watt)
r	: jari-jari poros yang menerima beban (mm)
R	: jari-jari turbin (mm)
Re_L	: Bilangan Reynolds
s	: massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
t_a	: lama waktu angin mengalir ke turbin (s)
t	: tebal sudu turbin angin Savonius (mm)
T_D	: torsi dinamis (Nm)
T_s	: torsi statis (Nm)
U	: kecepatan angin (m/s)
λ	: <i>tip speed ratio</i>
ρ	: massa jenis angin (kg/m^3)

- ω : kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)
 μ : viskositas dinamik (Ns/m)
 ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
 Θ : sudut sudu turbin angin Savonius ($^\circ$)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik pada era modern ini menjadi sumber energi utama bagi kehidupan masyarakat dan operasional industri. Pada akhir Desember 2018, total kapasitas terpasang dan jumlah unit pembangkit PLN (Holding dan Anak Perusahaan) mencapai 41.696,67 MW dan 6.750 unit, dengan 71,77% atau 29.924,58 MW berada di Jawa. Total kapasitas terpasang mengalami peningkatan sebesar 5,16% dibandingkan dengan akhir Desember 2017. Presentase kapasitas terpasang per jenis pembangkit di Indonesia terdiri dari PLTU 20.192,00 MW (48,43%), PLTGU 9.812,11 MW (23,53%), PLTD 4.383,42 MW (10,51%), PLTA 3.582,98 MW (8,59%), PLTG 3.133,61 MW (7,52%), PLTP 579,50 MW (1,39%), PLTS dan PLTB 12,54 MW (0,03%). **(Statistik PLN 2018)**

Sejak tahun 1970-an, batubara menjadi sumber energi utama ketenagalistrikan di Indonesia. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), cadangan batubara yang ada di Indonesia mencapai 22,6 miliar ton, yaitu sekitar 2,2% dari cadangan batubara dunia. Penggunaan batubara sebagai sumber energi ketenagalistrikan ini dianggap mampu menjaga harga listrik nasional dengan cara membuat kebijakan pengendalian harga batubara domestik yang dapat menekan biaya produksi PLN. Akan tetapi, penggunaan batubara sebagai sumber energi utama di Indonesia ini memberikan konsekuensi terhadap lingkungan. Pada tahun 2014, intensitas karbon untuk pembangkit listrik adalah 738 grCO₂/kWh., lebih tinggi apabila dibandingkan dengan rata-rata dunia yaitu 567 grCO₂/kWh. **(Arinaldo dkk, 2019)**

Energi baru dan terbarukan (EBT) atau *renewable energy* merupakan solusi dari permasalahan lingkungan yang ditimbulkan oleh sumber energi batubara dan sumber energi fosil lainnya. Selain lebih ramah lingkungan, *renewable energy* ini

menggunakan sumber energi yang tidak dapat habis selama siklus alam masih berlangsung. Akan tetapi, sumber energi baru dan terbarukan juga memiliki kekurangan, yaitu energi yang dihasilkan masih jauh lebih rendah daripada energi yang dihasilkan oleh fosil. Untuk itu, pemerintahan Indonesia mengambil kebijakan untuk tetap menggunakan sumber energi dari fosil dan mengoptimalkan penggunaan sumber energi terbarukan. Kebijakan pemerintah mengenai energi nasional tersebut diatur dalam Peraturan Pemerintah no. 79 tahun 2014. Pada pasal 9 PP no. 79 tahun 2014 disebutkan sasaran kebijakan energi nasional yang ingin dicapai terkait dengan energi terbarukan, yaitu pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% (dua puluh tiga persen) dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% (tiga puluh satu persen) sepanjang keekonomiannya terpenuhi. (<http://peraturan.bpk.go.id>)

Sebagai usaha dalam mewujudkan kebijakan pemerintah, terdapat 70 *Power Purchase Agreement* (PPA) yang ditandatangani pada tahun 2017 oleh PLN terkait penambahan energi terbarukan sebanyak 1.214 MW. Akan tetapi, PPA yang telah disetujui itu tidak dapat terealisasi penuh. Sampai akhir tahun 2017, 55 dari PPA yang telah disetujui ini mengalami kesulitan dalam pembiayaan. Pada bulan November 2018, hanya 4 PPA yang dapat beroperasi penuh dan ditandatangani dengan total kapasitas 361,9 MW. Hal ini menyebabkan transisi penggunaan sumber energi fosil menjadi sumber energi terbarukan akan sangat sulit dilakukan. (Arinaldo dkk, 2019)

Indonesia memiliki potensi yang sangat besar untuk dapat mengembangkan EBT, salah satunya adalah energi bayu atau angin yang diperkirakan memiliki potensi energi 950 MegaWatt dengan kecepatan angin rata-rata berkisar pada 3 – 6 m/s. Kesadaran untuk dapat memanfaatkan energi angin ini sudah ada sejak tahun 1980, yaitu dibuktikan dengan adanya berbagai penelitian dan uji coba. Selain itu, berbagai kerjasama telah dilakukan baik dengan instansi dalam negeri maupun luar negeri, khususnya kerjasama dengan Jerman Barat dan Belanda. Proyek uji coba pertama yang

telah dihasilkan adalah pengoperasian satu unit turbin angin listrik 10 kW di Cilautereun Pamengpeuk, Jawa Barat dan Parangtritis di tahun 1985 untuk penerangan, pembuatan es, dan pengisian baterai. PLTB terbesar yang ada di Indonesia diresmikan pada tahun 2018, yaitu PLTB Sidrap yang memiliki kapasitas 75 MW. Akan tetapi, dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga lainnya, PLTB ini masih dinilai paling kecil. Data Statistik PLN menunjukkan kapasitas PLTB yang terpasang di Indonesia hanya 0,03% dari total kapasitas pembangkit yang terpasang. Data tersebut sekaligus menunjukkan bahwa pengoptimalan pemanfaatan energi angin di Indonesia masih sangat kurang. Penyebab utama kurang optimalnya pemanfaatan potensi energi angin di Indonesia ini adalah karena nilai ekonomis energi, yaitu biaya operasional per energi yang dihasilkan (Rp/kWh) masih tinggi. **(Pakpahan, 2003)**

Berbagai upaya peningkatan performa dari turbin angin terus dilakukan untuk dapat meningkatkan jumlah energi yang dihasilkan, sehingga nilai ekonomis energi angin akan turun. Pemilihan jenis turbin angin yang tepat merupakan salah satu faktor penting dalam upaya ini. Jenis turbin angin berdasarkan sumbu putarnya dibagi menjadi dua, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Keunggulan dari jenis *Horizontal Axis Wind Turbine* adalah memiliki nilai efisien daya tinggi apabila dibandingkan turbin angin lainnya. Akan tetapi, jenis turbin ini memiliki kekurangan, diantaranya adalah sangat bergantung pada arah angin yang searah sumbunya, membutuhkan kecepatan angin yang cukup besar untuk memutar turbin, mekanisme yang cukup rumit, serta membutuhkan biaya operasional yang mahal. Jenis turbin kedua, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) memiliki beberapa tipe, salah satunya adalah turbin angin Savonius. Kelebihan dari VAWT adalah konstruksi yang lebih sederhana dan dapat dioperasikan pada kecepatan angin rendah. Sayangnya, turbin angin jenis VAWT ini memiliki nilai efisiensi rendah bila dibandingkan dengan HAWT.

Turbin angin tipe *Savonius* adalah salah jenis turbin angin VAWT yang cukup ideal untuk wilayah dengan potensi energi angin seperti di Indonesia. Turbin jenis ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia, Sigurd J.Savonius. Pada dasarnya, konsep dari turbin Savonius ialah dua buah sudu setengah silinder yang dipasang berbentuk S. Bentuk S pada turbin Savonius menyebabkan turbin ini mampu menerima energi angin dari segala arah dengan kecepatan rendah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan menerima gaya *drag* dari aliran angin yang menyebabkan terjadinya selisih torsi, sehingga rotor turbin berputar. Torsi yang memutar rotor turbin ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Kelebihan lain dari turbin Savonius ini adalah konstruksi lebih sederhana, sehingga biaya pembuatan dan perawatannya lebih murah. Namun, turbin ini memiliki kelemahan, yaitu nilai efisiensinya rendah. Hal ini yang mendorong banyak dilakukan penelitian dan eksperimen untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius.

Pada tahun 2010, **Mohamed et al (2010)** melakukan simulasi menggunakan *software Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk meningkatkan efisiensi serta performansi dari turbin angin Savonius dengan peletakan *obstacle* (pengganggu) berupa plat datar di depan *returning blade*. Peletakan pengganggu ini bertujuan untuk mengarahkan angin di depan *returning blade* menuju ke arah *advancing blade*. Pada simulasi ini digunakan variasi nilai *speed ratio* (λ) dan sudut plat (β) pada kecepatan angin 10 m/s. Hasil simulasi didapatkan bahwa *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin Savonius 2 sudu yang diberikan pengganggu dapat meningkat hingga 27,3% pada $\lambda=0,7$ dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$. Sedangkan pada turbin Savonius tiga sudu berpengganggu, hasil dari *Coefficient of Power (CoP)* turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 27,5%, yaitu pada *speed ratio* 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$.

Mahmoud et al (2010) melakukan eksperimen untuk meningkatkan performa rotor Savonius berdasarkan geometrinya. Pada eksperimen yang dilakukan oleh Mahmoud, digunakan

parameter berupa jumlah sudu turbin (dua, tiga, dan empat sudu), jumlah *stages* (*single and double stages*), *overlap ratio* (0 sampai 0,35), *aspect ratio* (0,5 ; 1; 2; 4; 5), dan keberadaan *end plate*. Pada eksperimen ini, turbin angin diletakkan di depan *wind tunnel* dengan kecepatan angin pada rentang 0-13 m/s saat keluar dari *wind tunnel*. Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa performa paling efisien ketika digunakan 2 sudu turbin, *double stages*, tanpa *overlap ratio*, *aspect ratio* 5 ,dan dengan menggunakan *end plate*.

Altan et al (2008) melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan memberikan dua buah plat yang diposisikan di depan turbin dengan tujuan untuk mengganggu aliran udara di depan *returning blade* dan mengarahkan aliran udara ke *advancing blade*. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah panjang plat (l_1 dan l_2), yaitu l_1 (cm) = 45; 34; 22 dan l_2 (cm) = 52; 39; 26 ,serta besar sudut plat yaitu α (30-60°) dan β (0-30°) dengan bilangan Reynolds $1,5 \times 10^5$. Hasil penelitian didapatkan bahwa *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin angin Savonius dapat meningkat hingga 38,5% pada aplikasi pengganggu yaitu dengan panjang plat $l_1 = 45$ cm dan $l_2 = 52$ cm dengan sudut sudu pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

Penelitian oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** dilakukan untuk mengamati pengaruh pemberian silinder sirkular pengganggu di depan silinder sirkular utama terhadap nilai gaya *drag* pada silinder sirkular utama. Tsutsui dan Igarashi menyebutkan bahwa *shear layer* dari silinder sirkular akan terlepas dan mengenai permukaan silinder sirkular utama yang berada di dekatnya. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D), dan harga bilangan Reynolds. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa nilai *pressure coefficient* dipengaruhi oleh nilai *Reynolds Number* dan d/D . Kesimpulan lain yang didapatkan adalah penurunan harga koefisien *drag* (C_D) disebabkan oleh peningkatan bilangan Re dan d/D , serta penurunan nilai L/D .

Mudjahidin (2019) telah melakukan eksperimen pada turbin angin Savonius dengan tujuan meningkatkan performa turbin dengan cara memberikan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter terhadap diameter sudu (d/D) = 0,5 yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$; variasi jarak $S/D = 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; \text{ dan } 2,8$; serta variasi bilangan Reynolds $9,6 \times 10^4; 13,4 \times 10^4; \text{ dan } 17,3 \times 10^4$. Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kondisi paling efektif pada $Re 9,6 \times 10^4; S/D = 2$, yaitu dengan kenaikan nilai CoP dan C_M maksimal masing-masing sebesar 13,23% dan 33,33% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.

Sakti et al (2019) melakukan eksperimen dan investigasi numerik pada turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu tipe I-65° di depan *returning blade*. Turbin angin yang digunakan memiliki diameter sudu (D) = 165,2 mm, *aspect ratio* (α) = 1; *overlap ratio* (β) = 0; perbandingan diameter *endplate* terhadap diameter turbin angin Savonius (D_o/L) = 1,07. Sedangkan untuk silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) = 0,5 dengan rasio peletakan $S/D = 1,4$. Hasil dari eksperimen dan simulasi yang dilakukan, didapatkan peningkatan performa dengan menggunakan silinder pengganggu. Peningkatan nilai CoP untuk eksperimen sebesar 23,61% dan metode simulasi sebesar 25,32%.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan tersebut, upaya meningkatkan performa turbin angin Savonius dapat dilakukan berdasarkan geometri turbin atau dengan memberikan pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius. Salah satu pengganggu yang dapat diberikan adalah silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Peletakan silinder pengganggu ini diharapkan akan menurunkan gaya *drag* pada *returning blade*, sesuai penelitian **Tsutsui dan Igarashi (2002)** dan pengaplikasiannya pada turbin angin Savonius telah dilakukan oleh **Mudjahidin (2019) dan Sakti et al(2019)**. Perbedaan dari penelitian ini dengan penelitian yang telah dilakukan, terutama terhadap penelitian oleh **Mudjahidin**

dan **Sakti et al** adalah variasi yang digunakan pada penelitian. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah nilai kecepatan angin, yaitu 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 (m/s) dengan rasio diameter silinder $d/D = 0,5$ yang diletakkan pada jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk dilakukan.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin angin tipe VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang memiliki dua bagian sudu, yaitu bagian *advancing blade* dan *returning blade*. Perbedaan antara kedua bagian sudu tersebut terletak pada kelengkungannya. *Advancing blade* merupakan sudu turbin yang memiliki kelengkungan berbentuk cekung atau menghadap arah angin. Sedangkan bagian *returning blade* memiliki bentuk cembung atau membelakangi arah aliran angin. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan memanfaatkan gaya *drag* pada turbin angin Savonius karena dialiri fluida, dimana nilai gaya *drag* pada *advancing blade* lebih besar daripada gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Selisih nilai gaya *drag* dikalikan dengan jari-jari sudu turbin angin Savonius akan menghasilkan nilai selisih torsi angin Savonius. Dari nilai selisih torsi tersebut dikalikan dengan nilai kecepatan angular dari turbin akan menghasilkan daya aktual dari turbin angin Savonius. Berdasarkan hubungan tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa nilai daya aktual turbin sebanding dengan nilai selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin angin Savonius.

Penelitian untuk meningkatkan efisiensi dan performa turbin Savonius sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah dengan menempatkan pengganggu di depan *returning blade*. Peletakan pengganggu di depan *returning blade* ini dimaksudkan untuk menurunkan nilai gaya *drag* pada *returning blade*, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara *returning* dan *advancing blade* akan meningkat dan menyebabkan peningkatan daya aktual pada turbin angin Savonius.

Pada penelitian ini, digunakan pengganggu berupa silinder sirkular dengan variasi yang digunakan adalah kecepatan angin yang mengalir pada turbin angin Savonius. Adapun beberapa hipotesa awal pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* karena diduga akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan turun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.
2. *Shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan jatuh pada permukaan *returning blade* yang akan mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*. Terganggunya *boundary layer* pada *returning blade* membuat transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen akan lebih cepat terjadi, sehingga titik separasi akan tertunda atau mundur ke belakang. Tertundanya separasi pada *returning blade* ini menyebabkan daerah *wake* di belakang *returning blade* akan menyempit dan gaya *drag* akan turun, sehingga nilai selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* ini naik dan daya pun ikut meningkat nilainya.
3. Penelitian ini dilakukan dengan variasi kecepatan aliran udara. Semakin besar nilai kecepatan aliran udara akan meningkatkan gaya *drag* angin dan kecepatan putar poros turbin, sehingga nilai *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin angin Savonius meningkat. Akan tetapi, nilai kecepatan aliran udara ini memiliki nilai optimum untuk menghasilkan CoP turbin angin Savonius maksimum. Setelah nilai optimum tercapai, kenaikan kecepatan angin akan menurunkan nilai CoP yang disebabkan oleh semakin banyaknya kerugian yang

terjadi. Oleh karena itu, variasi kecepatan yang dilakukan pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui nilai kecepatan optimum yang menghasilkan performa maksimum.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Fluida yang digunakan adalah udara dalam kondisi *steady*, *incompressible*, dan *uniform flow*.
2. Analisa aliran dilakukan secara dua dimensi.
3. Analisa dilakukan pada silinder sirkular utama (*returning blade*) pada turbin angin Savonius dengan diameter (D) = 167 mm dan bodi pengganggu berbentuk silinder dengan diameter (d) 88,8 mm.
4. Variasi jarak pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) yang digunakan adalah 1,8.
5. Variasi kecepatan angin yang digunakan adalah 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 dalam satuan m/s.
6. Perpindahan panas dapat diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara meletakkan silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius. Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) yang digunakan sebesar 0,5 dengan rasio jarak pusat *returning blade* turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) yang digunakan sebesar $S/D = 1,8$ pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 dalam satuan m/s. Adapun tujuan dari eksperimen ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu terhadap nilai *Coefficient of Moment* (C_M), *Coefficient of Power* (CoP) dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu

2. Mengetahui kecepatan optimum pada desain turbin angin Savonius yang digunakan

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian tugas akhir ini adalah memberi penjelasan tentang pengaruh pemberian silinder sirkular didepan *returning blade* turbin angin Savonius terhadap torsi statis, torsi dinamis, *Coefficient of Moment* (C_M), *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) , dan *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin Savonius.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Turbin Angin

Angin merupakan salah satu sumber Energi Baru dan Terbarukan yang memiliki potensi cukup besar di Indonesia, yaitu diperkirakan dapat menghasilkan 950 MW. Pemanfaatan energi angin diharapkan akan mengurangi ketergantungan pemanfaatan energi dari bahan bakar fosil di Indonesia. Salah satu komponen utama yang digunakan untuk konversi energi angin ini adalah turbin angin. Turbin angin akan mengkonversi energi kinetik yang dimiliki oleh angin menjadi energi mekanik berupa putaran poros turbin. Putaran poros turbin tersebut yang kemudian dikonversi oleh generator menjadi energi listrik.

Pada awalnya, turbin angin ditemukan di Eropa untuk memenuhi kebutuhan para petani seperti penggilingan padi, pengaliran irigasi, dan lain sebagainya. Kemudian pada tahun 1887, James Blyth menggunakan turbin angin ini sebagai pembangkit listrik pertama kali, yaitu untuk mengisi baterai sebagai penerangan rumah. Turbin angin ini terus dikembangkan sampai saat ini dan menjadi salah satu sumber energi terbarukan di beberapa negara. Akan tetapi, pemanfaatan energi angin sebagai pembangkit sampai saat ini belum banyak dilakukan, terutama di Indonesia.

Penelitian dan uji coba dalam pemanfaatan energi angin di Indonesia mulai dilakukan pada tahun 1980, yaitu sejak terbentuknya proyek R&D bidang energi angin. Di dalam pelaksanaan penelitian dan uji coba ini, kerjasama telah dilakukan bersama dengan beberapa instansi dalam maupun luar negeri, khususnya Jerman Barat dan Belanda. Proyek uji coba pertama yang dihasilkan adalah pengoperasian satu buah turbin angin 10 kW di Cilautereun Pamengpeuk, Jawa Barat dan di Parangtritis. Pada proyek tersebut, daya yang dihasilkan digunakan sebagai penerangan, pembuatan es, dan pengisian baterai.

Pemilihan jenis turbin merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan dalam pemasangan turbin angin di suatu wilayah karena masing-masing jenis turbin memiliki kelebihan dan kekurangan. Berdasarkan sumbu putarnya, turbin angin dibagi menjadi 2, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Jenis turbin yang pertama, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), merupakan turbin angin yang poros utamanya horizontal atau sejajar dengan arah datangnya angin. Rotor pada turbin angin jenis ini berfungsi untuk menangkap energi angin yang datang dan mengubahnya menjadi energi gerak poros. Putaran poros ini kemudian akan ditransmisikan ke *gearbox* yang akan mengubah putaran rendah dari poros menjadi putaran tinggi. Selanjutnya putaran tinggi tersebut yang akan diubah oleh generator menjadi energi listrik. Jenis turbin tipe horizontal ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin tipe vertikal. Akan tetapi, turbin jenis ini juga memiliki kekurangan seperti, membutuhkan tower yang tinggi dan kokoh untuk menopang komponen-komponennya, serta biaya instalasi dan perawatannya yang mahal. Contoh turbin angin HAWT dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut ini.



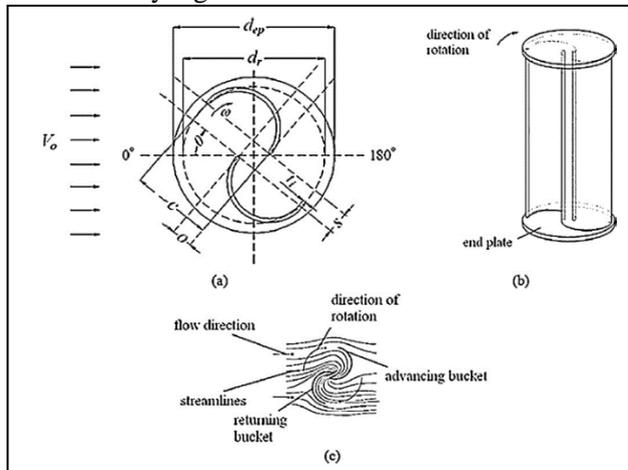
Gambar 2. 1 Turbin angin horizontal
(<https://www.republika.co.id>)

Jenis turbin angin kedua, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah turbin angin yang menggunakan poros utama yang tegak lurus terhadap arah datangnya angin. Jenis turbin angin ini cukup sederhana dengan sudu yang dipasang sejajar poros dan mengakibatkan turbin angin tipe ini dapat menangkap datangnya angin dari segala arah. Turbin angin VAWT ini terdiri dari beberapa tipe, diantaranya adalah turbin angin Savonius dan turbin angin Darrieus. Turbin angin Darrieus awalnya diperkenalkan di Perancis sekitar tahun 1920-an. Turbin angin ini memiliki bilah-bilah tegak yang berputar ke dalam dan ke luar dari arah mata angin. Sedangkan pada turbin Savonius, turbin ini memakai 2 sudu yang disusun berbentuk S. Perbedaan kedua jenis turbin ini adalah turbin Savonius memanfaatkan gaya *drag*, sedangkan turbin Darrieus memanfaatkan gaya *lift*. Turbin angin Savonius dan Darrieus memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan yang dimiliki oleh turbin angin jenis VAWT ini adalah memiliki torsi yang tinggi sehingga mampu berputar dalam kecepatan angin yang rendah, dapat menerima angin dari segala arah, dan biaya instalasi serta perawatannya lebih murah. Kekurangan dari turbin angin ini adalah memiliki efisiensi yang cukup rendah apabila dibandingkan dengan turbin angin horizontal. Kelebihan dan kekurangan dari turbin angin VAWT inilah yang membuat banyak penelitian dilakukan, terutama untuk daerah yang memiliki potensi angin dengan kecepatan angin yang rendah, seperti di Indonesia.

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius pertama kali dikenalkan pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius. Pada awalnya, turbin angin Savonius ini menggunakan 2 sudu yang disusun berbentuk S ketika dilihat dari pandangan atas. Satu sudu disebut sebagai *advancing blade*, yaitu sudu yang memiliki cekungan tegak lurus atau menghadap arah datangnya aliran. Sedangkan sudu kedua adalah *returning blade* yang memiliki cekungan membelakangi arah datangnya aliran. Pada penelitian optimalisasi turbin angin Savonius, beberapa modifikasi dilakukan

dan salah satunya adalah modifikasi jumlah sudu pada turbin angin Savonius. Akan tetapi dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa turbin angin dengan 2 sudu memiliki efisiensi yang terbaik.



Gambar 2. 2 Penampang Savonius dari atas (Akwa et al, 2012)

Cara kerja dari turbin angin Savonius ini adalah dengan memanfaatkan gaya *drag* dari angin yang menyebabkan sudu-sudu pada turbin angin berputar. Putaran turbin Savonius terjadi akibat adanya selisih gaya *drag* pada *advancing blade* dan *returning blade*. Poros utama yang ikut berputar bersama dengan putaran sudu ini akan dimanfaatkan generator untuk diubah menjadi energi listrik. Semakin cepat putaran poros, maka energi listrik yang dihasilkan juga akan semakin besar. Oleh karena itu, selisih gaya *drag* yang semakin besar sangat diharapkan dalam penggunaan turbin angin Savonius ini.

2.3 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya hambat yang sejajar dengan arah aliran dan timbul ketika suatu fluida mengalir melalui suatu benda, dimana aliran tersebut dikenai tegangan geser pada permukaan benda atau bisa disebut juga dengan aliran yang berada di dalam medan aliran *viscous*. Contoh fenomena gaya *drag* yang cukup mudah diamati adalah gaya *drag* yang menghambat laju mobil. Akibat adanya gaya *drag* ini, mobil di desain dengan bentuk yang lebih aerodinamis supaya mengurangi kerugian energi yang terjadi karena gaya *drag* tersebut. Dalam banyak kasus, adanya gaya *drag* ini tidak diinginkan, akan tetapi gaya *drag* ini justru menjadi gaya yang sangat diinginkan pada *advancing blade* turbin angin Savonius

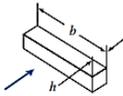
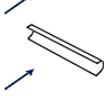
Gaya *drag* seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag*, yaitu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui besarnya nilai gaya *drag*. Secara umum, besarnya gaya *drag* untuk aliran *incompressible* dapat dinyatakan dalam persamaan :

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

dimana :

- F_D : Gaya *drag* (N)
- C_D : Koefisien *drag*
- ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
- U : Kecepatan fluida (m/s)
- A : Luas permukaan benda yang ditabrak oleh fluida (m^2)

Nilai dari koefisien *drag* merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dan juga dipengaruhi oleh permukaan yang dilewati oleh aliran fluida. Pada bidang yang tegak lurus dengan arah aliran fluida, beberapa nilai koefisien *drag* dapat dilihat dari tabel di bawah ini.

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

^aData from Hoerner [16].
^bBased on ring area.

Gambar 2. 3 Tabel koefisien *drag* pada beberapa bentuk permukaan bidang (Pritchard et al , 2011)

2.4 Bilangan Reynolds

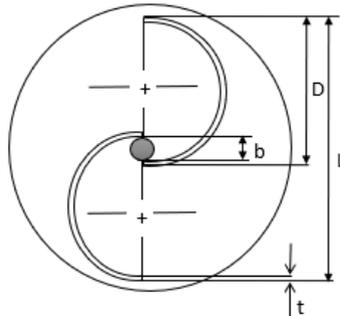
Bilangan Reynolds adalah suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan karakteristik aliran fluida. Karakteristik yang dimaksud adalah jenis aliran laminar dan turbulen. Secara umum, bilangan Reynolds ini dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

- Re_L : Bilangan Reynolds
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- U : kecepatan fluida (m/s)
- L : Panjang karakteristik (m)
- μ : viskositas dinamik (Ns/m)

Pada penelitian ini, panjang karakteristik yang digunakan memiliki nilai sebagai berikut.



Gambar 2. 4 Skema Turbin Angin Savonius tampak atas

$$L = 2D - b - 2t \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana :

D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)

b : diameter poros (m)

t : tebal sudu turbin angin Savonius (m)

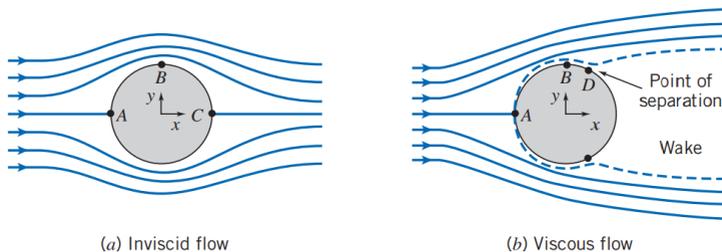
Bilangan Reynolds memiliki nilai yang berbeda-beda untuk menggolongkan aliran ke dalam jenis aliran laminar dan turbulen. Pada aliran yang mengalir di pelat datar, nilai transisi bilangan Reynolds adalah 5×10^5 . Nilai transisi pada aliran internal adalah $Re = 2300$. Sedangkan untuk aliran yang melewati permukaan *smooth sphere* memiliki nilai transisi $Re = 3 \times 10^5$.

2.5 Aliran Melintasi Sebuah Silinder

Suatu aliran yang melewati benda, akan mengalami kehilangan energi akibat adanya gaya hambat. Pada gaya hambat dua dimensi, gaya hambat yang arahnya sejajar dengan aliran dinamakan gaya *drag* sedangkan gaya hambat yang arahnya tegak lurus arah aliran disebut gaya *lift* atau gaya angkat. Adanya gaya hambat ini terjadi karena pengaruh dari efek *viscous* pada permukaan silinder. Gaya hambat yang terjadi akibat perbedaan tekanan pada arah normal terhadap permukaan disebut dengan *pressure drag*, sedangkan gaya *drag* yang timbul pada arah

tangensial terhadap permukaan disebut juga dengan *skin friction drag*.

Pada aliran fluida yang melewati silinder, keberadaan gaya *drag* dipengaruhi oleh titik separasi aliran. Proses terjadinya separasi dan *wake* pada aliran yang melewati silinder dapat diilustrasikan sebagai berikut.



Gambar 2. 5 Aliran melewati bola (Pritchard, 2011)

Pada gambar 2.5, menunjukkan dua jenis aliran yang melewati sebuah silinder pejal, yaitu aliran *inviscid* dan aliran *viscous*. Pada gambar 2.5 (a), yaitu aliran *inviscid* yang mengalir melewati silinder pejal, terlihat bahwa aliran fluida membentuk *streamline* yang mengikuti bentuk permukaan silinder pejal. Pada aliran *inviscid*, viskositas dari suatu aliran dapat diabaikan sehingga aliran tersebut tidak dipengaruhi oleh tegangan geser. Akan tetapi, pada kenyataannya, tidak ada fluida yang benar-benar memiliki viskositas nol. Sedangkan pada kondisi dimana viskositas dari suatu fluida berpengaruh dan menyebabkan terjadinya tegangan geser disebut dengan aliran *viscous*. Perbedaan yang paling menonjol dari aliran *inviscid* dan *viscous* pada gambar 2.5 adalah terdapatnya *boundary layer* pada aliran *viscous* melewati silinder pejal, sehingga menyebabkan adanya daerah *wake* di bagian belakang silinder.

Pada aliran *viscous* yang melewati silinder pejal seperti gambar 2.5 (b), terdapat titik stagnasi yang merupakan titik terjadinya tabrakan antara aliran fluida dan permukaan benda yang menyebabkan aliran fluida memiliki kecepatan nol dengan tekanan maksimum. Dari titik stagnasi ini kemudian muncul *boundary*

layer edge, yaitu garis yang memisahkan antara daerah yang terpengaruh tegangan geser atau daerah *viscous* dengan daerah *inviscid*. Kemudian, tekanan pada aliran terus menurun dan kecepatannya naik hingga pada titik B, yaitu titik dengan kecepatan aliran fluida memiliki nilai maksimum dan tekanan minimum. Setelah melewati titik B, fluida akan mengalami kenaikan tekanan atau gradien tekanannya bernilai positif ($\frac{\delta P}{\delta \theta} > 0$) yang disebut juga dengan *adverse pressure gradient*. Akibat dari peningkatan tekanan ini, aliran fluida di dalam *boundary layer* mengalami perlambatan. Hingga akhirnya pada titik D yang disebut juga dengan titik separasi, momentum fluida tidak mampu lagi melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* yang menyebabkan terjadinya *back flow*. Daerah setelah titik separasi dan dibatasi oleh *boundary layer* atas bawah disebut daerah *wake*, yaitu daerah bertekanan rendah.

2.6 Torsi Statis

Torsi statis merupakan ukuran kuantitatif dari sebuah gaya yang menyebabkan gerak rotasi suatu benda. Besarnya torsi yang terjadi pada turbin angin Savonius bergantung pada gaya *drag* angin dan dapat dituliskan dalam persamaan :

$$T_s = F_D R \dots\dots\dots(2.4)$$

Dengan substitusi gaya *drag* dari persamaan 2.1, maka didapatkan persamaan :

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

dimana:

T_s : torsi yang dihasilkan oleh putaran poros (Nm)

R : jari-jari turbin (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2t}{2}$

2.7 Perhitungan Daya Angin

Angin atau udara yang bergerak merupakan sumber energi pada turbin angin. Energi kinetik yang dimiliki oleh angin akan dikonversi menjadi energi listrik oleh turbin angin. Besarnya

energi kinetik yang dimiliki oleh angin dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m_a \cdot U^2 \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :

E_k : energi kinetik angin (Joule)

m_a : massa angin (kg)

U : kecepatan angin (m/s)

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dapat dituliskan dalam persamaan :

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \dots\dots\dots(2.7)$$

atau

$$\dot{m} = \rho \cdot U \cdot A \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana:

\dot{m} : laju alir massa angin (kg/s)

ρ : massa jenis angin (kg/m³)

A : *cross sectional area* (m²)

U : kecepatan angin (m/s)

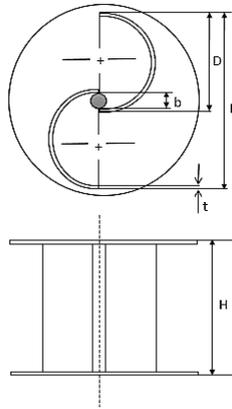
Cross sectional area merupakan luas permukaan sudu pada *advancing* dan *returning blade* yang ditabrak oleh angin. Apabila digunakan 2 sudu dengan bentuk yang identik, maka maka luas total permukaan turbin yang ditabrak oleh angin dapat dihitung dengan persamaan :

$$A = (2D-b-2t) H = L.H \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana :

L : diameter turbin angin Savonius (m)

H : tinggi sudu (m)



Gambar 2. 6 Skema turbin angin Savonius tampak samping dan atas

Daya merupakan besarnya energi per satuan waktu. Dari persamaan 2.6 – 2.8, daya yang dimiliki oleh angin dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3 \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana :

- P_w : daya dari angin (Watt)
- A : *cross sectional area* (m²)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m³)
- U : kecepatan aliran angin (m/s)

2.8 Perhitungan Daya Rotor Turbin

Pada perhitungan daya aktual turbin, digunakan persamaan sebagai berikut :

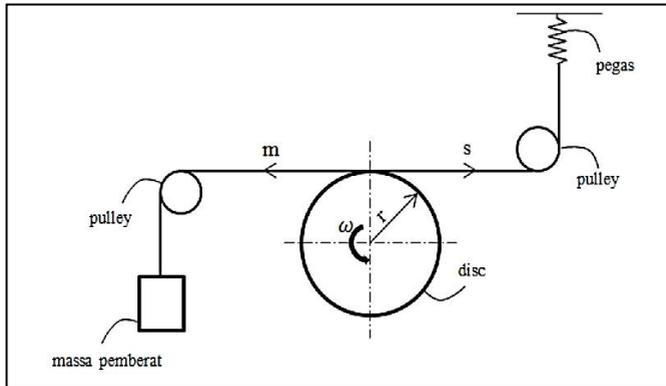
$$P_T = T_D \cdot \omega \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana :

- P_T : daya rotor turbin (Watt)
- T_D : torsi dinamis dari *Brake dynamometer* (Nm)
- ω : kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)

Nilai torsi dinamis didapatkan dari mekanisme *brake dynamometer* yang diterapkan pada poros turbin. Penggunaan

mekanisme ini dilakukan dengan melakukan pengukuran massa beban yang diberikan pada turbin dan pembacaan nilai neraca pegas yang didasari oleh penelitian dari **N.H Mahmoud et al** pada tahun 2010. Skema dari mekanisme *brake dynamometer* ini dapat dilihat pada gambar 2.7 sebagai berikut.



Gambar 2. 7 Free body diagram Brake dynamometer (Mudjahidin, 2019)

Nilai torsi dinamis dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$T_D = F \cdot r \dots\dots\dots(2.12)$$

dimana:

F : gaya yang bekerja pada poros turbin (N)

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

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$F = | m \cdot s | g \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana:

m : massa pemberat (kg)

s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

2.9 Tip Speed Ratio (λ)

Tip speed ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan tangensial dari turbin terhadap kecepatan angin. Berdasarkan pengertian tersebut, nilai dari tip speed ratio (λ) dapat dituliskan dalam persamaan:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \dots \dots \dots (2.14)$$

dimana :

- λ : tip speed ratio
- ω : kecepatan angular turbin (rad/s)
- R : jari-jari turbin (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2t}{2}$
- U : kecepatan angin (m/s)

2.10 Coefficient of Moment (C_M), Coefficient of Static Torque (C_{Tso}) dan Coefficient of Power (CoP)

Coefficient of Moment adalah perbandingan antara torsi aktual yang dimiliki oleh turbin terhadap torsi teoritis. Nilai dari C_M ini dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$C_M = \frac{T_d}{T_t} \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana torsi teoritis dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$T_t = \frac{P_w}{\omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R \dots \dots \dots (2.16)$$

maka, persamaan Coefficient of Moment menjadi:

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R} \dots \dots \dots (2.17)$$

Nilai Coefficient of Statis Torque didapatkan dari perbandingan torsi statis terhadap torsi teoritis atau dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$C_{TS} = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R} \dots \dots \dots (2.18)$$

Coefficient of Power (CoP) merupakan parameter yang digunakan untuk menentukan performa pada suatu turbin. Nilai CoP didapatkan dari perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh rotor turbin terhadap daya yang didapatkan dari angin.

$$CoP = \frac{P_r}{P_w} \dots \dots \dots (2.19)$$

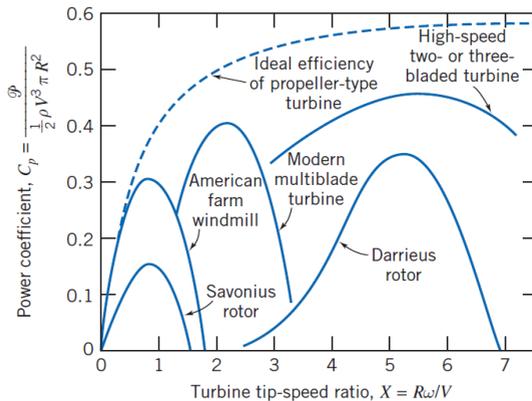
Berdasarkan persamaan 2.10 dan 2.11, persamaan CoP dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.

$$CoP = \frac{1}{2} \frac{\rho A U^3 C_p}{P_T} \dots \dots \dots (2.20)$$

dimana :

- P_T : daya rotor turbin (Watt)
- P_w : daya angin (Watt)
- ρ : massa jenis angin (kg/m^3)
- A : *cross sectional area* (m^2)
- U : kecepatan angin (m/s)

Nilai CoP memiliki rentang nilai dari 0 hingga 1, artinya nilai dari daya actual yang dihasilkan oleh turbin tidak akan lebih besar daripada daya yang diterima turbin dari energi kinetik angin.



Gambar 2. 8 Grafik Hubungan CoP dan *tip speed ratio* pada beberapa jenis turbin angin (Pritchard et al, 2011)

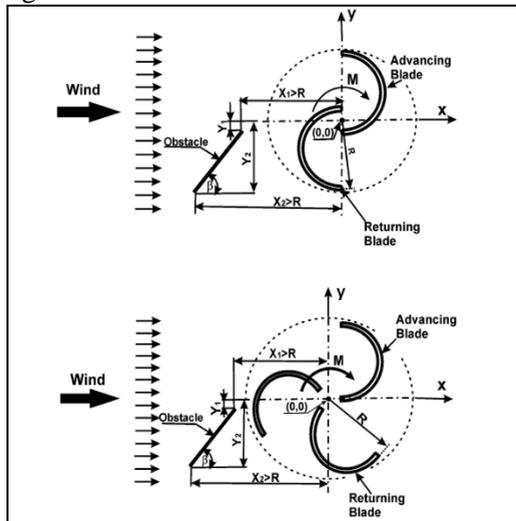
Berdasarkan gambar 2.8, beberapa macam turbin angin memiliki grafik yang berbeda-beda. masing-masing turbin memiliki titik awal kerja yang berbeda dengan titik optimum yang berbeda-beda pula. Kesemuanya grafik menunjukkan nilai CoP yang semakin meningkat pada kenaikan *tip speed ratio* hingga pada titik optimum masing-masing, kemudian nilai CoP akan turun.

2.11 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian dalam peningkatan performa turbin angin Savonius ini, dibutuhkan berbagai studi referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan agar dapat menunjang terlaksananya penelitian ini. Beberapa penelitian yang digunakan sebagai studi referensi adalah sebagai berikut.

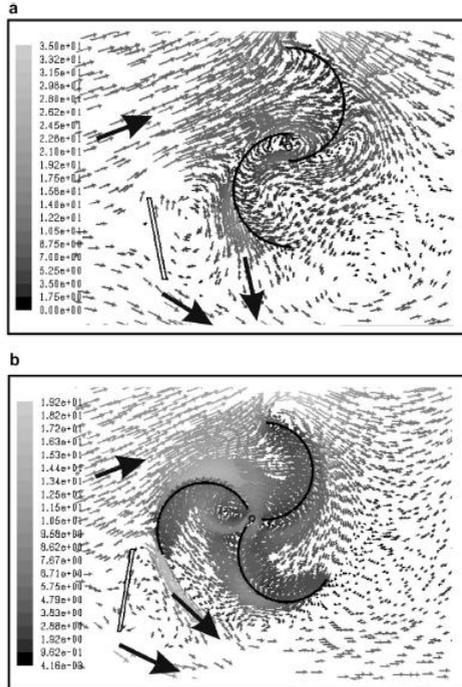
2.11.1 Mohamed et al (2010)

Pada tahun 2010, Mohamed et al melakukan simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) untuk mengoptimisasi turbin angin Savonius menggunakan *obstacle* atau pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Pengganggu yang digunakan berupa plat datar dengan sudut kemiringan β yang bertujuan untuk mengarahkan angin ke *advancing blade*. Skema alat penelitian pada simulasi ini dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut.



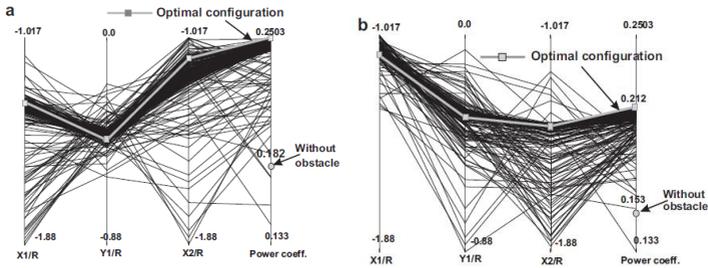
Gambar 2. 9 Skema alat penelitian pada simulasi turbin angin Savonius dengan 2 dan 3 sudu (Mohamed et al, 2010)

Variasi yang digunakan pada simulasi ini adalah posisi peletakan *obstacle* di depan *returning blade* (nilai $X1/R$, $X2/R$, $Y1/R$ dan β), jumlah sudu turbin (2 dan 3), serta *tip speed ratio* (0,3 - 1,4 dengan selisih 0,1). Sedangkan untuk parameter yang dibuat tetap adalah posisi peletakan *obstacle* pada $Y2/R = -1,177$ dan kecepatan angin 10 m/s.



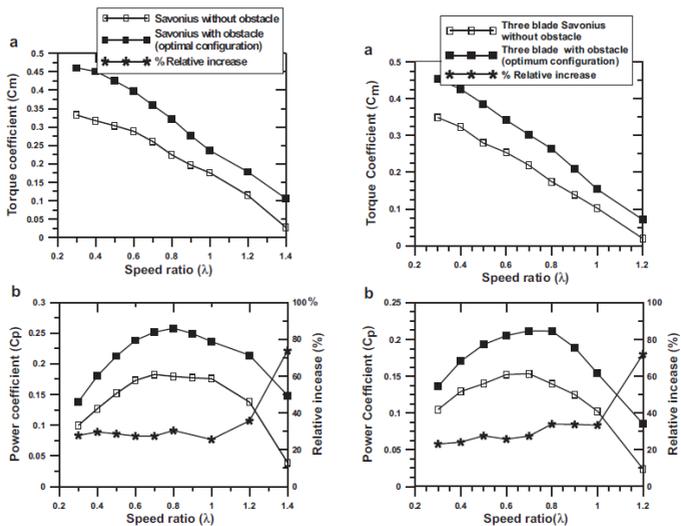
Gambar 2. 10 Distribusi tekanan pada turbin angin Savonius a.) dua sudu b.) tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil performa maksimum pada peletakan *obstacle* $\beta = 100,83^\circ$; $X1/R = -1,238$; $X2/R = -1,099$; $Y1/R = -0,45390$ untuk dua sudu dan posisi $\beta = 80,52^\circ$; $X1/R = -1,056$; $X2/R = -1,38162$; $Y1/R = -0,3691$ yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2. 11 Grafik hasil simulasi dengan variasi peletakan *obstacle* (Mohamed et al, 2010)

Pada gambar 2.11, peletakan optimal menghasilkan *Power coefficient* maksimum bernilai 0,2503 pada 2 sudu dan 0,212 pada 3 sudu.



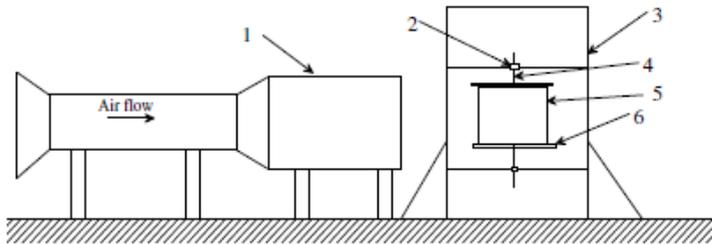
Gambar 2. 12 Grafik hubungan antara *tip speed ratio* dengan *torque coefficient* dan *Power Coefficient* pada turbin angin Savonius 2 sudu (kiri) dan 3 sudu (kanan) (Mohamed et al, 2010)

Berdasarkan hasil penelitian yang ditunjukkan oleh grafik pada gambar 2.12, penggunaan *obstacle* terbukti dapat meningkatkan nilai *Power Coefficient* (C_p), yaitu sebesar 0,068 pada *tip speed ratio* 0,7 untuk turbin angin Savonius dengan 2 sudu, dan 0,058 untuk 3 sudu. Artinya, performa turbin angin Savonius dengan 2 sudu meningkat sebesar 27,3% dengan menggunakan *obstacle* dan pada 3 sudu meningkat sebesar 27,5%.

2.11.2 Mahmoud et al (2010)

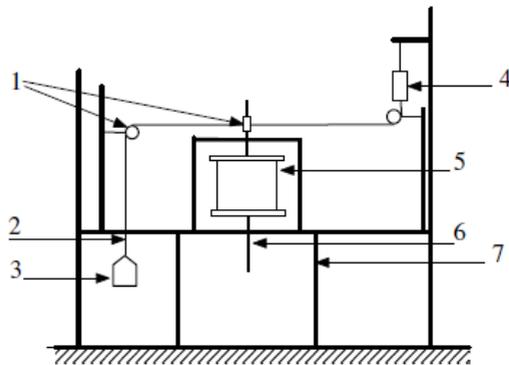
Mahmoud et al pada tahun 2010 melakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Pada penelitian ini, digunakan variasi geometri yang digunakan pada turbin angin Savonius. Variasi yang diubah adalah jumlah sudu, yaitu dua, tiga, dan empat sudu; jumlah *stages* turbin, yaitu digunakan satu dan dua *stages*; *overlap ratio* (β), yaitu 0, 0,2, 0,25, 0,3, dan 0,35; *aspect ratio* (α), yaitu 0,5, 1, 2, 4, dan 5; serta dengan atau tanpa menggunakan *end plates*.

Turbin angin Savonius diletakkan di depan *wind tunnel* dengan jarak antara keluaran *wind tunnel* dan turbin adalah 125 cm. *Wind tunnel* dengan diameter 49 cm ini diatur untuk menghasilkan kecepatan angin yang diinginkan pada sisi keluaran, yaitu pada variasi 0-13 m/s. Turbin angin Savonius yang digunakan menggunakan sudu yang terbuat dari pipa PVC dengan diameter yang divariasikan, yaitu 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,08 m. Sedangkan pada penelitian dengan *end plates*, digunakan *end plates* berbahan kayu dengan ukuran diameter 10% lebih besar dari diameter turbin angin Savonius sesuai dengan rekomendasi dari penelitian yang dilakukan oleh Nobuyuki, Menet, dan Blackwell et al untuk mendapatkan performa yang lebih baik. Dan untuk poros yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari baja dengan diameter 14 mm serta panjang 62 mm untuk semua model. Skema pengujian turbin angin yang dilakukan oleh Mahmoud et al ini dapat dilihat pada gambar 2.13 seperti berikut.



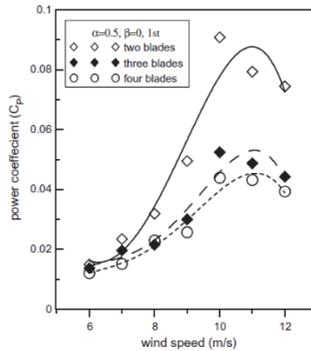
Gambar 2. 13 Skema pengujian performa turbin angin Savonius; (1)*wind tunnel*, (2)*bearing*, (3)*penyangga besi*, (4)*poros*, (5)*turbin angin Savonius*, (6)*end plate* (Mahmoud et al, 2010)

Nilai daya mekanik pada percobaan ini didapatkan dari pengukuran torsi mekanik dan kecepatan rotasi pada poros yang berputar di kecepatan angin yang divariasikan. Pengukuran torsi mekanik ini menggunakan sebuah sistem pengukuran yang terdiri dari *pulley*, nilon, pemberat, dan *spring balance* seperti pada gambar 2.14 di bawah ini.

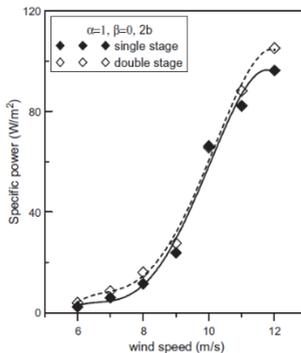


Gambar 2. 14 Skema pengukuran torsi mekanik, (1)*pulley*, (2)*nylon string*, (3)*weighing pan*, (4)*spring balance*, (5)*Savonius rotor*, (6)*rotating shaft*, (7)*structure* (Mahmoud et al; 2010)

Kesimpulan pertama dari penelitian ini adalah performa paling baik didapatkan pada turbin angin yang menggunakan dua sudu. Hal ini dapat dibuktikan dari grafik hubungan antara *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin seperti pada gambar 2.15 berikut ini. Grafik pada gambar 2.15 menunjukkan penelitian dilakukan pada *aspect ratio* 0.5, *overlap ratio* 0 dan dengan menggunakan *single stage*.

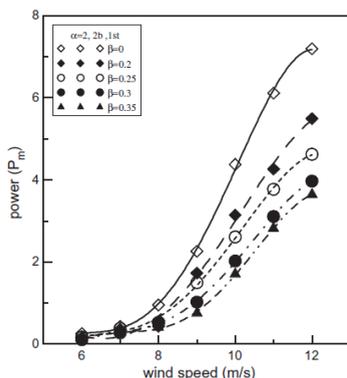


Gambar 2. 15 Grafik hubungan antara *Coefficient of Power* (C_p) terhadap kecepatan angin dengan dua, tiga, dan empat sudu (Mahmoud et al; 2010)



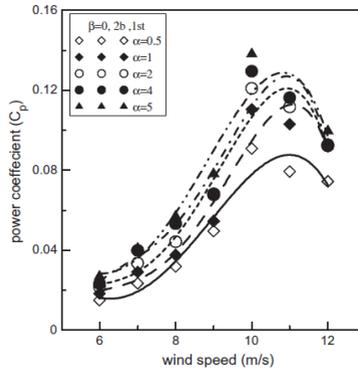
Gambar 2. 16 Grafik hubungan kecepatan angin terhadap daya spesifik pada *single and double stage* (Mahmoud et al; 2010)

Kesimpulan selanjutnya yang dapat diambil dari penelitian ini adalah performa paling baik ketika digunakan geometri *double stages* yang ditunjukkan dari grafik pada gambar 2.16. Sedangkan pengaruh penggunaan *overlap ratio* terhadap performa turbin angin Savonius ditunjukkan dengan gambar 2.17 di bawah ini. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa performa turbin Savonius akan memiliki nilai tertinggi ketika nilai dari *overlap ratio* adalah 0.

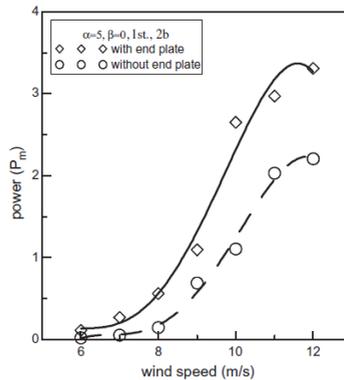


Gambar 2.17 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin pada variasi *overlap ratio* (Mahmoud et al; 2010)

Pada gambar 2.18, merupakan grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin angin Savonius dengan variasi nilai *aspect ratio*. Dari grafik tersebut, dapat diketahui bahwa nilai daya mekanik dari turbin semakin naik dengan kenaikan nilai *aspect ratio*, yaitu yang pada penelitian ini nilai tertingginya pada *aspect ratio* 5. Dan untuk kesimpulan terakhir, didapatkan hasil bahwa penggunaan end plate pada turbin angin Savonius akan menghasilkan performa turbin yang paling baik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.18 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin pada variasi *aspect ratio* (Mahmoud et al; 2010)

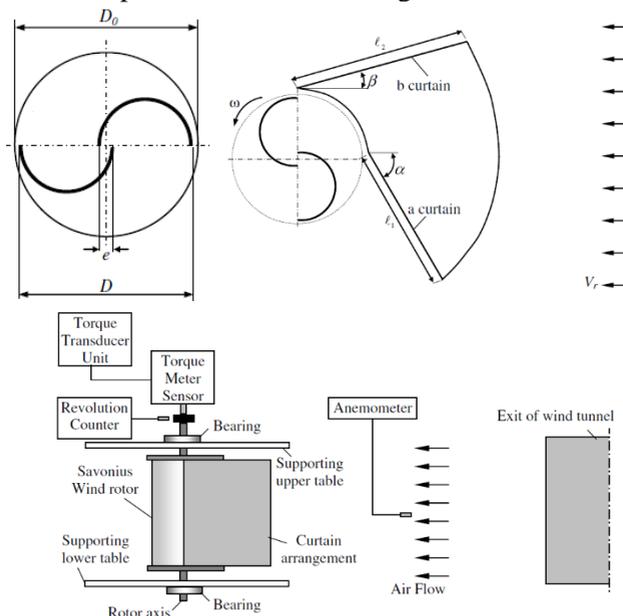


Gambar 2.19 Grafik hubungan variasi kecepatan angin terhadap daya mekanik turbin dengan dan tanpa *end plate* (Mahmoud et al; 2010)

2.11.3 Altan et al (2008)

Pada tahun 2008, Altan et al melakukan studi eksperimen untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan memberikan *curtain* sebagai pengarah aliran ke *advancing blade*. Geometri dari turbin angin Savonius yang digunakan

adalah dengan diameter turbin (D) = tinggi rotor (H) = 32 cm, $e/d = 0,15$ dengan *gap distance* (e) = 2,6 cm. Adapun skema alat pada studi eksperimen ini adalah sebagai berikut.



Gambar 2. 20 Skema alat turbin angin Savonius dengan *curtain* (Altan, 2008)

Variasi dari panjang curtain yang dipasang ditunjukkan pada tabel berikut.

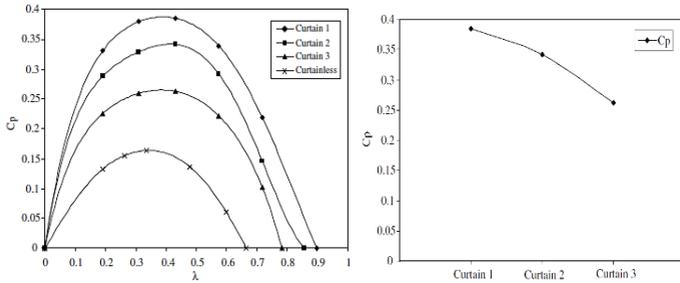
Tabel 2. 1 variasi *curtain*

Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

(Altan, 2008)

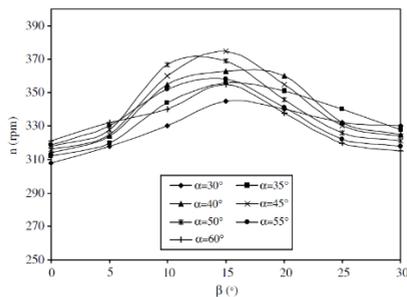
Sedangkan variasi sudut kemiringan α adalah 30-60° dengan kenaikan 5° dan sudut β 0-30°.

Hasil dari studi eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan bahwa penggunaan curtain 1 memiliki *Power Coefficient* paling tinggi yang ditunjukkan dengan grafik berikut.



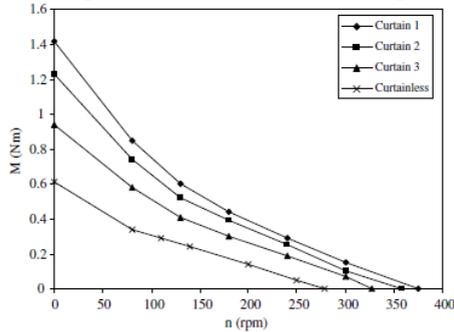
Gambar 2. 21 Grafik perbandingan *Power Coefficient* dengan menggunakan 3 *curtain* (Altan, 2008)

Berdasarkan grafik pada gambar 2.21, diketahui nilai CoP maksimal pada turbin angin Savonius tanpa *curtain*, dengan *curtain* 1, 2 dan 3 berturut-turut adalah 0,16; 0,38533 ; 0,34154 ; dan 0,26273. Hal ini menunjukkan nilai CoP maksimal yang tertinggi pada penggunaan *curtain* 1, dimana peningkatannya sebesar 1,4x dari CoP tanpa menggunakan *curtain*. Sedangkan pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap kecepatan rotasi dapat dilihat dari grafik berikut.



Gambar 2. 22 Pengaruh sudut kemiringan *curtain* terhadap kecepatan rotasi turbin (Altan, 2008)

Pada gambar 2.22, didapatkan bahwa nilai kecepatan putar turbin maksimal terjadi pada sudut kemiringan $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Pada penelitian ini juga didapatkan grafik hubungan panjang *curtain* terhadap torsi dengan sudut kemiringan optimum. Adapun grafik tersebut adalah sebagai berikut.

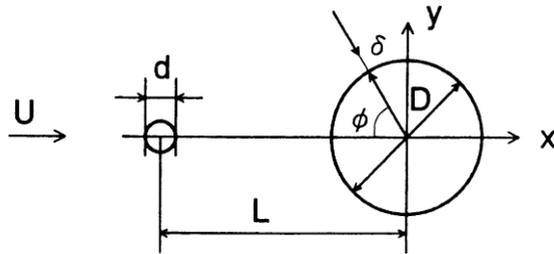


Gambar 2. 23 Pengaruh panjang *curtain* terhadap torsi pada sudut kemiringan optimum (Altan, 2008)

Berdasarkan grafik pada gambar 2.23, didapatkan nilai torsi untuk semua *curtain* lebih besar daripada torsi tanpa penggunaan *curtain*. Adapun diantara ketiga jenis *curtain* yang dipasang, torsi tertinggi pada penggunaan *curtain* 1.

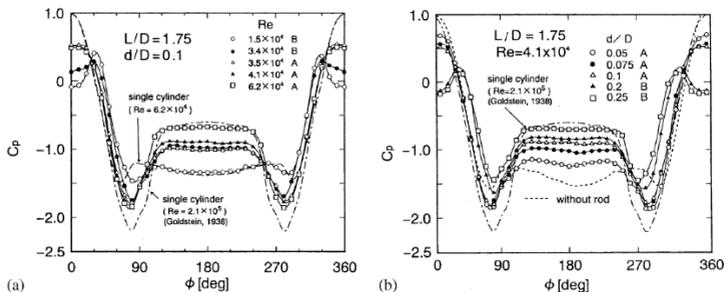
2.11.4 Tsutsui dan Igarashi (2002)

Pada tahun 2002, T. Tsutsui dan T. Igarashi melakukan penelitian untuk mengurangi *drag* pada aliran yang melewati silinder. Pada penelitian ini, digunakan silinder sirkular sebagai pengganggu yang diletakkan di depan silinder utama. Berikut skema penelitian yang dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi.



Gambar 2. 24 Skema alat penelitian
(Tsutsui & Igarashi, 2002)

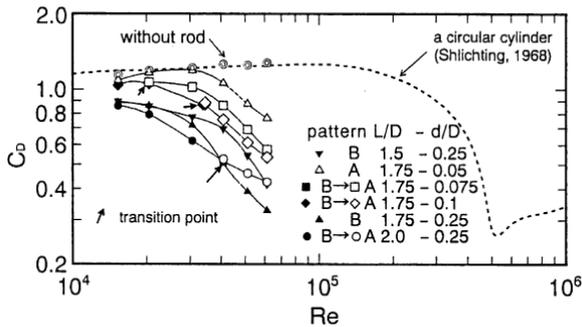
Diameter silinder utama yang digunakan adalah 40 mm dengan diameter silinder sirkular pengganggu bervariasi dari 1-10 mm. Selain variasi diameter silinder pengganggu, jarak antara silinder pengganggu dan silinder utama juga divariasikan dari 50-120 mm, kecepatan angin dari 4-24 m/s, serta variasi bilangan Reynolds $1,5 \times 10^4 - 6,2 \times 10^4$. Penelitian dilakukan dengan dua pola aliran, yaitu pola aliran A dengan *vortex shedding* di belakang silinder pengganggu dan pola aliran B tanpa *vortex shedding*. Pada penelitian ini, dapat diketahui pengaruh variasi nilai Re dan d/D terhadap distribusi nilai *pressure coefficient* (C_p), seperti pada gambar 2.25 di bawah ini.



Gambar 2. 25 Grafik distribusi tekanan pada silinder utama
(Tsutsui & Igarashi, 2002)

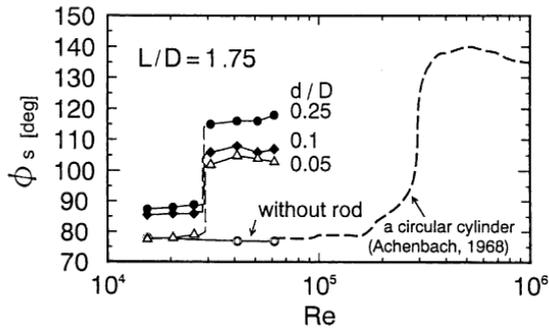
Dari grafik pada gambar 2.25 (a), penelitian dilakukan dengan silinder sirkular berukuran $d/D=0,1$ yang diletakkan pada $L/D=1,75$ di depan silinder utama. Pada sudut 0° disebut sebagai C_{Pf} atau *the front pressure coefficient*, sementara pada sudut 180° disebut sebagai C_{Pb} atau *the base pressure coefficient*. Perbedaan pola aliran A dan B dapat diketahui pada nilai C_{Pf} , dimana pada pola aliran B bernilai negatif karena terbentuknya *quasi-static vortex* diantara silinder sirkular dan silinder utama. Pada pola aliran B tersebut, kenaikan nilai Re menaikkan nilai C_{Pf} . Sedangkan pada pola aliran A, kenaikan Re tidak menaikkan nilai C_{Pf} secara signifikan. Sementara untuk nilai C_{Pb} pada pola aliran A maupun B, nilainya naik dengan kenaikan nilai Re . Pada pola aliran A maupun B pada gambar 2.25 menunjukkan dengan penambahan silinder sirkular di depan silinder utama dapat menurunkan nilai C_{Pf} dan menaikkan nilai C_{Pb} , sehingga selisih tekanan yang terjadi semakin kecil dan gaya *drag* pada silinder utama akan mengecil.

Pada gambar 2.25 (b), menunjukkan penelitian dilakukan pada $L/D = 1,75$ dengan $Re=4,1 \times 10^4$. Dari hasil penelitian tersebut dapat diketahui bahwa nilai C_p juga dipengaruhi oleh variasi dari d/D . Pada pola A dan B, nilai C_{Pf} turun dengan semakin besarnya nilai d/D . Sedangkan untuk nilai C_{Pb} , kedua pola aliran menunjukkan kenaikan nilai dengan semakin besarnya nilai d/D . Hal ini menunjukkan bahwa dengan peletakan silinder sirkular di depan silinder utama terbukti dapat menurunkan tekanan di depan silinder utama dan menaikkan tekanan di belakang silinder utama, sehingga selisih tekanan lebih besar dan gaya *drag* yang terjadi pada silinder utama akan semakin kecil.



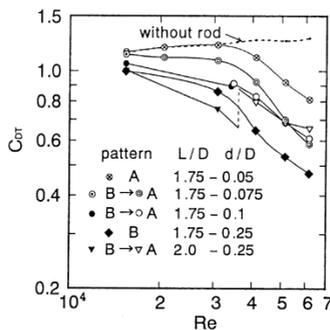
Gambar 2. 26 Grafik hubungan Re dan koefisien *drag* (C_{DT}) (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Berdasarkan hasil penelitian dari gambar 2.26, didapatkan kesimpulan bahwa kenaikan nilai Re akan menurunkan koefisien *drag* dan dengan peletakan silinder sirkular di depan silinder utama terbukti mampu memperkecil nilai C_D pada silinder utama. Dari grafik tersebut juga dapat diketahui bahwa transisi aliran dari laminar ke turbulen silinder utama yang diberikan silinder sirkular lebih cepat terjadi daripada tanpa menggunakannya. Fenomena tersebut terjadi karena *shear layer* dari silinder pengganggu terlepas dan jatuh pada permukaan silinder utama. Terlepasnya *shear layer* tersebut yang akan mengganggu aliran pada permukaan silinder utama dan transisi aliran lebih cepat terjadi.



Gambar 2. 27 Titik separasi (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Data berikutnya yang diperoleh dari penelitian ini adalah posisi titik separasi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.27. Berdasarkan gambar 2.27, titik separasi dari sebuah silinder mulai mundur pada $Re = \pm 1,8 \times 10^5$. Sedangkan dengan penambahan silinder sirkular di depan silinder utama pada $L/D = 1.75$, pada $Re = 2 \times 10^4$ titik separasi silinder utama lebih mundur. Grafik pada gambar 2.27 juga menunjukkan adanya pengaruh variasi ukuran diameter silinder sirkular d/D terhadap posisi titik separasi, yaitu semakin besar rasio ukuran silinder sirkular d/D akan menyebabkan titik separasi semakin mundur.

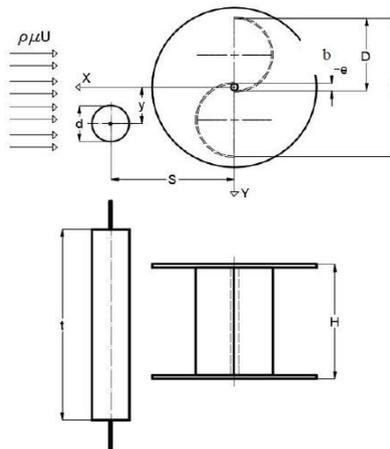


Gambar 2. 28 Total drag coefficient (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Berdasarkan gambar 2.28, pada penelitian ini didapatkan nilai *total drag coefficient* terkecil pada d/D 0,25; $L/D= 2,0$ untuk $Re < 4,1 \times 10^4$ dan $L/D = 1,75$ untuk $Re \geq 4,1 \times 10^4$.

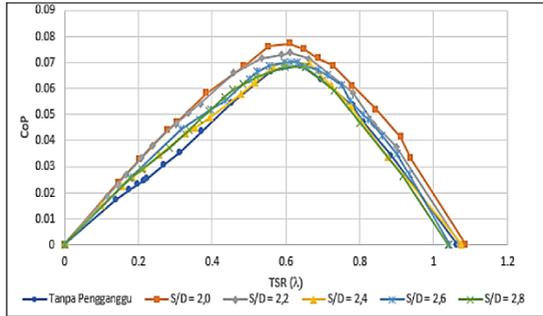
2.11.5 Mudjahidin (2019)

Di tahun 2019, Fikri Mudjahidin A.M melakukan eksperimen pada turbin Savonius untuk meningkatkan performanya dengan cara meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Variasi yang digunakan adalah S/D pada rentang 2-2,8 dengan kenaikan 0,2 dan bilangan Reynolds, yaitu 96.000, 134.000, dan 173.000. Skema perancangan alat penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



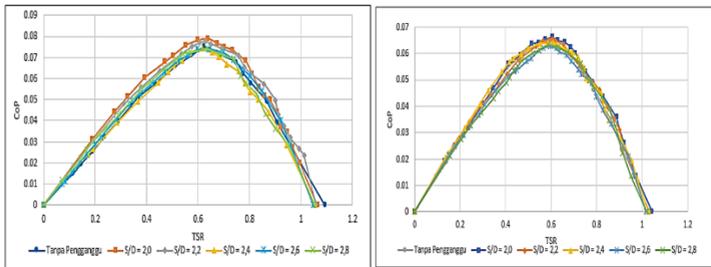
Gambar 2. 29 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius (Mudjahidin, 2019)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan hasil pengaruh TSR terhadap CoP pada variasi rasio S/D sebagai berikut.

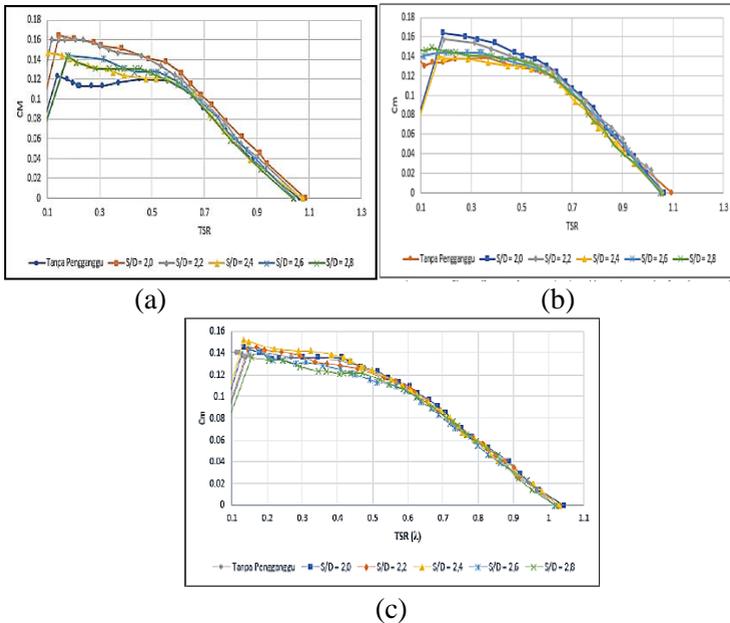


Gambar 2. 30 Grafik hubungan TSR terhadap CoP pada variasi rasio S/D pada bilangan Reynolds $9,6 \times 10^4$ (Mudjahidin, 2019)

Dari grafik pada gambar 2.30, dapat diketahui bahwa nilai CoP membentuk grafik parabola membuka ke bawah dengan nilai maksimum pada TSR sekitar 0,6. Nilai CoP maksimum terjadi dengan menggunakan silinder pengganggu pada rasio $S/D=2$, yaitu pada nilai CoP 0,77. Sedangkan pada penggunaan silinder pengganggu dengan rasio $S/D \geq 2,4$ justru menurunkan nilai CoP apabila dibandingkan dengan tanpa menggunakan silinder pengganggu.



(a) **Gambar 2. 31** Grafik Hubungan TSR dan CoP dengan variasi S/D pada (a) $Re = 13,4 \times 10^4$ (b) $Re = 17,3 \times 10^4$ (Mudjahidin, 2019)



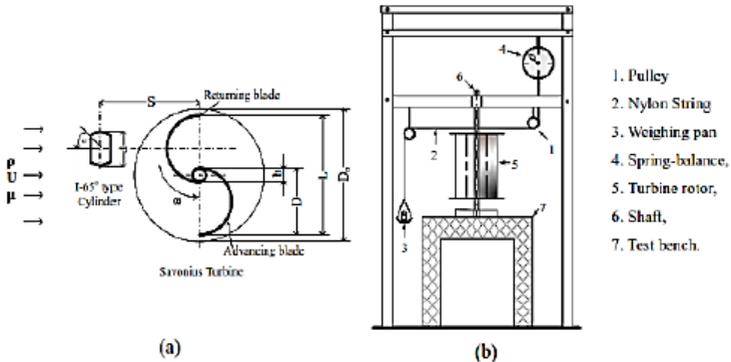
Gambar 2. 32 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) pada (a) $Re=9,6 \times 10^4$ (b) $Re=13,4 \times 10^4$ dan (c) $Re = 17,3 \times 10^4$ (Mudjahidin, 2019)

Gambar 2.32 menunjukkan hubungan TSR terhadap C_m pada variasi S/D dan Re . Dari ketiga grafik tersebut, didapatkan hasil bahwa nilai C_m maksimum terjadi pada variasi $S/D=2,0$.

2.11.6 Sakti et al (2019)

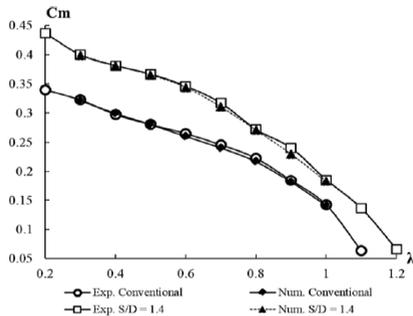
Pada tahun 2019, Sakti et al melakukan eksperimen dan investigasi numerik pada turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan pada studi kasus ini dipotong pada sudut 65° pada kedua sisi silinder ke arah sumbu y , sehingga disebut juga dengan silinder tipe I- 65° yang diletakkan di depan *returning blade*. Penelitian ini dilakukan pada Reynolds Number $9,9 \times 10^4$ dimana kecepatan angin (U) yang digunakan adalah 5m/s ; rasio

diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin ($d/D = 0,5$; dan peletakan $S/D = 1,4$ di depan *returning blade*. Sedangkan geometri turbin angin Savonius yang digunakan adalah panjang diameter sudu turbin angin Savonius ($D = 165,2$ mm; *aspect ratio* ($\alpha = 1$); *overlap ratio* ($\beta = 0$); dan perbandingan diameter *endplate* terhadap diameter turbin angin Savonius ($D_o/L = 1,07$).



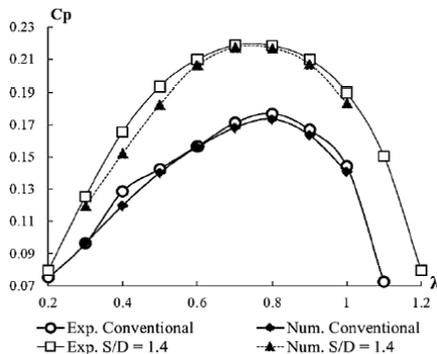
Gambar 2. 33 Skema Penelitian (Sakti et al, 2019)

Simulasi dilakukan menggunakan *software* ANSYS-Fluent 19.1 dengan validasi hasil menggunakan penelitian oleh Hassanzadeh et al (2013) yang berjudul **Comparison of the Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using Computational Fluid Dynamics**. Hasil dari eksperimen dan simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada grafik berikut.



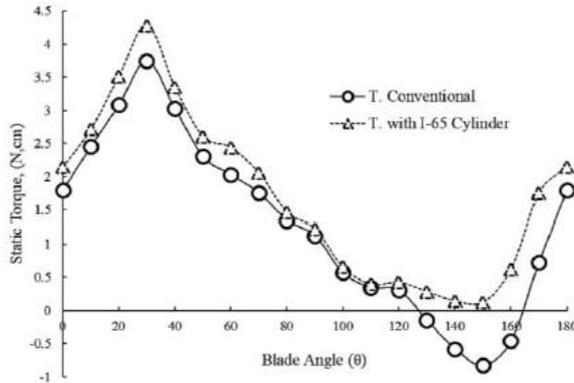
Gambar 2. 34 Grafik C_M turbin angin Savonius sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$ (Sakti et al, 2019)

Gambar 2.34 menunjukkan grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa terdapat kenaikan nilai C_M yang cukup signifikan dengan penggunaan silinder pengganggu I-65° di depan *returning blade*, baik untuk hasil eksperimen maupun hasil simulasi.



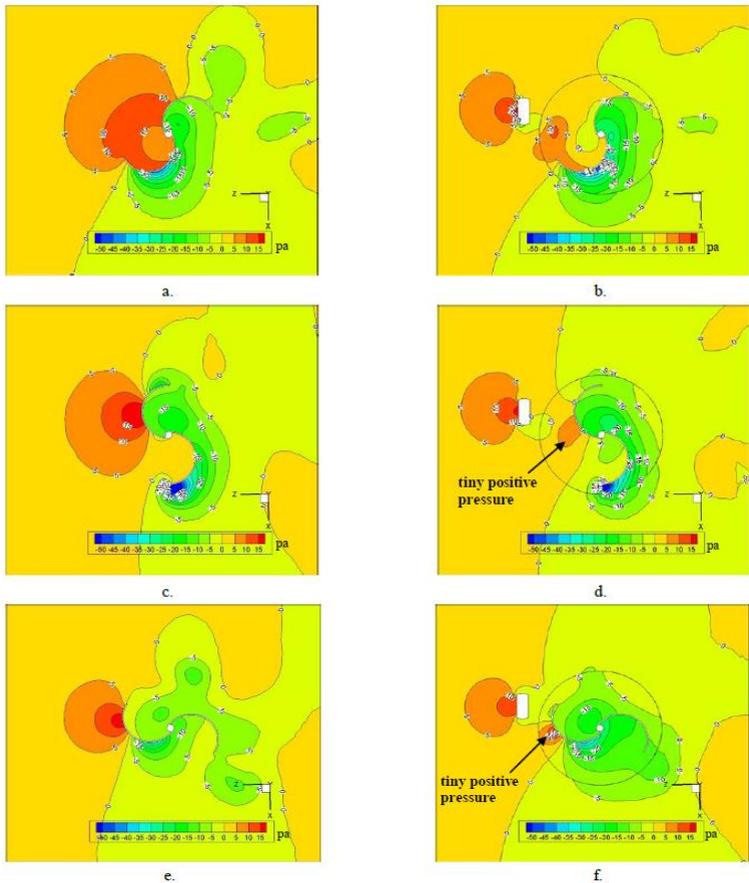
Gambar 2. 35 Grafik C_oP turbin angin Savonius sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$ (Sakti et al, 2019)

Berdasarkan grafik pada gambar 2.35, dapat diketahui bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu tipe I-65° dapat meningkatkan nilai CoP dari turbin angin Savonius, baik menggunakan metode simulasi maupun dengan eksperimen. Pada metode simulasi, nilai CoP naik 25,32% dibandingkan tanpa silinder pengganggu. Sedangkan dengan metode eksperimen, nilai CoP naik sebesar 23,61% lebih besar dibandingkan tanpa penggunaan silinder pengganggu.



Gambar 2. 36 Grafik Torsi Statis terhadap blade angle pada $S/D=1,4$ dan Reynolds Number $9,9 \times 10^4$ (Sakti et al, 2019)

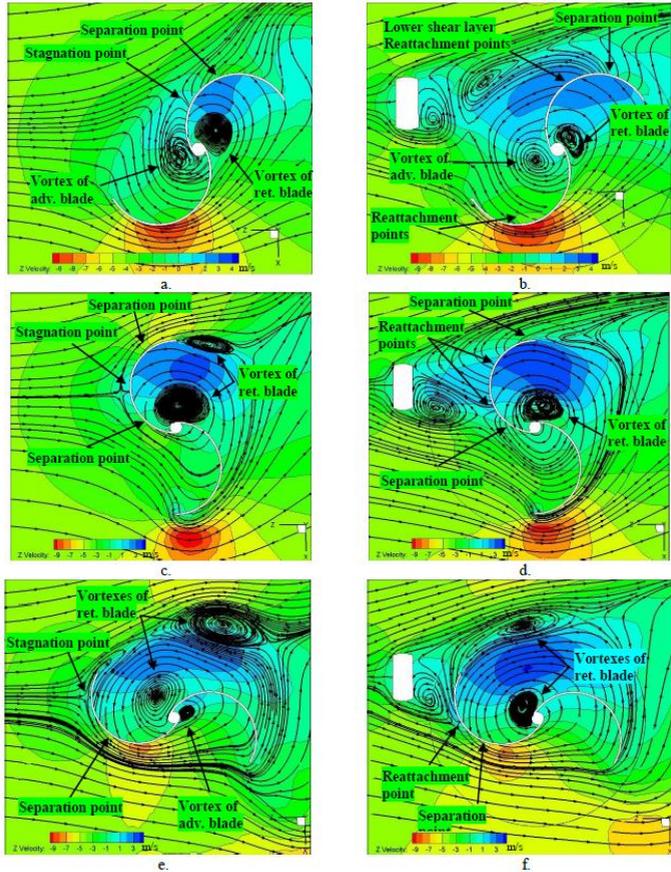
Berdasarkan gambar 2.36, didapatkan hasil nilai torsi statis bernilai positif di semua sudut kemiringan sudu turbin dengan menggunakan silinder pengganggu tipe I-65° yang artinya turbin angin Savonius memiliki *self starting* yang baik. Nilai torsi statis terbesar pada sudut 30° dan yang terkecil pada sudut 150°.



Gambar 2. 37 Kontur tekanan statis antara turbin angin Savonius pada sudut a) 30° turbin konvensional b) 30° dengan silinder I-65° c) 90° turbin konvensional d) 90° dengan silinder I-65° e) 150° turbin konvensional f) 150° dengan silinder I-65° (Sakti et al, 2019)

Berdasarkan hasil simulasi seperti ditampilkan pada gambar 2.37, dapat diketahui bahwa nilai tekanan di depan *returning blade* lebih turun dengan menggunakan silinder pengganggu

tipe I-65° dibandingkan tanpa pengganggu di sudut 30, 90 dan 150°.



Gambar 2. 38 Kontur kecepatan antara turbin angin Savonius pada sudut a) 30° turbin konvensional b) 30° dengan silinder I-65° c) 90° turbin konvensional d) 90° dengan silinder I-65° e) 150° turbin konvensional f) 150° dengan silinder I-65° (Sakti et al, 2019)

Gambar 2.38 menunjukkan kontur kecepatan aliran angin pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa menggunakan silinder pengganggu. Dari ketiga variasi sudut kemiringan sudu turbin yang digunakan, dapat diketahui bahwa titik separasi pada *returning blade* dengan menggunakan silinder pengganggu lebih mundur ke belakang jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu.

2. 12 Perbandingan Penelitian Tugas Akhir Kelompok Turbin Angin Savonius

Penelitian untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara memberikan silinder pengganggu di depan *returning blade* telah cukup banyak dilakukan di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS. Perbedaan penelitian yang telah dilakukan dengan penelitian ini adalah variasi yang digunakan, yaitu sebagai berikut.

Tabel 2. 2 Perbandingan Penelitian Kelompok Turbin Angin Savonius

	2016	2017	2018	2019	2020 a	2020 b	
	Retno Dewi	Arnoldus Adro	Jasmi Aprilia	Gigih Bagas	Sarsanto	Lisdarina	
Parameter							
D (mm)	60	101,6	152,4	165,2	167	167	
H (mm)	80	300	300	213	298	298	
d/D	0,75	0,5	0,5	0,5	0,1-1,0	0,5	
Re	(6; 7,5; 9) x10 ⁴	(3; 6; 9) x 10 ⁴	(9; 13,8; 16,8) x10 ⁴	(9,6;13,4;17,3)x 10 ⁴	(9,7 ; 13,6) x10 ⁴	(7,4-17,5)x10 ⁴	
S/D	1,5-2,4	1,5 - 2,4	2	1,4-1,8	1,8	1,8	
y/D	0,5	0,5	0; 0,25; 0,5	0,5	0,5	0,5	
Kesimpulan	Silinder pengganggu efektif pada S/D=1,5-2,4 dan posisi optimum S/D=1,7 Re=6x10 ⁴ , yaitu dengan nilai CoP _{max} /CoP _{0max} = 9,21	Silinder pengganggu efektif pada S/D=1,5-2,2; posisi optimum pada S/D=1,7 Re=6x10 ⁴ , yaitu dengan CoP _{maks} /CoP _{0maks} = 5,3	Silinder pengganggu efektif pada y/D= 0,5; Re=9x10 ⁴ ; yaitu dengan nilai CoP _{max} /CoP _{0max} =1,06	Silinder pengganggu efektif pada S/D=1,4-1,8; posisi optimum pada S/D=1,6 Re=13,4x10 ⁴ , yaitu nilai CoP _{max} /CoP _{0max} = 1,11	Silinder pengganggu efektif dengan d/D=0,5 pada Re=9,7x10 ⁴ , yaitu dibuktikan dengan nilai CoP _{max} /CoP _{0max} = 1,42	-	-

Berdasarkan Tabel 2.2, dapat diketahui bahwa penelitian pada tahun 2016, 2017 dan 2019 menggunakan variasi rasio jarak peletakan pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin angin Savonius terhadap sumbu x (S/D). Dari penelitian tersebut, diketahui bahwa pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif dilakukan pada $S/D = 1,5-2,4$ untuk penelitian tahun 2016, $S/D=1,5-2,2$ untuk 2017, dan $S/D = 1,4-2,2$ untuk penelitian tahun 2019.

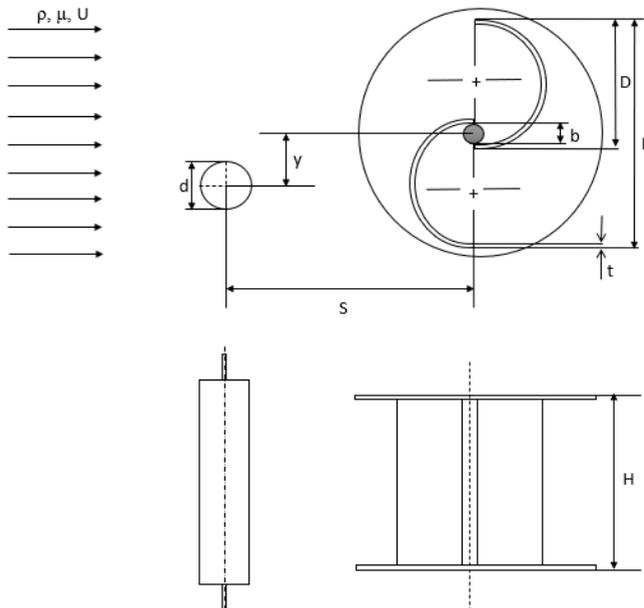
Pada tahun 2018, digunakan variasi rasio jarak peletakan pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin angin Savonius terhadap sumbu y (y/D), yaitu 0; 0,25 dan 0,5. Dari penelitian tersebut didapatkan performa paling optimum pada peletakan $y/D=0,5$. Kemudian pada awal tahun 2020, dilakukan penelitian dengan variasi rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) = 0,1 – 1,0 dengan hasil performa paling optimum pada $d/D=0,4 - 0,6$.

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, studi kasus pada penelitian ini adalah pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dengan ukuran $d/D=0,5$; $y/D = 0,5$ dan $S/D= 1,8$. Selain variasi S/D , y/D dan d/D , seluruh penelitian yang telah disebutkan menggunakan variasi 3 Reynolds Number. Pada penelitian ini, digunakan 7 variasi Reynolds Number, yaitu $7,4 \times 10^4$; $8,6 \times 10^4$; $9,7 \times 10^4$; $1,7 \times 10^4$; $13,6 \times 10^4$; $15,6 \times 10^4$; dan $17,5 \times 10^4$ atau pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 (m/s). Pemilihan variasi ini berdasarkan kecepatan angin minimum untuk dapat memutar turbin angin Savonius pada desain yang digunakan dan menghasilkan grafik CoP terhadap Tsr. Variasi kecepatan angin ini dimaksudkan untuk mendapatkan kecepatan optimum untuk menghasilkan nilai CoP maksimum.

BAB III METODOLOGI

3.1 Parameter yang Diukur

Analisa diperlukan pada setiap penelitian untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap hasil penelitian. Pada penelitian ini, Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui parameter yang mempengaruhi performa turbin angin Savonius. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan jarak antara pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu (S) dan juga variasi kecepatan angin (U). Selain parameter yang divariasikan, performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi oleh massa jenis udara (ρ), viskositas udara (μ), diameter *blade* (D), dan diameter silinder pengganggu (d). Beberapa parameter tersebut dijelaskan pada gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Skema penelitian turbin angin Savonius

Parameter yang dianalisa berdasarkan gambar 3.1 adalah:

- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- S : jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat *returning blade* (m)
- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
- b : diameter poros (m)
- d : diameter silinder pengganggu (m)
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- t : tebal sudu turbin (m)
- y : jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (m)
- ω : kecepatan putar sudu turbin Savonius (rad/s)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi dilakukan untuk mengetahui variabel yang mempengaruhi performa turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu di depan *returning blade* berupa silinder sirkular. Metode yang digunakan untuk analisa dimensi ini adalah dengan *Buckingham-Phi Teorema*.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Beberapa langkah analisa dimensi dengan metode *Buckingham-Phi Teorema* untuk *Coefficient of Power* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi nilai *power*.

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

Jumlah parameter keseluruhan (n) = 11

Parameter tersebut adalah :

- P : power (J/s)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)

- S : jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat *returning blade* (m)
H : tinggi turbin angin Savonius (m)
b : diameter poros (m)
d : diameter silinder pengganggu (m)
D : diameter sudu turbin Savonius (m)
y : jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (m)
 ω : kecepatan putar sudu turbin Savonius (rad/s)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam analisa, yaitu dipilih MLt pada analisa dimensi ini.

3. Membuat dimensi primer dari semua parameter yang dipilih

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

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan, yaitu ρ , U, dan D.

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan yaitu

$$n - m = 11 - 3 = 8$$

$$i. \pi_1 = P \rho^a U^b D^c = 1$$

$$\frac{ML^2}{t^3} \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b L^c = M^0 L^0 t^0$$

Mencari nilai a, b dan c.

$$\diamond M : 1 + a = 0$$

$$a = -1$$

$$\diamond t : -3 - b = 0$$

$$b = -3$$

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

Sehingga,

$$\begin{aligned} \pi_1 &= P \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} \\ \pi_1 &= \frac{P}{\rho U^3 D^2} \end{aligned}$$

$$\text{ii. } \pi_2 = \mu \rho^a U^b D^c = 1$$

$$\frac{M}{L t} \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b L^c = M^0 L^0 t^0$$

didapatkan nilai $a = b = c = 1$, sehingga

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

iii. Dengan cara yang sama, didapatkan grup tak berdimensi:

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

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

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

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

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

$$\pi_8 = \frac{\omega D}{U}$$

Dari analisa dimensi yang telah dilakukan, didapatkan grup tak berdimensi sebagai berikut.

π_1 : *Coefficient of Power*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 : rasio jarak pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_5 : rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 : rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 : rasio diameter poros turbin dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 : *tip speed ratio*

Hubungan antara grup tak berdimensi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan fungsi sebagai berikut.

$$\pi_1 = f_1 (\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Pada penelitian ini, grup tak berdimensi yang divariasikan adalah $\frac{\omega D}{U}$ dan $\frac{\mu}{\rho U D}$, sedangkan untuk grup tak berdimensi $\frac{S}{D}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}$ dibuat memiliki nilai yang tetap. Oleh karena itu, nilai dari *Coefficient of Power* pada penelitian ini dapat dituliskan dalam bentuk fungsi sebagai berikut.

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

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan panjang karakteristik (L) dari turbin angin Savonius yang memiliki nilai, $L = 2D - b - 2t$, dimana b dan t memiliki nilai konstan. Pada penelitian ini, nilai D juga dibuat konstan, sehingga nilai L juga konstan. Oleh karena itu, persamaan fungsi CoP diatas dapat dituliskan dengan :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_4 \left(\frac{\mu}{\rho U L}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

atau

$$\text{CoP} = f_5 (\text{Re}_L, \lambda)$$

3.2.2 Analisa Dimensi *Coefficient of Moment*

Beberapa langkah analisa dimensi dengan *Buckingham-Phi Teorema*. untuk *Coefficient of Moment* adalah sebagai berikut.

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi nilai *power*.

$$M = f (\rho, \mu, U, D, d, S, H, b, y, \omega)$$

Jumlah parameter keseluruhan (n) = 11

Parameter tersebut adalah :

- M : Moment (J)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- μ : viskositas udara (Ns/m^2)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- S : jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat *returning blade* (m)
- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
- b : diameter poros (m)
- d : diameter silinder pengganggu (m)
- D : diameter sudu turbin Savonius (m)
- y : jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (m)
- ω : kecepatan putar sudu turbin Savonius (rad/s)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam analisa, yaitu dipilih MLt pada analisa dimensi ini.

3. Membuat dimensi primer dari semua parameter yang dipilih

Parameter	M	P	M	U	S	H	B	D	D	y	ω
Dimensi	$\frac{ML^2}{t^2}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan, yaitu ρ , U, dan D. Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan = n – m = 11 - 3 = 8

i. $\pi_1 = M \rho^a U^b D^c = 1$
 $\frac{ML^2}{t^2} \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b L^c = M^0 L^0 t^0$

Mencari nilai a, b dan c.

❖ M : $1+a = 0$

a = -1

$$\diamond t : -2 - b = 0$$

$$b = -2$$

$$\diamond L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$3 - 2 + c + 2 = 0$$

$$c = -3$$

Sehingga,

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

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

ii. Dengan cara yang sama, didapatkan grup tak berdimensi:

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

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

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

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

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

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

$$\pi_8 = \frac{\omega D}{U}$$

Dari analisa dimensi yang telah dilakukan, didapatkan grup tak berdimensi sebagai berikut.

π_1 : *Coefficient of Moment*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 : rasio jarak pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_5 : rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 : rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 : rasio diameter poros turbin dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 : tip speed ratio

Hubungan antara grup tak berdimensi tersebut dapat dituliskan dalam persamaan fungsi sebagai berikut.

$$\pi_1 = f_1 (\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8)$$

$$\frac{M}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Pada penelitian ini, grup tak berdimensi yang divariasikan adalah $\frac{\omega D}{U}$ dan $\frac{\mu}{\rho U D}$, sedangkan untuk grup tak berdimensi $\frac{S}{D}, \frac{d}{D}, \frac{H}{D}, \frac{t}{D}, \frac{b}{D}$ dibuat memiliki nilai yang tetap. Oleh karena itu, nilai dari *Coefficient of Power* pada penelitian ini dapat dituliskan dalam bentuk fungsi sebagai berikut.

$$\frac{P}{\rho U^3 D^3} = f_3 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan panjang karakteristik (L) dari turbin angin Savonius yang memiliki nilai, $L = 2D - b - 2t$, dimana b dan t memiliki nilai konstan. Pada penelitian ini, nilai D juga dibuat konstan, sehingga nilai L juga konstan. Oleh karena itu, persamaan fungsi CoP diatas dapat dituliskan dengan :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^3} = f_4 \left(\frac{\mu}{\rho U L}, \frac{\omega D}{U} \right)$$

atau

$$C_M = f_5 (Re_L, \lambda)$$

3.3 Peralatan

Beberapa peralatan pasti diperlukan pada setiap eksperimen untuk mendapatkan hasil eksperimen yang baik. Berikut ini adalah peralatan yang digunakan pada pengujian performa turbin angin Savonius.

3.3.1 Axial fan

Peralatan pendukung pertama yang digunakan pada percobaan ini adalah *axial fan* atau blower yang berfungsi sebagai sumber aliran udara. Blower yang digunakan adalah CKE SPV-18 dengan spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 2 Axial fan CKE SF-45

Tabel 3. 1 Spesifikasi axial fan CKE SF-45

SPESEIFICATION	
Model	SF-45
Power	1800 W
Speed	2800 rpm
Static	972 Pa
Size	450 mm
Voltage	220-240 V
Capacity	125 m ³ /min
Frequency	50Hz

3.3.2 Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah turbin angin Savonius dan silinder sirkular sebagai pengganggu.

a. Profil turbin angin Savonius



Gambar 3. 3 Skema turbin angin Savonius

Tabel 3. 2 Spesifikasi turbin angin Savonius

SPEKIFIKASI	
Diameter sudu turbin (D)	167 mm
Tinggi turbin (H)	298 mm
Diameter turbin ($2D-b-2t$)	309 mm
Diameter poros (b)	19 mm
Diameter <i>end plate</i> (D_o)	320 mm
Tebal <i>end plate</i>	1 mm
Tebal sudu turbin	3 mm
MATERIAL	
Sudu turbin	Pipa PVC
<i>Endplate</i>	Alumunium cladding 2024

b. Profil silinder pengganggu

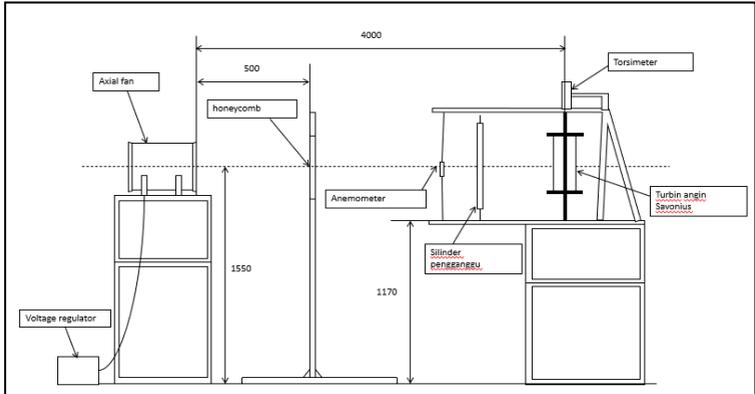
- Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (d/D)= 0,5
- Diameter silinder pengganggu (d)= 83 mm
- Tinggi silinder pengganggu (h) = 500 mm



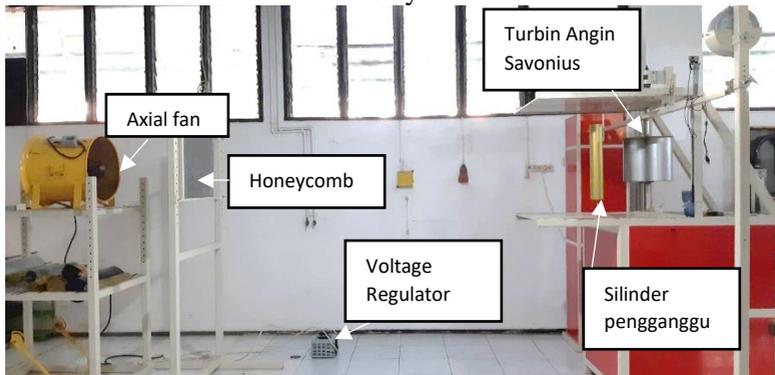
Gambar 3. 4 silinder pengganggu

3.3.3 Penyanga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini, digunakan penyangga sebagai tempat untuk meletakkan turbin angin Savonius dan silinder pengganggu. Berikut adalah skema penyangga yang digunakan.



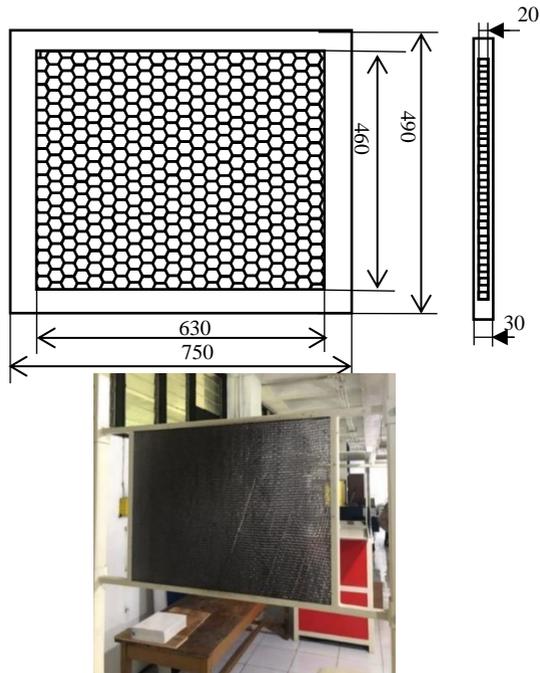
Gambar 3. 5 Skema susunan peralatan penelitian dan dimensinya



Gambar 3. 6 Skema susunan instalasi turbin angin Savonius

3.3.4 Honeycomb

Peralatan pendukung berikutnya yang digunakan adalah *honeycomb*, yaitu alat yang digunakan untuk membuat aliran angin dari *axial fan* menjadi aliran yang *uniform*. *Honeycomb* yang dipakai memiliki ukuran berdasarkan penelitian oleh **Bradshaw et al (1979)**. Berikut ini adalah skema dari *honeycomb* dengan meshing size 0,0248 lubang/mm².



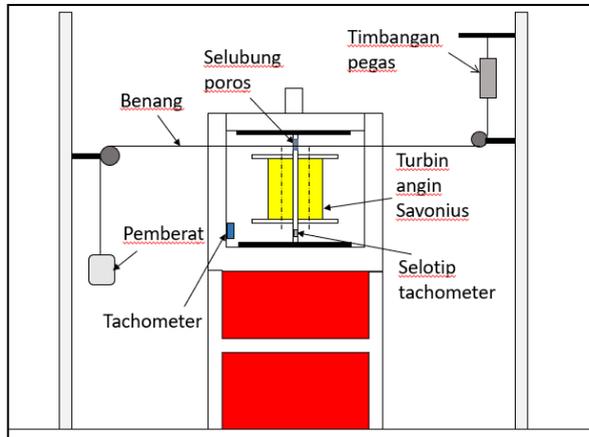
Gambar 3. 7 Skema *Honeycomb* beserta dimensinya

3.3.5 Alat Ukur

Penelitian turbin angin Savonius ini menggunakan beberapa alat ukur untuk mengukur nilai putaran turbin angin dan nilai torsi yang dihasilkan. Adapun alat ukur tersebut adalah sebagai berikut.

a. *Brake Dynamometer*

Brake dynamometer merupakan sebuah sistem pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. Nilai torsi dinamis didapatkan dengan melalui perhitungan antara selisih massa pemberat dan nilai yang dibaca pada neraca pegas.



Gambar 3. 8 Pemasangan *Brake dynamometer*

b. *Tachometer*

Tachometer merupakan sebuah alat ukur digital yang memiliki fungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. *Tachometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah *tachometer* dengan tipe Economical Non-Contact Pocket Optical *Tachometer* OMEGA seri HHT12 dengan spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 9 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3. 3 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

SPECIFICATION	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01% of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 “AA” 1,5 V dc batteries
Environmental	5 to 40° C

Pemasangan Tachometer untuk mengukur putaran turbin angin Savonius di penyangga dapat dilihat pada gambar 3.8.

c. Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur yang memiliki fungsi untuk mengukur kecepatan angin. Hasil ukur dari anemometer dapat dalam satuan ft/min, mph, knots, m/s, dan km/h. Selain berfungsi sebagai alat ukur kecepatan angin, anemometer ini juga dapat digunakan untuk mengukur suhu udara dalam satuan °C dan F. Pada penelitian ini digunakan anemometer dengan tipe Omega HHT141 Digital Anemometer yang ditunjukkan seperti

pada gambar 3.10 dan memiliki spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 10 Anemometer

Tabel 3. 4 Spesifikasi Anemometer Digital OMEGA HHF141

SPECIFICATION	
Accuracy	AP275 : $\pm 1\%$ of reading or 1 digit AP100 : $\pm 0.5\%$ of F.S. $+0,75\%$ of reading +1 digit
Resolution	0,01 m/s
Display	0.5 inch LCD, 4 digits
Air flow	
Range	Resolution
AP100	1,5 to 35,00 m/s
2,75 inch	0,2 to 40,00 m/s
Temperature	
Operating type	Temperature
Instrument	0 to 50°C
Probes	-20 to 100°C

d. Torque meter

Torque meter merupakan alat ukur digital yang memiliki fungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan pada penelitian adalah *Torque meter* LUTRON model TQ-8800 dengan high resolution 0,1 N-cm yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.11 dan memiliki spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 11 *Torque meter* LOTRON mode TQ-8800

Tabel 3. 5 Spesifikasi *torque meter* LUTRON mode TQ-8800

DISPLAY UNIT/ RESOLUTION				
Unit	Max range	High resolution	Low resolution	Overload protection range
Kg-cm	15	0,01	0,1	22,5 max
Lb-inch	12,99	0,01	0,1	19,53 max
N-cm	147,1	0,1	1	220,1 max

e. Voltage Regulator

Alat ukur berikutnya yang dipakai dalam penelitian ini adalah voltage regulator yang berfungsi untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan saat penelitian. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Voltage Regulator* Model TDGC 2J-3 yang ditunjukkan pada gambar 3.12 dan memiliki spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 12 *Voltage regulator*

Tabel 3. 6 Spesifikasi *voltage regulator*

SPECIFICATION	
Model	TDGC 2J-3
Input	110/220 V
Output	0-250 V
Frequency	50-60 Hz
I max	4,8/12 A
Capacity	2 KVA

f. Neraca Pegas

Neraca pegas merupakan alat ukur massa dimana pada penelitian ini digunakan sebagai alat ukur nilai S (gram) untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake dynamometer*. *Dynamometer* pada penelitian ini

ditunjukkan pada gambar 3.13 yang memiliki spesifikasi sebagai berikut.



Gambar 3. 13 Neraca Pegas

Tabel 3. 7 Spesifikasi neraca pegas

SPECIFICATION	
Merk	Nagata
Kapasitas maksimal	3 kg
Ketelitian	10 gram

h. Pemberat

Pemberat pada penelitian ini digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dan variasi nilai TSR pada brake dynamometer. Massa pemberat yang digunakan bervariasi, yaitu antara 3-20 gram.



Gambar 3. 14 Pemberat

3.4 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat beberapa prosedur yang dilakukan untuk pengambilan data. Adapun beberapa langkah dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.4.1 Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

Prosedur pertama yang akan dijelaskan adalah prosedur untuk menentukan putaran dan torsi dinamis, yaitu sebagai berikut.

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan
2. Melakukan pengukuran *temperature* lingkungan dengan menggunakan *thermometer*.
3. Memasang turbin angin Savonius sebagai benda uji pada penyangga di depan *axial fan* dan peralatan lain seperti pada gambar 3.6, akan tetapi tanpa memasang silinder pengganggu.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* hingga mendapatkan nilai kecepatan angin yang dibaca pada anemometer sesuai dengan kecepatan angin yang dibutuhkan, yaitu 3 m/s.
5. Menunggu beberapa menit sampai kecepatan putar poros turbin stabil, kemudian mengukur putaran poros turbin angin tanpa beban dengan menggunakan *Tachometer*.
6. Mengukur torsi dinamis tanpa pemberian massa beban dengan menggunakan brake dynamometer.
7. Menambahkan massa pemberat dengan massa beban dan mengukur putaran poros turbin menggunakan *tachometer*.
8. Membaca nilai massa yang dibaca pada neraca pegas
9. Mengulangi langkah nomor 4-9 dengan mengubah variasi kecepatan, yaitu 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 (m/s)

10. Meletakkan silinder pengganggu di depan returning blade pada jarak antara pusat turbin angin Savonius terhadap pusat silinder pengganggu (S/D) 1,8.
11. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 10.
12. Mengolah data yang diperoleh dari hasil pengukuran dan membuat grafik *tip speed ratio* terhadap nilai *Coefficient of Power* serta *tip speed ratio* terhadap *Coefficient of Moment*.

3.4.2 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis

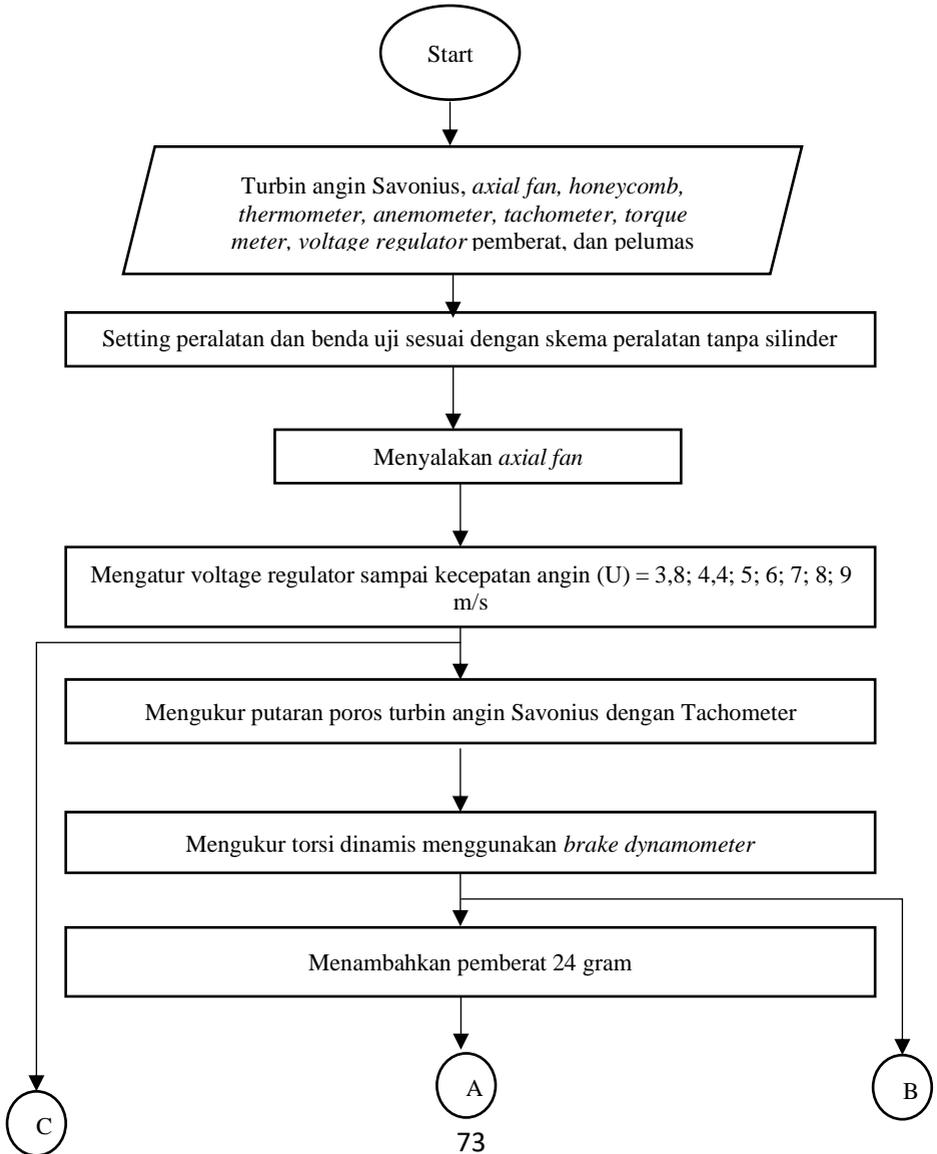
Data selanjutnya yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah nilai torsi statis pada turbin angin Savonius. Adapun beberapa langkah kerja yang dilakukan pada penentuan nilai torsi statis ini adalah sebagai berikut.

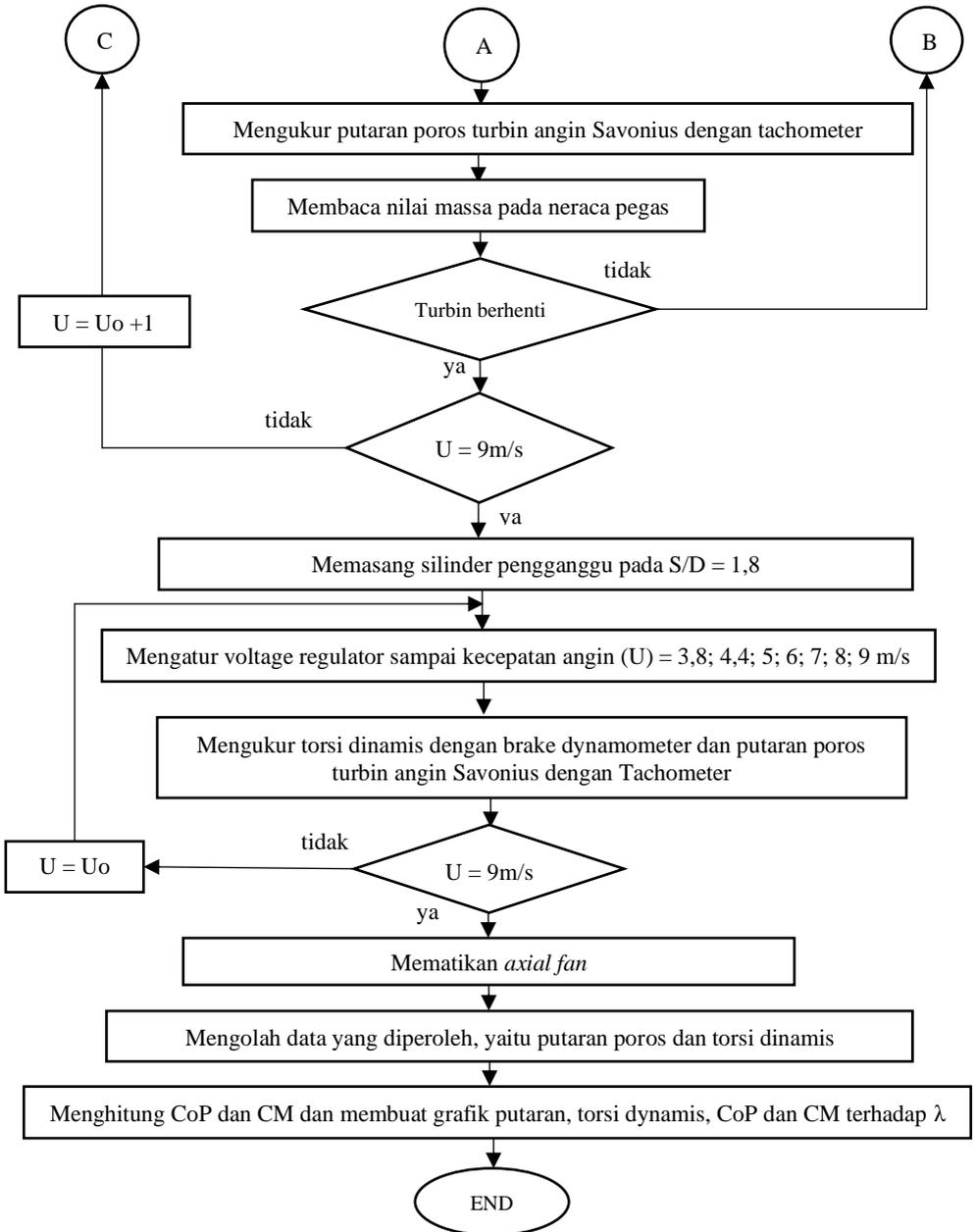
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan
2. Memasang turbin angin Savonius sebagai benda uji pada penyangga di depan *axial fan* dan peralatan lain seperti pada gambar 3.6, akan tetapi tanpa memasang silinder pengganggu.
3. Menentukan variasi sudut turbin angin Savonius (Θ) sebesar 0° .
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan voltage regulator hingga mendapatkan nilai kecepatan angin yang dibaca pada anemometer sesuai dengan kecepatan angin yang dibutuhkan, yaitu 3 m/s.
5. Melakukan pengukuran torsi statis menggunakan *torque meter*.
6. Mematikan *axial fan*.
7. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 6 dengan mengubah variasi sudut turbin angin Savonius pada $0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ$ dan pengambilan data setiap kenaikan sudut 10° .

8. Mengubah langkah 4 sampai 7 dengan mengubah variasi kecepatan *axial fan*, yaitu pada kecepatan 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s.
9. Meletakkan silinder pengganggu di depan returning blade pada jarak antara pusat turbin angin Savonius terhadap pusat silinder pengganggu (S/D) 1,8.
10. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 8.
11. Mengolah data yang diperoleh, yaitu torsi statis dan melakukan *plotting* pada grafik torsi statis sebagai fungsi sudut.
12. Membandingkan grafik antara torsi statis tanpa silinder pengganggu dan torsi statis dengan silinder pengganggu.

3.5 Flowchart Penelitian

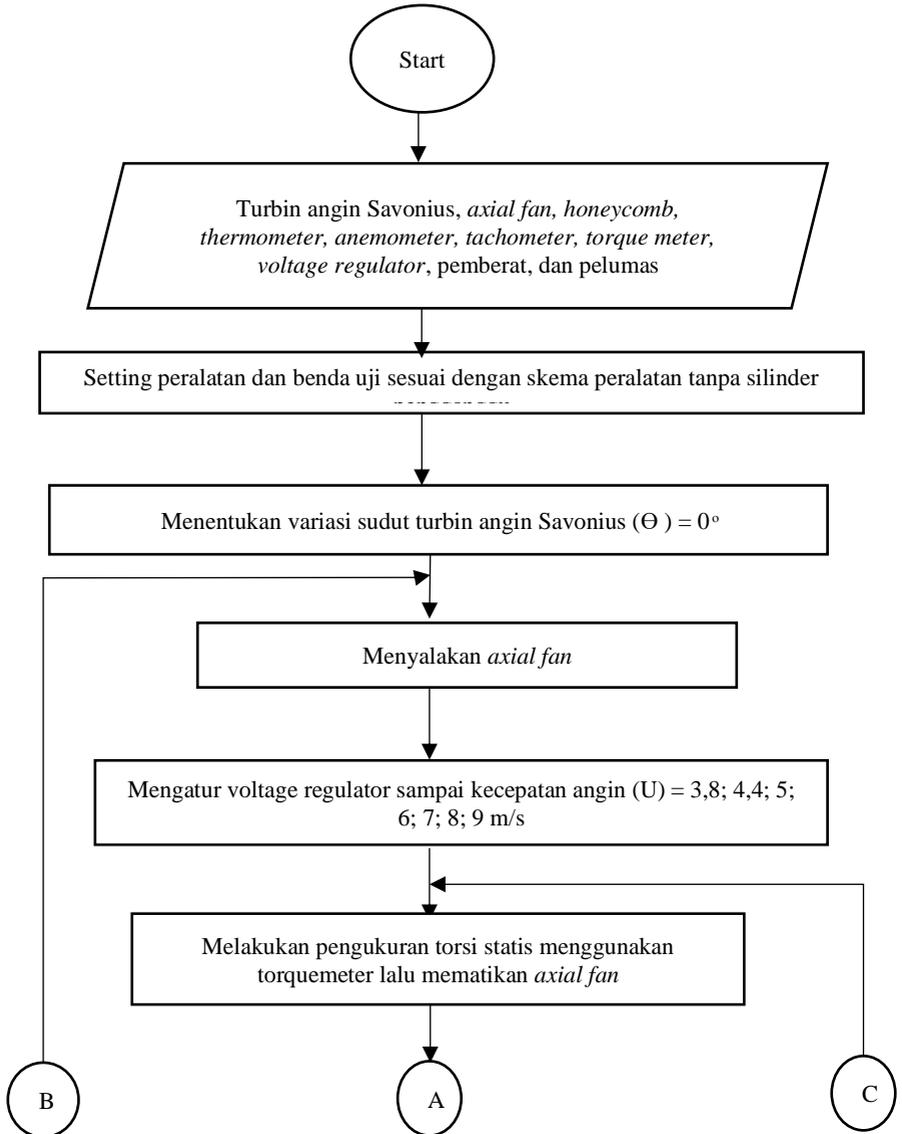
3.5.1 Flowchart Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

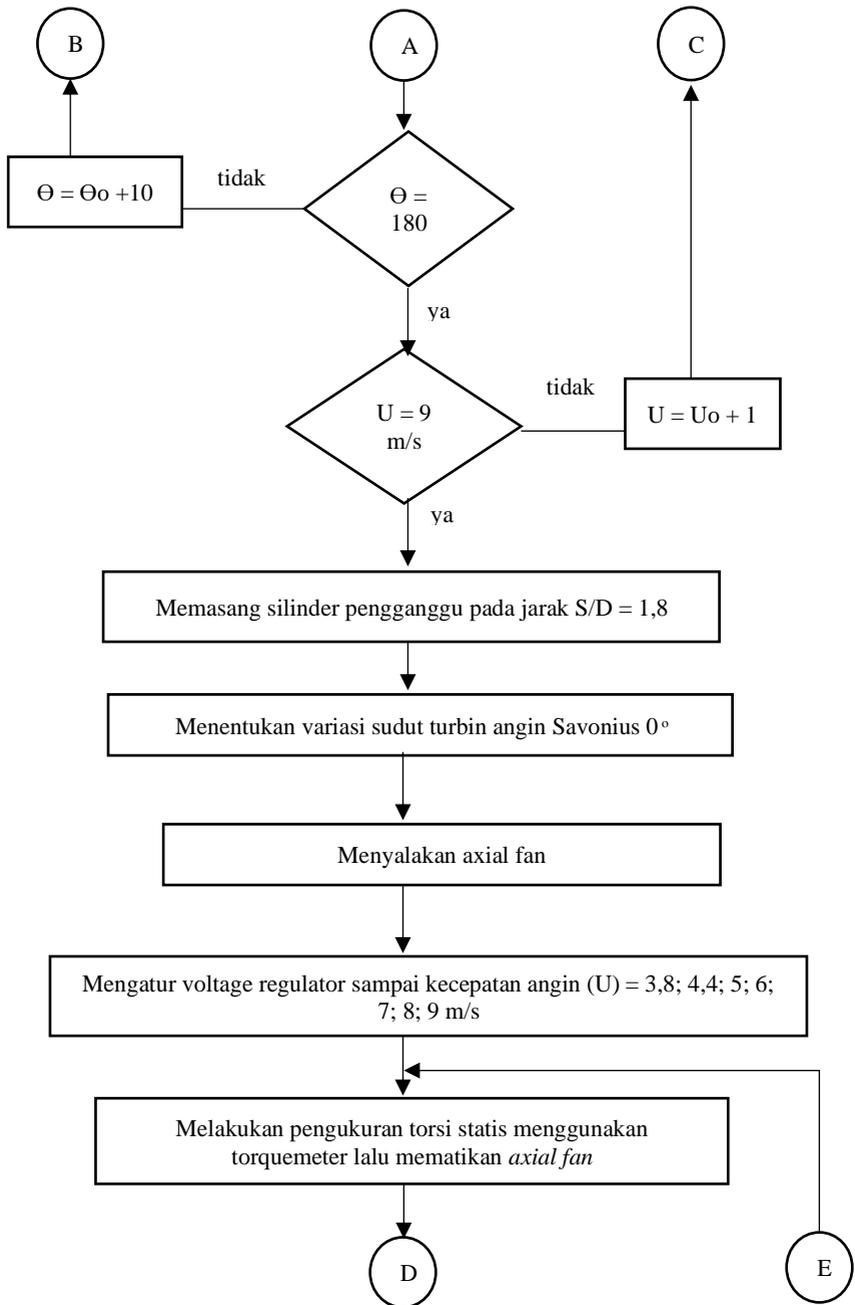


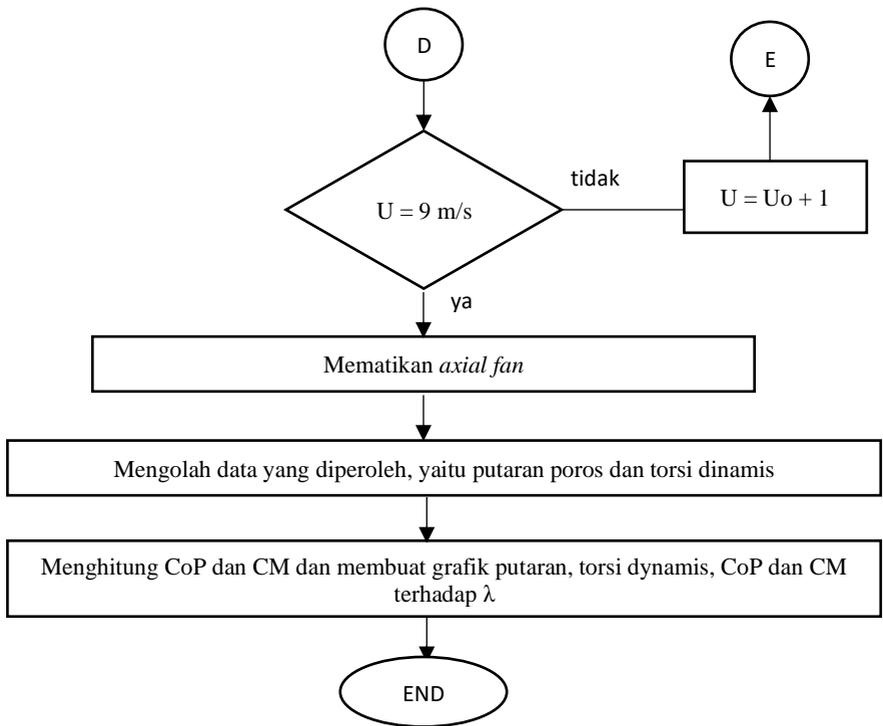


Gambar 3. 15 Flowchart penentuan putaran dan torsi dinamis

3.5.2 Flowchart Prosedur Penelitian untuk Menentukan Putaran dan Torsi Statis







Gambar 3. 16 Flowchart penentuan putaran dan torsi statis

3.6 Uncertainty Pengukuran

Tidak semua eksperimen yang dilakukan akan menghasilkan data yang baik. Oleh karena itu, diperlukan analisa ketidakpastian atau *uncertainty* yang digunakan untuk mengukur validasi dan akurasi data. Kesalahan atau *error* pada eksperimen dapat dibedakan menjadi 2 tipe, yaitu *fixed error* dan *random error*. *Fixed error* memiliki nilai sama pada setiap pengukuran yang merupakan kesalahan karena kerusakan alat atau kalibrasi alat ukur kurang tepat, sehingga *error* ini dapat diperbaiki. *Random error* merupakan kesalahan yang nilainya berbeda di setiap pengambilan data dan factor penyebabnya tidak dapat diketahui dengan pasti. Pada analisa *uncertainty* ini dimaksudkan untuk menghitung nilai dari random

error yang terjadi pada saat pembacaan alat ukur. Berikut ini perhitungan *uncertainty* pengukuran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5m/s ketika nilai CoP maksimum dan torsi statis maksimum.

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

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\omega R}{U} \\ d\lambda &= \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} + \frac{\partial \lambda}{\partial R} + \frac{\partial \lambda}{\partial U} \\ d\lambda &= R u^{-1} d\omega + \omega U^{-1} dR + (-U^{-2} \omega R) dU \\ U_{\lambda, \omega} &= \frac{\delta \lambda \omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} u_{\omega} = u_{\omega} \\ U_{\lambda, R} &= \frac{\delta \lambda R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R} u_R = u_R \\ U_{\lambda, U} &= \frac{\delta \lambda U}{\lambda} = \frac{U}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial U} u_U = u_U \\ U_{\lambda} &= \pm \{ [u_{\omega}]^2 + [u_R]^2 + [-u_U]^2 \}^{\frac{1}{2}} \\ U_{\lambda} &= \pm \{ u_{\omega}^2 + u_R^2 + u_U^2 \}^{\frac{1}{2}}\end{aligned}$$

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_{\omega} = \pm \{ [u_n]^2 \}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{188} = \pm 5,32 \times 10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{1}{154,5} = \pm 6,47 \times 10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (U)

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

Uncertainty pada massa jenis fluida (ρ)

$$u_{\rho} = \pm \frac{0,5}{28,5} = \pm 0,0175$$

Uncertainty pada viskositas dinamik fluida (μ)

$$\begin{aligned}
 u_{\mu(T)} &= \pm \frac{\delta\mu}{\mu} = \pm \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dT} (\pm\delta T) \\
 \frac{d\mu}{dT} &\approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(29^\circ\text{C}) - \mu(27^\circ\text{C})}{(29 - 27)^\circ\text{C}} \\
 &= \frac{(1,857 - 1,848) \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}}{2^\circ\text{C}} \\
 &= 4,72 \times 10^{-8} \\
 u_{\mu(T)} &= \frac{1}{1,855 \times 10^{-5}} 4,72 \times 10^{-8} \times 0,5^\circ\text{C} = \pm 0,00127
 \end{aligned}$$

- Maka nilai *uncertainty tip speed ratio* dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 u_\lambda &= \pm \{ u_\omega^2 + u_R^2 + (-u_U)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_\lambda &= \pm \{ (5,32 \times 10^{-4})^2 + (6,47 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_\lambda &= \pm 6,8 \times 10^{-3} \\
 u_\lambda &= \pm 0,68\%
 \end{aligned}$$

- *Uncertainty* pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

$$\begin{aligned}
 u_{RE} &= \pm \{ u_\rho^2 + u_U^2 + u_L^2 + (-u_\mu)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_{RE} &= \pm \{ (17,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (3,24 \times 10^{-3})^2 + \\
 &\quad (0,00127)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_{RE} &= \pm 17,997 \times 10^{-3} = 1,79\%
 \end{aligned}$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *Coefficient of Moment* (C_M)

$$\begin{aligned}
 u_{CM} &= \pm \{ u_{Td}^2 + u_\rho^2 + u_U^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_{CM} &= \pm \{ (0,055)^2 + (0,0175)^2 + (0,002)^2 + \\
 &\quad (4,66 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
 u_{CM} &= \pm 5,81 \times 10^{-2} = 5,81\%
 \end{aligned}$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS})

$$u_{CTS} = \pm \{ u_{Ts}^2 + u_p^2 + u_U^2 + u_A^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CTS} = \pm \{ (0,0022)^2 + (0,0175)^2 + (0,002)^2 + (4,66 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CTS} = \pm 1,85 \times 10^{-2} = 1,85 \%$$

- *Uncertainty* pada pembacaan *Coefficient of Power* (CoP)

$$u_{CoP} = \pm \{ [u_{Td}]^2 + [u_\omega]^2 + [-u_\rho]^2 + [-3u_U]^2 + [-u_A]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,055)^2 + (5,32 \times 10^{-4})^2 + (17,5 \times 10^{-3})^2 + (-3 \times 0,002)^2 + (4,66 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

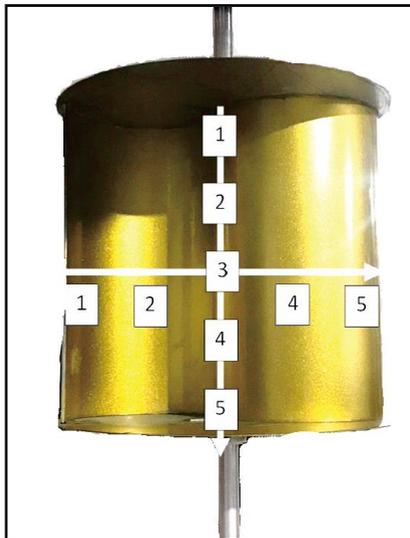
$$u_{CoP} = \pm 5,84 \times 10^{-2} = 5,84 \%$$

Tabel 3. 8 Hasil perhitungan *uncertainty* pengukuran

Parameter	<i>Uncertainty</i>
<i>Tip speed ratio</i> (λ)	0,68%
Reynolds Number (Re)	1,79%
<i>Coefficient of Moment</i> (C_M)	5,81%
<i>Coefficient of Static Torque</i> (C_{TS})	1,85%
<i>Coefficient of Power</i> (CoP)	5,84%

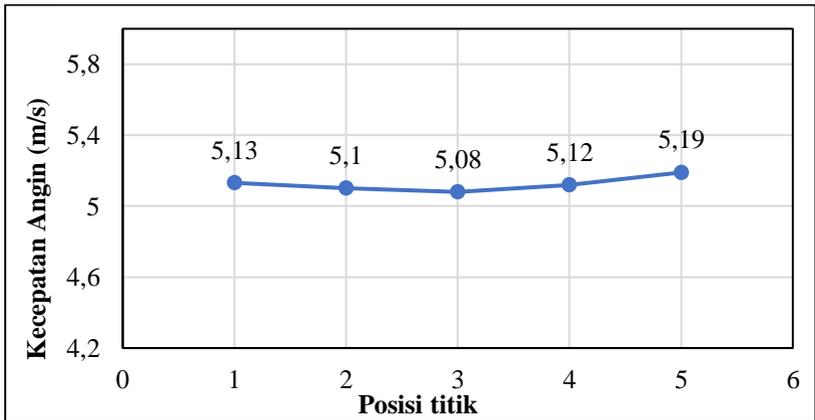
3.7 Uniformity Test

Salah satu batasan masalah yang digunakan di dalam penelitian ini adalah aliran udara dalam keadaan *uniform flow* pada sisi *upstream* turbin angin Savonius agar didapatkan hasil penelitian yang ideal. Adapun cara yang digunakan untuk mendapatkan *uniform flow* ini adalah dengan memberikan *honeycomb* di depan blower atau axial fan. Untuk memastikan aliran angin telah menjadi *uniform flow*, dilakukan *uniformity test*. *Uniformity test* dilakukan dengan cara mengukur kecepatan angin 9 titik di depan turbin angin Savonius dengan jarak 4D. Berikut adalah skema posisi pengukuran dan hasil pengukurannya.

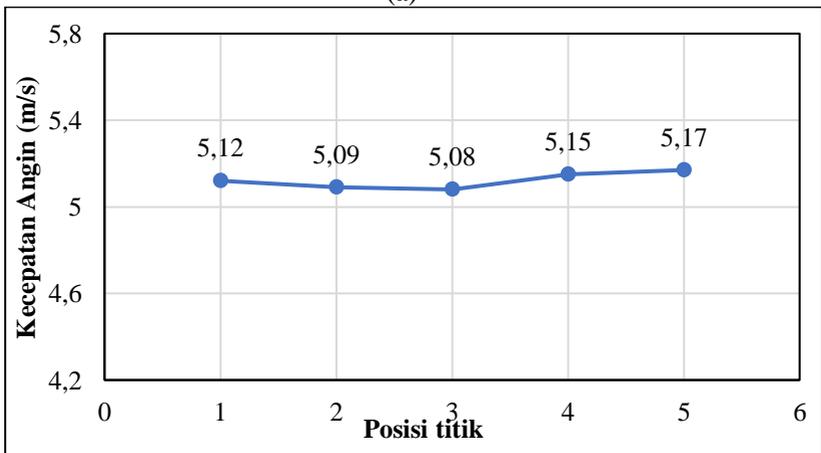


Gambar 4. 1 Skema posisi pengukuran *uniform test*

Berikut adalah grafik hasil *uniform test* pada kecepatan angin 5 m/s.



(a)



(b)

Gambar 4. 2 Hasil *uniform test* posisi (a) *horizontal* (b) *vertical* pada kecepatan 5m/s

3.8 Jadwal Kegiatan

Aktivitas	Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli				Agustus							
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV				
Pembuatan Proposal	■	■	■	■	■	■	■	■																								
Ujian Proposal																	■	■														
Persiapan Eksperimen		■	■	■																												
Eksperimen									■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■								
Pengolahan Data															■	■					■	■	■	■								
Penulisan Tugas Akhir																																
Ujian Tugas Akhir																									■	■						

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah nilai dari kecepatan putar turbin (n), torsi dinamis (T_d), torsi statis (T_s), *Coefficient of Power* (CoP), dan *Coefficient of Moment* (Cm). Dalam perhitungan ini, digunakan asumsi bahwa aliran udara sebagai fluida kerja dalam keadaan aliran *steady* dan *incompressible* yang memiliki nilai *properties* 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_{std}) = 288,2 K.
 3. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = $1,225 \text{ kg/m}^3$.
 4. Temperatur udara pada saat penelitian (T_2) = $28,5 \text{ }^\circ\text{C} = 301,5 \text{ K}$.
- Properties tersebut kemudian digunakan untuk mengolah data hasil eksperimen untuk menghitung data yang diinginkan.

4.1.1 Perhitungan Reynolds Number

Berdasarkan persamaan 2.2, bilangan Reynold dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

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

dimana :

- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- U : kecepatan fluida (m/s)
- L : Panjang karakteristik (m)
 $2D-b-2t = (2 \times 167,1\text{mm}) - 19\text{mm} -$
 $(2 \times 2,95\text{mm}) = 309 \text{ mm}$
- μ : viskositas dinamik (Ns/m)

a. Perhitungan Massa Jenis Fluida (ρ)

Massa jenis fluida dihitung menggunakan persamaan Boyle-Gay Lussac tentang pemuain gas sebagai berikut.

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

Dimana $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan 4.1 dapat diubah menjadi:

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

Keadaan 1 menyatakan keadaan standard dan keadaan 2 menyatakan keadaan pada saat pengukuran. Keadaan 1 dan 2 diasumsikan berada pada ketinggian yang sama, sehingga $P_1 = P_2$ dan $m_1 = m_2$. Berdasarkan batasan tersebut, maka persamaan 4.2 dapat diubah menjadi:

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2 \dots \dots \dots (4.3)$$

Sehingga nilai dari massa jenis udara pada saat penelitian dapat dihitung sebagai berikut.

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2}$$

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

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

b. Perhitungan Viskositas Udara

Perhitungan nilai viskositas udara menggunakan persamaan Sutherland, yaitu sebagai berikut :

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

dimana untuk udara:

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

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

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

Sehingga nilai viskositas udara pada saat penelitian dapat dihitung sebagai berikut.

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

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

Setelah didapatkan nilai massa jenis dan viskositas dari udara, maka Reynolds Number pada dapat dihitung. Sebagai contoh, digunakan perhitungan pada kecepatan angin 5 m/s.

$$Re = \frac{1,17 \text{ kg/m}^3 \times 5 \text{ m/s} \times 0,309 \text{ m}}{\left(1,86 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right)} = 97265$$

$$\approx 9,7 \times 10^4$$

4.1.2 Perhitungan *Tip speed ratio*

Tip speed ratio dihitung menggunakan persamaan 2.15 sebagai berikut.

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

dimana :

λ : *tip speed ratio*

ω : kecepatan angular turbin (rad/s)

R: jari-jari turbin (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2t}{2} = 154,5 \text{ mm}$

U : kecepatan angin (m/s)

Berikut adalah perhitungan *tip speed ratio* yang diambil pada saat didapatkan CoP maksimum di kecepatan angin (U) 5 m/s dengan peletakan silinder pengganggu, dimana nilai $\omega = 19,217 \text{ rad/s}$

$$\lambda = \frac{19,217 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1545 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,594$$

4.1.3 Perhitungan *Coefficient of Moment*

Coefficient of Moment pada eksperimen ini dihitung dengan persamaan 2.14, yaitu

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R}$$

Berikut contoh perhitungan nilai *Coefficient of Moment* pada eksperimen ini, dimana:

m : massa pemberat (kg) = $1,852 \times 10^{-2} \text{ kg}$

- s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg) = 0,5 kg
g : percepatan gravitasi (m/s²) = 9,81 m/s²
r : jari-jari poros yang menerima beban (m)
= 1,269 x 10⁻²
ω : Kecepatan sudut turbin = 19,217 rad/s
ρ : massa jenis angin (kg/m³) = 1,17 kg/m³
A : *cross sectional area* (m²) = 9,2 x 10² m²
R : jari-jari turbin angin Savonius = 154,5 mm

$$C_M = \frac{Td}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R}$$

$$C_M = \frac{|m-s|g \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$$

$$C_M = \frac{\left| \frac{185,2-500}{1000} \right| kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,01269 m \cdot 19,217 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,092 m^2 \cdot (5 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,1545 m}$$

$$C_M = 0,1885$$

4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Power*

Nilai *Coefficient of Power* (CoP) dihitung berdasarkan persamaan 2.19 sebagai berikut:

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

Berikut ini contoh perhitungan nilai *Coefficient of Power* maksimum pada kecepatan angin (U) 5 m/s, dimana :

- m : massa pemberat (kg) = 1,852 x 10⁻² kg
s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg) = 0,5 kg
g : percepatan gravitasi (m/s²) = 9,81 m/s²
r : jari-jari poros yang menerima beban (m)
= 1,269 x 10⁻²
ω : Kecepatan sudut turbin = 19,217 rad/s
ρ : massa jenis angin (kg/m³) = 1,17 kg/m³
A : *cross sectional area* (m²) = 9,2 x 10² m²

Sehingga didapatkan nilai CoP :

$$\begin{aligned}
 CoP &= \frac{\left| \frac{185,2 - 500}{1000} \right| kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,01269 m \cdot 19,217 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,092 m^2 \cdot (5 \frac{m}{s})^3} \\
 &= 0,1119 \\
 &= 11,19\%
 \end{aligned}$$

4.1.5 Perhitungan *Coefficient of Static Torque*

Berdasarkan persamaan 2.18, nilai *Coefficient of Static Torque* dapat dihitung sebagai berikut.

$$C_{TS} = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$$

Berikut ini contoh perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* maksimum pada kecepatan angin (U) 3,8 m/s, dimana:

- T_s : torsi statis pada sudut $30^\circ = 0,0452 \text{ Nm}$
- ρ : massa jenis angin (kg/m^3) = $1,17 \text{ kg/m}^3$
- A : *cross sectional area* (m^2) = $9,2 \times 10^2 \text{ m}^2$

Sehingga nilai C_{TS} adalah :

$$C_{TS} = \frac{0,0452 \text{ Nm}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,092 m^2 \cdot (5 \frac{m}{s})^2 \cdot 0,1545 m}$$

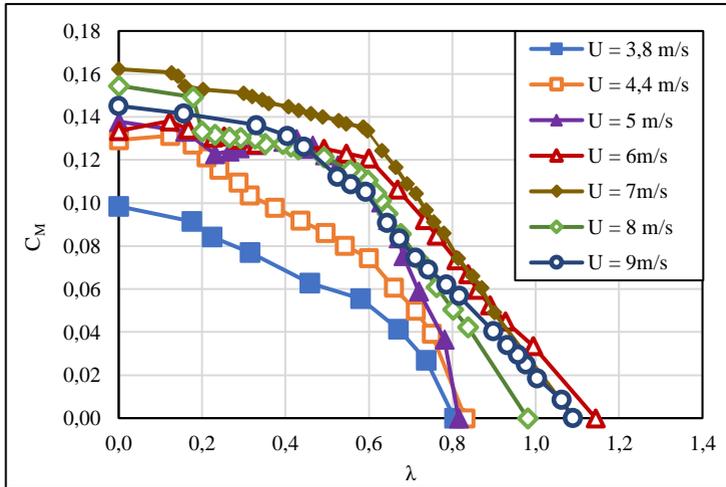
$$C_{TS} = 0,217$$

4.2 Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Analisa performa turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu diperlukan untuk mengetahui kondisi awal turbin angin Savonius yang diuji dan digunakan sebagai pembandingan terhadap performa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu. Hasil dari perbandingan performa tersebut yang akan membuktikan keefektifan dari pemberian silinder pengganggu di depan returning blade. Analisa dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s.

4.2.1 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi *Tip speed ratio* (λ)

Grafik pertama yang didapatkan dari eksperimen ini adalah grafik hubungan nilai *Coefficient of Moment* dengan nilai *tip speed ratio*. Nilai dari *Coefficient of Moment* didapatkan dari perbandingan antara torsi aktual yang dimiliki turbin angin Savonius terhadap torsi teoritis ($C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R}$). Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, masa pemberat pada *brake dynamometer system* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4. 3 Grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio*

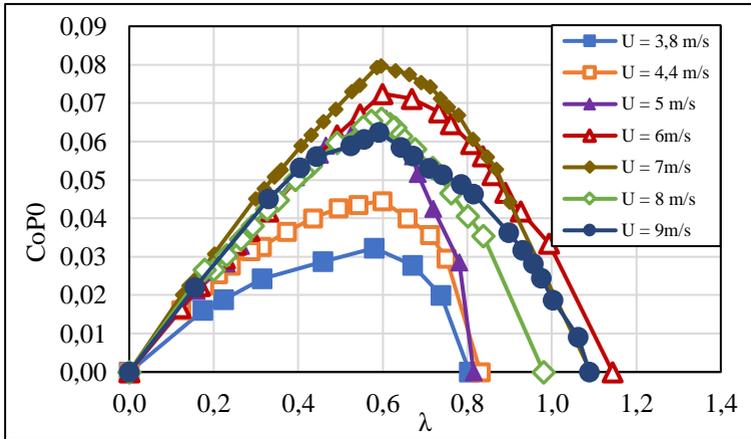
Berdasarkan gambar 4.3, dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Moment* mengalami penurunan seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Nilai C_M maksimum pada kecepatan 3,8 m/s bernilai 0,0985; pada kecepatan 4,4 m/s bernilai 0,1313; pada kecepatan 5 m/s bernilai 0,1379; pada kecepatan 6 m/s bernilai 0,1381; pada kecepatan 7 m/s bernilai 0,1622; pada kecepatan 8m/s bernilai 0,1546; pada kecepatan 9 m/s bernilai 0,1452. Nilai C_{M0} maksimum didapatkan pada *tip speed ratio* bernilai 0, yaitu ketika pembebanan maksimum sehingga turbin angin Savonius berhenti. Sedangkan nilai C_{M0} minimum didapatkan pada saat nilai *tip speed ratio* maksimum, yaitu ketika turbin angin Savonius belum diberikan beban pada *brake dynamometer systems*.

Selain dipengaruhi oleh pembebanan yang diberikan, nilai C_{M0} juga dipengaruhi oleh variasi kecepatan angin yang digunakan. Dari variasi kecepatan angin yang digunakan pada eksperimen ini, didapatkan bahwa *trendline* C_{M0} naik dari kecepatan angin 3,8 sampai pada kecepatan 7 m/s dan turun pada

kecepatan angin 8 dan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kecepatan optimum untuk menghasilkan C_{M0} maksimum. Nilai kecepatan terlalu kecil akan menyebabkan putaran poros turbin kecil, sehingga nilai torsi dinamis kecil dan C_{M0} akan kecil. Akan tetapi, kecepatan angin yang terlalu tinggi akan menyebabkan kerugian mekanis pada turbin angin Savonius semakin meningkat dan nilai C_{M0} turun setelah melewati kecepatan optimum.

4.2.1 Analisa *Coefficient of Power* Tanpa Silinder Pegganggu (CoP_0) Sebagai Fungsi *Tip speed ratio* (λ)

Pada eksperimen ini, didapatkan grafik *Coefficient of Power* terhadap nilai dari *tip speed ratio*. Nilai *Coefficient of Power* didapatkan dari perbandingan daya *output* turbin angin Savonius dengan daya teoritis yang diberikan oleh angin atau dapat dinyatakan dalam persamaan $CoP = \frac{T_D \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3}$. Daya *output* dari turbin angin Savonius merupakan hasil kali torsi dinamis dan kecepatan putar poros turbin. Torsi dinamis ini didapatkan dari sistem *brake dynamometer*, sedangkan nilai kecepatan putar poros turbin dari pengukuran menggunakan tachometer. Nilai *tip speed ratio* didapatkan dari perbandingan kecepatan tangensial turbin terhadap kecepatan angin ($\lambda = \frac{\omega R}{U}$). Nilai *tip speed ratio* pada eksperimen ini divariasikan dengan cara mengubah berat beban pada sistem *brake dynamometer*.

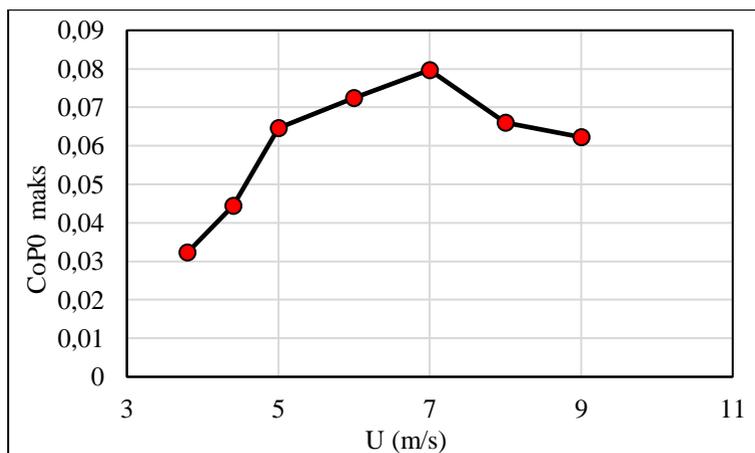


Gambar 4. 4 Grafik CoP_0 sebagai fungsi *Tip speed ratio*

Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai *Coefficient of Power* pada semua kecepatan berbentuk parabolik terbuka ke bawah, dimana nilai CoP meningkat sampai pada titik tertentu dan kemudian akan turun kembali. Titik puncak parabolik merupakan titik dengan nilai CoP maksimum yang bernilai 0,0323 pada *tip speed ratio* 0,581 untuk kecepatan 3,8 m/s; 0,0445 pada *tip speed ratio* 0,599 untuk kecepatan 4,4 m/s; 0,0661 pada *tip speed ratio* 0,608 untuk kecepatan 5m/s; 0,0724 pada *tip speed ratio* 0,599 untuk kecepatan 6 m/s; 0,0797 pada *tip speed ratio* 0,596 untuk kecepatan 7 m/s; 0,066 pada *tip speed ratio* 0,596 untuk kecepatan 8m/s; dan 0,0623 pada *tip speed ratio* 0,592 untuk kecepatan 9 m/s. Nilai *tip speed ratio* pada saat CoP maksimum merupakan nilai *tip speed ratio* optimum. Artinya, kenaikan *tip speed ratio* akan meningkatkan nilai CoP sampai pada nilai *tip speed ratio* optimum. Setelah melewati nilai *tip speed ratio* optimum, kenaikan nilai *tip speed ratio* justru akan menurunkan nilai CoP. Dari data tersebut, didapatkan bahwa nilai *tip speed ratio* optimum berada pada rentang yang hampir sama, yaitu 0,58 - 0,6 untuk kecepatan angin 3,8 – 9 m/s.

Berdasarkan *trendline* grafik CoP_0 terhadap nilai *tip speed ratio*, dapat disimpulkan bahwa setiap variasi nilai *tip speed ratio* memiliki nilai optimum, dimana jika melewati nilai tersebut justru akan menurunkan nilai CoP_0 . Hal ini menunjukkan bahwa turbin angin Savonius akan bekerja paling baik pada *tip speed ratio* optimum, yang pada eksperimen ini ditentukan dengan pemberian beban pemberat pada sistem *brake dynamometer*. Pembebanan yang terlalu kecil menyebabkan nilai torsi dinamis kecil dan nilai CoP rendah. Akan tetapi, pembebanan terlalu tinggi akan menyebabkan kerugian mekanis yang semakin besar, sehingga performa turbin angin Savonius turun.

4.2.2 Analisa *Coefficient of Power* Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Sebagai Fungsi Kecepatan Angin (U)



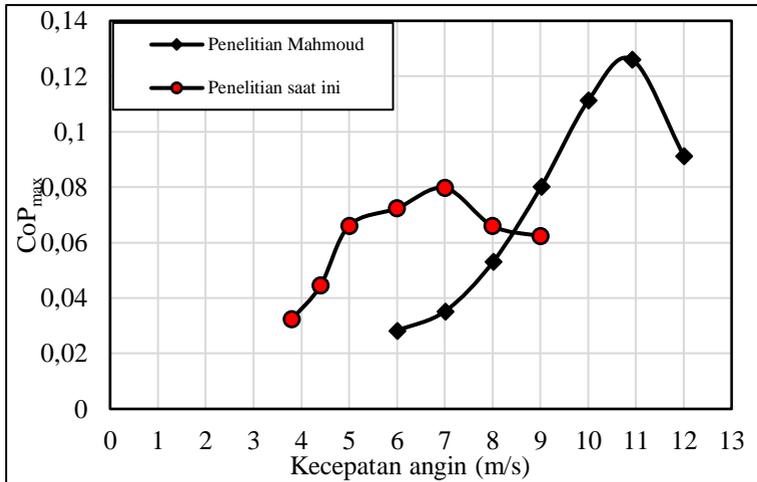
Gambar 4. 5 Grafik hubungan *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa pengganggu (CoP_0) maks sebagai fungsi kecepatan angin (U)

Nilai *Coefficient of Power* didapatkan dari perbandingan daya *output* turbin angin Savonius dengan daya teoritis yang diberikan oleh angin atau dapat dinyatakan dalam persamaan $CoP =$

$\frac{T_D \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot U^3}$. Berdasarkan persamaan tersebut, peningkatan nilai U akan memperbesar nilai daya teoritis dari angin dan juga meningkatkan kecepatan putar dari poros turbin angin Savonius (ω). Oleh karena itu, nilai CoP dapat dinyatakan dalam fungsi kecepatan angin yang diberikan. Pengukuran kecepatan angin dilakukan menggunakan anemometer, sedangkan pengukuran kecepatan putar poros turbin menggunakan tachometer.

Gambar 4.5 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara CoP_0 maks sebagai fungsi variasi kecepatan. Nilai CoP maksimum 0,0323 untuk kecepatan 3,8 m/s; 0,0445 untuk kecepatan 4,4 m/s; 0,0661 untuk kecepatan 5m/s; 0,0724 untuk kecepatan 6 m/s; 0,0797 untuk kecepatan 7 m/s; 0,066 untuk kecepatan 8m/s; dan 0,0623 untuk kecepatan 9 m/s. Data tersebut menunjukkan bahwa pada kecepatan 3,8 – 7 m/s, turbin angin mengalami peningkatan nilai CoP_0 maks. Akan tetapi pada kecepatan 8 dan 9 m/s, nilai CoP_0 maks justru semakin turun.

Trendline CoP_0 maks terhadap variasi kecepatan angin membentuk grafik parabolik yang menunjukkan adanya nilai kecepatan optimum pada penelitian ini. Peningkatan kecepatan angin yang diberikan hanya akan meningkatkan nilai performa turbin angin Savonius sampai pada kecepatan optimum. Hal ini disebabkan peningkatan kecepatan angin akan menyebabkan turbin angin bersifat *solid wall*, sehingga fluida tidak sempurna mencapai sudu-sudu turbin. Kesimpulan ini juga dapat dilihat dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al (2010) pada gambar 2.18 yang mendapatkan nilai kecepatan optimum 11 m/s pada penggunaan *single stages*, tanpa *overlap ratio* untuk variasi *aspect ratio* 0,5 – 5. Perbandingan hasil eksperimen ini dengan penelitian oleh Mahmoud et al dapat dilihat pada gambar berikut.



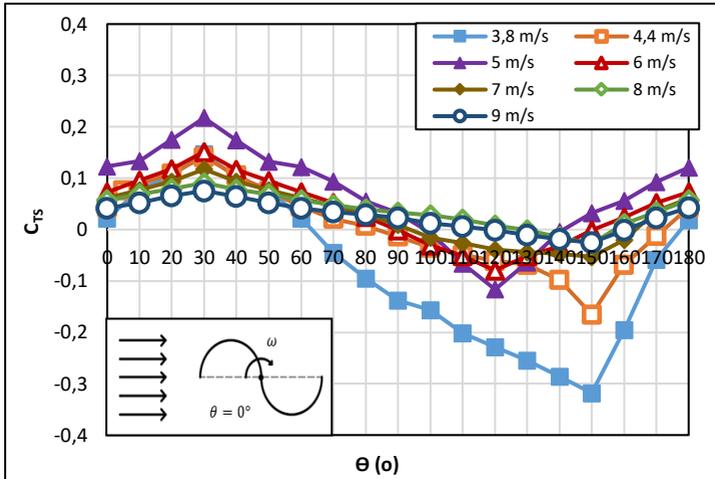
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan hasil penelitian dengan penelitian oleh Mahmoud et al

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa nilai kecepatan optimum pada penelitian Mahmoud adalah 11 m/s, sedangkan pada penelitian ini pada 7 m/s. Besar nilai kecepatan optimum ini akan berbeda berdasarkan desain turbin angin Savonius yang digunakan.

4.3.4 Analisa *Coefficient of Statis Torque* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (C_{TS0}) Fungsi Sudut Sudu Turbin (Θ)

Torsi statis merupakan ukuran kuantitatif dari sebuah gaya yang menyebabkan gerak rotasi suatu benda dan pada eksperimen ini diukur menggunakan torquemeter. Pengukuran torsi statis pada eksperimen ini dilakukan pada sudut 0-180° dengan jarak pengukuran setiap 10°. Berdasarkan persamaan 2.18, nilai *Coefficient of Static Torque* didapatkan dari perbandingan nilai torsi statis terhadap torsi teoritis pada turbin angin Savonius ($\frac{T_s}{0,5 \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$). Variasi kecepatan angin pengukuran

torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini adalah 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Hasil perhitungan nilai C_{TS0} dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 Grafik *Coefficient of Static Torque* turbin angin Savonius tanpa pengganggu (C_{TS0}) fungsi sudut sudu turbin(Θ)

Pada gambar 4.7 dapat dilihat bahwa grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Static Torque* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap besar sudut sudu turbin membentuk bentuk sinusoidal. Semua variasi kecepatan angin yang diberikan memiliki nilai torsi statis maksimum pada sudut 30°. Akan tetapi untuk nilai torsi statis minimum didapatkan pada sudut 120° untuk kecepatan angin 5 dan 6 m/s. Sedangkan untuk variasi kecepatan angin lainnya memiliki nilai torsi statis minimum pada sudut 150°. Gambar 4.7 menunjukkan adanya daerah dengan torsi statis bernilai negatif. Nilai negatif untuk torsi statis ini menunjukkan bahwa turbin angin Savonius tidak memiliki *self starting*, maka untuk memutar turbin pada sudut tersebut membutuhkan gaya tambahan dari luar. Pada kecepatan 3,8 m/s, didapatkan nilai maksimum 0,1465 dan nilai minimum

-0,318. Pada kecepatan 4,4 m/s, didapatkan nilai maksimum pada 0,14163 dan nilai minimum -0,165. Pada kecepatan 5 m/s, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,217 dan minimum -0,116. Pada kecepatan 6m/s, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,1517 dan minimum -0,0795. Pada kecepatan 7 m/s, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,117 dan minimum -0,053. Pada kecepatan 8 m/s, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,0909 dan minimum -0,0274. Pada kecepatan 9 m/s, didapatkan nilai maksimum sebesar 0,0754 dan minimum -0,0255.

Berdasarkan data hasil pengukuran dan perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque*, *trendline* kecepatan 3,8 – 5 m/s mengalami kenaikan dan pada kecepatan 6 – 9 m/s mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan adanya nilai kecepatan optimum pada nilai *Coefficient of Static Torque*. Kecepatan angin yang terlalu rendah menyebabkan gaya drag angin kecil, sehingga nilai torsi statis angin kecil dan *Coefficient of Static Torque* kecil. Akan tetapi kecepatan angin yang terlalu tinggi menyebabkan *torquemeter*, yaitu alat ukur torsi statis kesulitan untuk mengunci poros turbin hingga benar-benar diam dan menyebabkan hasil pembacaan alat ukur kurang stabil.

4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu

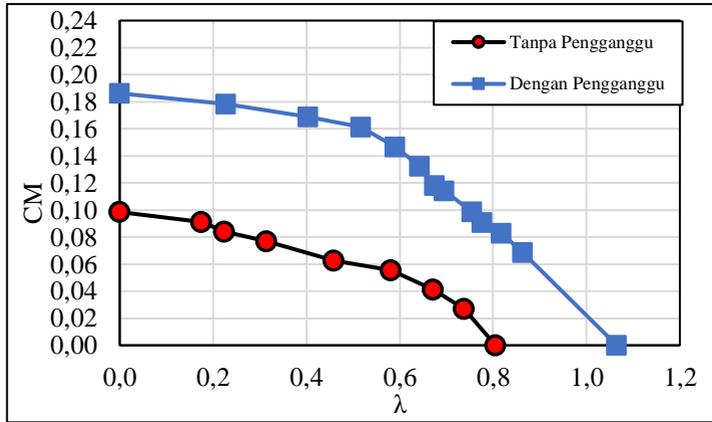
Analisa performa ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh diberikannya silinder pengganggu terhadap performa pada turbin angin Savonius. Silinder pengganggu yang digunakan pada eksperimen ini memiliki rasio diameter $d/D = 0,5$ dan diletakkan pada rasio jarak $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$. Analisa ini meliputi nilai *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap nilai *tip speed ratio*, *Coefficient of Power* (CoP) terhadap nilai *tip speed ratio*, dan torsi statis terhadap sudut yang dibentuk sudu turbin dengan arah kedatangan angin.

4.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ)

Analisa pertama pada turbin angin Savonius yang digunakan untuk membandingkan hasil performa dengan dan tanpa silinder pengganggu adalah analisa nilai C_M sebagai fungsi *tip speed ratio*. Analisa ini dilakukan untuk setiap variasi kecepatan angin yang digunakan. Adapun hasil analisa ini adalah sebagai berikut.

4.3.1.1 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 3,8 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung torsi aktual yang dimiliki turbin angin Savonius terhadap torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter $d/D = 0,5$, diletakkan pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada sistem *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.8 sebagai berikut.



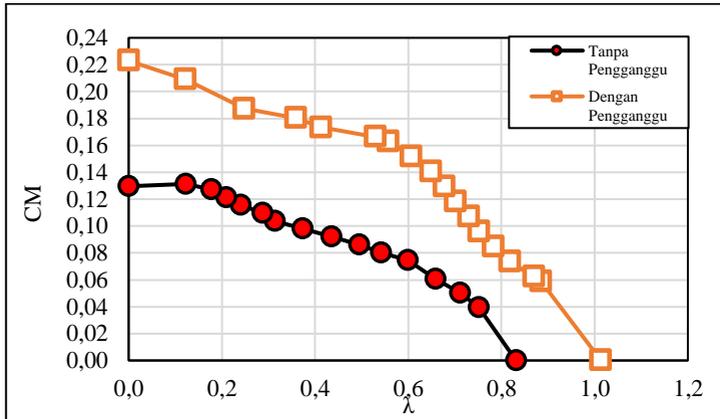
Gambar 4. 8 Grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 3,8 m/s

Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Nilai C_M maksimum terjadi *tip speed ratio* 0, yaitu ketika pemberian beban maksimum pada *brake dynamometer systems* dan membuat turbin angin Savonius berhenti. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,0985 dan bernilai 0,1862 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,89 kali lebih besar dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 3,8 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 3,8 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.2 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 4,4 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual dibandingkan torsi teoritis. Silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini memiliki rasio diameter $d/D=0,5$ diletakkan pada rasio jarak $S/D=1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.9 sebagai berikut.



Gambar 4. 9 Grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 4,4 m/s

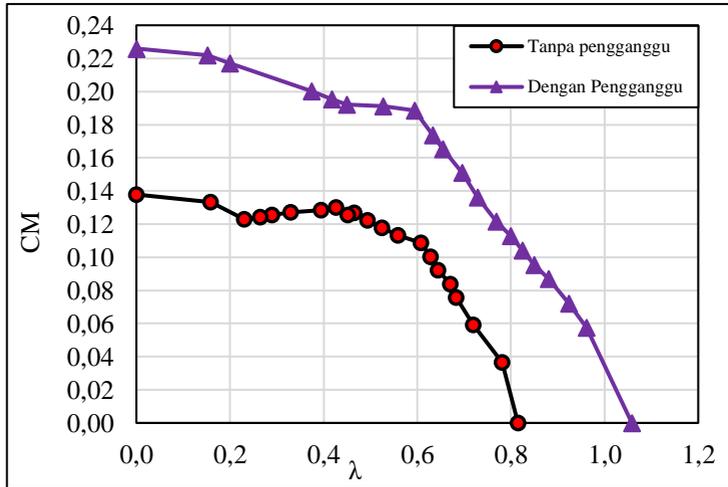
Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Kenaikan nilai *tip speed ratio* pada eksperimen ini ditunjukkan dengan pengurangan beban pada *brake dynamometer systems*, sehingga nilai dari torsi dinamis turbin mengecil. Kenaikan nilai *tip speed ratio*

menyebabkan nilai torsi dinamis turun, sehingga nilai *Coefficient of Moment* juga ikut turun dengan turunnya nilai torsi dinamis. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,131 dan bernilai 0,223 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,69 kali lebih besar dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 4,4 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 4,4 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.3 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 5 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual dan torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5, diletakkan pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan secara berkala hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.10 sebagai berikut.



Gambar 4. 10 Grafik nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 5 m/s

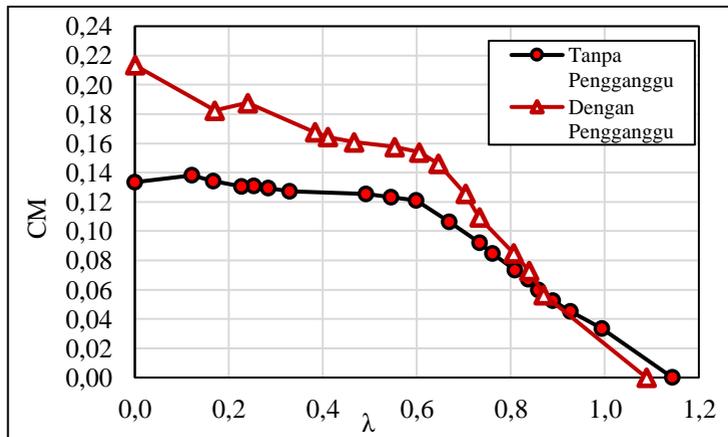
Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Nilai C_M maksimum terjadi *tip speed ratio* 0, yaitu ketika pemberian beban maksimum dan membuat turbin angin Savonius berhenti. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,1379 dan bernilai 0,2259 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,63 kali lebih besar dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin

angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.4 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 6 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual dan torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 ,diletakkan pada rasio jarak $S/D= 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.11 sebagai berikut.



Gambar 4. 11 Grafik *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 6 m/s

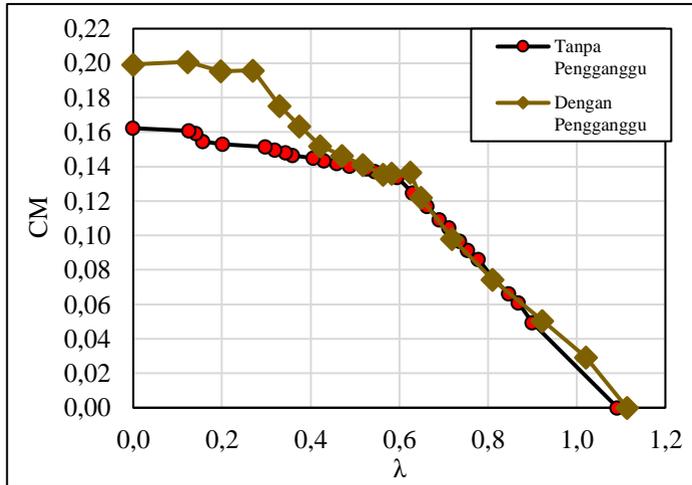
Gambar 4.11 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring

dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Kenaikan nilai *tip speed ratio* pada eksperimen ini ditunjukkan dengan pengurangan beban pada *brake dynamometer systems*, sehingga nilai dari torsi dinamis turbin mengecil. Torsi dinamis memiliki nilai yang sebanding dengan nilai dari *Coefficient of Power*, maka nilai *Coefficient of Power* dan nilai *Coefficient of Moment* juga ikut turun dengan turunnya nilai torsi dinamis. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,1381 dan bernilai 0,2133 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,54 kali lebih besar dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 6m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 6m/s mampu menaikkan kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.5 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 7 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual terhadap torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 ,diletakkan pada rasio jarak $S/D= 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.12 sebagai berikut.



Gambar 4. 12 Grafik *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 7 m/s

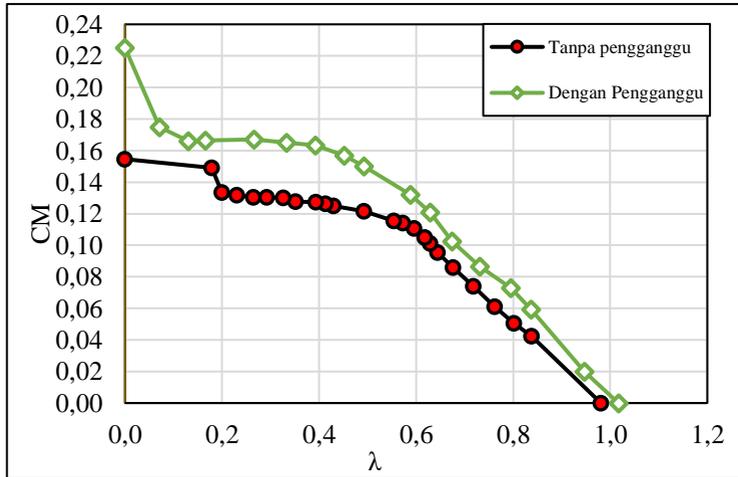
Gambar 4.12 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Kenaikan nilai *tip speed ratio* pada eksperimen ini ditunjukkan dengan pengurangan beban pada *brake dynamometer systems*, sehingga nilai dari torsi dinamis turbin mengecil. Torsi dinamis memiliki nilai yang sebanding dengan nilai dari *Coefficient of Power*, maka nilai *Coefficient of Power* dan nilai *Coefficient of Moment* juga ikut turun dengan turunnya nilai torsi dinamis. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,1622 dan bernilai 0,2053 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,26 kali lebih besar

dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.6 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 8 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual terhadap torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 ,diletakkan pada rasio jarak $S/D= 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.13 sebagai berikut.



Gambar 4. 13 Grafik *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 8 m/s

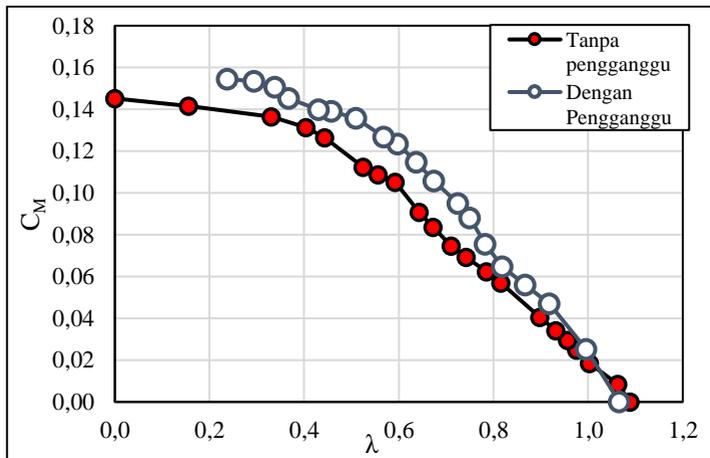
Gambar 4.13 menunjukkan grafik hubungan antara nilai *Coefficient of Moment* sebagai fungsi *tip speed ratio*. Grafik nilai C_M tanpa dan dengan silinder menurun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. Nilai C_M maksimum terjadi *tip speed ratio* 0, yaitu ketika pemberian beban maksimum dan membuat turbin angin Savonius berhenti. Nilai C_M maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,155 dan bernilai 0,2066 dengan penggunaan silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu. Nilai C_M maksimum dengan penggunaan silinder pengganggu 1,336 kali lebih besar dibandingkan nilai C_M maksimum tanpa penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan angin 8 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 8 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin

angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

4.3.2.7 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 9 m/s

Nilai dari *Coefficient of Moment* dapat dihitung dari perbandingan torsi aktual terhadap torsi teoritis dengan dan tanpa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter $d/D=0,5$ diletakkan pada rasio jarak $S/D= 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Untuk mendapatkan variasi dari nilai *tip speed ratio*, massa pemberat pada system *brake dynamometer* ditambahkan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar. Variasi dari nilai *tip speed ratio* ini akan merubah nilai C_M yang dapat dilihat pada gambar 4.14 sebagai berikut.



Gambar 4. 14 Grafik *Coefficient of Moment* sebagai fungsi dari *tip speed ratio* pada kecepatan 9 m/s

Berdasarkan gambar 4.14, dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan kenaikan nilai *tip speed ratio*. *Tip speed ratio* pada eksperimen ini

menunjukkan pengurangan beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*. Pada grafik C_M dengan penggunaan silinder pengganggu, tidak memiliki nilai pada rentang *tip speed ratio* 0 sampai sekitar 0,24. Hal ini dikarenakan kapasitas maksimum neraca pegas yang digunakan bernilai 3 kg, sedangkan turbin angin Savonius belum berhenti ketika beban pada *brake dynamometer systems* ditambahkan hingga neraca pegas telah menunjukkan hasil baca 3 kg.

Penggunaan silinder pengganggu mampu menaikkan nilai C_M turbin angin Savonius, terbukti dengan *trendline* grafik dengan silinder pengganggu lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 9 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 9 m/s mampu menaikkan kemampuan turbin angin Savonius untuk menerima beban yang diberikan pada *brake dynamometer systems*.

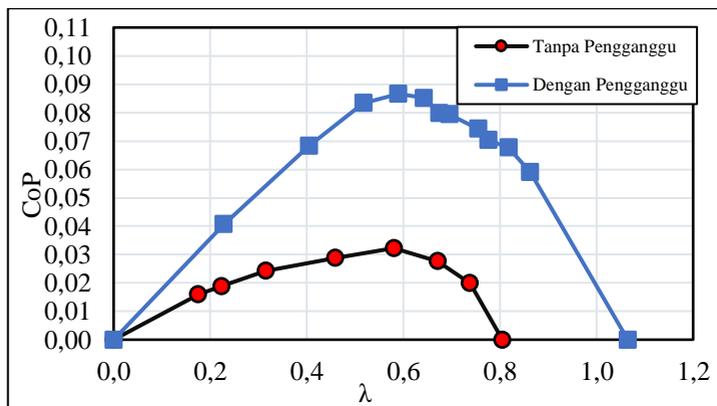
4.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ)

Sama seperti analisa yang telah dilakukan pada turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu, analisa yang digunakan pada penelitian dengan meletakkan silinder pengganggu salah satunya adalah analisa nilai *Coefficient of Power* terhadap *tip speed ratio*. Analisa nilai CoP sebagai fungsi *tip speed ratio* dilakukan pada setiap variasi kecepatan dengan dan tanpa menggunakan silinder pengganggu. Adapun hasil analisa adalah sebagai berikut.

4.3.1.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 3,8 m/s

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan grafik nilai *Coefficient of Power* terhadap *tip speed ratio* pada kecepatan 3,8 m/s dengan dan tanpa silinder pengganggu. Kecepatan 3,8 m/s merupakan kecepatan minimum angin yang dapat memutar turbin angin Savonius dengan desain yang

digunakan dan dapat menghasilkan grafik CoP terhadap *tip speed ratio*. *Coefficient of Power* menyatakan perbandingan antara daya output yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan daya teoritis yang diberikan oleh angin. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 15 Grafik Nilai *Coefficient of Power* Fungsi *Tip speed ratio* pada kecepatan 3,8 m/s

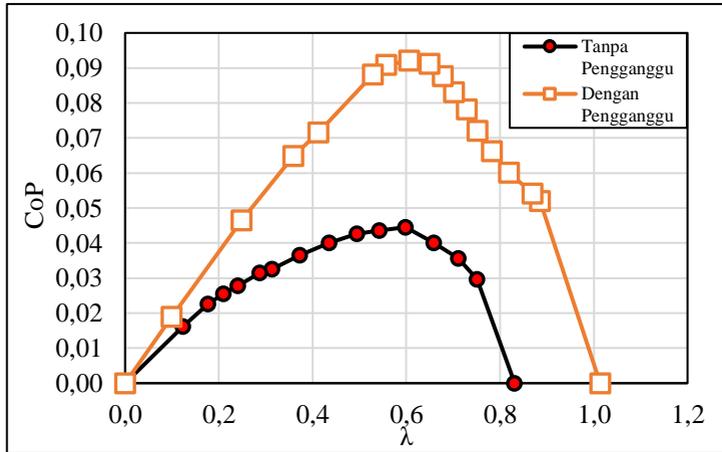
Pada gambar 4.15 dapat diketahui bahwa grafik CoP fungsi *tip speed ratio* memiliki bentuk parabolik. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum dari grafik CoP dengan dan tanpa silinder pengganggu berada pada titik yang berdekatan, yaitu *tip speed ratio* optimum 0,581 untuk turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan 0,590 untuk turbin angin dengan silinder pengganggu. Sementara untuk nilai *tip speed ratio* maksimum, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi. Pemberian silinder pengganggu ini juga membuktikan adanya

kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0323 dan 0,0866 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.15, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 2,68 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan yang signifikan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 4,4 m/s

Analisa selanjutnya dilakukan untuk pada *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* untuk kecepatan 4,4 m/s atau bilangan Reynold 85500 dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D 1,8; $y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 16 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 4,4 m/s

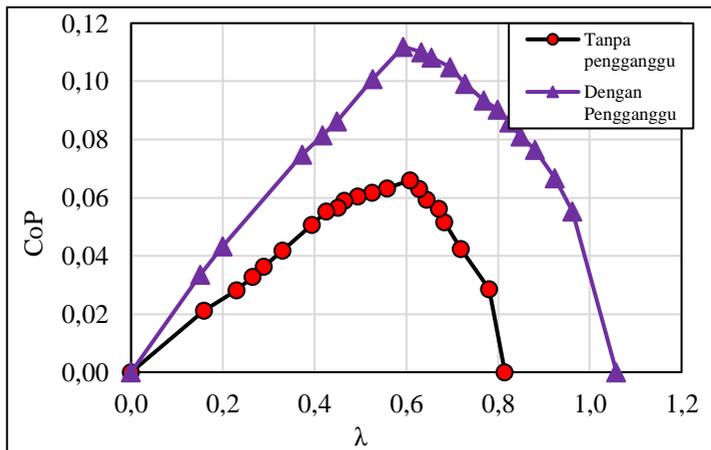
Gambar 4.16 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius fungsi *tip speed ratio* untuk kecepatan 4,4 m/s. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,599 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,606. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0445 dan 0,092 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.16, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 2,07 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan yang signifikan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D =

1,8 dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.3 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 5 m/s

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan grafik nilai *Coefficient of Power* terhadap *tip speed ratio* pada kecepatan 5 m/s atau bilangan Reynold 96000 dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D 1,8; $y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 17 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 5 m/s

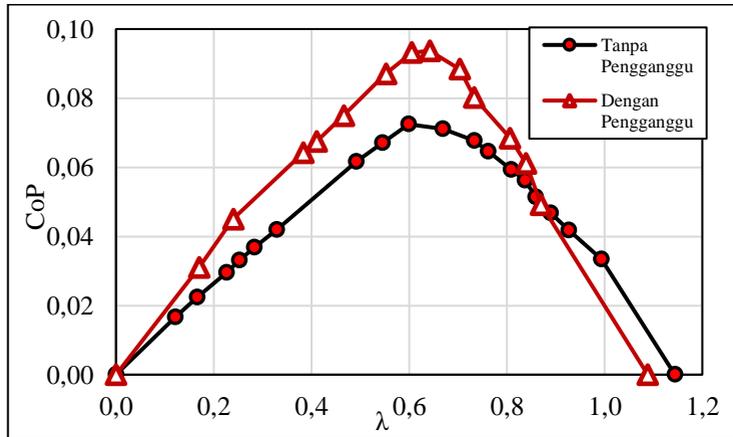
Gambar 4.17 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius fungsi *tip speed ratio* untuk kecepatan 5 m/s. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,608 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,598. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0661 dan 0,1119 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.17, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 1,69 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan yang signifikan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.4 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 6 m/s

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan grafik nilai *Coefficient of Power* terhadap *tip speed ratio* pada kecepatan 6 m/s dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D

1,8; $y/D = 0,5$. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D 1,8; $y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



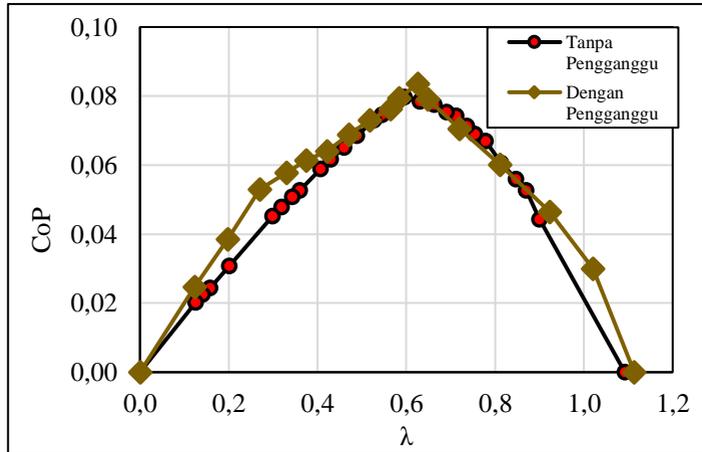
Gambar 4.18 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 6 m/s

Gambar 4.18 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius dengan nilai dari *tip speed ratio* untuk kecepatan 6 m/s. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,599 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,646. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0724 dan 0,0943 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.18, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 1,302 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.5 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 7 m/s

Analisa ini dilakukan untuk membandingkan grafik nilai *Coefficient of Power* terhadap *tip speed ratio* pada kecepatan 7 m/s atau bilangan Reynold 136000 dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter $d/D = 0,5$ dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$; $y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 19 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 7 m/s

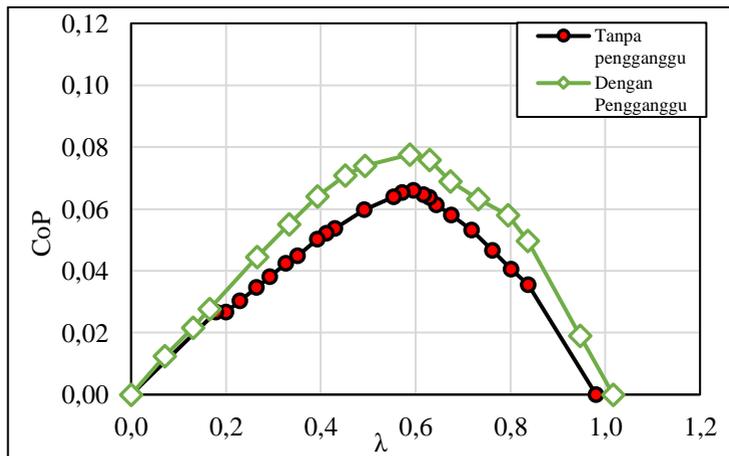
Gambar 4.19 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius dengan nilai dari *tip speed ratio* untuk kecepatan 7 m/s. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,596 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,625. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0797 dan 0,0853 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.19, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 1,07 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$

cukup efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Peningkatan nilai performa ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.6 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 8 m/s

Analisa selanjutnya dilakukan untuk pada *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* untuk kecepatan 8 m/s atau bilangan Reynold 155600 dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D 1,8; $y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 20 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 8 m/s

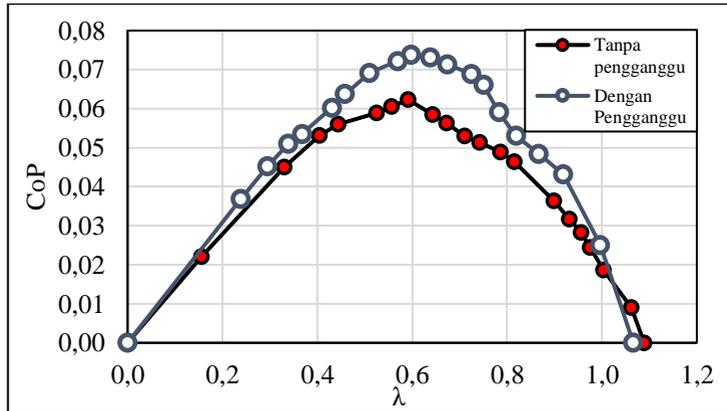
Gambar 4.20 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius dengan nilai dari *tip speed ratio* untuk kecepatan 8 m/s. Pada keadaan awal, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,596 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,588. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,066 dan 0,0776 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.20, dapat diketahui jika nilai CoP dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 1,17 kali CoP tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Peningkatan nilai ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.1.7 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip speed ratio* (λ) pada Kecepatan 9 m/s

Analisa selanjutnya dilakukan untuk pada *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* untuk kecepatan 9 m/s dengan dan tanpa silinder pengganggu. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D 0,5 dan diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak S/D 1,8;

$y/D = 0,5$. Data hasil pengukuran pada eksperimen ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. 21 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 9 m/s

Gambar 4.21 menunjukkan hubungan CoP turbin angin Savonius dengan nilai dari *tip speed ratio* untuk kecepatan 9 m/s. Pada keadaan awal untuk kedua *trendline*, nilai CoP naik seiring dengan naiknya nilai *tip speed ratio* hingga pada titik *tip speed ratio* optimum dan setelah itu nilai CoP akan turun dengan naiknya *tip speed ratio*. Titik *tip speed ratio* optimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu bernilai 0,592 dan dengan silinder pengganggu bernilai 0,598. Pemberian silinder pengganggu ini membuktikan adanya kenaikan nilai CoP untuk turbin angin Savonius pada kecepatan yang sama. Nilai CoP maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu adalah 0,0623 dan 0,0738 pada turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang ditunjukkan pada gambar 4.21, dapat diketahui jika nilai CoP_{maks} dengan penggunaan silinder pengganggu meningkat menjadi 1,186

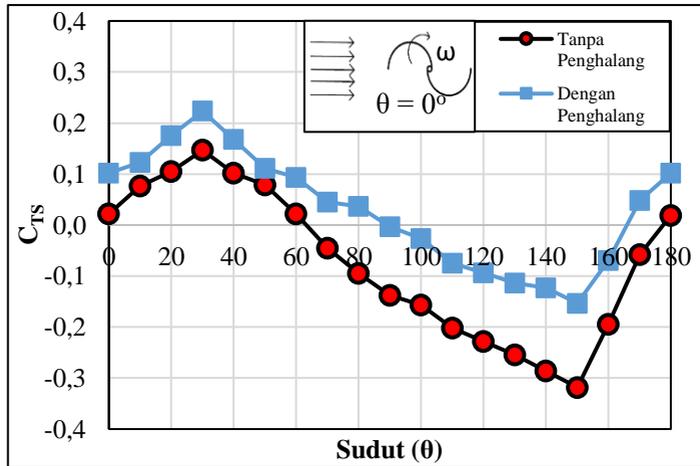
kali CoP_{maks} tanpa silinder pengganggu. Adanya peningkatan ini membuktikan bahwa peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada rasio jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$ efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Hal ini disebabkan adanya pengurangan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* akan meningkat dan selisih torsi kedua sudu juga akan meningkat. Peningkatan selisih torsi kedua sudu ini menyebabkan daya *output* turbin angin Savonius akan meningkat dan CoP akan meningkat.

4.3.3 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius

Analisa ketiga yang digunakan untuk membandingkan performa turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu terhadap turbin tanpa silinder pengganggu adalah *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) sebagai fungsi sudut sudu turbin terhadap arah kedatangan angin. Analisa ini digunakan untuk mengetahui kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius yang dilakukan untuk setiap variasi kecepatan angin yang digunakan.

4.3.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius pada Kecepatan 3,8 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut $0-180^\circ$ dengan beda tiap 10° . Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) dalam fungsi sudut pada kecepatan 3,8 m/s.



Gambar 4.22 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 3,8m/s

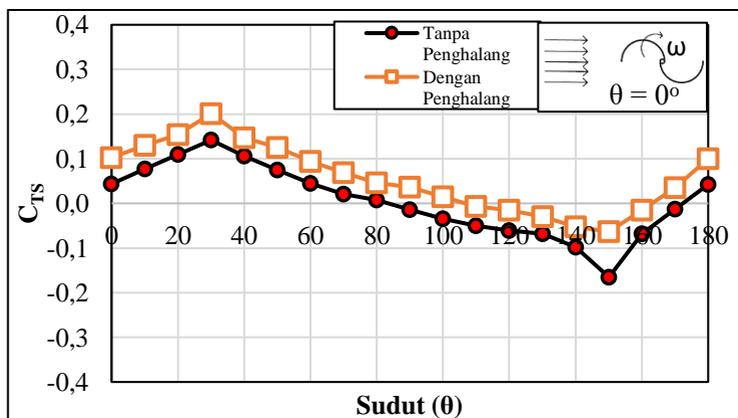
Pada gambar 4.22, dapat diketahui bahwa *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian nilainya turun sampai pada sudut 150°. Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,1466 dan torsi statis minimal -0,318. Sedangkan untuk turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal 0,223 dan minimal -0,153.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.22, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 3,8 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 70-170°, sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu

menjadi bernilai negatif pada sudut 90-160°. Peningkatan nilai *Coefficient of Static Torque* ini menunjukkan pemberian silinder pengganggu efektif pada kecepatan 3,8m/s.

4.3.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 4,4 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 4,4m/s.



Gambar 4. 23 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 4,4m/s

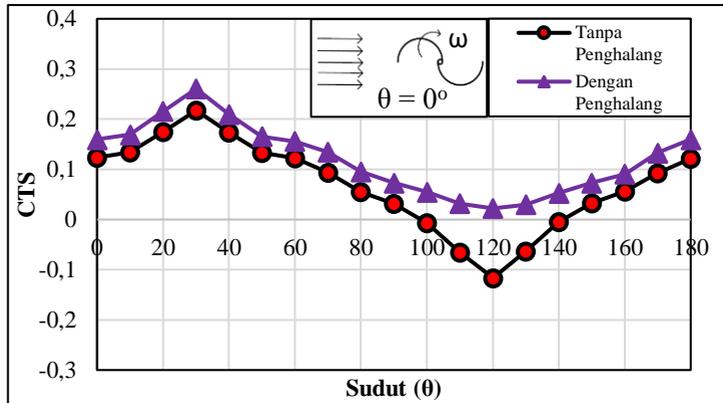
Pada gambar 4.23, dapat diketahui bahwa *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian nilainya turun sampai pada sudut 150°. Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,1416 dan torsi statis minimal -0,165. Sedangkan untuk

turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal 0,201 dan torsi minimal -0,063.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.23, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 4,4 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 90-170°, sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu menjadi bernilai negatif pada sudut 110-160°. Peningkatan nilai *Coefficient of Static Torque* ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu pada kecepatan 4,4 m/s efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius.

4.3.3.3 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 5 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil pengukuran *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 5m/s.



Gambar 4. 24 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 5 m/s

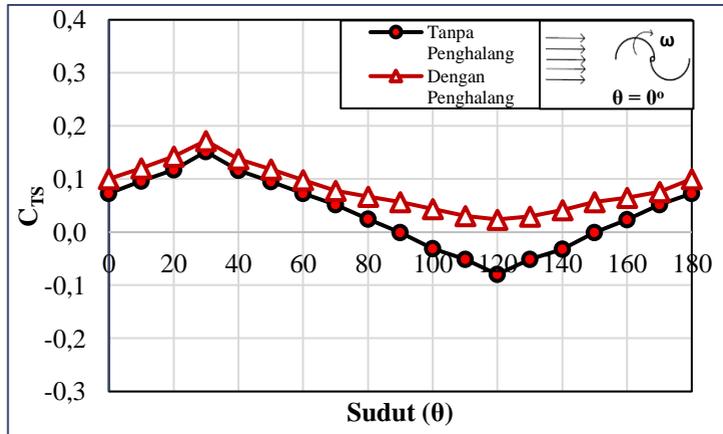
Pada gambar 4.24, dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal 30° dan kemudian nilainya turun sampai pada sudut 120° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,217 dan minimal -0,116. Sedangkan untuk turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai torsi maksimal 0,2607 dan torsi minimal 0,022.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.24, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 5 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut $100-140^\circ$, sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu tidak ada *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder

pengganggu pada turbin angin Savonius yang dioperasikan di kecepatan 5m/s efektif membuat turbin memiliki kemampuan *self starting* di semua sudut.

4.3.3.4 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 6 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 6m/s.



Gambar 4. 25 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 6 m/s

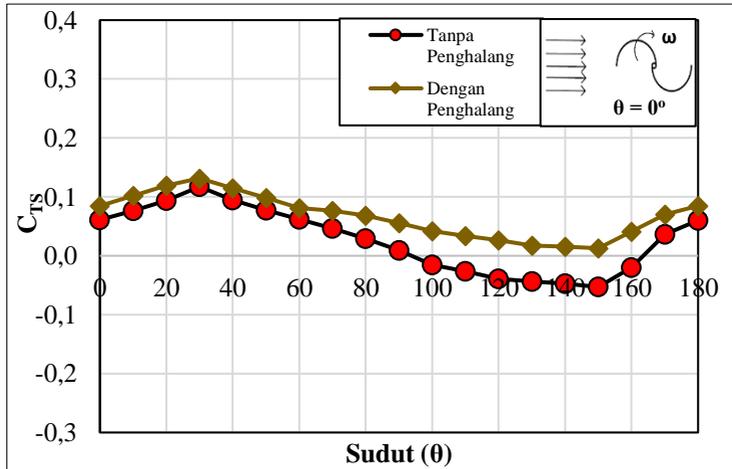
Pada gambar 4.25, dapat diketahui bahwa *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian nilainya turun sampai pada sudut 120°. Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,1517 dan minimal -0,0795. Sedangkan untuk turbin dengan

pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal 0,1723 dan torsi minimal 0,024.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.25, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 6 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 100-140°, sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu tidak ada *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius yang dioperasikan di kecepatan 6m/s efektif membuat turbin memiliki kemampuan *self starting* di semua sudut.

4.3.3.5 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 7 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 7m/s.



Gambar 4. 26 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 7 m/s

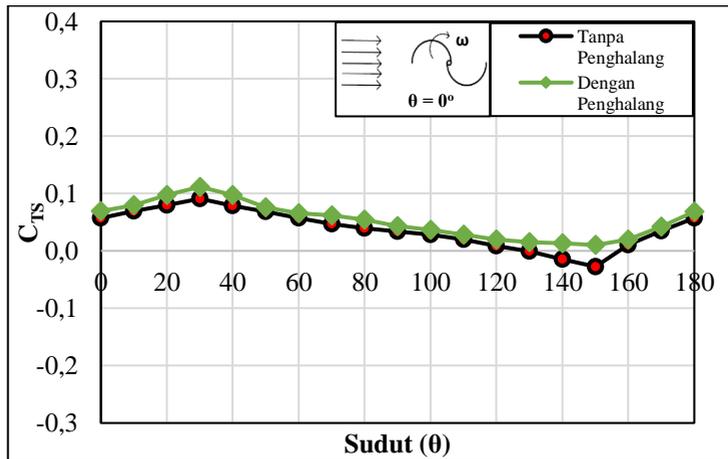
Pada gambar 4.26, dapat diketahui bahwa sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian nilainya turun sampai pada sudut 150° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,1173 dan minimal -0,053. Sedangkan untuk turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal 0,1315 dan minimal 0,0128.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.26, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 7 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 100 - 160° , sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu

tidak ada *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius yang dioperasikan di kecepatan 7m/s efektif membuat turbin memiliki kemampuan *self starting* di semua sudut.

4.3.3.6 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 8 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil perhitungan *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 8m/s.



Gambar 4. 27 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 8 m/s

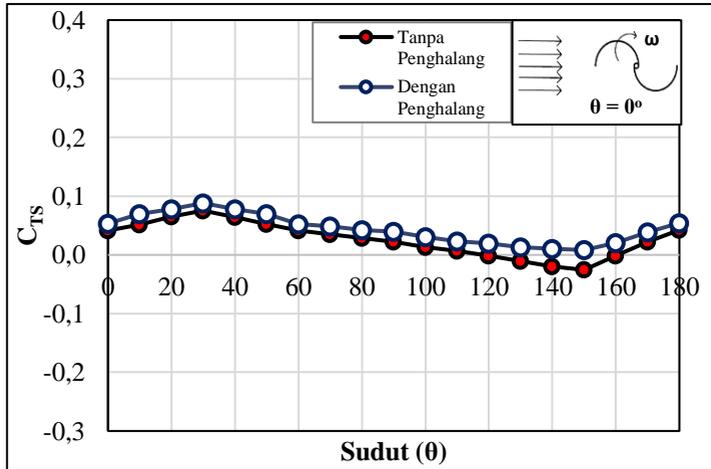
Pada gambar 4.27, dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian turun sampai

pada sudut 150°. Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,0909 dan torsi statis minimal -0,027. Sedangkan untuk turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai torsi maksimal 0,112 dan torsi minimal 0,010.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.27, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 8 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 130-150°, sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu tidak ada *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius yang dioperasikan di kecepatan 8m/s efektif membuat turbin memiliki kemampuan *self starting* di semua sudut.

4.3.3.7 Analisa Nilai *Coefficient of Static Torque* (C_{Ts}) Fungsi Sudut Sudu Turbin Angin Savonius Pada Kecepatan 9 m/s

Pengukuran torsi statis dilakukan menggunakan *torquemeter* pada sudut 0-180° dengan beda tiap 10°. Berikut ini adalah hasil perhitungan nilai *Coefficient of Static Torque* dalam fungsi sudut pada kecepatan 9m/s.



Gambar 4. 28 Grafik *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 9 m/s

Pada gambar 4.28, dapat diketahui bahwa *Coefficient of Static Torque* sebagai fungsi sudut membentuk grafik sinusoidal. Grafik untuk turbin dengan dan tanpa silinder pengganggu sama-sama memiliki nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal pada sudut 30° dan kemudian turun sampai pada sudut 150° . Nilai *Coefficient of Static Torque* maksimal untuk turbin tanpa silinder pengganggu adalah 0,0754 dan torsi statis minimal -0,0255. Sedangkan untuk turbin dengan pemasangan silinder pengganggu mempunyai nilai torsi maksimal 0,0882 dan torsi minimal 0,008.

Berdasarkan data hasil pengukuran yang disajikan dalam grafik pada gambar 4.28, dapat diketahui bahwa *trendline* nilai *Coefficient of Static Torque* fungsi sudut pada kecepatan 9 m/s mengalami kenaikan dengan menggunakan silinder pengganggu bila dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Pada turbin angin tanpa pengganggu, nilai *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif pada sudut 120 - 160° , sedangkan dengan penggunaan silinder pengganggu

tidak ada *Coefficient of Static Torque* bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius yang dioperasikan di kecepatan 9m/s efektif membuat turbin memiliki kemampuan *self starting* di semua sudut.

4.3.4 Analisa CoP_{max}/CoP_{0max} fungsi Reynold Number dengan Penelitian Sarsanto

Sarsanto, 2020 telah melakukan penelitian sebelum dilakukan penelitian ini. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Sarsanto,2020** digunakan turbin yang sama dengan turbin pada penelitian ini. Perbedaan dengan penelitian oleh **Sarsanto,2020** adalah penelitian ini menggunakan variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan 3,8 – 9 m/s pada turbin angin Savonius. Sedangkan pada penelitian **Sarsanto, 2020** menggunakan variasi rasio diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,1 – 1 dengan kecepatan angin 5 dan 7 m/s atau bilangan Reynold 97000 dan 136000. Silinder pengganggu pada penelitian ini dan penelitian Sarsanto diletakkan di depan *returning blade* pada rasio jarak yang sama, yaitu $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$. Adapun hasil penelitian ini dan Sarsanto untuk $d/D=0,5$ pada jarak $S/D = 1,8$ di depan *returning blade* adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 CoP_{max}/CoP_{0max} fungsi *Reynold Number* dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ pada jarak $S/D = 1,8$

Re	CoP_{max}/CoP_{0max}		Selisih relative
	Sarsanto	Lisdarina	
97000	1,4181	1,706	16,9%
136000	1,3411	1,07	23,5%

Berdasarkan tabel 4.1, dapat diketahui bahwa hasil CoP_{max}/CoP_{0max} dari bilangan Reynold 96000 ke 136000 mengalami penurunan nilai. CoP_{max}/CoP_{0max} pada penelitian Sarsanto bernilai 1,42 untuk Re 96000 dan 1,34 untuk Re

136000, sedangkan pada penelitian ini didapatkan nilai 1,7 untuk Re 96000 dan 1,07 untuk Re 136000. Pada Re 96000, penelitian Sarsanto menghasilkan CoP_{max}/CoP_{0max} lebih kecil dari penelitian ini. Sementara untuk Re 136000, penelitian oleh Sarsanto menghasilkan CoP_{max}/CoP_{0max} lebih besar. Selisih relatif dari nilai CoP_{max}/CoP_{0max} penelitian kami bernilai 16,9% untuk Re 97000 dan 23,5% pada Re 136000. Selisih relatif ini dihitung dari selisih nilai CoP_{max}/CoP_{0max} kedua penelitian terhadap nilai CoP_{max}/CoP_{0max} hasil penelitian ini. Nilai selisih relatif untuk Re 136000 lebih besar bila dibandingkan dengan selisih relatif dari Re 96000.

Meskipun menggunakan turbin angin yang sama dengan studi kasus yang sama, kedua penelitian ini menghasilkan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang berbeda. Perbedaan nilai ini dapat dimungkinkan karena umur dari peralatan yang digunakan, serta beberapa perubahan yang dilakukan selama penelitian. Perubahan yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya adalah mengganti jenis benang pada sistem *brake dynamometer*, timbangan pegas, serta posisi pengukuran putaran turbin dengan tachometer.

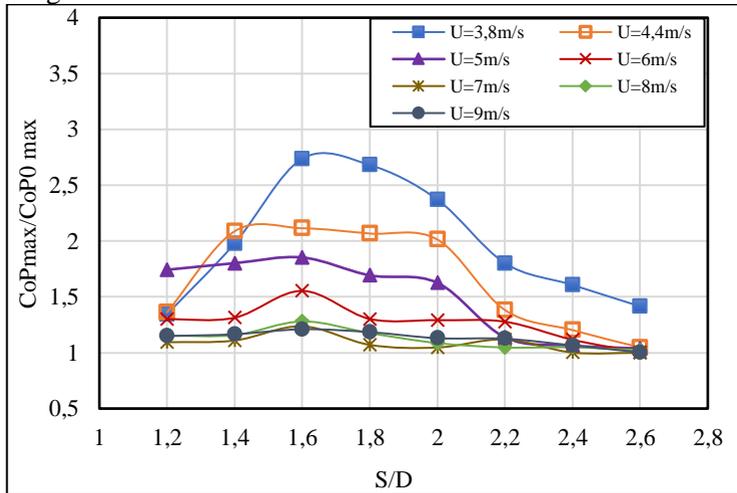
4.3.5 Analisa nilai CoP_{max}/CoP_{0max} fungsi S/D

Salah satu faktor yang mempengaruhi performa turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu di depan *returning blade* adalah jarak peletakan silinder pengganggunya. Untuk dapat mengetahui posisi peletakan S/D yang paling efektif, dilakukan analisa nilai CoP_{max}/CoP_{0max} dengan menggabungkan 7 peneliti lainnya, yaitu pada variasi peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada S/D 1,2 – 2,6. Adapun nama dari 7 peneliti tersebut dan penelitian sekarang ini beserta dengan variasi yang digunakan, ditampilkan pada tabel 4.2 sebagai berikut.

Tabel 4. 2 Tabel Perbandingan Variasi Eksperimen 8
Peneliti Turbin Angin Savonius

No	Nama	Tahun	d/D	S/D	Kecepatan Angin
1	Bagas Ramadhan A.	2020	0,5	1,2	3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; 9 (m/s)
2	Suksmatatya P.	2020		1,4	
3	Festy Merbasari M.	2020		1,6	
4	Elza Lisdarina	2020		1,8	
5	Vega Nabila Arif	2020		2,0	
6	Dionisius Jeremia	2020		2,2	
7	Michael Lawrence B.	2020		2,4	
8	Afiyah Shuhufam M.	2020		2,6	

Berikut ini data hasil gabungan 8 eksperimen tersebut yang disajikan dalam grafik nilai CoP_{max}/CoP_{0max} sebagai fungsi S/D.



Gambar 4. 29 Grafik perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu fungsi jarak (S/D) = 1,2 – 2,6

Gambar 4.29 menunjukkan grafik CoP_{max}/CoP_{0max} fungsi S/D dengan variasi kecepatan 3,8 – 9 m/s. Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa semua nilai $CoP_{max}/CoP_{0max} \geq 1$, artinya bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi didapatkan pada $S/D=1,6$ kecepatan 3,8 m/s, yaitu bernilai 2,737. Nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terendah pada $S/D= 2,6$ kecepatan 7 m/s, yaitu bernilai 1. Pada variasi kecepatan 3,8 -9 m/s, kecuali kecepatan 7 m/s nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terus menurun setelah $S/D=1,6$ hingga $S/D=2,6$. Sementara untuk kecepatan 7m/s, didapatkan sedikit kenaikan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} dari $S/D=2$ ke $S/D=2,2$. *Trendline* nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terhadap nilai S/D paling tinggi didapatkan pada kecepatan 3,8 dan terus turun dengan kenaikan kecepatan. Akan tetapi pada kecepatan 7-9 m/s, *trendline* CoP_{max}/CoP_{0max} berdekatan dan mendekati nilai 1.

Grafik pada gambar 4.29 juga menunjukkan *trendline* yang semakin menurun dengan kenaikan kecepatan angin yang diberikan. Peningkatan nilai performa turbin angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu disebabkan oleh adanya penurunan gaya *drag* di *returning blade*. Penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan di depan *returning blade* akan turun, sedangkan di sisi belakang akan naik. Hal tersebut menjadikan selisih torsi kedua sudu turbin akan naik dan daya turbin juga akan meningkat. Kesimpulan tersebut telah dibuktikan oleh Tsutsui dan Igarashi (2002) dan perbedaan nilai *Coefficient of Pressure* disajikan dalam grafik seperti pada gambar 2.26. Berdasarkan grafik hasil penelitian Tsutsui dan Igarashi tersebut, dapat diketahui bahwa untuk peningkatan variasi nilai bilangan Reynold yang digunakan akan meningkatkan selisih nilai koefisien tekanan pada silinder utama. Pada penelitian ini, nilai bilangan Reynold divariasikan berdasarkan kecepatan angin yang digunakan.

Akan tetapi dengan kenaikan nilai kecepatan angin, akan menyebabkan adanya kenaikan kerugian mekanis yang terjadi pada turbin angin Savonius. Variasi kecepatan yang efektif digunakan pada penelitian ini adalah pada rentang 3,8-6 m/s. Sedangkan pada variasi kecepatan 7-9m/s, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} semakin mendekati 1. Hal ini menunjukkan bahwa pada kecepatan angin yang terlalu tinggi, efek penurunan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* tidak sebanding dengan kerugian mekanis yang terjadi pada turbin angin Savonius.

Selain menurunkan gaya *drag* karena tekanan yang terjadi pada *returning blade*, pemberian silinder pengganggu akan menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu akan terlepas dan mengenai permukaan *returning blade*. Terlepasnya *shear layer* dari silinder pengganggu ini menyebabkan transisi *boundary layer* lebih cepat menjadi turbulen, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan turun dan daya turbin meningkat. Faktor penting yang mempengaruhi pelepasan *shear layer* ini adalah peletakan dari silinder pengganggu. Peletakan silinder pengganggu yang paling efektif diberikan pada penelitian ini adalah pada rentang S/D 1,4 -2, dengan nilai tertinggi pada saat S/D =1,6. Peletakan posisi silinder pengganggu yang terlalu dekat dengan *returning blade* menyebabkan posisi jatuhnya *shear layer* pada permukaan *returning blade* semakin mundur. Apabila posisi terjatuhnya *shear layer* pada permukaan *returning blade* berada pada daerah turbulen, penggunaan silinder pengganggu tidak akan berdampak besar pada performa turbin angin SSavonius. Sedangkan untuk peletakan silinder pengganggu yang terlalu jauh juga tidak akan efektif diberikan, dimana pada penelitian ini didapatkan data pada S/D = 2,2 – 2,6 memiliki nilai CoP_{max}/CoP_{0max} paling kecil dan mendekati nilai 1. Peletakan silinder pengganggu yang terlalu jauh menyebabkan peletakan silinder pengganggu tidak memberikan dampak apapun pada *returning blade*, karena

shear layer yang terlepas dari silinder pengganggu tidak mengenai permukaan *returning blade* yang akan mempercepat transisi *boundary layer*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Eksperimen ini dilakukan pada turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu dengan rasio diameter $d/D = 0,5$ dan jarak peletakan $S/D=1,8$; $y/D = 0,5$. Variasi kecepatan yang dilakukan pada eksperimen ini adalah 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai $C_{M\max}$ pada semua variasi kecepatan. Peningkatan nilai $C_{M\max}$ tertinggi didapatkan pada kecepatan 3,8 m/s, yaitu dengan kenaikan 89,05%. Sedangkan untuk peningkatan $C_{M\max}$ terendah didapatkan pada kecepatan 9 m/s, yaitu dengan kenaikan 6%.
2. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai CoP_{\max} pada semua variasi kecepatan. Kenaikan CoP_{\max} paling tinggi pada kecepatan 3,8 m/s, yaitu dengan kenaikan 168,1%. Sedangkan kenaikan CoP_{\max} terendah pada kecepatan 7 m/s, yaitu dengan kenaikan 7%.
3. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* terbukti mampu menaikkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan peningkatan nilai *Coefficient of Static Torque* pada semua variasi kecepatan. Pada kecepatan 5-9 m/s, penggunaan silinder pengganggu menjadikan *Coefficient of Static Torque* bernilai positif di semua sudut, sehingga memiliki kemampuan *self starting* di semua posisi sudu.
4. Turbin angin Savonius yang digunakan ini memiliki karakteristik menghasilkan performa paling tinggi pada

kecepatan 5 m/s untuk pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* jarak $S/D = 1,8$ dan $y/D = 0,5$.

5. Perbandingan hasil eksperimen yang dilakukan oleh 8 mahasiswa, didapatkan kesimpulan bahwa peningkatan performa efektif dilakukan pada turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu di depan *returning blade* jarak peletakan $S/D=1,4-2$ dengan kecepatan angin 3,8 – 6 m/s

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian berikutnya untuk mendapatkan hasil yang lebih baik adalah sebagai berikut.

1. Menggunakan *bearing* dengan kualitas yang lebih baik dan *life time* yang lebih lama.
2. Menggunakan turbin angin Savonius dengan warna yang kontras dengan warna selotip tachometer agar memudahkan pembacaan pengukuran.
3. Menggunakan timbangan pegas dengan kapasitas yang lebih tinggi untuk kecepatan angin lebih dari 7 m/s.
4. Memberikan waktu istirahat ± 30 menit untuk peralatan eksperimen maksimal setiap 2 jam pengambilan data.
5. Memastikan poros turbin angin Savonius benar-benar terkunci pada saat pengukuran torsi statis menggunakan torquemeter.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B.D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A. 2008. “*An Experimental Study On Improvement of a Savonius Rotor Performance With Curtaining*”. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008) 1673–1678.
- Akwa, João Vincente., Horácio Antonio Vielmo, Adriane Prisco Petry. 2012. “*A Review on the Performance of Savonius Wind Turbine*”. *Renewable and Suitable Energy Reviews* 16 (2012) 3054-3064
- Arinaldo, Deon., Julius Christian Adiatma. 2019. “**Dinamika Batu Bara Indonesia : Menuju Transisi Energi yang Adil**”. Indonesia : Institute for Essential Reform.
- Arinaldo, Deon., Julius Christian Adiatma. Pamela Simamora. 2018. “**Indonesia Clean Outlook Reviewing 2018, Outlooking 2019**”. Indonesia : Institute for Essential Reform.
- Bagas, Gigih. 2019. “**Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di depan Returning Blade. Studi Kasus $d/D=0,5$; $y/D=0,5$; $S/D = 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8$; dengan Bilangan Reynolds= 96000, 134000, dan 173000**”. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Daryanto, Y. 2007. “**Kajian Potensi Angin untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu**”. Indonesia : Balai PPTAGG- UPT-LAGG
<https://peraturan.bpk.go.id/Home/Details/5523/pp-no-79-tahun-2014>
<https://www.republika.co.id/berita/trendtek/sains-trendtek/16/11/03/og1m8m359-berapa-banyak-turbin-angin-yang-diperlukan-untuk-hasilkan-listrik>
- Jurnal Energi Media Komunikasi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2016. “**Program Srategis EBTKE dan Ketenagalistrikan**”. Indonesia
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. 2018. “**RUPTL PLN 2017-2027**”. Indonesia

- Mudjahidin, Fikri Amrul Alimin. 2019. **“Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di depan Returning Blade.** Studi Kasus $d/D=0,5$; $y/D=0,5$; $S/D = 2,0$; $2,2$; $2,4$; $2,6$; $2,6$; $2,8$; dengan Bilangan Reynolds= 96000, 134000, dan 173000”. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- M.H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, D. Thévenin. *Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade*. Renewable Energy 35(2010) 2618-2626
- N.H. Mahmoud, EL-Haroun, A.A, Wahba, E, dan Nasef, M.H. 2010. *An experimental study on improvement of Savonius rotor performance*. Alexandria Engineering Journal (2012) 51, 19-25
- Pamungkas, Retno Dewi. 2016. **“Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu di depan Returning Blade Turbin Angin Savonius Terhadap Performa Turbin.** Studi Kasus untuk Ratio Diameter Silinder Pengganggu terhadap Diameter Turbin ($d/D=0,75$ ”). Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pakpahan, Sahat. 2003. **“Pemetaan Energi Angin untuk Pemanfaatan dan Melengkapi Peta Potensi SDA Indonesia”**. Indonesia : Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.
- Pradhito, Arnoldus Adro. 2017. **“Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu di depan Returning Blade Turbin Angin Savonius terhadap Performa Turbin.** Studi Kasus $d/D=0,5$; Jarak $S/D = 1,5 - 2,4$; dengan Bilangan Reynolds = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$ ”. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Pritchard, Philip J. and John C. Lylegian, 2011. **“Introduction to Fluid Mechanics”**. USA: John Willey & Sons Inc.
- Rustam, Jasmi Aprilia. 2018. **“Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius.** Studi Kasus $d/D=0,5$; Jarak $S/D = 2,0$; Bilangan Reynolds = $9,0 \times 10^4$; $13,8 \times 10^4$; dan $16,8 \times 10^4$; y/D

- =0,0; 0,25; 0,5”. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sakti, Gunawan. Triyogi Yuwono. Wawan Aries Widodo. 2019. **“Experimental and Numerical Investigation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance”**. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sarsanto, Markus 2020. **“Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu di depan Returning Blade**. Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu $S/D=1,8$; $y/D=0,5$; $d/D=0,1$; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0; pada Bilangan Reynolds= $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ”. Indonesia : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sekretariat Perusahaan PT PLN. 2019. **“Statistik PLN 2018”**. Indonesia: Sekretariat Perusahaan PT PLN.
- Tsutsui, T., T. Igarashi. 2002. **“Drag reduction of a Circular Cylinder in an Air-stream”**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) 527–541

LAMPIRAN

A. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Tabel A. 1 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 74000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	0,3	0,1	0,3	0,4	0,2	0,0026	0,02165379
10	0,8	1	0,9	0,8	1,1	0,0092	0,07662111
20	1,1	1,3	1,3	1,2	1,4	0,0126	0,10493761
30	1,7	1,6	1,8	1,8	1,9	0,0176	0,14657952
40	1,3	1,2	1,1	1,4	1,1	0,0122	0,10160626
50	1,1	0,7	0,8	1	1,1	0,0094	0,07828679
60	0,3	0,4	0,1	0,4	0,1	0,0026	0,02165379
70	-0,5	-0,6	-0,5	-0,4	-0,7	-0,0054	-0,04497326
80	-1	-0,9	-1,1	-1,3	-1,4	-0,0114	-0,09494355
90	-1,5	-1,7	-1,6	-1,8	-1,7	-0,0166	-0,13825114
100	-1,9	-1,9	-1,8	-2	-1,8	-0,0188	-0,15657358
110	-2,3	-2,4	-2,5	-2,5	-2,4	-0,0242	-0,20154684
120	-2,9	-2,8	-2,8	-2,7	-2,5	-0,0274	-0,22819766
130	-2,9	-3,1	-3	-3,1	-3,2	-0,0306	-0,25484848
140	-3,5	-3,6	-3,4	-3,5	-3,2	-0,0344	-0,28649634
150	-3,9	-3,7	-3,8	-3,7	-4	-0,0382	-0,31814419
160	-2,5	-2,2	-2,3	-2,6	-2,1	-0,0234	-0,19488414
170	-0,8	-0,6	-0,7	-0,9	-0,5	-0,007	-0,05829867
180	0,4	-0,1	0,3	0,2	0,3	0,0022	0,01832244

Tabel A. 2 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 85500							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	0,5	0,7	0,6	0,8	0,9	0,007	0,0434831
5	1,2	1,4	1,5	1,1	1	0,0124	0,07702721
20	1,8	1,6	1,7	1,8	1,9	0,0176	0,10932894
30	2,2	2	2,5	2,4	2,3	0,0228	0,14163067
40	1,5	1,8	1,9	1,5	1,8	0,017	0,10560182
50	1,2	1,4	1	1,3	1,1	0,012	0,07454246
60	0,5	1	0,7	0,8	0,6	0,0072	0,04472548
70	0,4	0,6	0,2	0,1	0,4	0,0034	0,02112036
80	0,1	-0,2	0,2	0,1	0,4	0,0012	0,00745425
90	-0,2	-0,4	0,1	-0,4	-0,2	-0,0022	-0,01366612
100	-0,4	-0,7	-0,6	-0,5	-0,6	-0,0056	-0,03478648
110	-0,9	-0,7	-0,9	-0,8	-0,7	-0,008	-0,04969497
120	-0,9	-0,8	-1	-1	-1,2	-0,0098	-0,06087634
130	-1	-0,9	-1,2	-1,3	-1,1	-0,011	-0,06833059
140	-1,5	-1,7	-1,9	-1,5	-1,3	-0,0158	-0,09814757
150	-2,4	-2,6	-2,8	-2,9	-2,6	-0,0266	-0,16523578
160	-1,1	-1,3	-1	-1,2	-0,9	-0,011	-0,06833059
170	-0,5	-0,3	0,1	0,1	-0,4	-0,002	-0,01242374
180	0,6	0,5	0,9	0,6	0,8	0,0068	0,04224073

Tabel A. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 97000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	2,5	2,6	2,4	2,6	2,7	0,0256	0,12314812
10	2,7	3	2,7	2,8	2,7	0,0278	0,13373116
20	3,7	3,8	3,2	3,9	3,6	0,0364	0,17510123
30	4,3	4,9	4	4,8	4,6	0,0452	0,2174334
40	3,8	3,3	3,5	3,6	3,9	0,0362	0,17413914
50	2,9	2,8	2,7	2,6	2,8	0,0276	0,13276906
60	2,6	2,5	2,4	2,5	2,7	0,0254	0,12218602
70	1,8	2,3	1,7	1,8	2,1	0,0194	0,09332318
80	1,1	0,9	1,2	1,3	1,2	0,0114	0,0548394
90	0,6	0,5	0,7	0,7	0,8	0,0066	0,03174912
100	0,4	0,1	0	-0,4	-0,8	-0,0014	-0,00673466
110	-1,5	-1,2	-1,7	-1,3	-1,1	-0,0136	-0,06542244
120	-2,4	-2,5	-2,3	-2,4	-2,5	-0,0242	-0,11641346
130	-1,5	-1,4	-1,6	-1,1	-1	-0,0132	-0,06349825
140	-0,5	-0,7	1	0,1	-0,4	-0,001	-0,00481047
150	0,4	0,9	0,7	0,6	0,8	0,0068	0,03271122
160	1,1	1,4	1,2	0,9	1,2	0,0116	0,05580149
170	2,2	2,1	1,8	1,6	1,9	0,0192	0,09236109
180	2,5	2,8	2,6	2,3	2,4	0,0252	0,12122393

Tabel A. 4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 117000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	1,8	2,4	2,1	2,2	2,4	0,0218	0,07282522
10	3	2,7	2,9	3,1	2,7	0,0288	0,09620947
20	3,7	3,6	3,6	3,5	3,2	0,0352	0,11758935
30	4,4	4,8	4,2	4,6	4,7	0,0454	0,15166354
40	3,2	3,4	3,7	3,6	3,5	0,0348	0,11625311
50	2,7	2,6	3	2,8	3,1	0,0284	0,09487322
60	2,3	1,9	2,2	2,4	2,1	0,0218	0,07282522
70	1,5	1,3	1,9	1,6	1,5	0,0156	0,05211346
80	1,1	0,8	0,3	1,1	0,4	0,0074	0,02472049
90	-0,7	-0,6	0	0,7	0,5	-0,0002	-0,00066812
100	-1,1	-0,9	-0,8	-1	-0,8	-0,0092	-0,03073358
110	-1,1	-1,4	-1,6	-1,9	-1,7	-0,0154	-0,05144534
120	-2,7	-2,6	-2,3	-2,1	-2,2	-0,0238	-0,07950643
130	-1,2	-1,5	-1,8	-1,7	-1,4	-0,0152	-0,05077722
140	-0,6	-0,7	-1	-1,3	-1,2	-0,0096	-0,03206982
150	-0,4	0,5	-0,5	0,3	0	-0,0002	-0,00066812
160	0,7	0,3	0,6	0,8	1,2	0,0072	0,02405237
170	1,6	1,4	1,8	1,3	1,7	0,0156	0,05211346
180	2,5	2	2,4	2,1	1,9	0,0218	0,07282522

Tabel A. 5 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 136000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	2,7	2,4	2,6	2,3	2,5	0,025	0,06135808
10	2,9	2,8	3,3	3,2	3,4	0,0312	0,07657488
20	3,9	3,7	3,8	3,6	4,1	0,0382	0,09375514
30	4,6	4,9	5,1	4,7	4,6	0,0478	0,11731665
40	3,8	3,6	3,7	4,2	3,9	0,0384	0,09424601
50	3,1	3,2	3	3,3	3,2	0,0316	0,07755661
60	2,9	2,3	2,4	2,6	2,4	0,0252	0,06184894
70	1,5	1,9	1,8	2,2	2	0,0188	0,04614128
80	1,2	1,1	1,3	1	1,3	0,0118	0,02896101
90	0,7	0,3	0,5	0,4	0	0,0038	0,00932643
100	-0,4	-0,9	-0,8	-0,6	-0,5	-0,0064	-0,01570767
110	-0,8	-1,1	-0,9	-1,2	-1,4	-0,0108	-0,02650669
120	-1,5	-1,7	-1,5	-1,6	-1,6	-0,0158	-0,03877831
130	-1,9	-1,8	-1,7	-1,7	-1,8	-0,0178	-0,04368695
140	-2	-1,9	-1,8	-2,1	-1,8	-0,0192	-0,047123
150	-2,4	-2,3	-2	-2	-2,1	-0,0216	-0,05301338
160	-0,9	-0,8	-0,7	-0,8	-0,9	-0,0082	-0,02012545
170	1,4	1,3	1,5	1,6	1,7	0,015	0,03681485
180	2,2	2,3	2,5	2,5	2,7	0,0244	0,05988548

Tabel A. 6 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 155600							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	3,1	3,3	2,9	2,7	3,2	0,0304	0,05712437
10	3,9	3,7	3,6	3,7	3,5	0,0368	0,06915055
20	4,5	4,1	4,3	4,2	4	0,0422	0,07929765
30	4,8	4,7	5,1	4,9	4,7	0,0484	0,09094801
40	3,9	3,8	4,5	4,3	4,4	0,0418	0,07854601
50	3,7	3,5	3,7	3,8	3,6	0,0366	0,06877474
60	3,2	2,6	2,8	3,7	3	0,0306	0,05750019
70	2,4	2,6	2,3	2,5	2,8	0,0252	0,0473531
80	2,2	2,1	1,9	2,1	2,3	0,0212	0,03983673
90	1,9	1,7	1,8	1,6	1,9	0,0178	0,03344782
100	1,5	1,2	1,8	1,6	1,3	0,0148	0,02781055
110	1,1	1,2	1	0,8	1,1	0,0104	0,01954255
120	0,3	0,8	0,4	0,2	0,6	0,0046	0,00864382
130	-0,5	0,7	-0,4	-0,3	0,2	-0,0006	-0,00112745
140	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	-0,8	-0,0078	-0,01465691
150	-1,8	-1,3	-1,4	-1,7	-1,1	-0,0146	-0,02743473
160	0,7	0,7	0,5	0,4	0,6	0,0058	0,01089873
170	1,7	1,8	2,1	1,6	2	0,0184	0,03457528
180	3,1	2,9	2,8	3,1	3,2	0,0302	0,05674855

Tabel A. 7 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s

TANPA PENGHALANG							
Re = 175000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts0
0	2,9	2,8	2,7	2,6	3,1	0,0282	0,04186893
10	3,8	3,4	3,5	3,7	3	0,0348	0,05166805
20	4,2	4,4	4,5	4,3	4,6	0,044	0,06532742
30	5,1	5,3	4,7	5,4	4,9	0,0508	0,07542347
40	4,3	4,5	4,3	4,9	3,8	0,0436	0,06473353
50	3,6	3,2	3,4	3,8	3,6	0,0352	0,05226193
60	3,1	3	2,6	2,8	2,5	0,028	0,04157199
70	2,4	2,3	2,2	2,3	2,5	0,0234	0,03474231
80	1,8	2,1	2,3	2	1,6	0,0196	0,02910039
90	1,8	1,6	1,3	1,4	1,5	0,0152	0,02256765
100	0,5	0,8	0,6	1,1	1,3	0,0086	0,01276854
110	0,2	0,3	0,4	0,8	0,5	0,0044	0,00653274
120	-0,1	-0,4	0,2	-0,3	0,1	-0,001	-0,00148471
130	-0,9	-0,5	-0,7	-1	-0,4	-0,007	-0,010393
140	-1,4	-1,2	-1,5	-1,3	-1,1	-0,013	-0,01930128
150	-1,8	-1,6	-1,7	-1,8	-1,7	-0,0172	-0,02553708
160	-0,1	-0,2	-0,4	0,1	0,2	-0,0008	-0,00118777
170	1,7	1,8	1,4	1,2	1,5	0,0152	0,02256765
180	2,6	2,8	3,2	3	2,7	0,0286	0,04246282

B. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Tabel B. 1 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D=0,5$ pada $U=3,8$ m/s

S/D 1.8							
Re = 74000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	1,2	1,1	1,1	1,3	1,4	0,0122	0,10160626
10	1,5	1,4	1,7	1,5	1,3	0,0148	0,12326005
20	2,2	2,3	2,1	1,9	2	0,021	0,17489602
30	2,3	2,5	2,7	2,9	3	0,0268	0,22320063
40	1,8	1,9	2,4	2,1	1,9	0,0202	0,16823331
50	1,2	1,3	1,4	1,3	1,5	0,0134	0,11160032
60	1	1,3	1,2	1	1,1	0,0112	0,09327788
70	0,6	0,4	0,7	0,4	0,6	0,0054	0,04497326
80	0,4	0,5	0,3	0,4	0,6	0,0044	0,03664488
90	0,2	-0,2	-0,1	0,1	-0,2	-0,0004	-0,00333135
100	-0,3	-0,5	-0,1	-0,3	-0,4	-0,0032	-0,02665082
110	-0,7	-1	-0,8	-1,1	-0,9	-0,009	-0,07495544
120	-1,4	-1,1	-1,2	-1	-0,9	-0,0112	-0,09327788
130	-1,2	-1,4	-1,3	-1,4	-1,5	-0,0136	-0,11326599
140	-1,5	-1,6	-1,4	-1,3	-1,6	-0,0148	-0,12326005
150	-1,7	-1,8	-1,9	-1,8	-2	-0,0184	-0,15324223
160	-0,8	-0,9	-0,7	-1	-0,8	-0,0084	-0,06995841
170	0,4	0,7	0,7	0,5	0,6	0,0058	0,04830461
180	1,3	1,1	1,2	1,3	1,2	0,0122	0,10160626

Tabel B. 2 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada $U=4,4$ m/s

S/D 1.8							
Re = 85500							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	1,6	1,7	1,8	1,6	1,5	0,0164	0,10187469
10	2,1	2,3	1,9	2	2,2	0,021	0,1304493
20	2,4	2,3	2,5	2,6	2,6	0,0248	0,15405442
30	3,4	3,2	3,3	3,1	3,2	0,0324	0,20126464
40	2,2	2,4	2,4	2,5	2,3	0,0236	0,14660017
50	1,8	2	2,2	2,2	1,9	0,0202	0,12547981
60	1,4	1,5	1,6	1,6	1,5	0,0152	0,09442045
70	1,1	0,9	1,3	1,2	1	0,011	0,06833059
80	0,8	0,6	0,9	0,7	0,7	0,0074	0,04596785
90	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,0058	0,03602886
100	0,3	0,2	0,4	0,1	0,2	0,0024	0,01490849
110	-0,3	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	-0,0012	-0,00745425
120	-0,3	0,1	-0,4	-0,4	-0,2	-0,0024	-0,01490849
130	-0,5	-0,4	-0,3	-0,6	-0,6	-0,0048	-0,02981698
140	-1	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-0,0084	-0,05217972
150	-0,9	-0,9	-1,2	-1	-1,1	-0,0102	-0,06336109
160	-0,2	-0,4	0,1	-0,4	-0,3	-0,0024	-0,01490849
170	0,6	0,8	0,4	0,5	0,5	0,0056	0,03478648
180	1,6	1,7	1,4	1,5	1,8	0,016	0,09938995

Tabel B. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D=0,5$ pada $U=5$ m/s

S/D 1.8							
Re = 97000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	3,2	3,1	3,4	3,3	3,6	0,0332	0,15970772
10	3,5	3,6	3,5	3,6	3,4	0,0352	0,16932866
20	4,2	4,6	4,5	4,7	4,4	0,0448	0,21550921
30	5,5	5,3	5,4	5,7	5,2	0,0542	0,26072766
40	4,4	4,2	4,3	4,4	4,5	0,0436	0,20973664
50	3,5	3,3	3,4	3,4	3,6	0,0344	0,16548028
60	3,2	3,3	3,4	3,1	3,2	0,0324	0,15585934
70	2,9	3	2,6	2,8	2,7	0,028	0,13469325
80	2,1	1,8	1,9	2,2	1,9	0,0198	0,09524737
90	1,5	1,6	1,4	1,5	1,6	0,0152	0,0731192
100	1,2	1,1	1	1,1	1,3	0,0114	0,0548394
110	0,6	0,8	0,5	0,8	0,6	0,0066	0,03174912
120	0,4	0,5	0,6	0,3	0,5	0,0046	0,02212818
130	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,0062	0,02982493
140	1,2	1	1,1	1	1,2	0,011	0,05291521
150	1,3	1,6	1,8	1,4	1,5	0,0152	0,0731192
160	1,8	1,9	2	1,8	1,9	0,0188	0,0904369
170	2,9	2,8	2,8	2,6	2,7	0,0276	0,13276906
180	3,4	3,3	3,4	3,2	3,3	0,0332	0,15970772

Tabel B. 4 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D=0,5$ pada $U=6$ m/s

S/D 1.8							
Re = 117000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	3	2,9	3,1	3,2	2,8	0,03	0,1002182
10	3,5	3,7	3,8	3,6	3,4	0,036	0,12026183
20	4,2	4,1	4,3	4,5	4,2	0,0426	0,14230984
30	5,1	5,2	5,4	5	5,1	0,0516	0,1723753
40	4,1	4	4,2	4,2	4,1	0,0412	0,13763299
50	3,4	3,5	3,5	3,6	3,7	0,0354	0,11825747
60	2,8	2,9	3,1	2,9	3	0,0294	0,09821383
70	2,4	2,4	2,3	2,5	2,1	0,0234	0,07817019
80	2,2	2	1,8	2,1	1,9	0,02	0,06681213
90	1,8	1,6	1,5	1,7	1,9	0,017	0,05679031
100	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1	0,013	0,04342788
110	0,8	1	0,8	0,9	1,1	0,0092	0,03073358
120	0,6	1	0,5	0,8	0,7	0,0072	0,02405237
130	1	0,7	1	0,8	0,9	0,0088	0,02939734
140	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2	0,0124	0,04142352
150	1,6	1,5	1,9	1,7	1,8	0,017	0,05679031
160	2,1	2	1,8	1,9	2	0,0196	0,06547589
170	2,1	2,5	2,2	2,4	2,2	0,0228	0,07616583
180	2,8	3,1	3	2,9	3,2	0,03	0,1002182

Tabel B. 5 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada $U=7m/s$

S/D 1.8							
Re = 136000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	3,5	3,7	3,5	3,2	3,4	0,0346	0,08491958
10	4,2	4,3	4	4,1	4,2	0,0416	0,10209984
20	4,9	4,7	5,1	5	4,6	0,0486	0,1192801
30	5,4	5,5	5,6	5,1	5,2	0,0536	0,13155172
40	4,8	4,7	4,6	4,7	4,6	0,0468	0,11486232
50	4,2	3,9	4,2	3,8	4	0,0402	0,09866379
60	3,3	3,1	3,4	3,5	3,2	0,033	0,08099266
70	2,9	3,3	3	3,1	3,2	0,031	0,07608402
80	2,8	3	2,6	2,9	2,7	0,028	0,06872105
90	2,5	2,3	2,2	2,1	2,2	0,0226	0,0554677
100	2	1,6	1,8	1,8	1,3	0,017	0,04172349
110	1,6	1,2	1,5	1,2	1,3	0,0136	0,03337879
120	1,2	1	0,9	0,8	1,4	0,0106	0,02601583
130	0,6	1	0,7	0,5	0,8	0,0072	0,01767113
140	0,7	0,5	0,5	0,8	0,6	0,0062	0,0152168
150	0,8	0,5	0,4	0,5	0,4	0,0052	0,01276248
160	1,6	1,9	1,5	1,6	1,8	0,0168	0,04123263
170	2,9	3,1	3	2,5	2,8	0,0286	0,07019364
180	3,7	3,4	3,3	3,4	3,5	0,0346	0,08491958

Tabel B. 6 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada $U= 8m/s$

S/D 1.8							
Re = 155600							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	3,9	3,5	3,7	3,6	3,7	0,0368	0,06915055
10	4,2	4,1	4,3	4,3	4,2	0,0422	0,07929765
20	5	5,5	5	5,2	5,3	0,052	0,09771274
30	5,8	6	6,1	6	5,8	0,0594	0,11161801
40	5,3	5	5,2	5,1	5,4	0,052	0,09771274
50	4,3	4,1	3,9	4	4	0,0406	0,0762911
60	3,4	3,3	3,7	3,5	3,6	0,035	0,06576819
70	3,5	3,2	3,3	3,5	3	0,033	0,06201001
80	2,8	3,1	3	2,7	3	0,0292	0,05486946
90	2,5	2,1	2,3	2,2	2,5	0,0232	0,04359491
100	2	1,9	2,3	1,7	1,8	0,0194	0,03645437
110	1,3	1,9	1,1	1,7	1,5	0,015	0,02818637
120	1,1	1	0,9	1,2	1,2	0,0108	0,02029418
130	0,7	1,1	0,6	0,9	0,7	0,008	0,01503273
140	0,8	0,7	0,6	1	0,5	0,0072	0,01352946
150	0,5	0,3	0,6	0,8	0,5	0,0054	0,01014709
160	1,2	0,9	1,2	1,1	0,8	0,0104	0,01954255
170	2,4	2,5	2,1	2	2,2	0,0224	0,04209164
180	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	0,0362	0,0680231

Tabel B. 7 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; $y/D =0,5$ pada $U=9$ m/s

S/D 1.8							
Re = 175000							
Sudut	1	2	3	4	5	Averagex10 ⁻² (Nm)	Cts
0	3,4	3,7	3,5	3,6	3,8	0,036	0,0534497
10	4,8	5,1	4,6	4,4	4,7	0,0472	0,0700785
20	5,2	5,1	5,4	5,3	5,2	0,0524	0,07779901
30	5,2	5,9	6,5	6	6,1	0,0594	0,08819201
40	5,1	5,2	5,4	5,4	5,2	0,0526	0,07809596
50	4,8	4,5	5	4,5	4,7	0,047	0,06978156
60	3,3	3,7	3,4	3,5	3,6	0,035	0,05196499
70	3,4	3,1	3,2	3,3	3,5	0,033	0,04899556
80	3	2,6	2,8	2,7	3,1	0,0284	0,04216588
90	2,5	2,7	2,6	2,9	2,7	0,0268	0,03979034
100	2,2	2	1,9	2,3	1,8	0,0204	0,03028817
110	1,7	1,5	1,4	1,7	1,5	0,0156	0,02316154
120	1,4	1,5	1,1	1,5	1,2	0,0134	0,01989517
130	1,1	1	0,7	0,7	1	0,009	0,01336243
140	0,5	0,8	0,7	0,6	0,8	0,0068	0,01009606
150	0,5	0,7	0,6	0,4	0,6	0,0056	0,0083144
160	1,1	1,3	1,5	1,6	1,3	0,0136	0,02019211
170	2,4	2,5	2,7	2,8	2,5	0,0258	0,03830562
180	3,7	3,4	3,8	3,5	3,9	0,0366	0,05434053

C. Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Tabel C. 1 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 3,8 m/s

Re = 74000													
Voltage	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			Rata2			Rata2							
140	28,5	3,8	189,20286	19,803	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,805	0,0000	0,0000	0,0000
140	28,5	3,8	173,38668	18,148	24	50	0,01269	0,092	1,17	0,738	0,0032	0,0199	0,0270
140	28,5	3,8	157,67124	16,503	30,2	70	0,01269	0,092	1,17	0,671	0,0050	0,0277	0,0413
140	28,5	3,8	136,4151	14,278	36,4	90	0,01269	0,092	1,17	0,581	0,0067	0,0323	0,0556
140	28,5	3,8	107,80494	11,284	39,5	100	0,01269	0,092	1,17	0,459	0,0075	0,0288	0,0627
140	28,5	3,8	73,9563	7,741	45,7	120	0,01269	0,092	1,17	0,315	0,0092	0,0242	0,0770
140	28,5	3,8	52,59942	5,505	48,8	130	0,01269	0,092	1,17	0,224	0,0101	0,0188	0,0842
140	28,5	3,8	41,11506	4,303	51,9	140	0,01269	0,092	1,17	0,175	0,0110	0,0160	0,0913
140	28,5	3,8	0	0,000	55	150	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0118	0,0000	0,0985

Tabel C. 2 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 4,4 m/s

Re = 85500													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			Rata2			Rata2							
155	28,5	4,4	226,17444	23,673	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,831	0,0000	0,0000	0,0000
155	28,5	4,4	204,31386	21,385	19	70	0,01269	0,092	1,17	0,751	0,0063	0,0296	0,0394
155	28,5	4,4	193,63542	20,267	25,2	90	0,01269	0,092	1,17	0,712	0,0081	0,0357	0,0501
155	28,5	4,4	179,33034	18,770	31,4	110	0,01269	0,092	1,17	0,659	0,0098	0,0401	0,0608
155	28,5	4,4	162,90972	17,051	43,8	140	0,01269	0,092	1,17	0,599	0,0120	0,0445	0,0744
155	28,5	4,4	147,4965	15,438	56,2	160	0,01269	0,092	1,17	0,542	0,0129	0,0435	0,0803
155	28,5	4,4	134,70252	14,099	68,6	180	0,01269	0,092	1,17	0,495	0,0139	0,0426	0,0861
155	28,5	4,4	118,38264	12,391	81	200	0,01269	0,092	1,17	0,435	0,0148	0,0400	0,0920
155	28,5	4,4	101,55906	10,630	93,4	220	0,01269	0,092	1,17	0,373	0,0158	0,0365	0,0979
155	28,5	4,4	85,44066	8,943	105,8	240	0,01269	0,092	1,17	0,314	0,0167	0,0326	0,1038
155	28,5	4,4	78,18738	8,184	118,2	260	0,01269	0,092	1,17	0,287	0,0177	0,0315	0,1097
155	28,5	4,4	65,3934	6,845	130,6	280	0,01269	0,092	1,17	0,240	0,0186	0,0278	0,1155
155	28,5	4,4	57,13272	5,980	143	300	0,01269	0,092	1,17	0,210	0,0195	0,0255	0,1214
155	28,5	4,4	48,16686	5,041	155,4	320	0,01269	0,092	1,17	0,177	0,0205	0,0225	0,1273
155	28,5	4,4	33,45882	3,502	180,2	350	0,01269	0,092	1,17	0,123	0,0211	0,0161	0,1313
155	28,5	4,4	0	0,000	192,6	360	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0208	0,0000	0,12945

Tabel C. 3 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s

Re = 97000													
Voltage	T (°C)	V (m/s)	n(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s(gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			Rata2			Rata2							
160	28,5	5	252	26,376	0	0	0,0127	0,092	1,17	0,815	0,0000	0,0000	0,0000
160	28,5	5	241,4	25,267	19	80	0,0127	0,092	1,17	0,781	0,0076	0,0285	0,0365
160	28,5	5	222,4	23,278	31,4	130	0,0127	0,092	1,17	0,719	0,0123	0,0425	0,0590
160	28,5	5	211,2	22,106	43,8	170	0,0127	0,092	1,17	0,683	0,0157	0,0516	0,0756
160	28,5	5	207,4	21,708	50	190	0,0127	0,092	1,17	0,671	0,0174	0,0562	0,0838
160	28,5	5	199,4	20,871	56,2	210	0,0127	0,092	1,17	0,645	0,0191	0,0594	0,0921
160	28,5	5	194,4	20,347	62,4	230	0,0127	0,092	1,17	0,629	0,0209	0,0631	0,1004
160	28,5	5	188	19,677	68,6	250	0,0127	0,092	1,17	0,608	0,0226	0,0661	0,1086
160	28,5	5	172,8	18,086	81	270	0,0127	0,092	1,17	0,559	0,0235	0,0633	0,1132
160	28,5	5	162,4	16,998	93,4	290	0,0127	0,092	1,17	0,525	0,0245	0,0618	0,1177
160	28,5	5	152,8	15,993	105,8	310	0,0127	0,092	1,17	0,494	0,0254	0,0604	0,1223
160	28,5	5	143,8	15,051	118,2	330	0,0127	0,092	1,17	0,465	0,0264	0,0590	0,1268
160	28,5	5	139,6	14,611	130,6	340	0,0127	0,092	1,17	0,451	0,0261	0,0566	0,1254
160	28,5	5	131,8	13,795	143	360	0,0127	0,092	1,17	0,426	0,0270	0,0554	0,1300
160	28,5	5	122	12,769	155,4	370	0,0127	0,092	1,17	0,395	0,0267	0,0507	0,1285
160	28,5	5	102	10,676	167,8	380	0,0127	0,092	1,17	0,330	0,0264	0,0419	0,1271
160	28,5	5	89,6	9,378	180,2	390	0,0127	0,092	1,17	0,290	0,0261	0,0364	0,1256
160	28,5	5	81,8	8,562	192,6	400	0,0127	0,092	1,17	0,265	0,0258	0,0329	0,1242
160	28,5	5	71,2	7,452	205	410	0,0127	0,092	1,17	0,230	0,0255	0,0283	0,1228
160	28,5	5	49,2	5,150	217,4	440	0,0127	0,092	1,17	0,159	0,0277	0,0212	0,1333
160	28,5	5	0	0,000	229,8	460	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0287	0,0000	0,1379

Tabel C. 4 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 6 m/s

Re = 117000														
Voltage	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM	
			Rata2			Rata2								
165	28,5	6	424,4308	44,424	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,144	0,0000	0,0000	0,0000	
165	28,5	6	368,6208	38,582	19	100	0,0127	0,092	1,17	0,993	0,0101	0,0335	0,0337	
165	28,5	6	343,738	35,978	31,4	140	0,0127	0,092	1,17	0,926	0,0135	0,0418	0,0452	
165	28,5	6	330,1381	34,554	43,8	170	0,0127	0,092	1,17	0,890	0,0157	0,0467	0,0525	
165	28,5	6	318,7545	33,363	56,2	200	0,0127	0,092	1,17	0,859	0,0179	0,0514	0,0598	
165	28,5	6	310,5946	32,509	68,6	230	0,0127	0,092	1,17	0,837	0,0201	0,0562	0,0671	
165	28,5	6	300,0169	31,402	93,4	270	0,0127	0,092	1,17	0,809	0,0220	0,0594	0,0734	
165	28,5	6	282,4881	29,567	105,8	310	0,0127	0,092	1,17	0,761	0,0254	0,0647	0,0849	
165	28,5	6	272,2126	28,492	118,2	340	0,0127	0,092	1,17	0,734	0,0276	0,0677	0,0922	
165	28,5	6	248,1358	25,972	124,4	380	0,0127	0,092	1,17	0,669	0,0318	0,0711	0,1063	
165	28,5	6	222,2456	23,262	149,2	440	0,0127	0,092	1,17	0,599	0,0362	0,0724	0,1209	
165	28,5	6	202,3998	21,185	174	470	0,0127	0,092	1,17	0,546	0,0368	0,0671	0,1231	
165	28,5	6	182,6548	19,118	198,8	500	0,0127	0,092	1,17	0,492	0,0375	0,0617	0,1253	
165	28,5	6	122,0093	12,770	223,6	530	0,0127	0,092	1,17	0,329	0,0381	0,0419	0,1274	
165	28,5	6	105,2864	11,020	248,4	560	0,0127	0,092	1,17	0,284	0,0388	0,0368	0,1296	
165	28,5	6	93,80208	9,818	294,9	610	0,0127	0,092	1,17	0,253	0,0392	0,0331	0,1310	
165	28,5	6	84,13104	8,806	325,9	640	0,0127	0,092	1,17	0,227	0,0391	0,0296	0,1306	
165	28,5	6	61,8675	6,475	356,9	680	0,0127	0,092	1,17	0,167	0,0402	0,0224	0,1344	
165	28,5	6	44,94318	4,704	387,9	720	0,0127	0,092	1,17	0,121	0,0413	0,0167	0,1381	
165	28,5	6	0	0,000	418,9	740	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0400	0,0000	0,1335	

Tabel C. 5 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 7 m/s

Re = 136000													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm) Rata2	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr) Rata2	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
170	28,5	7	472,786	49,485	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,092	0,0000	0,0000	0,0000
170	28,5	7	389,7762	40,797	19	180	0,0127	0,092	1,17	0,900	0,0200	0,0443	0,0492
170	28,5	7	376,3778	39,394	31,4	230	0,0127	0,092	1,17	0,869	0,0247	0,0528	0,0607
170	28,5	7	366,9082	38,403	43,8	260	0,0127	0,092	1,17	0,848	0,0269	0,0560	0,0661
170	28,5	7	352,2002	36,864	56,2	300	0,0127	0,092	1,17	0,814	0,0304	0,0606	0,0745
170	28,5	7	337,0892	35,282	68,6	350	0,0127	0,092	1,17	0,779	0,0350	0,0670	0,0860
170	28,5	7	326,713	34,196	81	380	0,0127	0,092	1,17	0,755	0,0372	0,0690	0,0914
170	28,5	7	318,956	33,384	93,4	410	0,0127	0,092	1,17	0,737	0,0394	0,0713	0,0967
170	28,5	7	308,1768	32,256	118,2	460	0,0127	0,092	1,17	0,712	0,0426	0,0743	0,1044
170	28,5	7	299,0095	31,296	143	500	0,0127	0,092	1,17	0,691	0,0444	0,0753	0,1091
170	28,5	7	287,2229	30,063	167,8	550	0,0127	0,092	1,17	0,664	0,0476	0,0775	0,1168
170	28,5	7	273,0185	28,576	192,6	600	0,0127	0,092	1,17	0,631	0,0507	0,0785	0,1245
170	28,5	7	257,8068	26,984	242,2	680	0,0127	0,092	1,17	0,596	0,0545	0,0797	0,1338
170	28,5	7	253,7772	26,562	267	710	0,0127	0,092	1,17	0,586	0,0551	0,0794	0,1354
170	28,5	7	235,9462	24,696	291,8	740	0,0127	0,092	1,17	0,545	0,0558	0,0746	0,1369
170	28,5	7	228,1892	23,884	316,6	770	0,0127	0,092	1,17	0,527	0,0564	0,0730	0,1385
170	28,5	7	211,4664	22,133	341,4	800	0,0127	0,092	1,17	0,489	0,0571	0,0685	0,1401
170	28,5	7	199,0754	20,837	366,2	830	0,0127	0,092	1,17	0,460	0,0577	0,0652	0,1417
170	28,5	7	186,2814	19,497	391	860	0,0127	0,092	1,17	0,430	0,0584	0,0617	0,1433
170	28,5	7	176,0059	18,422	415,8	890	0,0127	0,092	1,17	0,407	0,0590	0,0589	0,1449
170	28,5	7	155,6564	16,292	440,6	920	0,0127	0,092	1,17	0,360	0,0597	0,0527	0,1465
170	28,5	7	148,7054	15,564	465,4	950	0,0127	0,092	1,17	0,344	0,0603	0,0509	0,1481
170	28,5	7	138,3292	14,478	490,2	980	0,0127	0,092	1,17	0,320	0,0610	0,0478	0,1497
170	28,5	7	129,2626	13,529	515	1010	0,0127	0,092	1,17	0,299	0,0616	0,0452	0,1512
170	28,5	7	87,15324	9,122	539,8	1040	0,0127	0,092	1,17	0,201	0,0623	0,0308	0,1528
170	28,5	7	68,31486	7,150	564,6	1070	0,0127	0,092	1,17	0,158	0,0629	0,0244	0,1544
170	28,5	7	61,3638	6,423	589,4	1110	0,0127	0,092	1,17	0,142	0,0648	0,0225	0,1591
170	28,5	7	54,41274	5,695	614,2	1140	0,0127	0,092	1,17	0,126	0,0655	0,0202	0,1607
170	28,5	7	0	0,000	639	1170	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0661	0,0000	0,1622

Tabel C. 6 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 8 m/s

Re = 155600													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm) Rata2	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr) Rata2	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
175	28,5	8	485,18	50,782	0	0	0,013	0,092	1,17	0,981	0,0000	0,0000	0,0000
175	28,5	8	414,56	43,390	19	200	0,013	0,092	1,17	0,838	0,0225	0,0355	0,0423
175	28,5	8	396,43	41,492	43,8	260	0,013	0,092	1,17	0,801	0,0269	0,0405	0,0506
175	28,5	8	376,98	39,457	68,6	330	0,013	0,092	1,17	0,762	0,0325	0,0466	0,0611
175	28,5	8	355,32	37,190	93,4	410	0,013	0,092	1,17	0,718	0,0394	0,0532	0,0741
175	28,5	8	334,37	34,997	143	510	0,013	0,092	1,17	0,676	0,0457	0,0580	0,0859
175	28,5	8	318,45	33,331	192,6	600	0,013	0,092	1,17	0,644	0,0507	0,0613	0,0953
175	28,5	8	311,3	32,583	217,4	650	0,013	0,092	1,17	0,629	0,0539	0,0637	0,1012
175	28,5	8	305,36	31,961	242,2	690	0,013	0,092	1,17	0,617	0,0557	0,0647	0,1048
175	28,5	8	294,88	30,864	267	740	0,013	0,092	1,17	0,596	0,0589	0,0660	0,1106
175	28,5	8	283,19	29,641	291,8	780	0,013	0,092	1,17	0,572	0,0608	0,0654	0,1142
175	28,5	8	274,13	28,692	316,6	810	0,013	0,092	1,17	0,554	0,0614	0,0640	0,1154
175	28,5	8	243,3	25,465	391	910	0,013	0,092	1,17	0,492	0,0646	0,0597	0,1214
175	28,5	8	212,57	22,249	465,4	1000	0,013	0,092	1,17	0,430	0,0666	0,0537	0,1251
175	28,5	8	204,11	21,364	490,2	1030	0,013	0,092	1,17	0,413	0,0672	0,0521	0,1263
175	28,5	8	194,54	20,362	515	1060	0,013	0,092	1,17	0,393	0,0678	0,0501	0,1275
175	28,5	8	173,69	18,179	614,2	1160	0,013	0,092	1,17	0,351	0,0679	0,0448	0,1277
175	28,5	8	161,4	16,893	663,8	1220	0,013	0,092	1,17	0,326	0,0692	0,0424	0,1301
175	28,5	8	144,58	15,132	763	1320	0,013	0,092	1,17	0,292	0,0693	0,0381	0,1303
175	28,5	8	130,98	13,709	862,2	1420	0,013	0,092	1,17	0,265	0,0694	0,0345	0,1305
175	28,5	8	113,85	11,916	986,2	1550	0,013	0,092	1,17	0,230	0,0702	0,0304	0,1319
175	28,5	8	99,041	10,366	1110	1680	0,013	0,092	1,17	0,200	0,0709	0,0267	0,1333
175	28,5	8	88,362	9,249	1172	1810	0,013	0,092	1,17	0,179	0,0794	0,0266	0,1492
175	28,5	8	0	0,000	1239	1900	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0823	0,0000	0,155

Tabel C. 7 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 9m/s

Re = 175000													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm) Rata2	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr) Rata2	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
180	28,5	9	606,17	63,445	0	0	0,013	0,092	1,17	1,089	0,0000	0,0000	0,0000
180	28,5	9	591,26	61,885	24	70	0,013	0,092	1,17	1,062	0,0057	0,0090	0,0085
180	28,5	9	558,41	58,447	39,5	140	0,013	0,092	1,17	1,003	0,0125	0,0186	0,0186
180	28,5	9	543	56,834	55	190	0,013	0,092	1,17	0,976	0,0168	0,0243	0,0250
180	28,5	9	532,42	55,727	70,5	230	0,013	0,092	1,17	0,957	0,0199	0,0282	0,0295
180	28,5	9	518,52	54,272	86	270	0,013	0,092	1,17	0,932	0,0229	0,0317	0,0340
180	28,5	9	500,09	52,342	101,5	320	0,013	0,092	1,17	0,899	0,0272	0,0363	0,0404
180	28,5	9	454,05	47,524	132,5	440	0,013	0,092	1,17	0,816	0,0383	0,0464	0,0568
180	28,5	9	437,33	45,773	163,5	500	0,013	0,092	1,17	0,786	0,0419	0,0489	0,0622
180	28,5	9	412,95	43,222	225,5	600	0,013	0,092	1,17	0,742	0,0466	0,0514	0,0692
180	28,5	9	395,52	41,398	256,5	660	0,013	0,092	1,17	0,711	0,0502	0,0530	0,0746
180	28,5	9	374,36	39,183	287,5	740	0,013	0,092	1,17	0,673	0,0563	0,0563	0,0836
180	28,5	9	357,94	37,465	318,5	810	0,013	0,092	1,17	0,643	0,0612	0,0584	0,0908
180	28,5	9	329,43	34,481	380,5	950	0,013	0,092	1,17	0,592	0,0709	0,0623	0,1053
180	28,5	9	309,59	32,403	411,5	1000	0,013	0,092	1,17	0,556	0,0733	0,0605	0,1088
180	28,5	9	292,06	30,569	442,5	1050	0,013	0,092	1,17	0,525	0,0756	0,0589	0,1123
180	28,5	9	246,93	25,845	566,5	1250	0,013	0,092	1,17	0,444	0,0851	0,0560	0,1263
180	28,5	9	225,17	23,567	659,5	1370	0,013	0,092	1,17	0,405	0,0884	0,0531	0,1313
180	28,5	9	183,76	19,234	752,5	1490	0,013	0,092	1,17	0,330	0,0918	0,0450	0,1363
180	28,5	9	86,75	9,080	783,5	1550	0,013	0,092	1,17	0,156	0,0954	0,0221	0,1417
180	28,5	9	0	0,000	814,5	1600	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0978	0,0000	0,145

D. Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Tabel D. 1 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 3,8 m/s

Re = 74000													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	$\frac{n \text{ (rpm)}}{\text{Rata2}}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	m (gr)	$\frac{s \text{ (gr)}}{\text{Rata2}}$	r (m)	A (m ²)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	λ	Td (Nm)	CoP	CM
140	28,5	3,8	250,2	26,188	0	0	0,013	0,092	1,17	1,065	0,0000	0,0000	0,0000
140	28,5	3,8	202,8	21,226	24	90	0,013	0,092	1,17	0,863	0,0082	0,0591	0,0684
140	28,5	3,8	192,2	20,117	30,2	110	0,013	0,092	1,17	0,818	0,0099	0,0677	0,0827
140	28,5	3,8	182,4	19,091	42,6	130	0,013	0,092	1,17	0,776	0,0109	0,0703	0,0906
140	28,5	3,8	177,4	18,568	55	150	0,013	0,092	1,17	0,755	0,0118	0,0744	0,0985
140	28,5	3,8	163,4	17,103	79,8	190	0,013	0,092	1,17	0,695	0,0137	0,0794	0,1143
140	28,5	3,8	158,6	16,600	86	200	0,013	0,092	1,17	0,675	0,0142	0,0798	0,1182
140	28,5	3,8	151	15,805	92,2	220	0,013	0,092	1,17	0,643	0,0159	0,0851	0,1325
140	28,5	3,8	138,6	14,507	98,4	240	0,013	0,092	1,17	0,590	0,0176	0,0866	0,1468
140	28,5	3,8	121,6	12,727	104,6	260	0,013	0,092	1,17	0,517	0,0193	0,0834	0,1611
140	28,5	3,8	95	9,943	117	280	0,013	0,092	1,17	0,404	0,0203	0,0683	0,1690
140	28,5	3,8	53,6	5,610	148	320	0,013	0,092	1,17	0,228	0,0214	0,0407	0,1783
140	28,5	3,8	0	0,000	160,4	340	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0224	0,0000	0,186

Tabel D. 2 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D = 1,8$; dan $y/D = 0,5$ pada kecepatan angin 4,4 m/s

Re = 85500													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	$\frac{n \text{ (rpm)}}{\text{Rata2}}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	m (gr)	$\frac{s \text{ (gr)}}{\text{Rata2}}$	r (m)	A (m ²)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	λ	Td (Nm)	CoP	CM
150	28,5	4,4	275,8	28,867	0	0	0,013	0,092	1,17	1,014	0,0000	0,0000	0,0000
150	28,5	4,4	240,8	25,204	24	100	0,013	0,092	1,17	0,885	0,0095	0,0520	0,0588
150	28,5	4,4	236,6	24,764	39,5	120	0,013	0,092	1,17	0,870	0,0100	0,0541	0,0623
150	28,5	4,4	222,8	23,320	55	150	0,013	0,092	1,17	0,819	0,0118	0,0602	0,0735
150	28,5	4,4	213	22,294	70,5	180	0,013	0,092	1,17	0,783	0,0136	0,0663	0,0847
150	28,5	4,4	204,6	21,415	86	210	0,013	0,092	1,17	0,752	0,0154	0,0721	0,0959
150	28,5	4,4	198,6	20,787	101,5	240	0,013	0,092	1,17	0,730	0,0172	0,0782	0,1071
150	28,5	4,4	191	19,991	117	270	0,013	0,092	1,17	0,702	0,0190	0,0831	0,1183
150	28,5	4,4	184,4	19,301	132,8	300	0,013	0,092	1,17	0,678	0,0208	0,0877	0,1293
150	28,5	4,4	176,6	18,484	148,3	330	0,013	0,092	1,17	0,649	0,0226	0,0912	0,1405
150	28,5	4,4	165	17,270	163,8	360	0,013	0,092	1,17	0,606	0,0244	0,0920	0,1518
150	28,5	4,4	151,6	15,867	179,3	390	0,013	0,092	1,17	0,557	0,0262	0,0908	0,1630
150	28,5	4,4	144	15,072	194,8	410	0,013	0,092	1,17	0,529	0,0268	0,0881	0,1665
150	28,5	4,4	112,4	11,765	225,8	450	0,013	0,092	1,17	0,413	0,0279	0,0716	0,1734
150	28,5	4,4	97,8	10,236	256,8	490	0,013	0,092	1,17	0,359	0,0290	0,0648	0,1804
150	28,5	4,4	67,6	7,075	287,8	530	0,013	0,092	1,17	0,248	0,0302	0,0465	0,1873
150	28,5	4,4	33,2	3,475	349,8	620	0,013	0,092	1,17	0,122	0,0336	0,0255	0,2090
150	28,5	4,4	0	0,000	411,8	700	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0359	0,0000	0,223

Tabel D. 3 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 5 m/s

Re = 97000													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	$\frac{n \text{ (rpm)}}{\text{Rata2}}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	m (gr)	$\frac{s \text{ (gr)}}{\text{Rata2}}$	r (m)	A (m ²)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	λ	Td (Nm)	CoP	CM
150	28,5	5	327	34,247	0	0	0,013	0,092	1,17	1,058	0,0000	0,0000	0,0000
150	28,5	5	297	31,128	24	120	0,013	0,092	1,17	0,962	0,0120	0,0553	0,0575
150	28,5	5	286	29,914	39,5	160	0,013	0,092	1,17	0,924	0,0150	0,0667	0,0722
150	28,5	5	272	28,490	55	200	0,013	0,092	1,17	0,880	0,0181	0,0764	0,0868
150	28,5	5	263	27,506	70,5	230	0,013	0,092	1,17	0,850	0,0199	0,0812	0,0955
150	28,5	5	255	26,690	86	260	0,013	0,092	1,17	0,825	0,0217	0,0859	0,1042
150	28,5	5	247	25,874	101,5	290	0,013	0,092	1,17	0,799	0,0235	0,0902	0,1129
150	28,5	5	238	24,890	117	320	0,013	0,092	1,17	0,769	0,0253	0,0935	0,1216
150	28,5	5	225	23,571	132,5	360	0,013	0,092	1,17	0,728	0,0283	0,0992	0,1362
150	28,5	5	215	22,503	148	400	0,013	0,092	1,17	0,695	0,0314	0,1049	0,1509
150	28,5	5	203	21,205	154,2	430	0,013	0,092	1,17	0,655	0,0343	0,1082	0,1652
150	28,5	5	196	20,494	169,7	460	0,013	0,092	1,17	0,633	0,0361	0,1101	0,1738
150	28,5	5	184	19,217	185,2	500	0,013	0,092	1,17	0,594	0,0392	0,1119	0,1885
150	28,5	5	163	17,061	200,7	520	0,013	0,092	1,17	0,527	0,0397	0,1008	0,1912
150	28,5	5	139	14,528	247,2	568	0,013	0,092	1,17	0,449	0,0399	0,0862	0,1921
150	28,5	5	129	13,502	293,7	620	0,013	0,092	1,17	0,417	0,0406	0,0815	0,1954
150	28,5	5	116	12,099	355,7	690	0,013	0,092	1,17	0,374	0,0416	0,0748	0,2002
150	28,5	5	62	6,468	417,7	780	0,013	0,092	1,17	0,200	0,0451	0,0434	0,2170
150	28,5	5	47	4,898	479,7	850	0,013	0,092	1,17	0,151	0,0461	0,0336	0,2218
150	28,5	5	0	0,000	572,7	950	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0470	0,0000	0,226

Tabel D. 4 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D = 1,8$; dan $y/D = 0,5$ pada kecepatan angin 6m/s

Re = 117000													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	$\frac{n \text{ (rpm)}}{\text{Rata2}}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	m (gr)	$\frac{s \text{ (gr)}}{\text{Rata2}}$	r (m)	A (m ²)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	λ	Td (Nm)	CoP	CM
155	28,5	6	404	42,264	0	0	0,013	0,092	1,17	1,088	0,0000	0,0000	0,0000
155	28,5	6	323	33,786	24	160	0,013	0,092	1,17	0,870	0,0169	0,0492	0,0566
155	28,5	6	311	32,593	55	230	0,013	0,092	1,17	0,839	0,0218	0,0611	0,0728
155	28,5	6	299	31,316	86	290	0,013	0,092	1,17	0,806	0,0254	0,0684	0,0848
155	28,5	6	272	28,469	117	380	0,013	0,092	1,17	0,733	0,0327	0,0802	0,1094
155	28,5	6	261	27,318	148	450	0,013	0,092	1,17	0,703	0,0376	0,0883	0,1256
155	28,5	6	240	25,078	179	530	0,013	0,092	1,17	0,646	0,0437	0,0943	0,1460
155	28,5	6	225	23,508	210	580	0,013	0,092	1,17	0,605	0,0461	0,0931	0,1539
155	28,5	6	205	21,457	241	620	0,013	0,092	1,17	0,553	0,0472	0,0871	0,1576
155	28,5	6	173	18,086	303	690	0,013	0,092	1,17	0,466	0,0482	0,0750	0,1609
155	28,5	6	152	15,951	365	760	0,013	0,092	1,17	0,411	0,0492	0,0675	0,1643
155	28,5	6	142	14,884	427	830	0,013	0,092	1,17	0,383	0,0502	0,0642	0,1676
155	28,5	6	89	9,315	489	940	0,013	0,092	1,17	0,240	0,0561	0,0450	0,1876
155	28,5	6	63	6,594	551	990	0,013	0,092	1,17	0,170	0,0547	0,0310	0,1826
155	28,5	6	0	0,000	737	1250	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0639	0,0000	0,213

Tabel D. 5 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D = 0,5$; $S/D = 1,8$; dan $y/D = 0,5$ pada kecepatan angin 7 m/s

Re = 136000														
Voltage	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM	
			Rata2			Rata2								
165	28,5	7	482	50,449	0	0	0,013	0,092	1,17	1,113	0,0000	0,0000	0,0000	
165	28,5	7	442	46,242	24	120	0,013	0,092	1,17	1,021	0,0120	0,0299	0,0293	
165	28,5	7	399	41,804	55	220	0,013	0,092	1,17	0,923	0,0205	0,0465	0,0504	
165	28,5	7	351	36,738	117	360	0,013	0,092	1,17	0,811	0,0303	0,0602	0,0742	
165	28,5	7	311	32,593	179	500	0,013	0,092	1,17	0,719	0,0400	0,0706	0,0981	
165	28,5	7	281	29,411	241	640	0,013	0,092	1,17	0,649	0,0497	0,0791	0,1219	
165	28,5	7	270	28,302	303	750	0,013	0,092	1,17	0,625	0,0556	0,0853	0,1366	
165	28,5	7	253	26,439	365	810	0,013	0,092	1,17	0,584	0,0554	0,0793	0,1360	
165	28,5	7	244	25,560	427	870	0,013	0,092	1,17	0,564	0,0551	0,0764	0,1354	
165	28,5	7	224	23,466	489	950	0,013	0,092	1,17	0,518	0,0574	0,0730	0,1409	
165	28,5	7	204	21,331	551	1030	0,013	0,092	1,17	0,471	0,0596	0,0689	0,1464	
165	28,5	7	183	19,112	613	1110	0,013	0,092	1,17	0,422	0,0619	0,0641	0,1519	
165	28,5	7	162	16,998	675	1210	0,013	0,092	1,17	0,375	0,0666	0,0613	0,1635	
165	28,5	7	143	14,967	737	1310	0,013	0,092	1,17	0,330	0,0713	0,0578	0,1751	
165	28,5	7	117	12,246	799	1440	0,013	0,092	1,17	0,270	0,0798	0,0529	0,1958	
165	28,5	7	86	8,959	861	1500	0,013	0,092	1,17	0,198	0,0795	0,0386	0,1952	
165	28,5	7	53	5,568	923	1580	0,013	0,092	1,17	0,123	0,0818	0,0247	0,2007	
165	28,5	7	0	0,000	1078	1750	0,013	0,092	1,17	0,000	0,0837	0,0000	0,205	

Tabel D. 6 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 8 m/s

Re = 155600													
Voltase	T (°C)	V (m/s)	$\frac{n \text{ (rpm)}}{\text{Rata2}}$	$\omega \text{ (rad/s)}$	m (gr)	$\frac{s \text{ (gr)}}{\text{Rata2}}$	r (m)	A (m ²)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	λ	Td (Nm)	CoP	CM
170	28,5	8	503	52,647	0	0	0,013	0,092	1,17	1,017	0,0000	0,0000	0,0000
170	28,5	8	468	49,005	24	110	0,013	0,092	1,17	0,946	0,0107	0,0190	0,0201
170	28,5	8	414	43,311	86	340	0,013	0,092	1,17	0,836	0,0316	0,0497	0,0594
170	28,5	8	393	41,134	148	460	0,013	0,092	1,17	0,794	0,0388	0,0580	0,0730
170	28,5	8	362	37,868	210	580	0,013	0,092	1,17	0,731	0,0461	0,0633	0,0866
170	28,5	8	333	34,875	272	710	0,013	0,092	1,17	0,674	0,0545	0,0690	0,1025
170	28,5	8	311	32,572	334	850	0,013	0,092	1,17	0,629	0,0642	0,0759	0,1207
170	28,5	8	291	30,458	396	960	0,013	0,092	1,17	0,588	0,0702	0,0776	0,1319
170	28,5	8	244	25,518	458	1100	0,013	0,092	1,17	0,493	0,0799	0,0740	0,1502
170	28,5	8	224	23,403	520	1190	0,013	0,092	1,17	0,452	0,0834	0,0708	0,1567
170	28,5	8	194	20,326	582	1280	0,013	0,092	1,17	0,393	0,0869	0,0641	0,1633
170	28,5	8	165	17,249	644	1350	0,013	0,092	1,17	0,333	0,0879	0,0550	0,1652
170	28,5	8	132	13,774	706	1420	0,013	0,092	1,17	0,266	0,0889	0,0444	0,1670
170	28,5	8	82	8,583	768	1480	0,013	0,092	1,17	0,166	0,0886	0,0276	0,1666
170	28,5	8	64	6,741	830	1540	0,013	0,092	1,17	0,130	0,0884	0,0216	0,1661
170	28,5	8	35	3,684	892	1640	0,013	0,092	1,17	0,071	0,0931	0,0125	0,1750
170	28,5	8	0	0,000	1047	1930	0,013	0,092	1,17	0,000	0,1099	0,0000	0,207

Tabel D. 7 Data hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu $d/D=0,5$; $S/D=1,8$; dan $y/D=0,5$ pada kecepatan angin 9 m/s

Re = 175000																						
Voltage	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)					ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)					r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM	
			1	2	3	4	5			Rata2	1	2	3	4								5
180	28,5	9	590	595	592	597	593	593,4	62,109	0	0	0	0	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,066	0,0000	0,0000	0,0000
180	28,5	9	557	555	552	555	554	554,6	58,048	24	160	160	160	160	160	0,0127	0,092	1,17	0,996	0,0169	0,0250	0,0251
180	28,5	9	510	513	512	510	511	511,2	53,506	86	340	340	340	340	340	0,0127	0,092	1,17	0,919	0,0316	0,0431	0,0469
180	28,5	9	480	482	486	483	482	482,6	50,512	148	450	450	450	450	450	0,0127	0,092	1,17	0,867	0,0376	0,0484	0,0558
180	28,5	9	458	453	456	457	455	455,8	47,707	210	560	560	560	560	560	0,0127	0,092	1,17	0,819	0,0436	0,0530	0,0647
180	28,5	9	436	437	434	437	435	435,8	45,614	272	680	680	680	680	680	0,0127	0,092	1,17	0,783	0,0508	0,0590	0,0754
180	28,5	9	418	416	420	418	417	417,8	43,730	334	810	810	810	810	810	0,0127	0,092	1,17	0,751	0,0593	0,0660	0,0880
180	28,5	9	405	402	407	401	403	403,6	42,243	396	910	910	910	910	910	0,0127	0,092	1,17	0,725	0,0640	0,0689	0,0950
180	28,5	9	374	377	375	376	375	375,4	39,292	458	1030	1030	1030	1030	1030	0,0127	0,092	1,17	0,675	0,0712	0,0713	0,1057
180	28,5	9	356	357	355	352	355	355	37,157	520	1140	1140	1140	1140	1140	0,0127	0,092	1,17	0,638	0,0772	0,0731	0,1146
180	28,5	9	332	336	331	332	333	332,8	34,833	582	1250	1250	1250	1250	1250	0,0127	0,092	1,17	0,598	0,0832	0,0738	0,1235
180	28,5	9	318	316	315	318	317	316,8	33,158	644	1330	1330	1330	1330	1330	0,0127	0,092	1,17	0,569	0,0854	0,0722	0,1268
180	28,5	9	281	284	286	285	283	283,8	29,704	706	1440	1440	1440	1440	1440	0,0127	0,092	1,17	0,510	0,0914	0,0692	0,1357
180	28,5	9	257	255	253	256	255	255,2	26,711	768	1520	1520	1520	1520	1520	0,0127	0,092	1,17	0,459	0,0936	0,0637	0,1390
180	28,5	9	240	242	238	240	239	239,8	25,099	1374	2130	2130	2130	2130	2130	0,0127	0,092	1,17	0,431	0,0941	0,0602	0,1397
180	28,5	9	206	203	204	206	205	204,8	21,436	1644	2430	2430	2430	2430	2430	0,0127	0,092	1,17	0,368	0,0978	0,0535	0,1453
180	28,5	9	189	190	187	189	188	188,6	19,740	1706	2520	2520	2520	2520	2520	0,0127	0,092	1,17	0,339	0,1013	0,0510	0,1505
180	28,5	9	164	165	162	166	164	164,2	17,186	1830	2660	2660	2660	2660	2660	0,0127	0,092	1,17	0,295	0,1033	0,0453	0,1534
180	28,5	9	133	135	130	134	131	132,6	13,879	2144	2980	2980	2980	2980	2980	0,0127	0,092	1,17	0,238	0,1041	0,0368	0,1545
180	28,5	9	0	0	0	0	0	0	0,000						#DIV/0!	0,0127	0,092	1,17	0,000	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!