



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

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

**“Studi Kasus Variasi Rasio $S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$; $d/D = 0,1$;
 $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$; $1,0$ Pada $Re = 97000$
dan 136000 ”**

**ASRI MELATI WIJAYANTI
NRP 02111540000018**

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

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



TUGAS AKHIR – TM184835

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

**“Studi Kasus Variasi Rasio $S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$; $d/D = 0,1$; $0,2$;
 $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ dan $1,0$ Pada $Re = 97000$ dan
 136000 ”**

Asri Melati Wijayanti
NRP. 0211154000018

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

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



FINAL PROJECT – TM184835

**EXPERIMENTAL STUDY WITH DISTURBANCE
CYLINDER SIZE VARIATIONS PLACED IN FRONT OF
THE RETURNING BLADE ON SAVONIUS WIND
TURBINE EFFICIENCY OPTIMIZATION**

“Case Study with Ratio Variation $S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$; $d/D = 0.1$; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8 ; 0.9 and 1.0 at $Re = 97000$ and 136000 ”

Asri Melati Wijayanti
0211154000018

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

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

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

“Studi Kasus Variasi Rasio $S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$; $d/D = 0,1$; $0,2$;
 $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ dan $1,0$ Pada $Re = 97000$ dan
 136000 ”

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Asri Melati Wijayanti

NRP. 02111540000018

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD (Penguji 1)
NIP. 196412281990031002
3. Nur Ikhwan, ST, M.Eng (Penguji 2)
NIP. 196709151995121001
4. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD (Penguji 3)
NIP. 198105292003122001

**SURABAYA
JANUARI, 2020**

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

**“Studi Kasus Variasi Rasio $S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$; $d/D = 0,1$;
 $0,2$; $0,3$; $0,4$; $0,5$; $0,6$; $0,7$; $0,8$; $0,9$ dan $1,0$ Pada $Re = 97000$
dan 136000 ”**

Nama Mahasiswa : Asri Melati Wijayanti
NRP : 021 1 15 4000 0018
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyono Yuwono, DEA

ABSTRAK

Sekitar 95% kebutuhan energi dipenuhi dari energi fosil dan sisanya dari energi terbarukan. Ketesediaan energi fosil sebagai sumber energi utama sangat terbatas dan terus mengalami ancaman kelangkaan, sehingga diperlukan alternatif berupa penggunaan energi terbarukan. Pembangkit listrik tenaga angin mempunyai potensi yang cukup baik karena dapat beroperasi pada siang dan malam dan tidak menyebabkan polusi namun terhalang pada biaya produksi yang tinggi. Salah satu jenis turbin angin yaitu turbin angin Savonius, dimana turbin ini memiliki kelebihan berupa konstruksinya yang sederhana sehingga biaya yang dibutuhkan untuk produksi cukup rendah serta dapat menerima angin dari segala arah, namun turbin Savonius ini mempunyai *range* efisiensi yang cukup rendah dibandingkan dengan turbin angin lainnya, yaitu sekitar 15% maka dari itu diperlukan peningkatan efisiensi yang dapat dilakukan dengan cara meletakkan suatu penghalang didepan sisi *returning blade*.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius yang memiliki sudu dengan diameter turbin (D) sebesar 167,1 mm, diameter *endplate* (D_0) sebesar 320 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Penelitian ini menggunakan penghalang berbentuk silinder dengan jarak penempatan silinder

pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius (S/D) = 3,0 dan variasi ukuran diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius (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 97000 ($v = 5$ m/s) dan 136000 ($v = 7$ m/s). Sumber aliran yang digunakan berasal dari *axial fan* dan digunakan *honeycomb* untuk penyeragam aliran menuju turbin angin Savonius. Alat ukur yang digunakan adalah *anemometer* sebagai pengukur kecepatan aliran, *torsimeter* sebagai pengukur torsi statis, *tachometer* sebagai pengukur kecepatan putar turbin, dan *brake dynamometer* sebagai pengukur torsi dinamis.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah analisis kinerja turbin angin Savonius dengan dan tanpa penempatan silinder pengganggu didepan sisi *returning blade* untuk variasi penempatan jarak (S/D) = 3,0 didapatkan hasil kenaikan CoP_{max} paling tinggi untuk bilangan Reynolds 97000 adalah sebesar 30,43% pada (d/D) = 0,6 dan 22,12% pada (d/D) = 0,5 untuk bilangan Reynolds 136000. Kenaikan C_{Mmax} paling besar untuk bilangan Reynolds 97000 adalah 34,26% pada (d/D) = 0,6 dan 20,55% pada (d/D) = 0,5 untuk bilangan Reynolds 136000. Penambahan silinder pengganggu juga meningkatkan nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds. Pada ukuran (d/D) optimum untuk kedua bilangan Reynolds tidak terjadi torsi negatif yang menandakan turbin angin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu pada variasi (d/D) optimum mempunyai kemampuan *self-starting* yang baik untuk semua sudut angular.

Kata Kunci : *Coefficient of Moment, Coefficient of Power, Rasio d/D , Silinder Pengganggu, Turbin Angin Savonius*

**EXPERIMENTAL STUDY WITH DISTURBANCE
CYLINDER SIZE VARIATIONS PLACED IN FRONT OF
THE RETURNING BLADE ON SAVONIUS WIND
TURBINE EFFICIENCY OPTIMIZATION**

“Case Study with Ratio Variation $S/D = 3.0$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0.1$; 0.2 ; 0.3 ; 0.4 ; 0.5 ; 0.6 ; 0.7 ; 0.8 ; 0.9 and 1.0 at $Re = 97000$ and 136000 ”

Student Name : Asri Melati Wijayanti
NRP : 0211154000018
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Around 95% of energy consumption is fulfilled from fossil energy and the rest is fulfilled from renewable energy. The availability of fossil energy as the main source of energy fulfillment is very limited and very likely to experience scarcity, thus alternative energy fulfillment source is needed. Wind power plant has a good potential because it can operate both at noon and at night, also it doesn't produce pollution but the development of wind power plant having a setback because the initial production cost is quite high. One of a vertical axis wind turbine is Savonius wind turbine. Savonius wind turbine has a simple construction, so the initial production cost can be set at low, but the efficiency of this wind turbine is quite low (around 15%) thus it needs enhancement and reach its potential. One of the ways to enhance the Savonius wind turbine efficiency is by placing a disturbance cylinder in front of its returning blade.

This experiment used a Savonius wind turbine with blade diameter (D) of 167.1 mm, endplate diameter (D_0) of 320 mm, blade height (H) of 298 mm and the axis diameter (b) of 19 mm. This experiment also used a disturbance of a circular cylinder shape with size ratio (d/D) of 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9 and 1.0 at Reynolds number of 97000 ($v = 5$ m/s) and 136000 ($v = 7$ m/s). The wind source comes from axial fan and a

honeycomb is used to uniform the wind flow towards the Savonius wind turbine. The measuring instruments used are anemometer for wind velocity measurement, torque meter for static torque measurement, tachometer for turbine rotation speed measurement, and brake dynamometer for dynamic torque measurement.

The result from this experiment shows the analysis of Savonius wind turbine with and without the placement of disturbance cylinder at $(S/D) = 3.0$ position. The result shows that the highest CoP_{max} enhancement happens when the disturbance cylinder size (d/D) used is 0.6 for Reynolds number 97000 with enhancement value of 30.43% and when (d/D) of 0.5 is used for Reynolds number 136000, the highest CoP_{max} enhancement value is 22.12%. The highest CM_{max} enhancement happens when the (d/D) of 0.6 is used for Reynolds number 97000 with enhancement value of 34.26% and when (d/D) 0.5 is used for Reynolds number 136000, the highest CM_{max} enhancement value is 20.55%. The addition of disturbance cylinder also enhances static torque value at both Reynolds number. With the optimum disturbance cylinder size used on both Reynolds number, there is no negative value of static torque which implies that with the addition of disturbance cylinder in front of the Savonius wind turbine has the self-starting ability for every angular angle.

Keywords : Coefficient of Moment, Coefficient of Power, d/D Ratio, Disturbance Cylinder, Savonius Wind Turbine

KATA PENGANTAR

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

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA sebagai dosen pembimbing yang senantiasa memberikan dorongan dan bantuan serta motivasi hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Prof. Ir. Sutardi, PhD., Bapak Nur Ikhwan, ST, M.Eng. dan Ibu Vivien Suphandani, ST, ME, PhD selaku dosen penguji tugas akhir serta Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.T., dan Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji proposal tugas akhir yang telah memberikan arahan, masukan serta kritik yang membangun terhadap tugas akhir ini.
3. Bapak Sutrisno dan Bapak Faisal yang telah membantu pengerjaan alat tugas akhir ini.
4. Bapak Bambang Pramujati ST, MSc.Eng, PhD selaku dosen wali penulis serta kepada seluruh dosen dan karyawan

Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS atas segala bantuan dan bimbingan yang diberikan.

5. Orangtua penulis, Bapak Triyono, Ibu Wiwien, Ibu Siti Sundari dan Bapak Annas Sappari atas segala doa serta dorongan untuk menjadi manusia yang lebih baik setiap harinya, Bapak Heru Soekarno atas segala petuah dan dorongan untuk mengejar mimpi, Abang Aldian, Kakak Dyna dan Adik Kiky atas segala doa dan semangat yang selalu diberikan serta seluruh keluarga penulis yang senantiasa mendukung penulis.
6. Teman-teman Savonius kelompok 6, Hilda, Kiki, Markus, Prabas, Ghiyats, Ardy dan Lazuardhi atas segala diskusi, perselisihan dan semangat yang diberikan.
7. Kawan-kawan terbaik, Rasyidah Fahlillah, Hilda Mailil Haq serta Junaida Zamzami yang selalu ada di saat paling tinggi maupun paling rendah penulis dan senantiasa menjadi pengingat untuk menjadi manusia yang lebih baik lagi.
8. Teman-teman Angkatan M58 Departemen Teknik Mesin ITS atas segala informasi, diskusi, pertikaian, perselisihan dan segala bentuk dukungan yang diberikan.
9. Semua pihak yang telah membantu proses penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

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

Surabaya, Januari 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Peneliatian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Turbin Angin	7
2.2 Turbin Angin Savonius.....	9
2.3 Gaya Drag	10
2.4 Aliran Melewati Silinder	11
2.5 Bilangan Reynolds.....	12
2.6 <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	13
2.7 <i>Coefficient of Moment (CM)</i>	16
2.8 <i>Tip Speed Ratio (λ)</i>	17
2.9 Penelitian Terdahulu.....	18
2.9.1 Studi Eksperimen Modifikasi Geometri Rotor Turbin Angin Savonius.....	18

2.9.2	Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius, Studi Kasus Variasi $y/D = 0,0; 0,25; \text{ dan } 0,5$	24
2.9.3	Studi Pengaruh Penempatan Silinder Pengganggu Didepan Silinder Sirkular Utama Terhadap Pengurangan <i>Drag</i>	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		43
3.1	Setting Eksperimen.....	43
3.1.1	Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP)	44
3.1.2	Analisa Dimensi Coefficient of Moment (CM).....	47
3.2	Peralatan	50
3.2.1	Axial Fan	50
3.2.2	Honeycomb.....	51
3.2.3	Silinder Pengganggu.....	51
3.2.4	Turbin Angin Savonius	52
3.2.5	Penyangga Turbin Angin Savonius.....	53
3.3	Alat Ukur.....	54
3.3.1	Voltage Regulator	54
3.3.2	Anemometer	55
3.3.3	Torsimeter.....	56
3.3.4	Tachometer	57
3.3.5	Brake Dynamometer	58
3.4	Prosedur Penelitian	61
3.4.1	Prosedur Pengukuran Torsi Dinamis	61
3.4.2	Prosedur Pengukuran Torsi Statis	63
3.5	Analisis <i>Uncertainty</i> dalam Eksperimen.....	64
3.6	Flowchart Penelitian	67
3.6.1	Pengukuran Torsi Dinamis	67

3.6.2	Pengukuran Torsi Statis	70
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		73
4.1	Data Penelitian dan Contoh Perhitungan	73
4.1.1	Perhitungan Bilangan Reynolds.....	73
4.1.2	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (λ).....	76
4.1.3	Perhitungan Torsi Dinamis	76
4.1.4	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	77
4.1.5	Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i> (C_M)	78
4.2	Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	78
4.2.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	79
4.2.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Tanpa Silinder Pengganggu (CM_0) Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	81
4.2.3	Analisis Nilai Torsi Statis Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ).....	83
4.3	Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu	85
4.3.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000.....	86
4.3.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C_M) Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000.....	90
4.3.3	Analisis Nilai Torsi Statis (T_s) Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000.....	95
4.4	Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu	98

4.4.1.	Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu Pada Jarak S/D = 3,0	99
4.4.2.	Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu Pada Variasi Jarak S/D = 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0	101
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		109
5.1	Kesimpulan.....	109
5.2	Saran.....	110
DAFTAR PUSTAKA.....		111
LAMPIRAN A.....		113
LAMPIRAN B		117
LAMPIRAN C		121
LAMPIRAN D.....		145
BIODATA PENULIS.....		153

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Tipe Upwind dan Downwind (Zhongzou Yang, 2013)	8
Gambar 2. 2 Ilustrasi Beberapa Jenis Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) (Idrees Farooq, 2017).....	9
Gambar 2. 3 Ilustrasi Arah Rotasi Turbin Angin Savonius (wikipedia, n.d.)	10
Gambar 2. 4 Ilustrasi Kualitatif Aliran Incompressible Melewati Silinder (Fox et al., 2008).....	12
Gambar 2. 5 Skema Turbin Angin Savonius	13
Gambar 2. 6 Skema Free-Body Diagram Brake Dynamometer (Daffa & Yuwono, 2019)	14
Gambar 2. 7 Grafik Hubungan Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Berbagai Jenis Turbin Angin (Fox et al., 2008)	17
Gambar 2. 8 Skema Turbin Angin Savonius Tampak Depan dan Tampak Samping (Mahmoud et al., 2012)	19
Gambar 2. 9 Grafik Power Coefficient Terhadap Jumlah Blades Pada Turbin Angin Savonius (Mahmoud et al., 2012).....	19
Gambar 2. 10 Grafik Mechanical Power Pada Turbin Savonius dengan Variasi Jumlah Blades dengan (a) aspect ratio = 0,5 single stage, (b) aspect ratio = 5 single stage, dan (c) aspect ratio = 0,5 double stages (Mahmoud et al., 2012).....	20
Gambar 2. 11 Hubungan Antara Koefisien Torsi Statis dan Kecepatan Angin di Turbin Savonius dengan Variasi Jumlah Blades pada (a) aspect ratio = 0,5 dan (b) aspect ratio = 5 (Mahmoud et al., 2012).....	21
Gambar 2. 12 Hubungan Antara Specific Power dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Single Stage dan Double Stages (Mahmoud et al., 2012).....	22
Gambar 2. 13 Hubungan Antara Torsi Statis dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Single Stage dan Double Stages (Mahmoud et al., 2012).....	22

Gambar 2. 14 Hubungan Antara Mechanical Power dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi Overlap Ratio (Mahmoud et al., 2012).....	23
Gambar 2. 15 Hubungan Antara Coefficient of Power dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi Aspect Ratio (Mahmoud et al., 2012).....	23
Gambar 2. 16 Hubungan Antara Mechanical Power dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi Keberadaan Endplate (Mahmoud et al., 2012)	24
Gambar 2. 17 Skema Turbin Angin Savonius Dengan Peletakan Silinder Penghalang di Depan Returning Blade (Aprilia & Yuwono, 2018).....	25
Gambar 2. 18 Grafik <i>Coefficient of Power</i> Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) (Aprilia & Yuwono, 2018).....	26
Gambar 2. 19 Grafik Torsi Statis Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (TS_0) sebagai Fungsi Sudut (θ) (Aprilia & Yuwono, 2018)	27
Gambar 2. 20 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio(λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018).....	28
Gambar 2. 21 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018).....	29
Gambar 2. 22 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)	30
Gambar 2. 23 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0})	

sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)	31
Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)	32
Gambar 2. 25 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018).....	33
Gambar 2. 26 Skema Eksperimen dan Sumbu Koordinat (Lee et al., 2004)	35
Gambar 2. 27 Visualisasi Aliran Antara Silinder Utama Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak ($L/D = 2,0$ (a) dan $3,0$ (d)) (Lee et al., 2004)	36
Gambar 2. 28 Visualisasi Aliran Dibelakang Silinder Utama Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (Lee et al., 2004).....	36
Gambar 2. 29 Pengaruh Diameter Silinder Pengganggu Terhadap Distribusi Tekanan (a) $L/D = 1,5$ dan (b) $L/D = 2,17$ (Lee et al., 2004)	37
Gambar 2. 30 Pengaruh Jarak Penempatan Silinder Pengganggu Terhadap Distribusi Tekanan (a) $d/D = 0,133$ dan (b) $d/D = 0,233$ (Lee et al., 2004)	38
Gambar 2. 31 Pengaruh Diameter Silinder Pengganggu Terhadap Pengurangan Drag Pada Silinder Utama (Lee et al., 2004)	39
Gambar 2. 32 Pengaruh Jarak Peletakan Silinder Pengganggu Terhadap Pengurangan Drag Pada Silinder Utama (Lee et al., 2004)	39
Gambar 2. 33 Skema Geometri Pengujian (Tsutsui & Igarashi, 2002)	40
Gambar 2. 34 Grafik Bilangan Strouhal dan Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynolds (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	41

Gambar 2. 35 Grafik Distribusi Sekitar Silinder Sirkular Utama dengan (a) Pengaruh Bilangan Reynolds dan (b) Pengaruh d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	42
Gambar 3. 1 Skema Penelitian	43
Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur.....	44
Gambar 3. 3 Axial Fan CKE SPV-18.....	50
Gambar 3. 4 Skema Honeycomb.....	51
Gambar 3. 5 Silinder Pengganggu.....	52
Gambar 3. 6 Skema Turbin Angin Savonius	53
Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Angin Savonius.....	54
Gambar 3. 8 Voltage Regulator TDGC 2J-3	55
Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141	55
Gambar 3. 10 Torsimeter LUTRON TQ-8800	57
Gambar 3. 11 Tachometer OMEGA HHT12.....	58
Gambar 3. 12 Skema Brake Dynamometer	59
Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA	60
Gambar 3. 14 Massa Pemberat	61
Gambar 3. 15 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis.....	69
Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Statis	71
Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Fungsi Tip Speed Ratio (λ).....	80
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment Tanpa Silinder Pengganggu (CM_0) Fungsi Tip Speed Ratio (λ)	82
Gambar 4. 3 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ).....	84
Gambar 4. 4 Grafik Coefficient of Power Turbin Savonius Dengan (CoP) dan Tanpa Pengganggu (CoP_0) Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Untuk $(S/D) = 3,0$ dan $(y/D) = 0,5$ Pada Bilangan Reynolds 97000.....	86

Gambar 4. 5 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP₀) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada Bilangan Reynolds 136000..... 87

Gambar 4. 6 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Savonius Dengan (C_M) dan Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada Re = 97000 .. 91

Gambar 4. 7 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Savonius Dengan (C_M) dan Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada Re = 136000 92

Gambar 4. 8 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan (T_s) dan Tanpa Silinder Penghalang (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ) Pada (S/D) = 3,0; (d/D) = 0,6; (y/D) = 0,5; Re = 97000..... 96

Gambar 4. 9 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan (T_s) dan Tanpa Silinder Penghalang (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ) Pada (S/D) = 3,0; (d/D) = 0,5; (y/D) = 0,5 Re = 136000..... 97

Gambar 4. 10 Grafik Kenaikan Nilai Maksimal *Coefficient of Performance* Turbin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D Pada Bilangan Reynolds 97000 dan 136000 (S/D = 3,0; y/D = 0,5) ... 99

Gambar 4. 11 Grafik Kenaikan Nilai *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) Pada Bilangan Reynolds 97000 (y/D = 0,5) 102

Gambar 4. 12 Grafik Kenaikan *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) Pada Bilangan Reynolds 136000 (y/D = 0,5) 103

Gambar 4. 13 Grafik Kenaikan *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Jarak Penempatan Silinder Pengganggu (S/D) Pada Bilangan Reynolds 97000 (y/D = 0,5) 105

Gambar 4. 14 Grafik Kenaikan Coefficient of Power Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Jarak Penempatan Silinder Pengganggu (S/D) Pada Bilangan Reynolds 136000 ($y/D = 0,5$) 106

Gambar A. 1 Posisi Titik Pengambilan Data Kecepatan Angin 113

Gambar A. 2 Distribusi Kecepatan Posisi Vertikal..... 114

Gambar A. 3 Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal..... 114

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Koefisien Drag Bebeapa Geometri Benda (Fox, Pritchard, & McDonald, 2008)	11
Tabel 3. 1 Dimensi Tiap Parameter CoP	45
Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM	48
Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18	50
Tabel 3. 4 Spesifikasi Honeycomb	51
Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius	53
Tabel 3. 6 Spesifikasi Voltage Regulator Ling Bridge TDGC 2J-3	54
Tabel 3. 7 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141	56
Tabel 3. 8 Spesifikasi Torsimeter LUTRON TQ-8800.....	57
Tabel 3. 9 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12	58
Tabel 3. 10 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA type C-5.....	60
Tabel 3. 11 Nilai Uncertainty CoP Maksimal Pada Bilangan Reynolds 97000 ($S/D = 3,0$; $d/D = 0,6$; $y/D = 0,5$	66
Tabel 4. 1 Nilai Coefficient of Power Makismal dan Tip Speed Ratio Optimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu serta Kenaikannya	88
Tabel 4. 2 Nilai Ketidakpastian Coefficient of Power Maksimal untuk Seluruh Variasi Ukuran d/D Pada Peletakan $S/D = 3,0$ dan $y/D = 0,5$	90
Tabel 4. 3 Nilai Coefficient of Moment Makismum dan Tip Speed Ratio Optimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu serta Kenaikannya	93
Tabel 4. 4 Nilai Ketidakpastian Coefficient of Moment Maksimal untuk Seluruh Variasi Ukuran d/D Pada Peletakan $S/D = 3,0$ dan $y/D = 0,5$	95

Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Maksimal Turbin dengan dan tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Fungsi Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) untuk Penempatan Jarak (S/D) = 3,0	101
Tabel 4. 6 Tabel Kenaikan <i>Coefficient of Power</i> Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D dan S/D	104
Tabel A. 1 Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal dan Vertikal Uji Uniformity.....	115
Tabel B. 1 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu, bilangan Reynolds 97000	117
Tabel B. 2 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu, Bilangan Reynolds 136000.....	118
Tabel B. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu.....	119
Tabel C. 1 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,1 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	121
Tabel C. 2 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,1 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	122
Tabel C. 3 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,2 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	123
Tabel C. 4 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,2 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	124

Tabel C. 5 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,3 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	125
Tabel C. 6 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,3 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	126
Tabel C. 7 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,4 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	127
Tabel C. 8 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,4 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	128
Tabel C. 9 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,5 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	130
Tabel C. 10 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,5 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	132
Tabel C. 11 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,6 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	133
Tabel C. 12 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,6 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	134
Tabel C. 13 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,7 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	135
Tabel C. 14 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,7 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	136
Tabel C. 15 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,8 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	137

Tabel C. 16 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Penggangu (d/D) = 0,8 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	138
Tabel C. 17 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Penggangu (d/D) = 0,9 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	139
Tabel C. 18 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Penggangu (d/D) = 0,9 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	140
Tabel C. 19 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Penggangu (d/D) = 1,0 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000.....	141
Tabel C. 20 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Penggangu (d/D) = 1,0 Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000.....	142
Tabel C. 21 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penggangu Pada Jarak (S/D) = 3,0	144

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi dunia, kebutuhan energi juga semakin meningkat. Kenaikan kebutuhan energi tersebut juga dipengaruhi kenaikan angka pertumbuhan penduduk di dunia (Dr. Hamdi, 2016). Sekitar 95% kebutuhan energi dipenuhi dari energi fosil dan sisanya dari energi terbarukan (KESDM, 2019). Ketersediaan energi fosil sebagai sumber energi utama sangat terbatas dan terus mengalami ancaman kelangkaan karena penggunaan energi tersebut dalam skala besar dan secara terus menerus. Kondisi ini memerlukan alternatif berupa penggunaan energi terbarukan, salah satunya adalah energi angin namun sayangnya pembangkit listrik tenaga angin masih kurang dikembangkan. Pembangkit listrik tenaga angin mempunyai potensi yang cukup baik karena dapat beroperasi pada siang dan malam dan tidak menyebabkan polusi namun terhalang pada biaya produksi yang cukup tinggi. Salah satu jenis turbin angin yang memiliki *vertical axis* yaitu turbin angin Savonius merupakan turbin yang cukup sederhana sehingga masalah biaya produksi dapat diatasi. Turbin ini memiliki kelebihan berupa konstruksinya yang sederhana sehingga biaya yang dibutuhkan untuk membuatnya cukup rendah, dapat menerima angin dari segala arah, suara dan kecepatan angular yang dihasilkan rendah, serta momen statis dan dinamisnya tinggi, namun turbin Savonius ini mempunyai *range* efisiensi yang cukup rendah dibandingkan dengan turbin angin lainnya, yaitu sekitar 15% (Akwa et al., 2012). Hal ini terjadi karena turbin ini menghasilkan daya dari gaya drag yang diterima oleh sudu-sudunya, dimana pada konstruksi turbin angin Savonius terdapat dua jenis sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* memiliki fungsi sebagai “penerima” angin yang menghasilkan gaya drag dan mendorong sudu, sedangkan *returning blade* mempunyai fungsi kebalikannya sehingga terdapat perbedaan gaya drag yang diterima kedua sudu.

Perbedaan gaya drag ini akan menimbulkan perbedaan torsi yang kemudian berhubungan dengan daya yang dihasilkan oleh turbin. Rendahnya efisiensi turbin angin Savonius menyebabkan perlunya peningkatan efisiensi, yang dapat dilakukan dengan cara mengurangi gaya drag yang terjadi pada *returning blade* dengan cara meletakkan suatu penghalang didepan sisi *returning blade*.

Beberapa penelitian yang pernah dilakukan mengenai turbin angin Savonius antara lain yaitu penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2012)** menggunakan variasi geometri rotor turbin Savonius dengan tujuan menemukan geometri yang optimum untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Variasi geometri tersebut antara lain jumlah *blade*, jumlah *stage*, *overlap ratio* (β), *aspect ratio* (α), serta keberadaan *endplate*. Parameter variasi yang digunakan adalah jumlah *blade* yang digunakan adalah dua (2b), tiga (3b), dan empat *blade* (4b), *single stage* (1st) dan *double stages* (2st), *overlap ratio* (β) = 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35 serta *aspect ratio* (α) = 0,5; 1; 2; 4; dan 5 juga ada dan tidaknya *endplate*. Dari hasil penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan bahwa rotor dengan dua *blade*, penggunaan *endplate*, rotor *double stages*, *overlap ratio* (β) = 0, peningkatan *aspect ratio* akan meningkatkan performa turbin angin Savonius.

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

Penelitian lain tentang penempatan silinder pengganggu didepan silinder sirkular utama terhadap pengurangan *drag* yang dilakukan oleh **Lee et al (2004)**. Penelitian ini menggunakan variasi berupa diameter silinder pengganggu d/D 0,133 sampai dengan 0,267 serta variasi jarak peletakan silinder pengganggu dari silinder sirkular utama (L/D) sebesar 1,5 sampai dengan 4,0. Dari penelitian ini didapatkan bahwa pengurangan koefisien *drag* maksimal dari silinder utama adalah sebesar 29% pada diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,233 pada jarak (L/D) = 2,081. Pengurangan koefisien *drag* maksimal sistem secara keseluruhan termasuk silinder pengganggu dan silinder utama yaitu sebesar 25% pada (L/D) = 1,833 dan (d/D) = 0,233. Penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui & Igarashi (2002)** juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengurangan *drag* yang terjadi ketika suatu silinder utama diberikan pengganggu didepan sisinya. Penelitian ini memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu (d/D), dan bilangan Reynolds dari $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$. Dari penelitian ini didapatkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dan peningkatan bilangan Reynolds dan penambahan ukuran diameter silinder pengganggu menyebabkan *wake* yang terjadi di belakang silinder utama menyempit. Dengan adanya silinder pengganggu juga menyebabkan C_p didepan silinder utama mengalami penurunan.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan diatas, diperlukan penelitian mengenai peningkatan kinerja turbin angin Savonius dengan meletakkan penghalang didepan sisi *returning blade*. Penelitian ini dilakukan menggunakan penghalang berbentuk silinder dengan perbandingan jarak antara pusat turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius (S/D) sebesar 3,0 dan variasi perbandingan diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) yang digunakan adalah 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0. Penelitian ini dilakukan dengan bilangan Reynolds sebesar 97.000 dan 136.000 dengan kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis *vertical axis wind turbine* yang mempunyai fungsi mengubah energi angin menjadi energi kinetik yang kemudian dapat diubah menjadi energi listrik. Turbin angin Savonius mempunyai dua sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade* dimana *advancing blade* mempunyai bentuk yang cekung dan *returning blade* berbentuk cembung. Karena turbin angin Savonius bekerja dengan prinsip drag, profil *advancing blade* lebih diutamakan di banding *returning blade* dimana koefisien drag *advancing blade* lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga gaya drag di sisi *advancing blade* lebih besar. Perbedaan nilai gaya drag ini menyebabkan adanya selisih besar torsi dimana semakin besar selisih besar torsi, daya turbin akan naik dan meningkatkan performa turbin. Selisih besarnya gaya drag ini dapat diatasi dengan cara menurunkan gaya drag pada sisi *returning blade* di turbin angin Savonius. Salah satu cara menurunkan drag pada sisi *returning blade* adalah dengan memberikan suatu penghalang yang diletakkan didepannya.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius dengan jumlah sudu sebanyak dua buah dan diletakkan pengganggu berupa silinder sirkular yang divariasikan diameter silinder penghalang dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D). Hipotesa sementara yang digunakan pada studi tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Silinder penghalang yang diletakkan di depan *returning blade* diduga dapat menyebabkan tekanan di antara silinder penghalang dan *returning blade* menurun sehingga perbedaan tekanan di depan dan di belakang *returning blade* juga menurun. Hal ini menyebabkan *pressure drag* pada *returning blade* menurun dan gaya drag pada *returning blade* juga akan menurun, sehingga didapatkan nilai torsi positif yang meningkat akibatnya daya yang dihasilkan juga akan meningkat.
2. Aliran yang melewati silinder pengganggu akan membentuk *wake* di bagian belakang silinder pengganggu. *Shear layer* yang

terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan *returning blade* dan akan mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga mempercepat perubahan aliran menjadi turbulen dan separasi terjadi lebih lambat. Dengan titik separasi pada *returning blade* yang mundur menyebabkan daerah *wake* yang terbentuk semakin sempit sehingga gaya drag pada *returning blade* menurun dan didapatkan nilai torsi positif yang tinggi sehingga daya yang dihasilkan juga akan meningkat.

3. Variasi ukuran diameter silinder penghalang diduga dapat mempengaruhi kinerja turbin angin Savonius, dimana apabila variasi diameter silinder penghalang terlalu kecil kurang efektif menurunkan tekanan didepan *returning blade* dan dalam menunda titik separasi, apabila variasi diameter silinder penghalang yang terlalu besar dapat menyebabkan terjadinya defleksi aliran dan menghalangi aliran *free stream* menuju *advancing blade* yang dapat mengakibatkan torsi positif menurun dan akan menurunkan daya, sehingga dibutuhkan variasi yang beragam dalam menentukan diameter silinder pengganggu yang paling efektif menurunkan tekanan didepan *returning blade* dan menunda separasi.

1.3 Batasan Masalah

Berikut ini adalah beberapa batasan masalah yang digunakan pada studi tugas akhir ini:

1. Analisa aliran adalah *external flow*.
2. Perpindahan panas yang terjadi antara komponen alat dengan sekitar diabaikan.
3. Analisa dilakukan dengan perbandingan jarak antara pusat turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius (S/D) sebesar 3,0.
4. Variasi perbandingan diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) yang digunakan adalah 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0.
5. Kecepatan angin yang digunakan adalah 5 m/s dan 7 m/s.

6. Aliran fluida yang mengalir adalah udara yang memiliki kondisi *steady state*, *incompressible flow* dan *uniform*.

1.4 Tujuan Penelitian

Studi eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh peningkatan performa turbin Savonius menggunakan variasi diameter silinder penghalang yang diletakkan didepan sudu *returning blade* dengan mengukur kecepatan putar poros turbin Savonius serta torsi statis dan torsi dinamisnya kemudian dilakukan perhitungan *Coefficient of Performance* (CoP) dan *Coefficient of Moment* (CM).

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya studi eksperimen ini, diharapkan dapat memberi referensi perancangan turbin angin Savonius sebagai pemanfaatan energi alternatif serta memberikan penjelasan tentang pengaruh silinder pengganggu yang di letakkan didepan sisi *returning blade* turbin angin Savonius serta rasio diameter silinder penghalang (d/D) yang optimum pada bilangan Reynolds tertentu guna meningkatkan performa turbin angin Savonius.

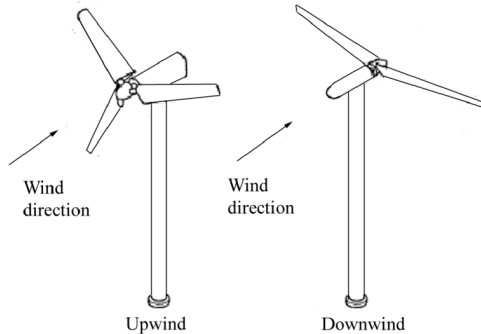
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

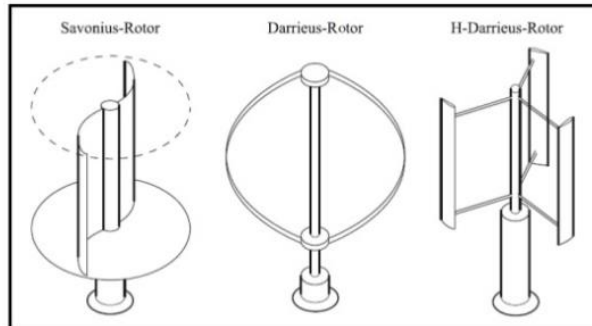
Turbin angin adalah perangkat yang bekerja dengan cara mengubah energi kinetik yang dihasilkan oleh angin yang menabrak *blade* turbin dan mengubahnya menjadi energi mekanik dimana poros generator akan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Turbin angin terdiri dari dua jenis, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (Al-Shimmeri, 2010).

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) mempunyai ciri sumbu putar turbin sejajar terhadap tanah. Turbin yang digunakan di *wind farm* untuk produksi tenaga listrik komersial biasanya menggunakan HAWT dengan 3 bilah yang diletakkan di atas *tower*. Desain ini mempunyai *noise* torsi rendah yang dapat diartikan mempunyai keandalan yang baik. HAWT terdiri dari dua tipe yaitu mesin *upwind* dan mesin *downwind* dimana mesin *upwind* rotornya berhadapan dengan angin sedangkan mesin *downwind* rotornya ditempatkan di belakang *tower*. Sebagian besar HAWT memiliki rotor *upwind*. Rotor *downwind* tidak membutuhkan mekanisme tambahan untuk menjaga agar angin tetap searah dengan rotor, meskipun dengan kelebihan ini rotor *upwind* lebih disukai karena fluktuasi beban yang dihasilkan dari angin saat bilah melewati bagian belakang *supporting tower* dapat merusak turbin. Gambar 2.1 menunjukkan ilustrasi HAWT tipe *upwind* dan *downwind*.



Gambar 2. 1 Ilustrasi *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) Tipe *Upwind* dan *Downwind* (Zhongzou Yang, 2013)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) memiliki poros rotor utama yang tersusun secara vertical terhadap tanah. Keuntungan dari instalasi ini adalah turbin tidak perlu diarahkan ke arah datangnya angin agar efektif sehingga menguntungkan untuk daerah yang arah anginnya bervariasi dan juga apabila turbin ini diintegrasikan ke suatu bangunan yang arah anginnya juga bervariasi. Selain itu, generator dan *gearbox* dapat ditempatkan di dekat tanah, menggunakan system *direct drive* dari rotor ke *gearbox* yang berada di dekat tanah sehingga akses perawatan lebih mudah. Namun, desain ini menghasilkan rata-rata energi lebih sedikit serta kecepatan rotasi yang relatif rendah dengan torsi yang lebih tinggi menyebabkan biaya yang lebih tinggi untuk *drive train* nya. Kekurangan lainnya adalah *power coefficient* yang dihasilkan rendah serta rotasi 360° *aerofoil* di setiap siklusnya menyebabkan besarnya beban dinamis pada sudu. Pemodelan aliran angin yang akurat sulit dilakukan sehingga proses analisa dan desain rotor yang baik perlu diperlukan sebelum membuat *prototype*. Gambar 2.2 menunjukkan ilustrasi beberapa jenis *vertical-axis wind turbine* (VAWT).

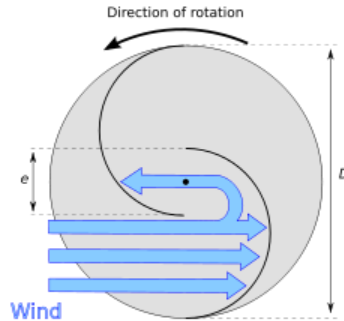


Gambar 2. 2 Ilustrasi Beberapa Jenis Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) (Idrees Farooq, 2017)

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis *vertical axis wind turbine* (VAWT) yang digunakan untuk mengubah gaya yang dihasilkan ketika aliran angin menyentuh sudu turbin dan menimbulkan gaya drag. Gaya drag ini akan memutar poros turbin dan menghasilkan energi mekanik yang kemudian menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Turbin Angin Savonius ditemukan oleh seorang insinyur asal Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922.

Turbin Savonius merupakan turbin yang sederhana. Secara aerodinamis, turbin ini bekerja dengan prinsip drag yang terdiri oleh dua atau tiga lengkungan *blade*. Pada rotor turbin dengan dua lengkungan *blade*, jika dilihat secara *cross-section* akan terlihat seperti huruf “S”. Bagian yang melengkung ke arah datangnya angin (*returning blade*) menerima gaya drag lebih kecil dibandingkan dengan bagian yang melengkung ke arah berlawanan datangnya angin (*advancing blade*). Adanya perbedaan besarnya gaya drag ini menyebabkan berputarnya turbin angin Savonius. Gambar 2.3 menunjukkan skema pergerakan rotasi turbin angin Savonius.



Gambar 2. 3 Ilustrasi Arah Rotasi Turbin Angin Savonius
(wikipedia, n.d.)

2.3 Gaya Drag

Ketika suatu benda dialiri aliran fluida *viscous* maka akan mengalami tekanan dan gaya geser pada permukaannya sehingga menghasilkan gaya-gaya aerodinamika seperti gaya drag dan gaya lift. Gaya drag merupakan komponen gaya yang bekerja pada benda sejajar horizontal dengan arah aliran sedangkan gaya lift bekerja pada benda secara vertikal terhadap arah aliran. Gaya drag dituangkan kedalam fungsi sebagai berikut:

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

dimana: F_D = Gaya drag (N)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

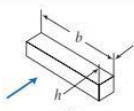




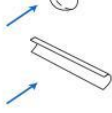

v = kecepatan fluida (m/s)

C_D = koefisien drag

A = luas bidang yang dikenai aliran fluida (m^2)

Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa gaya drag dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain densitas fluida, kecepatan fluida, luas permukaan bidang yang dikenai aliran fluida, serta koefisien drag dimana setiap benda mempunyai nilai yang berbeda antara yang satu dengan yang lain. Beberapa nilai koefisien drag dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Koefisien Drag Beberapa Geometri Benda (Fox, Pritchard, & McDonald, 2008)

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

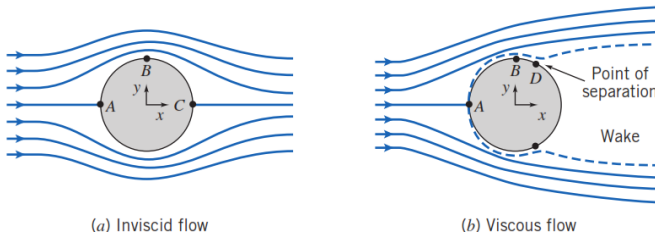
^aData from Hoerner [16].

^bBased on ring area.

2.4 Aliran Melewati Silinder

Aliran suatu fluida mengalir mengikuti bentuk permukaan benda yang dikenainya. Ketika geometri dari benda tersebut sederhana seperti silinder atau lingkaran maka, jejak yang dilalui fluida dapat di prediksi tetapi jika geometri benda yang kompleks seperti bangunan atau airfoil maka jejak yang dilalui fluida sulit di perkirakan. Aliran fluida dilihat dari pengaruh viskositasnya dapat dibedakan menjadi aliran *viscous* dan aliran *inviscid*. Aliran *viscous* adalah aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser aliran pada dinding saluran $\tau_{yx} \neq 0$, sedangkan aliran *inviscid* adalah aliran dimana viskositas fluida diasumsikan nol ($\mu=0$) sehingga tegangan geser tidak

berpengaruh ($\tau_{yx} = 0$). Ilustrasi aliran *viscous* dan aliran *inviscid* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Ilustrasi Kualitatif Aliran Incompressible Melewati Silinder (Fox et al., 2008)

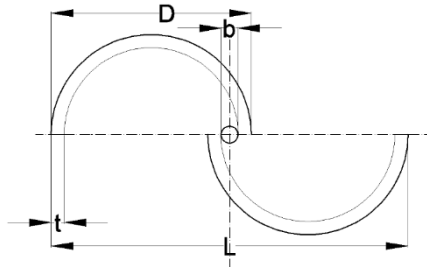
Gambar diatas menunjukkan aliran *viscous* pada suatu silinder. Titik A merupakan titik stagnasi dimana aliran fluida menyentuh silinder sehingga kecepatan diperlambat hingga nol dan bertekanan tinggi lalu terjadi *boundary layer*. Dari titik A ke B terjadi peningkatan kecepatan diiringi penurunan tekanan. Dari titik B ke D momentum yang digunakan untuk menggerakkan fluida sudah tidak mampu melawan tegangan geser dan tekanan balik (*adverse pressure gradient*) yang terjadi sehingga *boundary layer* terpisah dan menyebabkan separasi pada titik D. Daerah bertekanan rendah yang terbentuk akibat terpisahnya *boundary layer* ini disebut dengan *wake*.

2.5 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk memberikan karakteristik suatu aliran fluida. Osborne Reynolds adalah yang mengusulkan ide ini pada tahun 1883. Bilangan Reynolds merupakan rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Secara umum, rumus bilangan Reynolds adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya viskos}} = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.1)$$

Dimana: V = kecepatan fluida (m/s)
 L = panjang karakteristik (m)
 μ = viskositas absolut fluida (N.s/m²)
 ν = viskositas dinamis fluida ($\nu = \mu/\rho$)
 ρ = densitas fluida (kg/m³)



Gambar 2. 5 Skema Turbin Angin Savonius

Panjang karakteristik suatu geometri benda akan berbeda dengan benda yang lain. Gambar 2.5 menunjukkan skema turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini, dengan panjang karakteristik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$L = 2D - 2t - b \quad (2.2)$$

Dimana: D = diameter sudu turbin Savonius (m)
 b = diameter poros (m)
 t = tebal sudu turbin Savonius (m)

Nilai bilangan Reynolds pada dua plat datar adalah $Re < 5 \times 10^5$ untuk aliran laminar dan $Re > 5 \times 10^5$ untuk aliran turbulen dan pada silinder $Re < 3 \times 10^5$ untuk aliran laminar dan $Re > 3 \times 10^5$ untuk aliran turbulen.

2.6 Coefficient of Power (CoP)

Coefficient of Power (CoP) adalah perhitungan yang menentukan besarnya performa turbin angin dimana CoP merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya yang diberikan oleh angin berupa gaya drag. Nilai CoP berbanding lurus dengan performa turbin angin sehingga

semakin besar nilai CoP maka semakin tinggi daya yang dihasilkan oleh turbin. Persamaan CoP adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \quad (2.3)$$

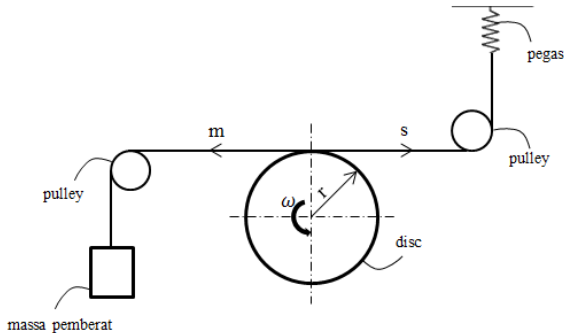
Daya aktual turbin (P_T) dihitung berdasarkan torsi dinamis dan putaran turbin yang diukur dengan menggunakan *brake dynamometer*. Hasil pengukuran yang terbaca dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$P_T = \tau \omega \quad (2.4)$$

dimana: P_T = daya actual pada turbin (Watt)

τ = torsi dinamis turbin yang diukur dengan *brake dynamometer* (N-m)

ω = putaran turbin angin Savonius (rad/s)



Gambar 2. 6 Skema Free-Body Diagram Brake Dynamometer
(Daffa & Yuwono, 2019)

Berdasarkan Gambar 2.6, nilai torsi dimanis dari turbin angin Savonius diperoleh dari persamaan:

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

dimana : s = massa yang terbaca pada pegas (kg)

m = massa beban (kg)

g = gravitasi (m/s^2)

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

Daya yang dihasilkan oleh angin (P_w) adalah besarnya energi kinetic yang dibawa terhadap waktu, sehingga daya yang dihasilkan oleh angin yaitu:

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

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

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

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu:

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{m'}{t} \\ \dot{m} &= \rho \cdot U \cdot A \end{aligned} \quad (2.8)$$

Maka persamaan daya yang dihasilkan oleh udara menjadi:

$$\begin{aligned} P_w &= \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot U^2 \\ P_w &= \frac{1}{2} (\rho \cdot U \cdot A) U^2 \\ P_w &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \end{aligned} \quad (2.9)$$

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

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

$$CoP = \frac{\{(s - m)g\}.r.\pi.n}{15.\rho.A.U^3} \quad (2.10)$$

dimana :

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

2.7 Coefficient of Moment (CM)

Coefficient of Moment (CM) adalah perbandingan antara torsi yang dihasilkan dari turbin dengan torsi dari hasil perhitungan torsi teoritis. Torsi dari turbin adalah hasil pembacaan dari pengukuran torsi statis. Untuk torsi teoritis dapat didapatkan dari persamaan:

$$T_\infty = 1/2 \rho A v^2 R \quad (2.11)$$

- dimana : T_∞ = torsi teoritis (N.m)
 ρ = densitas fluida (Kg/m^3)
 v = kecepatan fluida (m/s)
 R = jari-jari rotor Savonius (m)

Untuk persamaan *coefficient of moment* adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R} \quad (2.12)$$

- dimana : T_D = hasil perhitungan torsi dinamis (N.m)
 C_M = *coefficient of moment*

2.8 Tip Speed Ratio (λ)

Tip Speed Ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan putar poros terhadap kecepatan angin. *Tip Speed Ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

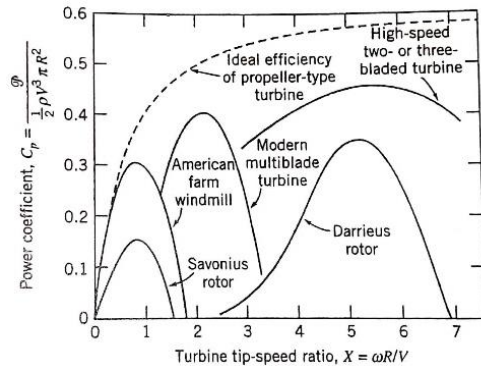
$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2.13)$$

dimana: $\lambda = \text{tip speed ratio}$

$\omega = \text{kecepatan sudut turbin (rad/s)}$

$R = \text{jari-jari turbin (m)}$

$U = \text{kecepatan angin (m/s)}$



Gambar 2. 7 Grafik Hubungan Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Berbagai Jenis Turbin Angin (Fox et al., 2008)

Gambar 2.7 menunjukkan hubungan antara *Coefficient of Power* (CoP) dengan *Tip Speed Ratio* dari berbagai jenis turbin angin. Pada grafik dapat dilihat bahwa semakin tinggi TSR, CoP akan meningkat hingga titik optimumnya kemudian nilai CoP turun seiring dengan meningkatnya nilai TSR.

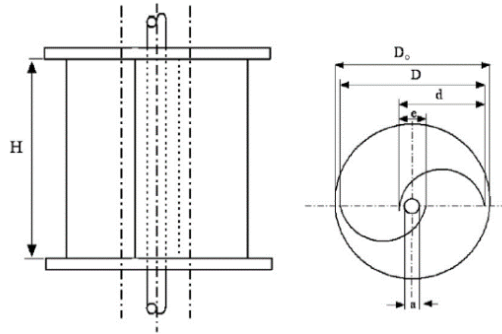
Aturan Betz menyatakan bahwa CoP maksimal yang dapat dihasilkan oleh turbin angin adalah 0,593. Masing-masing turbin angin mempunyai titik kerja awal yang berbeda. Apabila titik kerja awal suatu turbin terletak pada TSR yang rendah, artinya turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah.

2.9 Penelitian Terdahulu

Untuk memudahkan penelitian yang dilakukan dibutuhkan beberapa referensi dari peneliti terdahulu yang sudah melakukan studi tentang turbin angin Savonius. Berikut adalah beberapa penelitian mengenai turbin angin Savonius.

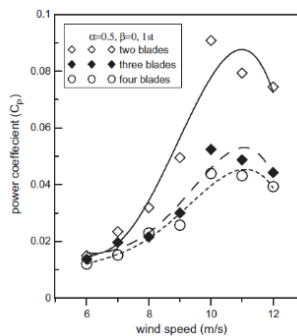
2.9.1 Studi Eksperimen Modifikasi Geometri Rotor Turbin Angin Savonius

Studi eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud et al. (2012)** dilakukan dengan memvariasikan geometri untuk menentukan parameter yang paling efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Gambar 2.8 menunjukkan skema geometri turbin Savonius yang digunakan pada studi eksperimen ini. Parameter geometri yang divariasikan antara lain jumlah *blade*, jumlah *stage*, *overlap ratio*, *aspect ratio* dan keberadaan *endplate* yang diletakkan di ujung belakang *wind tunnel*. Variasi geometri yang digunakan adalah dengan 2 *blades* (2b), 3 *blades* (3b), dan 4 *blades* (4b), *single stage* (1st), *double stages* (2st), *overlap ratio* (β) = 0; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35 serta *aspect ratio* (α) = 0,5; 1; 2; 4; 5, dan juga keberadaan *endplate*. Turbin Savonius diletakkan di penyangga yang terbuat dari besi dan digunakan *ball bearing* (SKF) di kedua ujung poros untuk menyangga turbin. *Blade* turbin Savonius dibuat menggunakan bahan pipa PVC dengan diameter 0,3; 0,2; 0,1; dan 0,08 m. *Endplate* dibuat menggunakan bahan kayu ringan yang dibentuk plat dengan ketebalan 2,5 mm berdiameter 10% lebih besar dari diameter turbin. Ukuran poros yang digunakan adalah 14 mm dengan panjang 62 cm.



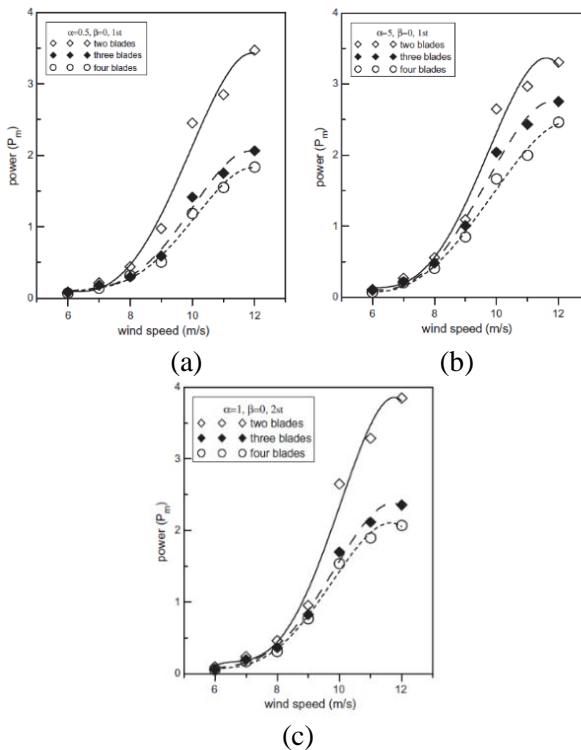
Gambar 2. 8 Skema Turbin Angin Savonius Tampak Depan dan Tampak Samping (Mahmoud et al., 2012)

Pada penelitian ini didapatkan hubungan antara *power coefficient* dan kecepatan angin terhadap banyaknya *blade* dengan *aspect ratio* 0,5, *overlap ratio* 0 dan menggunakan *single stage*. Hasil yang didapatkan adalah rotor yang menggunakan dua buah *blade* mempunyai *power coefficient* yang paling tinggi dibandingkan dengan rotor yang menggunakan tiga dan empat *blade*, selain itu *power coefficient* tertinggi terdapat pada kecepatan 10 m/s seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Hal ini kemungkinan disebabkan karena gaya hambat yang terjadi pada rotor dengan dua buah *blade* lebih besar dibandingkan dengan rotor dengan tiga dan empat *blade*.



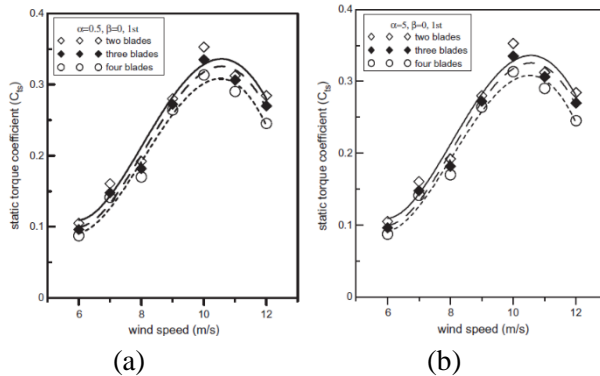
Gambar 2. 9 Grafik *Power Coefficient* Terhadap Jumlah *Blades* Pada Turbin Angin Savonius (Mahmoud et al., 2012)

Pada penelitian ini juga didapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi jumlah *blades* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar 2.10 dapat dilihat bahwa turbin dengan dua *blades* mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan rotor yang mempunyai tiga dan empat *blades* untuk semua *aspect ratio* baik pada *single stage* maupun pada *double stage*.



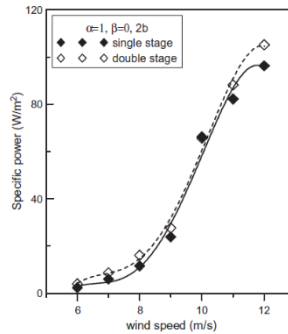
Gambar 2. 10 Grafik *Mechanical Power* Pada Turbin Savonius dengan Variasi Jumlah *Blades* dengan (a) *aspect ratio* = 0,5 *single stage*, (b) *aspect ratio* = 5 *single stage*, dan (c) *aspect ratio* = 0,5 *double stages* (Mahmoud et al., 2012)

Untuk memvalidasi hasil dari grafik yang sebelumnya, dilakukan pengukuran torsi statis untuk setiap variasi geometris rotor turbin Savonius pada kecepatan angin yang berbeda. Torsi statis di definisikan sebagai besarnya torsi yang terjadi pada rotor turbin hingga rotasinya berhenti. Gambar 2.11 menunjukkan hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin untuk variasi jumlah *blade* pada *aspect ratio* 0,5 dan 5. Dari grafik terlihat bahwa torsi statis pada rotor dengan dua *blade* melebihi torsi statis pada rotor dengan tiga dan empat *blade* dimana hal ini membuktikan bahwa rotor dengan dua *blade* memberikan daya yang lebih besar.



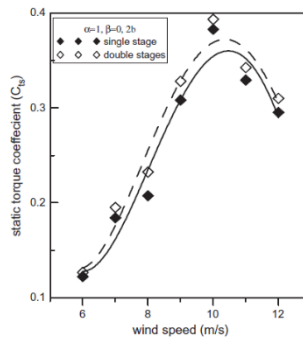
Gambar 2. 11 Hubungan Antara Koefisien Torsi Statis dan Kecepatan Angin di Turbin Savonius dengan Variasi Jumlah *Blades* pada (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5 (Mahmoud et al., 2012)

Penelitian ini juga mendapatkan hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Gambar 2.12 menunjukkan bahwa nilai *specific power* pada turbin Savonius *double stages* lebih besar dibandingkan dengan pada turbin Savonius *single stage* dengan nilai *specific power* tertinggi didapatkan pada kecepatan angin 12 m/s.



Gambar 2. 12 Hubungan Antara *Specific Power* dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius *Single Stage* dan *Double Stages* (Mahmoud et al., 2012)

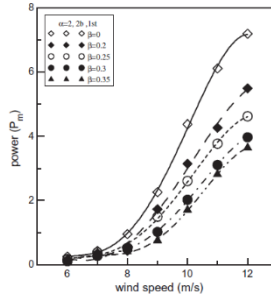
Untuk memvalidasi hasil dari grafik sebelumnya, dilakukan pengukuran torsi statis pada turbin Savonius dengan *single* dan *double stages*. Gambar 2.13 menunjukkan bahwa rotor dengan *double stages* mempunyai nilai torsi statis dan koefisien torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan rotor *single stage*.



Gambar 2. 13 Hubungan Antara Torsi Statis dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius *Single Stage* dan *Double Stages* (Mahmoud et al., 2012)

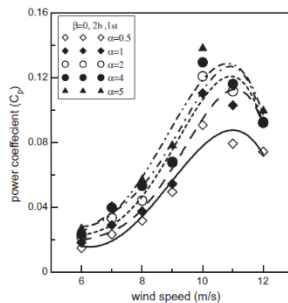
Penelitian ini juga mendapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius

dengan variasi *overlap ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada Gambar 2.14 dapat dilihat bahwa nilai rotor yang tidak memiliki *overlap ratio* mempunyai *mechanical power* yang paling tinggi dibandingkan dengan rotor yang mempunyai *overlap ratio*.



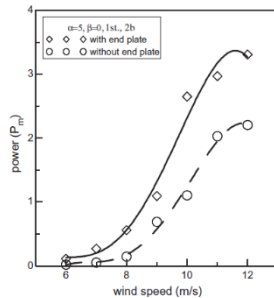
Gambar 2. 14 Hubungan Antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi *Overlap Ratio* (Mahmoud et al., 2012)

Penelitian ini juga mendapatkan hubungan antara *coefficient of power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi *aspect ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada Gambar 2.15 dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya *aspect ratio* semakin meningkat juga *coefficient of power*.



Gambar 2. 15 Hubungan Antara *Coefficient of Power* dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi *Aspect Ratio* (Mahmoud et al., 2012)

Penelitian ini juga mendapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan variasi keberadaan *endplate* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada Gambar 2.16 dapat dilihat bahwa rotor dengan adanya *endplate* mempunyai *mechanical power* yang lebih tinggi dibandingkan dengan rotor yang tidak menggunakan *endplate*. Hal ini disebabkan karena keberadaan *endplate* meningkatkan jumlah udara yang mengenai *blade* turbin Savonius.

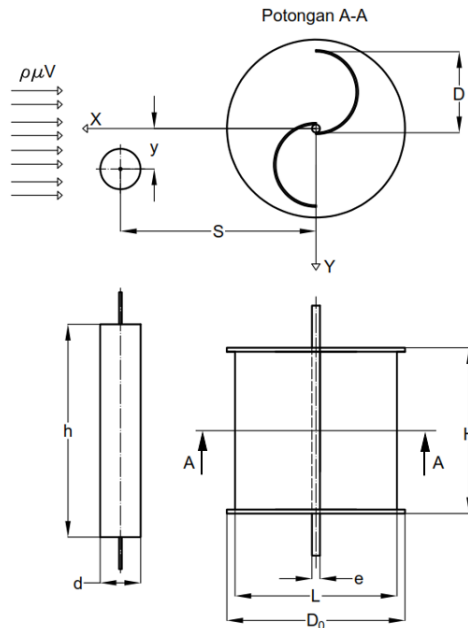


Gambar 2. 16 Hubungan Antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin Pada Turbin Savonius Dengan Variasi Keberadaan *Endplate* (Mahmoud et al., 2012)

2.9.2 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius, Studi Kasus Variasi $y/D = 0,0; 0,25; \text{ dan } 0,5$

Studi eksperimen yang dilakukan oleh **Jasmi Aprilia (2018)** ini dilakukan sebagai upaya meningkatkan performa turbin angin Savonius menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan didepan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua buah sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2mm, tinggi (H) sebesar 294,4mm, diameter poros (e) sebesar 19mm dan diameter *endplate* (D_0) sebesar 321mm dengan silinder pengganggu berdiameter (d) sebesar 88,8mm dan tinggi (h) sebesar 500mm yang diletakkan didepan *returning blade*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jarak S/D sebesar 2,0 dengan variasi bilangan

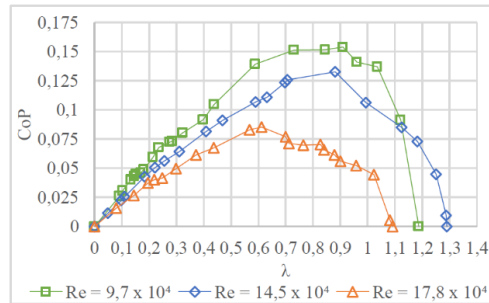
Reynolds = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; dan $17,8 \times 10^4$, dan variasi $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$. Penelitian ini dilakukan pada area terbuka dengan sumber angin yang dihembuskan oleh *axial fan*. Beberapa alat ukur yang digunakan antara lain anemometer untuk mengukur kecepatan angin, tachometer untuk mengukur putaran poros, *torque meter* untuk mengukur torsi statis dan *brake dynamometer* untuk mengukur torsi dinamis. Dari kecepatan sudut dan torsi dinamis akan diperoleh daya aktual dari turbin angin Savonius. Gambar 2.18 menunjukkan skema penelitian dan dimensi alat yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. 17 Skema Turbin Angin Savonius Dengan Peletakan Silinder Penghalang di Depan Returning Blade (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari penelitian ini, dilakukan analisa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan juga dengan menggunakan silinder pengganggu dimana analisa performa turbin

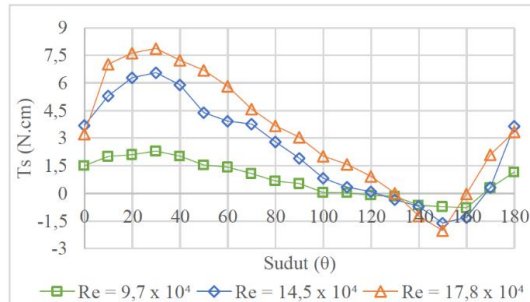
angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini menggunakan kecepatan angin masuk yaitu 5,01 m/s; 7,5 m/s dan 9,2 m/s sesuai dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$.



Gambar 2. 18 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ tanpa menggunakan silinder pengganggu seperti yang terlihat pada gambar 2.18. Nilai maksimal CoP pada $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 0,1539 pada $\lambda = 0,91$; pada $Re = 14,5 \times 10^4$ sebesar 0,1328 pada $\lambda = 0,881$ dan pada $Re = 17,8 \times 10^4$ sebesar 0,0853 pada $\lambda = 0,612$. Pada *trendline* nilai CoP maksimal tertinggi pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan nilai CoP maksimal terendah pada $Re = 17,8 \times 10^4$. Semakin meningkatnya bilangan Reynolds maka semakin menurun nilai CoP yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$, peningkatan torsi dinamis diiringi nilai putaran turbin dan kecepatan angin yang tidak besar mengakibatkan daya *output* yang dihasilkan oleh turbin meningkat sehingga nilai CoP pada turbin angin Savonius mengalami peningkatan, namun pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ peningkatan kecepatan aliran fluida dan nilai putaran turbin tidak diiringi dengan torsi dinamis yang signifikan dari turbin angin Savonius, sehingga daya *output* turbin angin Savonius menurun. Pada $Re = 17,8 \times 10^4$ putaran yang terjadi

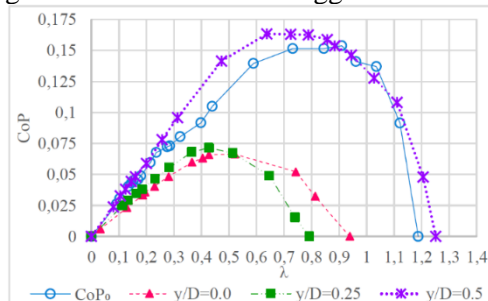
sangat cepat sehingga turbin dapat membentuk silinder sirkular, sehingga selisih gaya *drag* menurun dan mengakibatkan daya *output* menurun. Dari perbandingan daya teoritis yang meningkat dengan daya *output* yang menurun, menghasilkan nilai CoP yang menurun.



Gambar 2. 19 Grafik Torsi Statis Turbin Tanpa Silinder Pengganggu (TS_0) sebagai Fungsi Sudut (θ) (Aprilia & Yuwono, 2018)

Didapat juga data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ) dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ tanpa menggunakan silinder pengganggu seperti yang terlihat pada gambar 2.19. Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ torsi statis mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° , kemudian mengalami penurunan hingga sudut 160° pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan pada $Re = 14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ penurunan hingga sudut 150° , lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ torsi statis maximum sebesar 2,3 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -0,78 Ncm di sudut 160° . Pada $Re = 14,5 \times 10^4$ torsi statis maximum sebesar 6,56 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -1,61 Ncm di sudut 150° . Pada $Re = 17,8 \times 10^4$ torsi statis maximum sebesar 7,88 Ncm di sudut 30° dan torsi statis minimum sebesar -2,03 Ncm di sudut 150° . Torsi statis tertinggi dan terendah pada $Re = 17,8 \times 10^4$, karena semakin besar bilangan Reynolds, semakin besar kecepatan dan gaya *drag*. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*, sehingga turbin angin Savonius

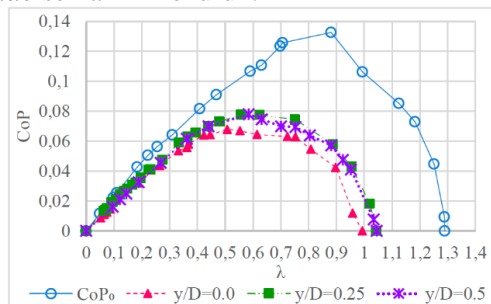
membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin berputar. Torsi statis negatif pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ saat sudut 120° hingga 160° ; bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$ saat sudut 130° hingga 160° dan bilangan Reynolds $17,8 \times 10^4$ saat sudut 140° hingga 160° . Penurunan nilai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



Gambar 2. 20 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoPo) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio(λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0$; $0,25$; dan $0,5$. Pengukuran *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan

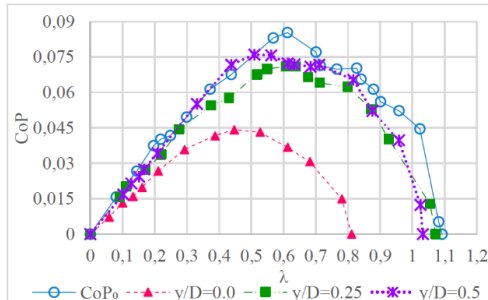
dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$ seperti yang terlihat pada gambar 2.20. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebesar 0,1539 di $\lambda = 0,91$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar 0,0665 di $\lambda = 0,521$; pada $y/D = 0,25$ sebesar 0,0715 di $\lambda = 0,428$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar 0,1634 di $\lambda = 0,637$. Pada *trendline* nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin dengan silinder pengganggu $y/D = 0,5$ dan nilai CoP maksimal terendah pada $y/D = 0,0$. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dengan peletakan silinder pengganggu dengan $y/D = 0,5$ efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen. Penambahan silinder pengganggu juga diduga efektif menyebabkan penurunan tekanan didepan *returning blade* dan juga efektif mengarahkan aliran menuju *advancing blade* sehingga gaya drag pada *advancing blade* meningkat. Penambahan silinder pengganggu $y/D = 0,25$ dan $0,0$ tidak efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* karena semakin menghalangi aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya drag pada *advancing blade* semakin menurun.



Gambar 2. 21 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0$; $0,25$; dan $0,5$. Pengukuran

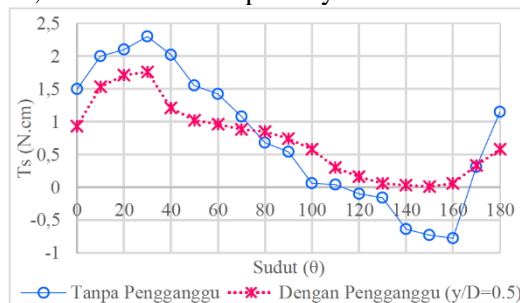
coefficient of power (CoP) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $14,5 \times 10^4$ seperti yang terlihat pada gambar 2.21. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebesar 0,1328 di $\lambda = 0,881$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar 0,0679 di $\lambda = 0,507$; pada $y/D = 0,25$ sebesar 0,0776 di $\lambda = 0,558$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar 0,0779 di $\lambda = 0,584$. Pada *trendline* dapat dilihat bahwa nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin tanpa silinder pengganggu dan nilai CoP maksimal terendah turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D = 0,0$. *Trendline* CoP tanpa silinder pengganggu nilainya lebih tinggi dari pada nilai CoP dengan silinder pengganggu di semua posisi y/D , sehingga penambahan silinder pengganggu di *returning blade* tidak efektif pada $Re = 14,5 \times 10^4$ di semua posisi y/D . Nilai maksimal CoP di $y/D = 0,5$ lebih tinggi daripada di $y/D = 0,25$ dan 0,0 serta nilai maksimal CoP di $y/D = 0,25$ lebih tinggi daripada di $y/D = 0,0$.



Gambar 2. 22 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin dengan Silinder Pengganggu (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan menggunakan variasi posisi $y/D = 0,0$; 0,25; dan 0,5. Pengukuran *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius dengan

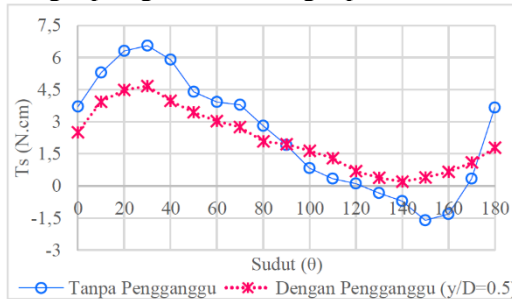
menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds sebesar $14,5 \times 10^4$ seperti yang terlihat pada gambar 2.22. Nilai maksimal CoP tanpa silinder pengganggu (CoP0) sebesar 0,0853 di $\lambda = 0,612$. Nilai maksimal CoP dengan silinder pengganggu (CoP) pada $y/D = 0,0$ sebesar 0,0443 di $\lambda = 0,447$; pada $y/D = 0,25$ sebesar 0,071 di $\lambda = 0,607$ dan pada $y/D = 0,5$ sebesar 0,076 di $\lambda = 0,509$. Nilai CoP maksimal tertinggi pada turbin tanpa silinder pengganggu dan nilai CoP maksimal terendah turbin dengan silinder pengganggu yang diletakkan pada $y/D = 0,0$. *Trendline* CoP tanpa silinder pengganggu nilainya lebih tinggi dari nilai CoP dengan silinder pengganggu di semua posisi y/D , sehingga penambahan silinder pengganggu di *returning blade* tidak efektif pada $Re = 17,8 \times 10^4$ di semua posisi y/D .



Gambar 2. 23 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 9,7 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ seperti yang terlihat pada gambar 2.23. Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 1,76 Ncm,

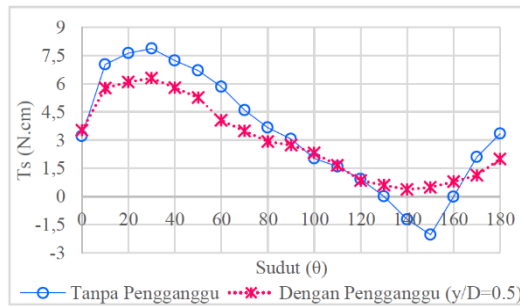
kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar 0,01 Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.



Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 14,5 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$. Pada gambar 2.26 dapat dilihat *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Pada *trendline* torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 6,56 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar -1,61 Ncm lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 4,67 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 140° dengan nilai torsi minimal sebesar 0,2 Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Torsi statis maksimal tertinggi dan torsi statis

minimal terendah saat turbin tidak menggunakan silinder pengganggu. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*, sehingga turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin berputar. Torsi statis negatif juga terjadi pada T_{s0} saat sudut 130° hingga 160° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.



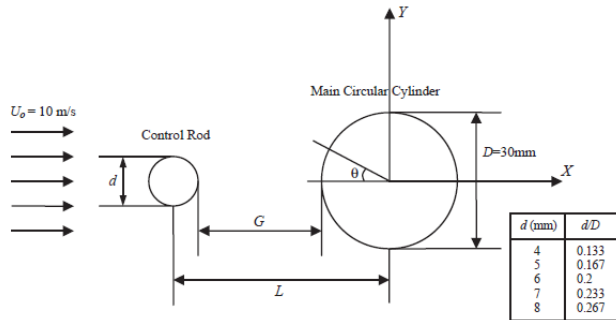
Gambar 2. 25 Grafik Perbandingan Torsi Statis Turbin dengan Silinder Pengganggu (T_s) dan Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) sebagai Fungsi Sudut (θ) $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $Re = 17,8 \times 10^4$ (Aprilia & Yuwono, 2018)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data nilai torsi statis (T_s) terhadap sudut (θ). Pengukuran torsi statis (T_s) turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu $d/D = 0,5$, yang diletakkan dengan posisi $y/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 2,0$ dan menggunakan bilangan Reynolds $17,8 \times 10^4$ seperti yang terlihat pada gambar 2.25. Pada *trendline* torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 7,88 Ncm, kemudian mengalami penurunan hingga sudut 150° dengan nilai torsi minimal sebesar -2,03 Ncm lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 6,3 Ncm, kemudian mengalami penurunan

hingga sudut 140° dengan nilai torsi minimal sebesar 0,37 Ncm, lalu mengalami peningkatan hingga sudut 180° . Torsi statis maksimal tertinggi dan torsi statis minimal terendah saat turbin tidak menggunakan silinder pengganggu. Terdapat nilai torsi statis negatif menandakan *no-self starting*. Torsi statis negatif juga terjadi pada T_{s0} saat sudut 140° hingga 160° . Pada *trendline* torsi statis dengan silinder pengganggu tidak terdapat nilai torsi negatif, sehingga kemampuan *self-starting* turbin Savonius baik dengan nilai yang positif dan mampu menangkap angin dari berbagai posisi.

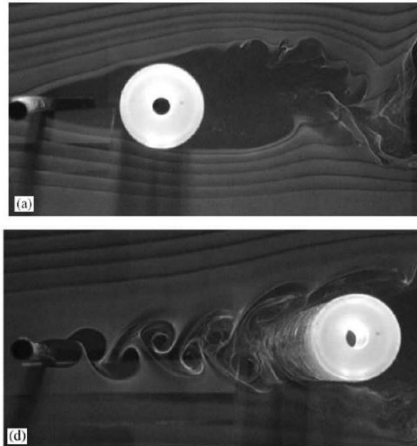
2.9.3 Studi Pengaruh Penempatan Silinder Pengganggu Didepan Silinder Sirkular Utama Terhadap Pengurangan Drag

Penelitian yang dilakukan oleh **Lee et al. (2004)** dilakukan secara eksperimen dengan meletakkan silinder pengganggu pada sisi *upstream* dari silinder sirkular. Eksperimen ini dilakukan pada *subsonic wind tunnel* dengan kecepatan *freestream* (U_0) sebesar 10 m/s dengan bilangan Reynolds sebesar 20.000. Diameter silinder utama (D) yaitu sebesar 30 mm dengan akrilik sebagai materialnya sedangkan silinder pengganggu menggunakan material *stainless steel* dengan variasi diameter (d) silinder pengganggu sebesar 4 mm sampai dengan 8 mm dengan interval 1 mm ($d/D = 0,133-0,267$). Jarak antara silinder utama dengan silinder pengganggu (L) di variasikan sebesar 45 mm; 50 mm; 55 mm; 60 mm; 62,5 mm; 65 mm; 70 mm; 90 mm; 105 mm; dan 120 mm ($L/D = 1,5-4,0$). Skema dari eksperimen yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 2.26 dibawah ini.

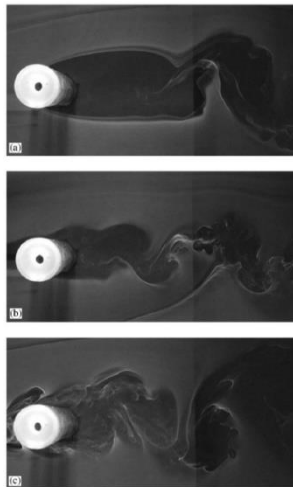


Gambar 2. 26 Skema Eksperimen dan Sumbu Koordinat (Lee et al., 2004)

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini salah satunya adalah visualisasi aliran dengan menggunakan metode *smoke-wire*, namun filamen asap akan menghilang untuk pembacaan pada bilangan Reynolds diatas 6000 sehingga digunakan kecepatan *freestream* sebesar 2 m/s ($Re = 4000$) untuk mendapatkan hasil visual yang baik. Visualisasi aliran yang terjadi antara silinder utama dengan silinder pengganggu dapat dilihat pada gambar 2.27 dimana d/D yang digunakan adalah 0,233 pada jarak $L/D = 2,0$ (a) dan 3,0 (d). Untuk visualisasi aliran yang terjadi dibelakang silinder utama dapat dilihat pada gambar 2.28, dimana d/D yang digunakan adalah 0,233 dengan dan tanpa silinder pengganggu dan peletakan silinder pengganggu (L/D) sebesar 2,0 (b) dan 3,0 (c).

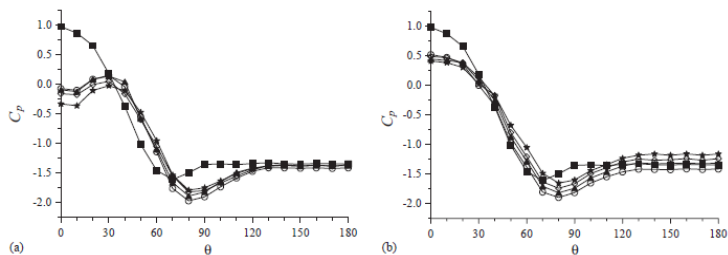


Gambar 2. 27 Visualisasi Aliran Antara Silinder Utama Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak ($L/D = 2,0$ (a) dan $3,0$ (d)) (Lee et al., 2004)



Gambar 2. 28 Visualisasi Aliran Dibelakang Silinder Utama Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (Lee et al., 2004)

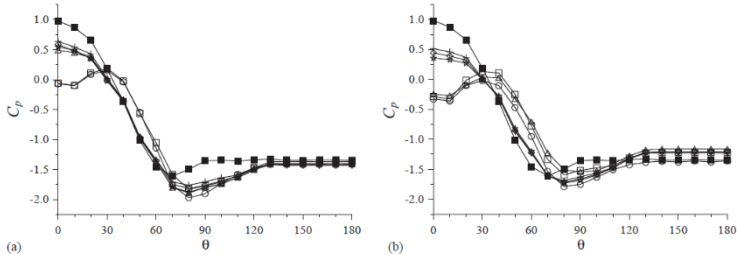
Hasil lain yang didapatkan adalah distribusi tekanan pada silinder utama seperti yang terlihat dari gambar 2.29, dimana pada gambar 2.29 (a) dapat dilihat bahwa tekanan pada daerah stagnasi silinder utama berkurang signifikan. Penggunaan silinder pengganggu efektif menurunkan *drag* akibat dari turunnya tekanan pada silinder utama dibandingkan dengan tanpa adanya silinder pengganggu. Semakin besar diameter silinder pengganggu, *pressure coefficient* (C_p) semakin menurun pada sisi depan permukaan silinder utama. Peletakan silinder pengganggu yang semakin jauh tekanan naik kembali pada bagian samping dan belakang permukaan silinder utama. Variasi diameter silinder pengganggu dan peletakkannya menyebabkan titik separasi aliran mundur dari 70° ke 80° dibandingkan dengan sistem yang tidak diberikan silinder penghalang. Pada gambar 2.29 (b) distribusi tekanan pada silinder utama serupa dengan yang terjadi pada gambar 2.29 (a). Untuk diameter silinder pengganggu yang semakin besar, tekanan pada bagian bawah silinder utama lebih tinggi dibandingkan pada silinder pengganggu yang disebabkan oleh tertundanya titik separasi akibat diletakkannya silinder pengganggu. Penambahan silinder pengganggu dapat memperlambat gaya tekanan yang terjadi pada silinder utama.



Gambar 2. 29 Pengaruh Diameter Silinder Pengganggu Terhadap Distribusi Tekanan (a) $L/D = 1,5$ dan (b) $L/D = 2,17$ (Lee et al., 2004)

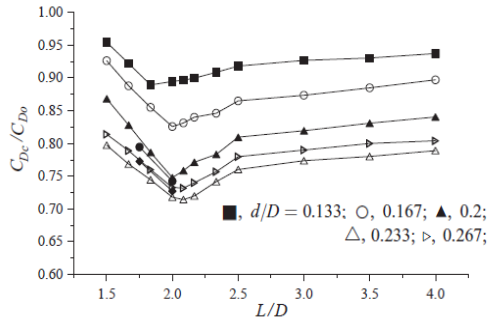
Pada gambar 2.30 dapat dilihat hasil berupa pengaruh jarak penempatan silinder pengganggu terhadap distribusi tekanan pada

diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,133 dan 0,233. Semakin jauh penempatan silinder pengganggu, tekanan pada daerah stagnasi meningkat terlepas dari besarnya diameter silinder pengganggu yang digunakan.

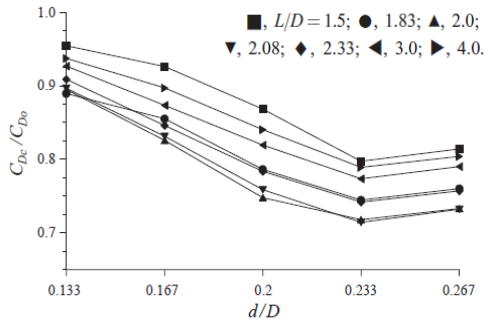


Gambar 2. 30 Pengaruh Jarak Penempatan Silinder Pengganggu Terhadap Distribusi Tekanan (a) $d/D = 0,133$ dan (b) $d/D = 0,233$ (Lee et al., 2004)

Selain itu didapatkan hasil berupa grafik antara pengaruh diameter silinder pengganggu dan peletakan silinder pengganggu terhadap pengurangan drag pada silinder utama. Pada gambar 2.31 ditunjukkan pengaruh diameter silinder pengganggu terhadap *drag* untuk variasi jarak penempatan silinder pengganggu. Pada setiap sistem yang diuji, drag yang terjadi pada silinder utama berkurang dengan adanya silinder pengganggu pada sisi *upstream*. Semakin meningkatnya diameter silinder pengganggu, koefisien *drag* semakin menurun. Silinder utama menunjukkan penurunan *drag* maksimal sekitar 29% untuk diameter silinder pengganggu 0,233 dengan penempatan $L/D = 2,083$ dibandingkan dengan tidak diletakkannya silinder pengganggu. Penambahan diameter silinder pengganggu lebih dari 0,233 menurunkan pengurangan *drag*. Pada gambar 2.32 ditunjukkan bahwa untuk seluruh diameter silinder pengganggu, koefisien *drag* menurun hingga nilai minimal pada L/D kecil dan naik kembali seiring dengan meningkatnya L/D .



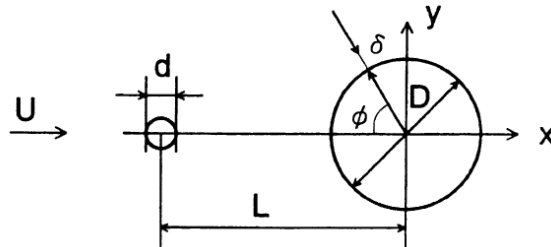
Gambar 2. 31 Pengaruh Diameter Silinder Pengganggu Terhadap Pengurangan Drag Pada Silinder Utama (Lee et al., 2004)



Gambar 2. 32 Pengaruh Jarak Peletakan Silinder Pengganggu Terhadap Pengurangan Drag Pada Silinder Utama (Lee et al., 2004)

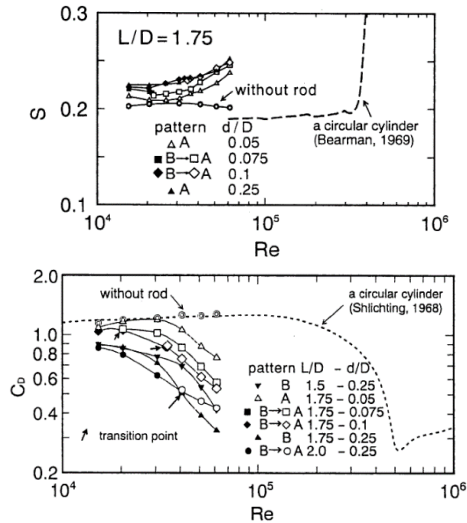
Penelitian lain yang membahas tentang aliran fluida pada suatu silinder yang diberi penghalang berupa silinder lain juga dilakukan oleh **Tsutsui & Igarashi (2002)**. Penelitian ini memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu (d/D), dan bilangan Reynolds antara $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$. Ukuran silinder utama yang digunakan yaitu sebesar 40 mm dengan perubahan diameter silinder pengganggu dari 1 mm sampai dengan 10 mm dan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan silinder utama menggunakan variasi dari 50

mm sampai dengan 120 mm. Skema geometri pengujian dapat dilihat pada gambar 2.33 dibawah ini.



Gambar 2. 33 Skema Geometri Pengujian (Tsutsui & Igarashi, 2002)

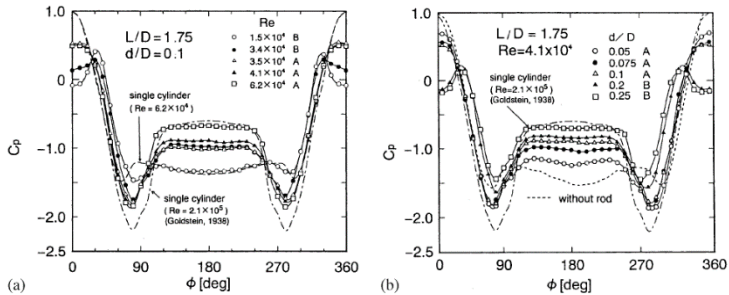
Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa penurunan koefisien *drag* (C_D) dan peningkatan bilangan Strouhal disebabkan oleh meningkatnya bilangan Reynolds serta peningkatan d/D dan penurunan nilai L/D . Mulai dari bilangan Reynolds 3×10^4 dan penambahannya, titik separasi bergeser semakin cepat dan tebal *shear layer* berkurang, sehingga bilangan Strouhal meningkat dan mengakibatkan daerah *wake* menyempit serta koefisien *drag* menurun. Hubungan bilangan Strouhal dan koefisien drag terhadap bilangan Reynolds dapat dilihat pada gambar 2.34 dibawah ini.



Gambar 2. 34 Grafik Bilangan Strouhal dan Koefisien Drag Terhadap Bilangan Reynolds (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Untuk mengetahui pengaruh variasi bilangan Reynolds, diameter silinder pengganggu (d/D) dan jarak penempatan silinder pengganggu (L/D) terhadap koefisien drag (C_D) dilakukan percobaan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada $L/D = 1,75$ dan $d/D = 0,1$ dengan dua pola aliran yaitu pola A dan B, dimana pola A terdapat *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu dan pola B tidak terdapat *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.37. Pada gambar 2.35 (a) didapatkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu C_p di bagian depan silinder utama menurun. Pada pola aliran A, C_p menurun menjadi 0,5 sedangkan pada pola aliran B, C_p menjadi negatif di bagian depan silinder utama sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi peningkatan bilangan Reynolds maka semakin menyempit *wake* yang terbentuk dibelakang silinder utama. Pada gambar 2.35 (b) percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder utama yang dilakukan pada $L/D = 1,75$ dan $Re =$

$4,1 \times 10^4$. Dari grafik dapat dilihat bahwa dengan variasi diameter silinder pengganggu yang semakin besar, C_p di bagian depan silinder utama menurun, sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan variasi penambahan silinder pengganggu yang semakin besar, *wake* yang terbentuk di belakang silinder utama semakin menyempit.

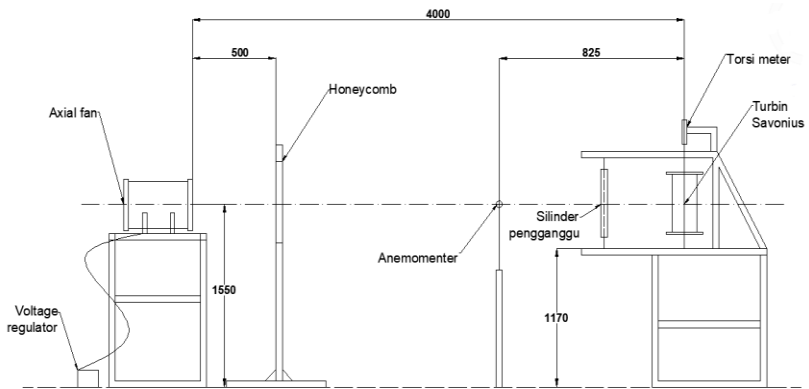


Gambar 2. 35 Grafik Distribusi Sekitar Silinder Sirkular Utama dengan (a) Pengaruh Bilangan Reynolds dan (b) Pengaruh d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002)

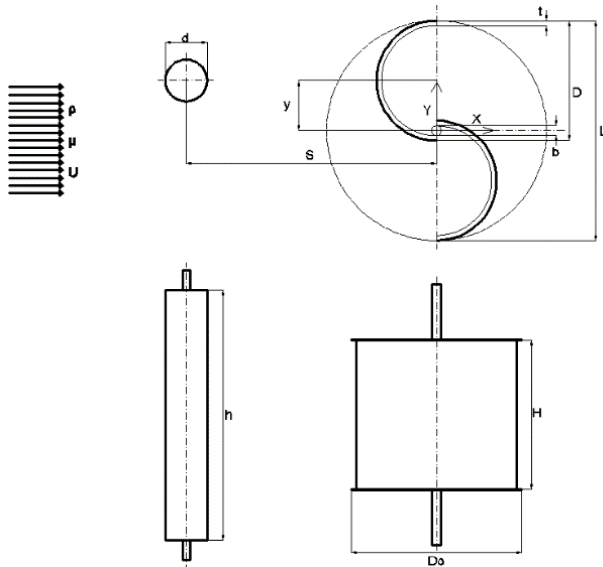
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Setting Eksperimen

Dibawah ini dapat dilihat skema penelitian dan juga parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini. Analisa ini dilakukan untuk mengetahui apakah suatu parameter berpengaruh terhadap penelitian yang dilakukan atau tidak. Beberapa parameter yang mempengaruhi penelitian kali ini antara lain densitas udara (ρ), kecepatan fluida (v), viskositas udara (μ), letak penghalang terhadap returning blade (S/D), diameter penghalang (d) dan diameter turbin (D). Gambar 3.1 dan gambar 3.2 dibawah ini menunjukkan skema dari penelitian serta parameter ukur yang akan digunakan.



Gambar 3. 1 Skema Penelitian



Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur

Dimana:

D : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)

S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin angin Savonius (m)

d : Diameter silinder pengganggu (m)

H : Tinggi turbin angin Savonius (m)

U : Kecepatan aliran angin (m/s)

ρ : Densitas udara (kg/m^3)

μ : Viskositas dinamis udara (N.s/m^2)

y/D : 0,5

S/D : 3,0

d/D : 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0

Re : 97000 dan 136000

3.1.1 Analisa Dimensi Coefficient of Power (CoP)

Untuk menganalisa dimensi nilai *coefficient of power* dalam penelitian ini digunakan pengaplikasian Teorema Phi

Buckingham. Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisa dimensi nilai *coefficient of power* adalah sebagai berikut

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter. Parameter-parameter tersebut adalah :

P : *power* (watt)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

μ : viskositas absolut udara (N.s/m^2)

U : kecepatan aliran udara (m/s)

D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d : diameter silinder pengganggu (m)

S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (m)

H : tinggi turbin angin Savonius (m)

n : putaran turbin (rpm)

h : panjang silinder pengganggu (m)

y : posisi silinder penghalang terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)

b : diameter poros (m)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t
3. Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Dimensi Tiap Parameter CoP

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

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

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $12 - 3 = 9$ grup tanpa dimensi. Grup tanpa dimensi tersebut antara lain :

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \frac{P}{\rho U^3 D^2}; & \pi_2 &= \frac{\mu}{\rho U D}; & \pi_3 &= \frac{d}{D}; \\ \pi_4 &= \frac{S}{D}; & \pi_5 &= \frac{H}{D}; & \pi_6 &= \frac{nD}{U}; \\ \pi_7 &= \frac{h}{D}; & \pi_8 &= \frac{y}{D}; & \pi_9 &= \frac{b}{D}\end{aligned}$$

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

π_1 : *Coefficient of Power*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius

π_4 : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_5 : Rasio tinggi turbin angin dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_6 : Rasio kecepatan tip (*tip speed ratio*)

π_7 : Rasio ketinggian silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius

π_8 : Rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus terhadap datangnya aliran udara dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_9 : Rasio diameter *overlap* turbin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah :

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

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

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

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

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

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

Atau dapat ditulis juga menjadi :

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

3.1.2 Analisa Dimensi Coefficient of Moment (CM)

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

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Jumlah parameter (n) = 12 parameter. Parameter-parameter tersebut adalah :

T : torsi (N.m)

ρ : massa jenis udara (kg/m³)

μ : viskositas absolut udara (N.s/m²)

U : kecepatan aliran udara (m/s)

D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d : diameter silinder pengganggu (m)

S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (m)

- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
 n : putaran turbin (rpm)
 h : panjang silinder pengganggu (m)
 y : posisi silinder penghalang terhadap sudu Savonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)
 b : diameter poros (m)

- Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan. Dalam penelitian ini menggunakan M, L, t.
- Membuat dimensi primer masing-masing parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM

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

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

$$\pi_1 = \frac{T}{\rho U^2 D^3}; \quad \pi_2 = \frac{\pi}{\rho U D}; \quad \pi_3 = \frac{d}{D}$$

$$\pi_4 = \frac{S}{D}; \quad \pi_5 = \frac{H}{D}; \quad \pi_6 = \frac{nD}{U}$$

$$\pi_7 = \frac{h}{D}; \quad \pi_8 = \frac{y}{D}; \quad \pi_9 = \frac{b}{D}$$

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

π_1 : *Coefficient of Moment*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 : Rasio jarak pusat pengganggu paralel terhadap arah aliran angin dengan diameter turbin angin Savonius

π_5 : Rasio tinggi turbin terhadap diameter turbin angin Savonius

π_6 : Rasio kecepatan tip (*tip speed ratio*)

π_7 : Rasio ketinggian silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius

π_8 : Rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus dengan datangnya aliran udara dengan diameter sudu turbin angin Savonius

π_9 : Rasio diameter *overlap* turbin dengan diameter turbin angin Savonius

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

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

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

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

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

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

Atau dapat juga ditulis menjadi :

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

3.2 Peralatan

Untuk melakukan penelitian ini, dibutuhkan beberapa peralatan guna menunjang pengambilan data eksperimen. Berikut adalah peralatan yang dipakai

3.2.1 Axial Fan

Pada penelitian ini digunakan *axial fan* sebagai sumber angin untuk memutar turbin angin Savonius dimana kecepatannya diatur menggunakan mekanisme tambahan yang disesuaikan dengan kebutuhan. *Axial fan* yang digunakan adalah CKE SPV-18 seperti yang terlihat pada Gambar 3.3 dibawah ini. Spesifikasi *axial fan* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

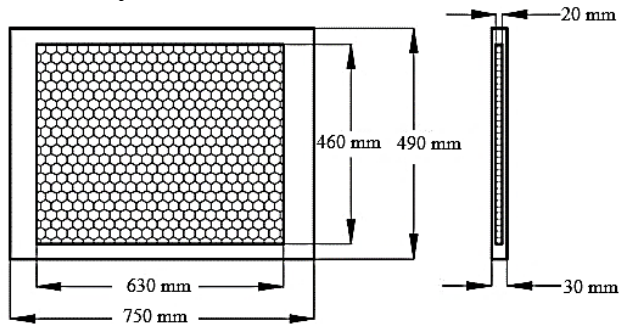


Gambar 3. 3 *Axial Fan* CKE SPV-18

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

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

3.2.2 Honeycomb



Gambar 3. 4 Skema *Honeycomb*

Pada penelitian ini digunakan *honeycomb* yang digunakan untuk menyeragamkan aliran fluida angin yang bergerak menuju turbin angin Savonius. *Honeycomb* ini diletakkan di antara *axial fan* dengan turbin angin Savonius. Skema *honeycomb* dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Spesifikasi *Honeycomb*

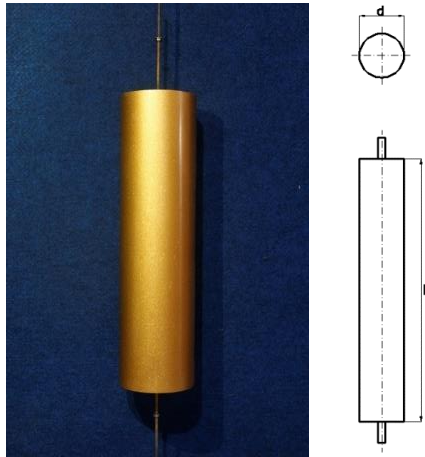
Spesifikasi <i>Honeycomb</i>	
Panjang sisi <i>frame</i>	508 mm
Panjang sisi <i>honeycomb</i>	468 mm
Tebal <i>frame</i>	50 mm
Tebal <i>honeycomb</i>	20 mm
Lebar sisi <i>frame</i>	490 mm
Lebar sisi <i>honeycomb</i>	460 mm
<i>Meshing size</i>	0,0248 lubang/mm ²

3.2.3 Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini silinder penghalang diletakkan didepan sisi *returning blade* turbin angin Savonius dengan harapan dapat menurunkan gaya drag yang terjadi sehingga dihasilkan torsi positif yang besar dan daya yang dihasilkan

juga akan meningkat. Spesifikasi silinder pengganggu yang digunakan adalah sebagai berikut:

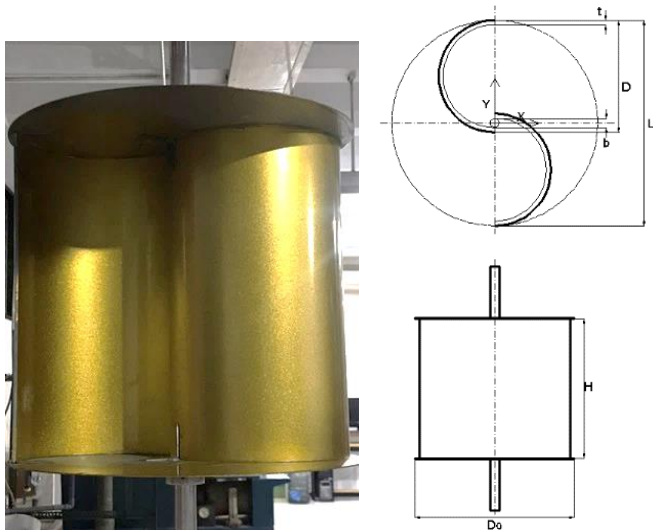
1. Tinggi (h) = 500 mm
2. Rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya aliran angin dengan diameter sudu turbin Savonius (y/D) = 0,5
3. Rasio diameter silinder pengganggu dan diameter turbin angin Savonius (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0.



Gambar 3. 5 Silinder Pengganggu

3.2.4 Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini digunakan turbin angin jenis Savonius dengan skema seperti terlihat di Gambar 3.6 dan spesifikasi di Tabel 3.5 berikut.



Gambar 3. 6 Skema Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

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

3.2.5 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius dan silinder pengganggu disangga oleh suatu sistem penyangga seperti yang terlihat pada Gambar 3.7 dibawah ini.



Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Angin Savonius

3.3 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Beberapa alat ukur tersebut adalah sebagai berikut

3.3.1 Voltage Regulator

Voltage regulator merupakan alat yang mempunyai fungsi sebagai regulator tegangan keluaran sehingga tegangan yang keluar dapat diatur sesuai dengan kebutuhan, dimana dalam hal ini tegangan keluaran yang di atur digunakan untuk mengatur kecepatan *axial fan*. Pada penelitian ini, *voltage regulator* yang digunakan adalah Ling Bridge TDGC 2J-3 seperti yang terlihat pada Gambar 3.8. Spesifikasi dari *voltage regulator* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Spesifikasi *Voltage Regulator* Ling Bridge TDGC 2J-3

TDGC ₂				
Capacity	Phase	Input	Ouput	Frekuensi
3 KV _a	Φ1	220 V	0-250 V	50-60 Hz



Gambar 3. 8 Voltage Regulator TDGC 2J-3

3.3.2 Anemometer

Anemometer adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Pada penelitian ini digunakan anemometer jenis Omega HHF141 seperti yang terlihat pada Gambar 3.9 dengan *high resolution* sebesar 0,01 m/s. spesifikasi dari anemometer ini dapat dilihat pada Tabel 3.7.



Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 7 Spesifikasi Anemometer Omega HHH141

Range	2,75 inch Air Probe	: 40 to 7800 ft/min : 0.2 to 40.00 m/sec
	Air Probe AP100	: 300 to 6800 ft/min : 1.5 to 35.00 m/sec
Accuracy	Air Velocity	AP275: $\pm 1.0\%$ of reading ± 1 digit
		AP100: $\pm(0.5\%$ of F.S. + 0.75% of reading + 1 digit
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/sec	
Operating Temperature	Instrument	: 32° to 125°F (0° to 50°C)
	Probe	: -4° to 21°F (-20° to 100°C)
Power Supply	3 AA alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours, without backlight	
Battery Check	Automatic Low Battery display	
Display	0.5" LCD, 4 digits, with LED backlight	

3.3.3 Torsimeter

Torque meter atau torsimeter adalah alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis suatu poros. Pada penelitian ini torsimeter yang digunakan yaitu LUTRON model TQ-8800 seperti yang terlihat pada Gambar 3.10 dibawah dengan *high resolution* sebesar 0,1 N-cm. Spesifikasi torsimeter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.8.



Gambar 3. 10 Torsimeter LUTRON TQ-8800

Tabel 3. 8 Spesifikasi Torsimeter LUTRON TQ-8800

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

3.3.4 Tachometer

Tachometer adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek. Pada penelitian ini digunakan tachometer *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer* OMEGA HHT12 seperti terlihat pada Gambar 3.11 dibawah ini. Spesifikasi dari tachometer ini dapat dilihat pada Tabel 3.9.



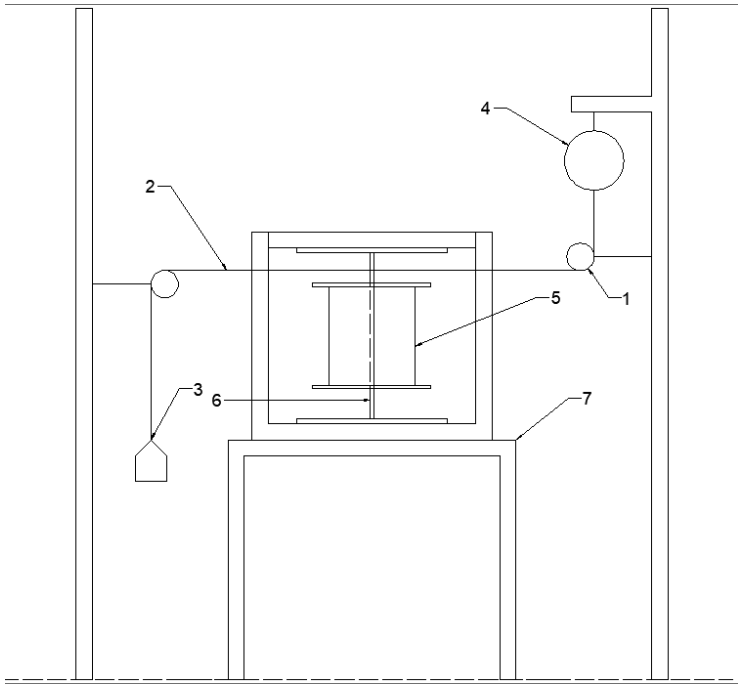
Gambar 3. 11 Tachometer OMEGA HHT12

Tabel 3. 9 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12

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

3.3.5 Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius. Skema *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3. 12 Skema Brake Dynamometer

Keterangan:

1. Sistem pulley
2. Benang Nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Penyangga turbin angin Savonius

Pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius dengan *brake dynamometer* seperti pada skema diatas yang terdiri dari sistem pulley, masa pemberat dan neraca pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dikaitkan pada poros turbin angin Savonius. Pengukuran dilakukan dengan cara menambahkan massa pemberat yang disambungkan dengan

neraca pegas secara bertahap saat turbin sedang berputar hingga turbin berhenti berputar. Setiap penambahan massa pemberat, putaran dari turbin diukur menggunakan tachometer. Nilai torsi dinamis di dapatkan dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan jari-jari poros turbin angin Savonius. Spesifikasi neraca pegas dan massa pemberat adalah sebagai berikut.



Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA

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

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



Gambar 3. 14 Massa Pemberat

3.4 Prosedur Penelitian

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

3.4.1 Prosedur Pengukuran Torsi Dinamis

1. Mengatur peralatan dan benda uji yang akan digunakan sesuai dengan skema.
2. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin sesuai dengan yang diharapkan.
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan termometer.
4. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh *Reynolds Number* yang diinginkan yaitu 97000.
5. Setelah memperoleh *Reynolds Number* yang sesuai dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan *tachometer*.
6. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan langkah sebagai berikut:

7. Memberikan massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan
8. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
9. Mengukur kecepatan putaran poros turbin angin Savonius menggunakan tachometer
10. Mengulangi langkah 8 - 10 hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.
11. Mengulangi langkah 2 sampai 6 dengan merubah variasi *Reynolds Number* menjadi 136000.
12. Mematikan *axial fan*.
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (S/D) sebesar 3,0.
14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada *Reynolds Number* 97000.
15. Setelah memperoleh *Reynolds Number* yang sesuai dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan *brake dynamometer*.
16. Melakukan pengukuran torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan *brake dynamometer* untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan langkah sebagai berikut:
17. Memberikan massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan
18. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
19. Mengukur kecepatan putaran poros turbin angin Savonius menggunakan tachometer
20. Mengulangi langkah 17 - 19 hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.

21. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah *Reynolds Number* menjadi 136000.
22. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi d/D menjadi 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0.
23. Mematikan *axial fan*.
24. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting grafik*, perbandingan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ , dan perbandingan *coefficient of moment* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ .

3.4.2 Prosedur Pengukuran Torsi Statis

1. Mengatur peralatan dan benda uji yang akan digunakan sesuai dengan skema.
2. Mengatur sudut bukaan sudu turbin angin Savonius sebesar 0° .
3. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin sesuai dengan yang diharapkan.
4. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh *Reynolds Number* yang diinginkan, yaitu 97000.
5. Setelah memperoleh *Reynolds Number* yang diharapkan dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran torsi statis dengan torsimeter.
6. Mematikan *axial fan*.
7. Mengulangi langkah 2 sampai 6 dengan variasi sudut sudu turbin angin Savonius (θ) menjadi $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan sudut 10° .
8. Mengulangi langkah 2 sampai 7 dengan merubah variasi *Reynolds Number* menjadi 136000.

9. Meletakkan silinder pengganggu yang paling optimum dengan mengatur jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (S/D) sebesar 3,0.
10. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar 0° .
11. Menyalakan *axial fan* dan mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds 97000.
12. Setelah memperoleh bilangan *Reynolds* yang diharapkan dan *steady*, kemudian melakukan pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan torsimeter.
13. Mematikan *axial fan*.
14. Mengulangi langkah 10 - 13 dengan mengubah variasi sudut tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan sudut 10° .
15. Mengulangi langkah 10 - 14 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi 136000.
16. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan *plotting* grafik, perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap θ .

3.5 Analisis *Uncertainty* dalam Eksperimen

Data yang diambil dari hasil eksperimen tidak seluruhnya selalu baik, sehingga dibutuhkan analisis *uncertainty* untuk mengetahui validitas dan akurasi data yang telah diambil. Terdapat dua jenis *error* pada pengambilan data hasil eksperimen, yaitu *fixed error* dan *random error*. *Fixed error* mempunyai nilai yang sama untuk setiap pembacaan dan dapat diatasi dengan proses pembenaran dan kalibrasi yang tepat. *Random error* nilainya berbeda untuk setiap pembacaan sehingga tidak dapat dihilangkan. Analisis *uncertainty* digunakan dengan tujuan untuk memperkirakan kemungkinan *random error* yang terjadi pada hasil eksperimen. Berikut

adalah contoh analisis *uncertainty* pada perhitungan nilai *tip speed ratio* (λ).

Tip speed ratio (λ) didefinisikan sebagai perbandingan antara kecepatan turbin terhadap kecepatan angin yang diterima turbin. Contoh perhitungan *uncertainty tip speed ratio* (λ) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda(\omega, R, V) = \omega R V^{-1} \\ d\lambda &= \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial \lambda}{\partial R} dR + \frac{\partial \lambda}{\partial V} dV \\ d\lambda &= (R V^{-1}) d\omega + (\omega V^{-1}) dR + (-V^{-2} \omega R) dV \\ u_{\lambda, \omega} &= \frac{\delta \lambda \omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} u_{\omega} = \frac{\omega}{\omega R V^{-1}} (R V^{-1}) u_{\omega} = u_{\omega} \\ u_{\lambda, R} &= \frac{\delta \lambda R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R} u_R = \frac{R}{\omega R V^{-1}} (\omega V^{-1}) u_R = u_R \\ u_{\lambda, V} &= \frac{\delta \lambda V}{\lambda} = \frac{V}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial V} u_V = \frac{V}{\omega R V^{-1}} (-V^{-2} \omega R) u_V = -u_V \\ u_{\lambda} &= \pm [(u_{\omega})^2 + (u_R)^2 + (-u_V)^2]^{1/2} \\ u_{\lambda} &= \pm [u_{\omega}^2 + u_R^2 + u_V^2]^{1/2} \quad (3.1)\end{aligned}$$

Data yang digunakan pada contoh perhitungan *uncertainty* ini adalah data pengukuran dengan nilai *coefficient of power* maksimal dengan ukuran pengganggu optimal pada bilangan Reynolds 97000. Untuk mendapatkan nilai *uncertainty* u_{ω} , u_R , dan u_V dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

- Untuk *uncertainty* pada pembacaan putaran (ω)

$$u_{\omega} = \pm \frac{0,1/min}{239,98/min} = \pm 4,167 \times 10^{-4} = \pm 0,0417\%$$
- Untuk *uncertainty* pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{0,5mm}{154,5mm} = \pm 3,236 \times 10^{-3} = \pm 0,3236\%$$

- Untuk *uncertainty* pada pembacaan kecepatan (V)

$$u_V = \pm \frac{0,01 \text{ m/s}}{5 \text{ m/s}} = \pm 2 \times 10^{-3} = \pm 0,2\%$$

Sehingga dari persamaan (3.1) didapatkan nilai *uncertainty* dari *tip speed ratio* (λ) adalah sebagai berikut:

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

$$u_\lambda = \pm [(4,167 \times 10^{-4})^2 + (3,236 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$$

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

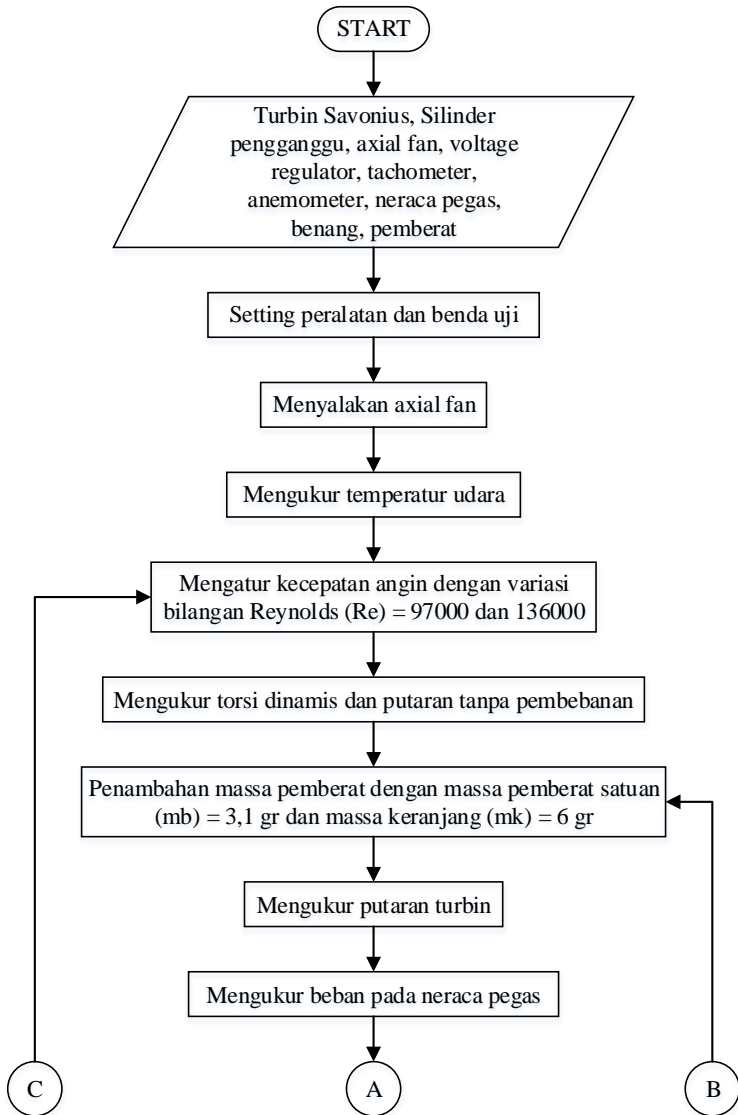
Berikut adalah nilai *uncertainty* yang didapatkan untuk bilangan Reynolds 97000 pada *coefficient of power* maksimal dengan silinder pengganggu optimal ($d/D = 0,6$) pada penempatan jarak ($S/D = 3,0$).

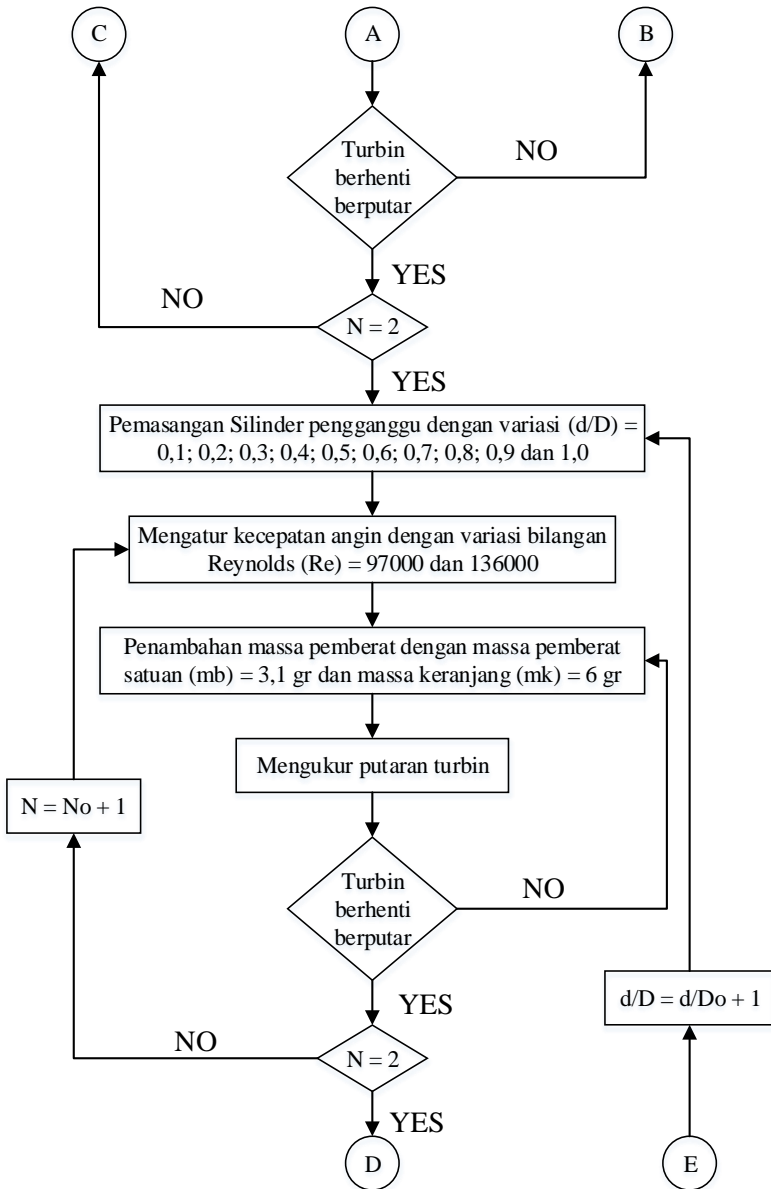
Tabel 3. 11 Nilai *Uncertainty* CoP Maksimal Pada Bilangan Reynolds 97000 ($S/D = 3,0$; $d/D = 0,6$; $y/D = 0,5$)

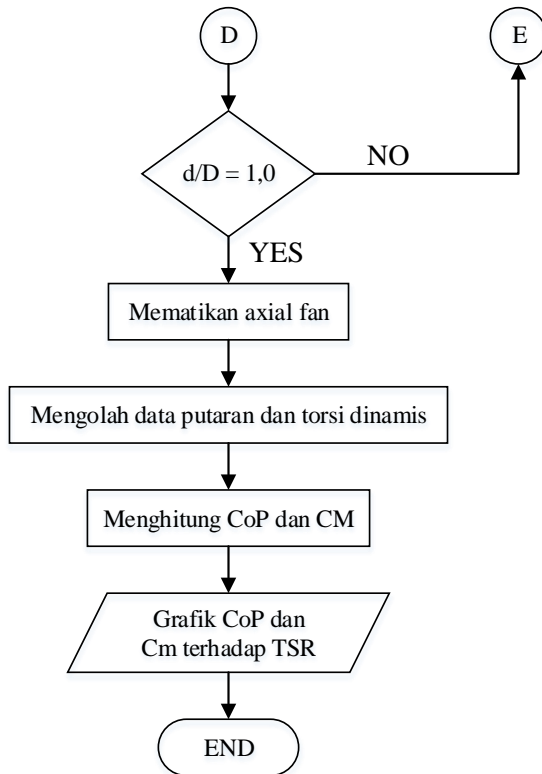
Parameter	Uncertainty (%)
<i>Coefficient of power</i> (CoP)	4,386
<i>Coefficient of Moment</i> (C_M)	4,375
<i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	0,383
Torsi Dinamis (T_D)	4,338
Bilangan Reynolds	0,261

3.6 Flowchart Penelitian

3.6.1 Pengukuran Torsi Dinamis

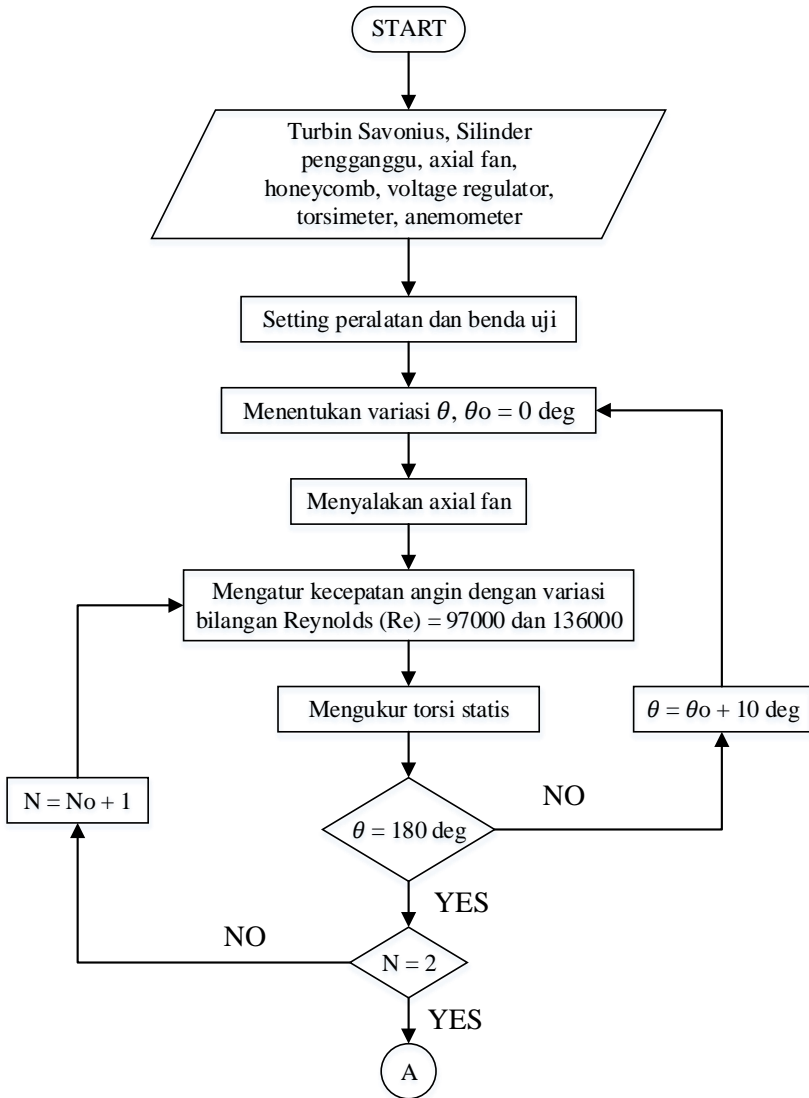


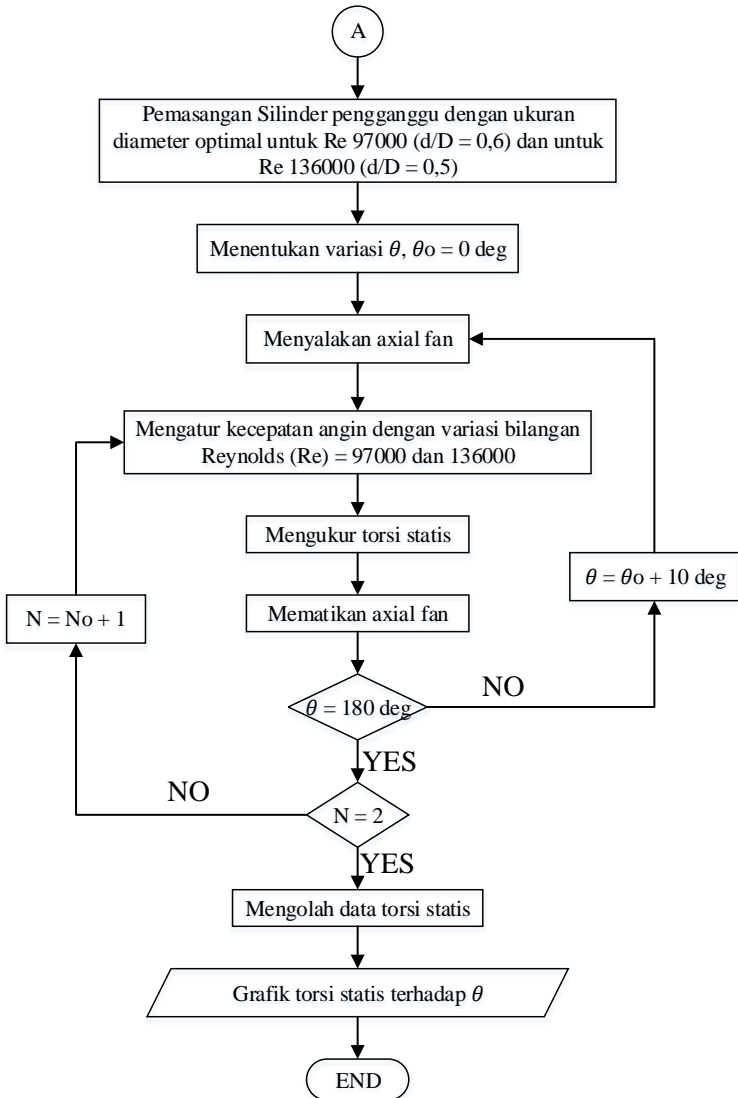




Gambar 3. 15 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis

3.6.2 Pengukuran Torsi Statis





Gambar 3. 16 Flowchart Pengukuran Torsi Statis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian dan Contoh Perhitungan

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan beberapa data yang menunjukkan pengaruh adanya silinder pengganggu yang di letakkan didepan sisi *returning blade* terhadap kinerja turbin angin Savonius. Adapun data-data yang diperoleh adalah putaran turbin (n), torsi statis dan torsi dinamis, dimana data tersebut kemudian diolah menjadi *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (C_M) turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang. Dalam studi eksperimen ini variasi yang digunakan adalah rasio ukuran diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius (d/D) serta variasi bilangan Reynolds.

Beberapa batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini antara lain yaitu fluida udara mempunyai aliran yang *steady* dan *incompressible* dengan nilai *properties* sebagai berikut:

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar atmosfer (P_1) = 1 atm = 101325 Pa
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_1) = 288,2 K
3. Temperatur udara ruangan kerja (T_2) = 28,5°C = 301,5 K
4. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_1) = 1,225 kg/m³

4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

Untuk mendapatkan nilai dari bilangan Reynolds, maka terlebih dahulu dihitung nilai massa jenis udara (ρ) dan viskositas udara (μ).

- Massa Jenis Udara (ρ)

Dari persamaan umum gas ideal yaitu:

$$PV = mRT$$

dimana nilai m dan R dianggap konstan, sehingga persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan Boyle-Gay Lussac tentang pemuaiian gas yaitu sebagai berikut:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2 \rho_2}$$

dengan $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan diatas menjadi sebagai berikut:

$$\frac{P_1 m_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2 m_2}{T_2 \rho_2}$$

dimana:

P_1 = tekanan absolut udara pada tekanan atmosfer = 1 atm = 101325 Pa

T_1 = temperature udara pada kondisi 1 (acuan) = 288,2 K

ρ_1 = massa jenis udara pada kondisi 1 (acuan) = 1,225 kg/m³

m_1 = massa udara pada kondisi 1 (acuan)

P_2 = tekanan absolut udara pada kondisi 2 (penelitian)

T_2 = temperature udara pada kondisi 2 (penelitian) = 28.5°C = 301,5 K

ρ_2 = massa jenis udara pada kondisi 2 (penelitian)

m_2 = massa udara pada kondisi 2 (penelitian)

Posisi 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga $P_1 = P_2$ dan $m_1 = m_2$, sehingga didapatkan persamaan:

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

$$\rho_2 = \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{301,5 \text{ K}} = 1,17 \text{ kg/m}^3$$

- Viskositas Udara (μ)

Dari persamaan Sutherland, didapatkan viskositas udara sebagai berikut:

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S + T}$$

dimana untuk udara mempunyai nilai:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \text{ kg/msK}^{0.5}$$

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

T = temperature saat penelitian = 301,5 K

Maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

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

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

Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1) sebagai berikut:

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

Panjang karakteristik (L) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2) sebagai berikut:

$$L = 2D - 2t - b$$

dimana:

D = diameter sudu turbin Savonius = 167 mm

b = diameter poros = 19 mm

t = tebal sudu turbin Savonius = 2,95 mm

sehingga didapatkan nilai panjang karakteristik (L) sebesar:

$$L = (2 \times 167) - (2 \times 2,95) - (19)$$

$$L = 309 \text{ mm} = 0,309 \text{ m}$$

Dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s maka didapatkan bilangan Reynolds sebesar:

$$Re = \frac{1,17 \frac{kg}{m^3} \times 5 \frac{m}{s} \times 0,309 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}} = 97185,48 \approx 97000$$

Untuk kecepatan angin sebesar 7 m/s didapatkan bilangan Reynolds sebesar:

$$Re = \frac{1,17 \text{ kg/m}^3 \times 7 \text{ m/s} \times 0,309 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}} = 136059,68$$

$$\approx 136000$$

4.1.2 Perhitungan Tip Speed Ratio (λ)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *tip speed ratio* pada adalah sebagai berikut:

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

dimana:

ω = putaran turbin angin Savonius (rad/s)

R = jari jari turbin angin Savonius (m)

U = kecepatan angin (m/s)

Pada Re 97000, dimana kecepatan angin adalah 5 m/s digunakan penghalang dengan rasio diameter penghalang terhadap diameter turbin (d/D) = 0,6 didapatkan data sebagai berikut:

$m = 18,4$ gram

$n = 240$ rpm

$\omega = \frac{2\pi(240)}{60} = 25,12$ rad/s

$R = L/2 = 0,309/2 = 0,1545$ m

$U = 5$ m/s

sehingga didapatkan nilai TSR (λ) sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{25,12 \text{ rad/s} \times 0,1545 \text{ m}}{5 \text{ m/s}} = 0,776$$

4.1.3 Perhitungan Torsi Dinamis

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis adalah sebagai berikut:

$$T = \{(m - s) \times g\} \times r$$

dimana:

m = massa beban yang digantungkan pada benang (gr)

s = massa yang terbaca pada neraca pegas (gr)

g = percepatan gravitasi bumi = $9,81 \text{ m/s}^2$

r = jari-jari poros turbin angin Savonius yang dililit benang = $0,0125 \text{ m}$

Pada Re 97000, dimana kecepatan angin adalah 5 m/s digunakan penghalang dengan rasio diameter penghalang terhadap diameter turbin (d/D) = $0,6$ didapatkan data sebagai berikut:

$m = 18,4 \text{ gram}$

$s = 450 \text{ gram}$

$r = 0,0125 \text{ m}$

sehingga didapatkan nilai torsi dinamis sebagai berikut:

$$T = \left\{ \left(\frac{|18,4 - 450|}{1000} \text{ kg} \right) \times 9,81 \text{ m/s}^2 \right\} \times 0,0125 \text{ m} = 0,053 \text{ Nm}$$

4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *coefficient of power* adalah sebagai berikut:

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

dimana:

A = luas daerah pada turbin yang ditabrak oleh angin

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

Pada Re 97000, dimana kecepatan angin adalah 5 m/s digunakan penghalang dengan rasio diameter penghalang terhadap diameter turbin (d/D) = $0,6$ didapatkan data sebagai berikut:

$m = 18,4 \text{ gram}$

$s = 450 \text{ gram}$

$r = 0,0125 \text{ m}$

sehingga didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) sebagai berikut:

$$CoP = \frac{\left\{ \frac{|18,4 - 450|}{1000} kg \times 9,81 m/s^2 \right\} \times 0,0125 m \times 25,12 rad/s}{\frac{1}{2} \times 1,17 kg/m^3 \times 0,092 m^2 \times (5 m/s)^3} = 0,1976$$

4.1.5 Perhitungan *Coefficient of Moment* (C_M)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung *coefficient of moment* adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{2T}{\rho AU^2 R}$$

Pada Re 97000, dimana kecepatan angin adalah 5 m/s digunakan penghalang dengan rasio diameter penghalang terhadap diameter turbin (d/D) = 0,6 didapatkan data sebagai berikut:

$m = 18,4$ gram

$s = 450$ gram

$R = L/2 = 0,309/2 = 0,1545$ m

$A = L \times H = 0,309$ m \times $0,298$ m = $0,092$ m²

$T = 0,053$ Nm

sehingga didapatkan nilai *coefficient of moment* adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{2 \times 0,053 Nm}{1,17 kg/m^3 \times 0,092 m^2 \times (5 m/s)^2 \times 0,1545 m} = 0,25459$$

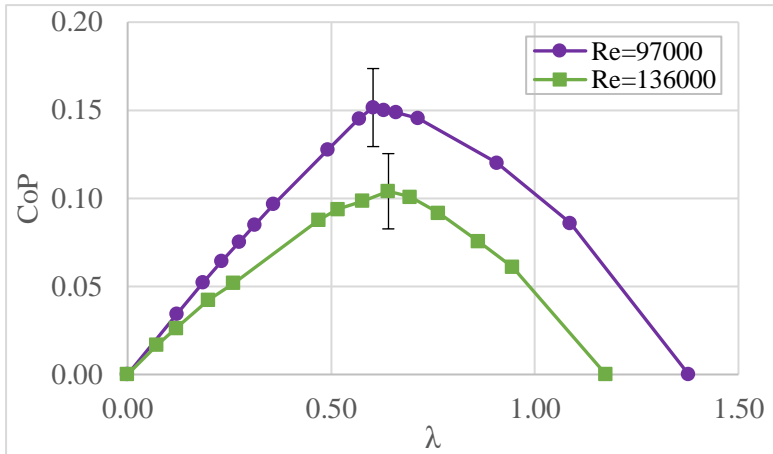
4.2 Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Analisis kinerja turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu digunakan untuk mengetahui kondisi awal turbin angin Savonius yang akan diuji, dimana hasil data yang didapatkan tanpa adanya silinder pengganggu dibandingkan dengan hasil kinerja turbin angin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu. Pengujian dilakukan pada bilangan Reynolds 97000

dan 136000. Data yang didapatkan berupa *coefficient of power* (C_{p0}) fungsi *tip speed ratio* (λ), *coefficient of moment* (C_{M0}) fungsi *tip speed ratio* (λ) serta torsi statis (T_{s0}) fungsi sudut (θ) yang disajikan dalam bentuk grafik.

4.2.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* Tanpa Silinder Pengganggu (C_{p0}) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada turbin tanpa adanya silinder pengganggu didapatkan data berupa *coefficient of power* (C_{p0}) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Penambahan variasi massa dilakukan untuk mendapatkan variasi nilai *tip speed ratio* (λ) dari turbin angin Savonius. Nilai torsi dinamis didapat dengan menggunakan *brake dynamometer* dengan menghitung selisih massa pemberat yang diberikan dan nilai yang terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan percepatan gravitasi dan jari-jari poros yang dililit benang. Daya *output* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius didapatkan dari perkalian torsi dinamis dengan kecepatan sudut turbin. Grafik *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (C_{p0}) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada masing-masing bilangan Reynolds dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Grafik *Coefficient of Power* Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

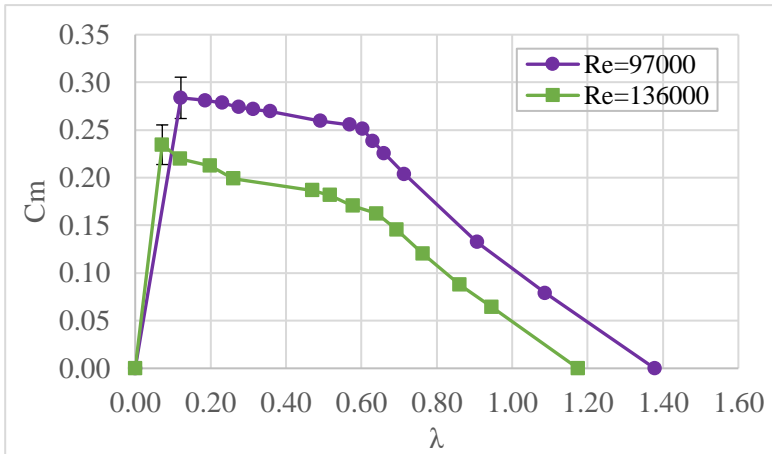
Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik dimana nilai *coefficient of power* mengalami kenaikan diawal dan kemudian setelah titik puncak tertentu mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya nilai *tip speed ratio* (λ). Pada titik puncak didapatkan nilai *coefficient of power* maksimal dan *tip speed ratio* yang optimum. Untuk bilangan Reynolds 97000 nilai *coefficient of power* maksimal adalah sebesar 0,1515 dengan nilai ketidakpastian sebesar $\pm 4,43\%$ pada $\lambda = 0,603$ sedangkan pada bilangan Reynolds 136000 nilai *coefficient of power* maksimal sebesar 0,1040 dengan nilai ketidakpastian sebesar 4,27% pada $\lambda = 0,64$.

Dari *trendline* grafik yang dihasilkan maka diketahui bahwa bilangan Reynolds yang lebih besar mempunyai nilai *coefficient of power* yang lebih rendah dibandingkan dengan bilangan Reynolds yang lebih kecil. Dari persamaan 2.3 diketahui bahwa nilai *coefficient of power* dipengaruhi oleh daya *output* (aktual) dari turbin angin Savonius dan daya teoritis (kinetik) dari angin. Daya *output* dipengaruhi oleh torsi dinamis dan putaran turbin, sedangkan daya teoritis dipengaruhi oleh kecepatan angin, dimana dari persamaan 2.3 *coefficient of power* berbanding terbalik

dengan daya teoritis. Pada Re 97000, kecepatan angin sebagai fluida kerja rendah yaitu sebesar 5 m/s dan seiring dengan torsi dinamis yang terus meningkat mengakibatkan daya *output* yang dihasilkan oleh turbin meningkat sehingga nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius juga meningkat. Pada Re 136000 kecepatan fluida yang cepat menyebabkan putaran turbin meningkat dan turbin membentuk *solid wall* silinder yang dapat menghambat fluida menuju turbin dan menurunkan selisih gaya *drag* sehingga daya *output* yang dihasilkan turbin angin Savonius menurun.

4.2.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* Tanpa Silinder Pengganggu (CM_0) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada turbin tanpa adanya silinder pengganggu didapatkan data berupa *coefficient of moment* (CM_0) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Untuk mendapatkan variasi λ dilakukan dengan menambahkan massa pemberat pada *brake dynamometer*. selain itu torsi dinamis didapatkan dengan menghitung selisih nilai yang terbaca pada neraca pegas dengan massa pemberat yang kemudian dikalikan dengan percepatan gravitasi dan jari-jari poros yang dililit dengan benang. Grafik *coefficient of moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *tip speed ratio* (λ) pada masing-masing bilangan Reynolds dapat dilihat pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Grafik *Coefficient of Moment Tanpa Silinder Pengganggu (C_{M_0}) Fungsi Tip Speed Ratio (λ)*

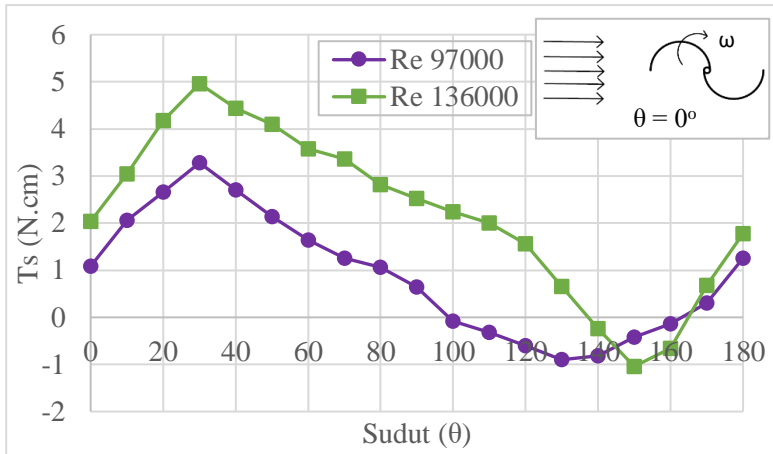
Pada gambar 4.2 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik naik sampai titik maksimal dari *coefficient of moment* pada *tip speed ratio* (λ) optimum kemudian *trendline* terus menurun seiring bertambahnya *tip speed ratio* (λ). Didapatkan nilai maksimal *coefficient of moment* pada bilangan Reynolds 97000 sebesar 0,2837 dengan nilai ketidakpastian sebesar 4,34% pada $\lambda = 0,12$ sedangkan pada bilangan Reynolds 136000 sebesar 0,2345 dengan nilai ketidakpastian sebesar 4,15% pada $\lambda = 0,07$. Torsi dinamis maksimal di setiap bilangan Reynolds didapatkan saat pembebanan paling besar saat turbin angin Savonius masih berputar, sehingga didapatkan nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimal.

Dari grafik dapat diketahui bahwa nilai *coefficient of moment* pada bilangan Reynolds 97000 lebih tinggi dibandingkan pada bilangan Reynolds 136000. Dari persamaan 2.12 diketahui bahwa nilai *coefficient of moment* (C_M) dipengaruhi oleh torsi dinamis dan kecepatan angin, dimana *coefficient of moment* berbanding terbalik dengan kecepatan angin. Pada Re 97000, kecepatan angin sebagai fluida kerja rendah yaitu sebesar 5 m/s dan seiring dengan torsi dinamis yang terus meningkat mengakibatkan daya *output* yang dihasilkan oleh turbin meningkat sehingga nilai

coefficient of moment turbin angin Savonius juga meningkat. Pada Re 136000 kecepatan fluida yang cepat menyebabkan putaran turbin meningkat dan turbin membentuk *solid wall* silinder yang dapat menghambat fluida menuju turbin dan menurunkan selisih gaya *drag* sehingga mengakibatkan C_M menurun.

4.2.3 Analisis Nilai Torsi Statis Tanpa Silinder Pengganggu (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ)

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan untuk turbin angin Savonius tanpa adanya silinder pengganggu, didapatkan data berupa nilai torsi statis (T_{s0}) fungsi sudut (θ) pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Untuk mendapatkan nilai torsi statis digunakan alat ukur berupa torsimeter. Pengambilan data dilakukan pada saat turbin dalam kondisi diam yaitu dengan dicekam pada bagian atas poros turbin, kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi statis pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi sudut 0° searah dengan aliran angin hingga sudut 180° dengan kenaikan sebesar 10° . Grafik torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) fungsi sudut (θ) pada masing-masing bilangan Reynolds dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Penghalang (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ)

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik awalnya naik sampai sudut tertentu kemudian mengalami penurunan sampai sudut tertentu dan kembali naik. Pada bilangan Reynolds 97000 torsi statis maksimal terjadi pada sudut 30° sebesar 3,28 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 130° sebesar -0,9 N.cm. Pada bilangan Reynolds 136000 torsi statis maksimal terjadi pada sudut 30° sebesar 4,96 N.cm dan nilai torsi statis minimum terjadi pada sudut 150° sebesar -1,04 N.cm. Nilai torsi statis maksimal dan minimum terjadi pada bilangan Reynolds 136000 disebabkan karena semakin besar bilangan Reynolds, semakin besar kecepatan dan gaya *drag*. Pada kedua bilangan Reynolds terdapat nilai torsi statis negatif yang menyebabkan turbin angin Savonius tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga dibutuhkan torsi awal untuk menggerakkan turbin. Pada bilangan Reynolds 97000 torsi statis negative terjadi dari sudut 100° hingga 160° , sedangkan pada bilangan Reynolds 136000 torsi statis negative terjadi dari sudut 140° hingga 160° . Posisi 30° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis tertinggi.

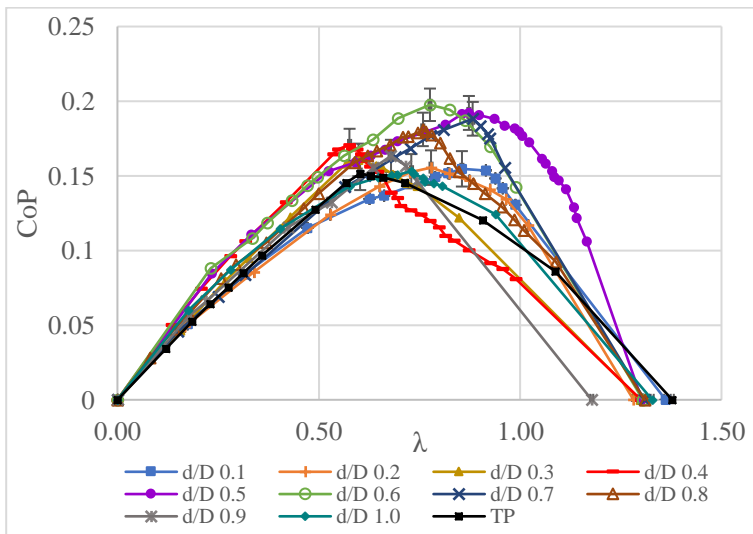
Penurunan nilai torsi statis yang terjadi dari sudut 30° hingga sudut 130° pada Re 97000 dan pada sudut 30° hingga 160° pada Re 136000 disebabkan karena posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin dan mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekat dengan arah datangnya angin dan menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* semakin besar, sehingga selisih gaya *drag* yang terjadi mengalami penurunan dan torsi statis yang dihasilkan juga mengalami penurunan. Kenaikan nilai torsi statis yang terjadi pada sudut 0° hingga 30° dan 160° hingga 180° pada Re 136000 serta pada sudut 0° hingga 30° dan 140° hingga 180° untuk Re 97000 terjadi karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat dan gaya *drag* pada sisi *returning blade* menurun sehingga selisih gaya *drag* yang dihasilkan kedua sudu meningkat.

4.3 Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

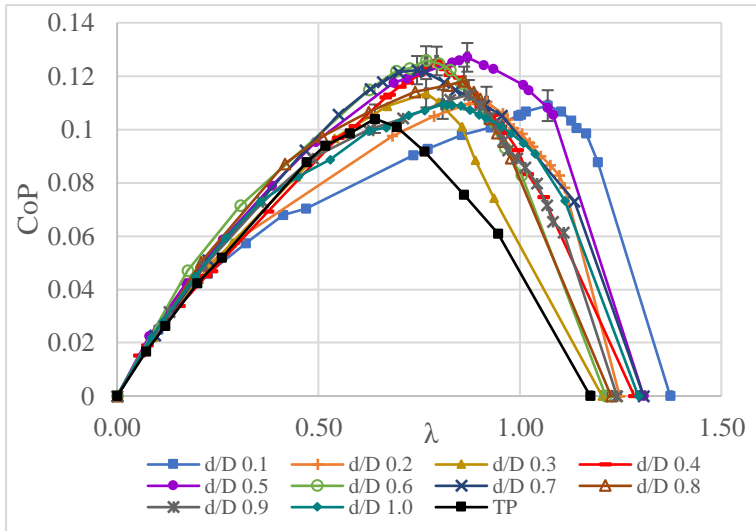
Analisis kinerja turbin angin savonius dengan silinder pengganggu, dimana jarak pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (S/D) sebesar 3,0. Variasi yang digunakan adalah rasio ukuran diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 dengan tinggi silinder pengganggu sebesar 500 mm. Pengujian dilakukan dengan silinder pengganggu diletakkan pada posisi tegak lurus arah datangnya angin terhadap diameter sudu turbin (y/D) = 0,5 serta bilangan Reynolds yang digunakan adalah 97000 dan 136000. Data yang akan dianalisis meliputi *coefficient of power* (CoP) fungsi *tip speed ratio* (λ), *coefficient of moment* (C_M) fungsi *tip speed ratio* (λ) serta torsi statis (T_s) fungsi sudut (θ) yang disajikan dalam bentuk grafik.

4.3.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan didapatkan data berupa nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan menggunakan variasi rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0, dimana silinder pengganggu diletakkan menggunakan rasio jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat sudu turbin (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.4 dan 4.5.



Gambar 4. 4 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Savonius Dengan (CoP) dan Tanpa Pengganggu (CoP₀) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada Bilangan Reynolds 97000



Gambar 4. 5 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan (CoP) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_0) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada Bilangan Reynolds 136000

Pada gambar 4.4 dan 4.5 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik berbentuk parabolik dimana nilai CoP naik hingga titik tertentu kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai *tip speed ratio* (λ). Pada puncak *trendline* didapatkan nilai maksimal *coefficient of power* (CoP) dan *tip speed ratio* (λ) yang optimum. Dari grafik dapat dilihat bahwa posisi *coefficient of power* (CoP) maksimal setiap variasi ukuran d/D berbeda-beda, dimana turbin yang diberikan penghalang mempunyai nilai *tip speed ratio* (λ) optimum yang lebih besar pada CoP maksimal dibandingkan dengan turbin yang tidak diletakkan silinder penghalang. Pergeseran posisi nilai CoP maksimal ini dapat disebabkan karena penambahan silinder pengganggu meningkatkan putaran turbin dan menyebabkan nilai *tip speed ratio* (λ) juga meningkat sehingga puncak dari nilai *coefficient of power* (CoP) juga akan bergeser menjadi lebih besar. Data nilai *coefficient of power* maksimal

untuk setiap variasi d/D pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000 beserta kenaikannya dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai *Coefficient of Power* Maksimal dan *Tip Speed Ratio* Optimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu serta Kenaikannya

d/D	Tanpa Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				Kenaikan CoP (%)	
	Re 97000		Re 136000		Re 97000		Re 136000		Re 97000	Re 136000
	CoP ₀ max (%)	λ	CoP ₀ max (%)	λ	CoP max (%)	λ	CoP max (%)	λ		
0,1	15,15	0,60	10,40	0,64	15,47	0,86	10,89	1,07	2,11	4,71
0,2					15,55	0,78	11,04	0,92	2,64	6,15
0,3					16,07	0,06	11,35	0,77	6,07	9,14
0,4					17,07	0,58	12,57	0,79	12,67	20,87
0,5					19,21	0,87	12,70	0,87	26,80	22,12
0,6					19,76	0,78	12,59	0,77	30,43	21,06
0,7					18,82	0,88	12,22	0,74	24,22	17,50
0,8					18,11	0,76	11,81	0,86	19,54	13,56
0,9					16,34	0,68	11,30	0,87	7,85	8,65
1,0					15,31	0,73	10,94	0,81	1,06	5,19

Pada tabel 4.1 ditunjukkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius efektif menaikkan *coefficient of power*, dimana kenaikan paling rendah sebesar 1,06% untuk d/D 1,0 dan paling tinggi sebesar 30,43% untuk d/D 0,6 pada Re 97000, sedangkan untuk Re 136000 kenaikan *coefficient of power* paling rendah sebesar 4,71% untuk d/D 0,1 dan paling tinggi sebesar 22,12 untuk d/D 0,5. Penambahan silinder pengganggu paling efektif untuk posisi $(S/D) = 3,0$ pada Re 97000 adalah dengan ukuran (d/D) sebesar 0,6 dengan nilai ketidakpastian sebesar $\pm 4,35\%$ dan pada Re 136000 adalah dengan ukuran (d/D) sebesar 0,5 dimana kedua ukuran d/D ini adalah ukuran yang berada pada *range* tengah dari seluruh variasi d/D yang digunakan.

Penambahan silinder pengganggu efektif menaikkan *coefficient of power* karena silinder pengganggu yang diletakkan pada posisi $y/D = 0,5$ tepat berada pada titik stagnasi *returning blade* efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*

dan mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen, dimana momentum aliran yang digunakan untuk menggerakkan fluida di dekat dinding *returning blade* meningkat dan aliran dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* mengakibatkan titik separasi mundur dan *wake* menyempit. Hal ini menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* yang terjadi antara dua sudu, sehingga torsi dan daya yang didapatkan semakin besar. Selain itu, dengan adanya silinder pengganggu dapat menurunkan tekanan di bagian depan *returning blade* dan menyebabkan selisih tekanan bagian depan dan belakang *returning blade* meningkat, dimana hal ini juga menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dengan *advancing blade* meningkat.

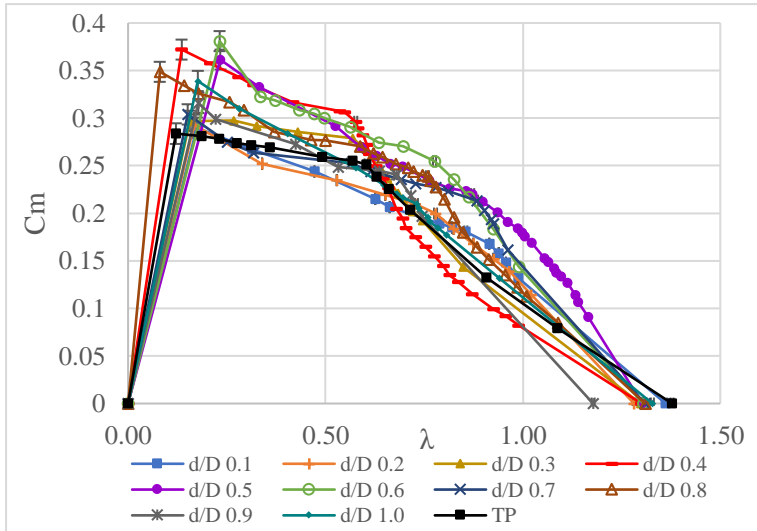
Analisis ketidakpastian (*uncertainty*) dilakukan pada nilai *coefficient of power* maksimal dari setiap variasi ukuran diameter silinder pengganggu yang ditunjukkan dengan *error bar* yang terdapat pada grafik di gambar 4.4 dan 4.5 untuk kedua variasi bilangan Reynolds yang digunakan pada eksperimen ini. Dari kedua gambar dapat dilihat bahwa terdapat beberapa *error bar* yang bersinggungan, dimana hal ini menunjukkan bahwa kedua data yang bersinggungan tersebut mempunyai *range* nilai yang relatif sama sehingga tidak diperlukan pengambilan salah satu data dari kedua data tersebut. Dari grafik dapat dilihat bahwa data eksperimen yang didapatkan ketika digunakan ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,5 dan 0,7 pada bilangan Reynolds 97000 mempunyai nilai yang relatif sama dan nilai ketidakpastian yang ditunjukkan dengan *error bar* bersinggungan sehingga salah satu dari kedua data tidak perlu dilakukan pengambilan. Untuk bilangan Reynolds 136000, hal yang sama juga terjadi ketika digunakan diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,8 dan 0,9 mempunyai nilai yang relatif sama dan nilai ketidakpastian yang ditunjukkan dengan *error bar* bersinggungan. Data nilai ketidakpastian *coefficient of power* maksimal yang didapatkan pada eksperimen ini dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Nilai Ketidakpastian *Coefficient of Power* Maksimal untuk Seluruh Variasi Ukuran d/D Pada Peletakan $S/D = 3,0$ dan $y/D = 0,5$

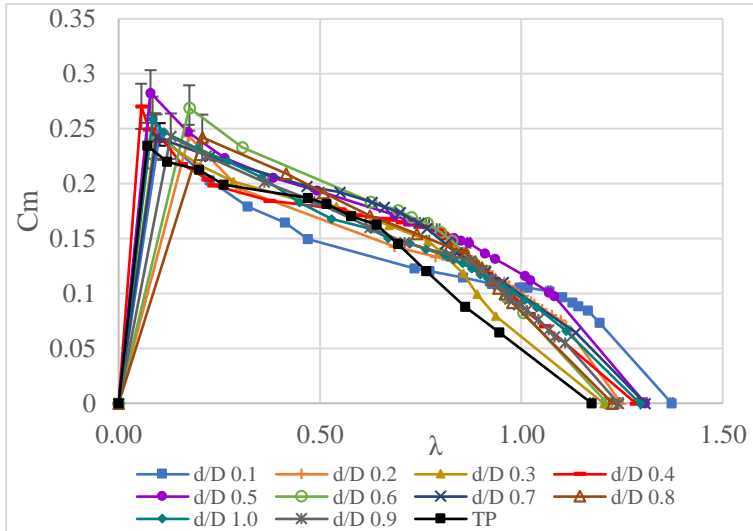
d/D	CoP Maksimal(%)		Uncertainty (%)		Range CoP Maksimal	
	97000	136000	97000	136000	97000	136000
0,1	15,47	10,89	±4,75	±4,63	14,74 – 16, 20	10,39 – 11,40
0,2	15,55	11,04	±4,63	±4,49	14,83 – 16, 27	10,54 – 11,53
0,3	16,07	11,35	±4,35	±4,26	15,37 – 16,77	10,87 – 11,84
0,4	17,07	12,57	±4,32	±4,30	16,33 – 17,81	12,03 – 13,11
0,5	19,21	12,70	±4,55	±4,30	18,34 – 20,09	12,16 – 13,25
0,6	19,76	12,59	±4,39	±4,23	18,90 – 20,62	12,06 – 13,12
0,7	18,82	12,22	±4,52	±4,23	17,97 – 19,67	11,71 – 12,74
0,8	18,11	11,81	±4,48	±4,35	17,30 – 18,92	11,30 – 12,32
0,9	16,34	11,30	±4,31	±4,43	15,63 – 17,04	10,80 – 11,80
1,0	15,31	10,94	±4,59	±4,39	14,61 – 16,01	10,46 – 11,42

4.3.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* (C_M) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan didapatkan data berupa nilai *coefficient of moment* (C_M) terhadap *tip speed ratio* (λ) dengan menggunakan variasi rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0, dimana silinder pengganggu diletakkan menggunakan rasio jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat sudu turbin (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4. 6 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Savonius Dengan (C_M) dan Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada $Re = 97000$



Gambar 4. 7 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Savonius Dengan (C_M) dan Tanpa Pengganggu (C_{M0}) Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Untuk (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 Pada $Re = 136000$

Pada gambar 4.6 dan 4.7 dapat dilihat bahwa *trendline* pada awalnya naik sampai pada nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimal dan *tip speed ratio* (λ) optimum, kemudian *trendline* terus menurun seiring bertambahnya *tip speed ratio* (λ). Torsi dinamis maksimal di setiap bilangan Reynolds didapatkan saat pembebanan paling besar saat turbin angin Savonius masih berputar, sehingga didapatkan nilai *coefficient of moment* (C_M) maksimal. Data nilai *coefficient of moment* maksimal untuk setiap variasi d/D pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000 beserta kenaikannya dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Nilai *Coefficient of Moment* Maksimum dan *Tip Speed Ratio* Optimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu serta Kenaikannya

d/D	Tanpa Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				Kenaikan (%)	
	Re 97000		Re 136000		Re 97000		Re 136000		Re 97000	Re 136000
	C_{M0} max (%)	λ	C_{M0} max (%)	λ	C_M max (%)	λ	C_M max (%)	λ		
0,1	28,37	0,12	23,45	0,07	28,99	0,17	24,47	0,10	2,19	4,35
0,2					29,29	0,17	24,31	0,17	3,24	3,67
0,3					29,75	0,16	24,33	0,09	4,86	3,75
0,4					37,20	0,14	27,03	0,06	31,12	15,27
0,5					36,15	0,23	28,27	0,08	27,42	20,55
0,6					38,09	0,23	26,88	0,18	34,26	14,63
0,7					30,39	0,15	24,23	0,09	7,12	3,33
0,8					34,87	0,08	24,21	0,21	22,91	3,24
0,9					31,61	0,18	24,32	0,13	11,42	3,71
1,0					33,91	0,18	25,86	0,08	19,53	10,28

Dari tabel 4.3 ditunjukkan nilai *coefficient of moment* maksimal dengan (C_M) dan tanpa silinder pengganggu (C_{M0}), dimana nilai *coefficient of moment* tanpa silinder pengganggu adalah sebesar 28,37% pada Re 97000 dan 23,45% pada Re 136000. Pada kedua bilangan Reynolds, penambahan silinder pengganggu efektif meningkatkan nilai *coefficient of moment*. Untuk Re 97000, peletakan silinder pengganggu paling efektif untuk meningkatkan *coefficient of moment* adalah pada ukuran d/D 0,6 yang bernilai 38,09% dengan nilai ketidakpastian sebesar 4,22% dimana kenaikan yang terjadi sebesar 34,26% dan kenaikan paling rendah adalah sebesar 2,19% untuk ukuran d/D 0,1. Pada Re 136000 yang paling efektif meningkatkan *coefficient of moment* adalah pada ukuran d/D 0,5 yang bernilai 28,27% dengan nilai ketidakpastian sebesar $\pm 4,11\%$ dimana kenaikan yang terjadi sebesar sebesar 20,55% dan kenaikan paling rendah adalah sebesar 3,24% pada ukuran d/D 0,8.

Coefficient of moment (C_M) dipengaruhi oleh torsi teoritis dan torsi dinamis. Torsi teoritis berbanding lurus dengan kecepatan dimana pada analisis ini kecepatan angin dijaga konstan sehingga yang lebih berpengaruh adalah torsi dinamis. Pada kedua bilangan dengan penambahan silinder pengganggu dengan seluruh variasi ukuran d/D efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menuju turbulen, dimana momentum aliran yang digunakan untuk menggerakkan fluida di dekat dinding *returning blade* meningkat dan aliran dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* mengakibatkan titik separasi mundur dan *wake* menyempit. Hal ini menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* menurun dan meningkatkan selisih gaya *drag* yang terjadi antara dua sudu, sehingga torsi dan daya yang didapatkan semakin besar. Selain itu, dengan adanya silinder pengganggu diduga efektif menurunkan tekanan di bagian depan *returning blade*. Jika tekanan di belakang *returning blade* diasumsikan sama dengan tekanan ketika sebelum diberikan silinder pengganggu, maka selisih tekanan didepan dan di belakang *returning blade* akan menyebabkan *pressure drag* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu meningkat.

Analisis ketidakpastian (*uncertainty*) dilakukan pada nilai *coefficient moment* maksimal dari setiap variasi ukuran diameter silinder pengganggu yang ditunjukkan dengan *error bar* yang terdapat pada grafik di gambar 4.6 dan 4.7 untuk kedua variasi bilangan Reynolds yang digunakan pada eksperimen ini. Dari kedua gambar dapat dilihat bahwa terdapat beberapa *error bar* yang bersinggungan, dimana hal ini menunjukkan bahwa kedua data yang bersinggungan tersebut mempunyai *range* nilai yang relatif sama sehingga tidak diperlukan pengambilan salah satu data dari kedua data tersebut. Dari grafik dapat dilihat bahwa data eksperimen yang didapatkan ketika digunakan ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,1; 0,2; 0,3 dan 0,7 pada bilangan Reynolds 97000 mempunyai nilai yang relatif sama dan nilai ketidakpastian yang ditunjukkan dengan *error bar*

bersinggungan sehingga salah satu dari keempat data tidak perlu dilakukan pengambilan. Untuk bilangan Reynolds 136000, hal yang sama juga terjadi ketika digunakan diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,1; 0,3 dan 0,7 yang mempunyai nilai yang relatif sama dan nilai ketidakpastian yang ditunjukkan dengan *error bar* bersinggungan. Data nilai ketidakpastian *coefficient of moment* maksimal yang didapatkan pada eksperimen ini dapat dilihat pada tabel 4.4.

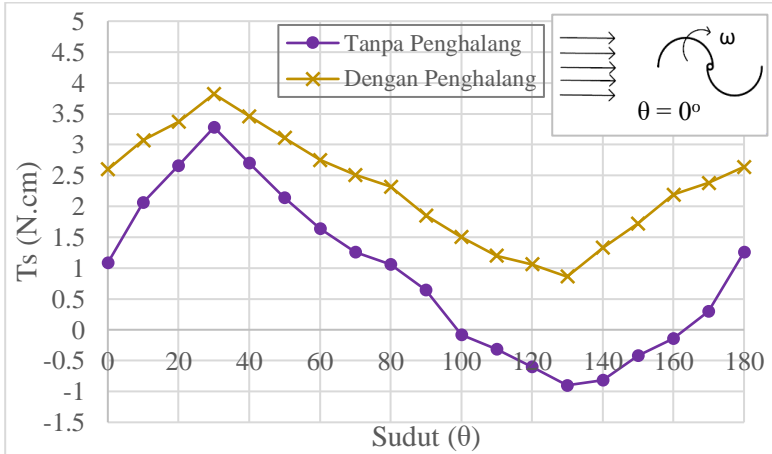
Tabel 4. 4 Nilai Ketidakpastian *Coefficient of Moment* Maksimal untuk Seluruh Variasi Ukuran d/D Pada Peletakan $S/D = 3,0$ dan $y/D = 0,5$

d/D	Max CM (%)		Uncertainty (%)		Range Max CM	
	97000	136000	97000	136000	97000	136000
0,1	28,99	24,48	±4,29	±4,12	27,74 – 30,23	23,47 – 25,48
0,2	29,29	24,31	±4,33	±4,15	28,02 – 30,56	23,31 – 25,32
0,3	29,69	24,34	±4,32	±4,15	28,41 – 30,98	23,33 – 25,35
0,4	37,20	27,04	±4,21	±4,12	35,64 – 38,77	25,92 – 28,15
0,5	36,15	28,27	±4,18	±4,11	34,64 – 37,66	27,11 – 29,43
0,6	38,09	26,89	±4,22	±4,13	36,49 – 39,70	25,78 – 28,00
0,7	30,39	24,23	±4,27	±4,14	29,09 – 31,69	23,23 – 25,24
0,8	34,87	24,21	±4,21	±4,14	33,40 – 36,34	23,21 – 25,22
0,9	31,60	24,32	±4,30	±4,14	30,25 – 32,96	23,31 – 25,32
1,0	33,91	25,86	±4,25	±4,12	32,46 – 35,35	24,80 – 26,93

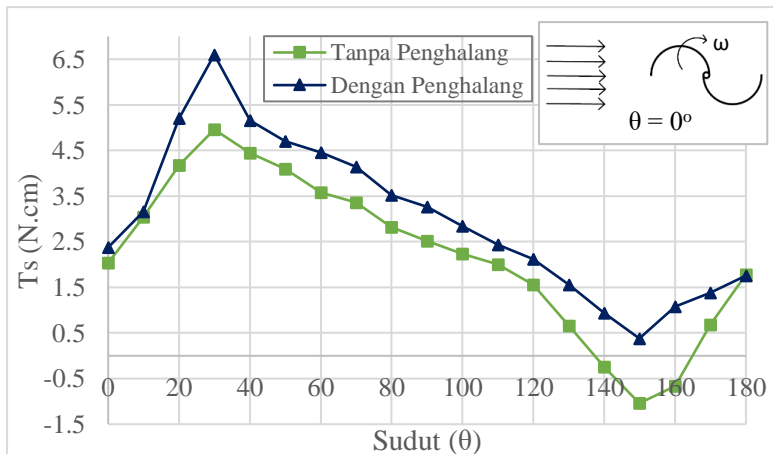
4.3.3 Analisis Nilai Torsi Statis (Ts) Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu Pada Re 97000 dan 136000

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan untuk turbin angin Savonius dengan dan tanpa adanya silinder pengganggu, didapatkan data berupa nilai torsi statis (Ts) fungsi sudut (θ) pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Untuk mendapatkan nilai torsi statis digunakan alat ukur berupa torsimeter. Pengambilan data dilakukan pada saat turbin dalam kondisi diam yaitu dengan dicekam pada bagian atas poros turbin, kemudian dialiri udara pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000.

Torsi statis yang diukur pada penelitian ini yaitu torsi statis pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi sudut 0° searah dengan aliran angin hingga sudut 180° dengan kenaikan sebesar 10° . Grafik torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (T_s) fungsi sudut (θ) pada masing-masing bilangan Reynolds dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4. 8 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan (T_s) dan Tanpa Silinder Penghalang (T_{s0}) Fungsi Sudut (θ) Pada (S/D) = 3,0; (d/D) = 0,6; (y/D) = 0,5; $Re = 97000$



Gambar 4. 9 Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan (T_s) dan Tanpa Silinder Penghalang (T_{s_0}) Fungsi Sudut (θ) Pada (S/D) = 3,0; (d/D) = 0,5; (y/D) = 0,5 $Re = 136000$

Pada gambar 4.8 dan 4.9 dapat dilihat *trendline* membentuk grafik sinusoidal. Untuk bilangan Reynolds 97000, torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s_0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 3,28 N.cm, kemudian turun hingga sudut 130° dengan nilai torsi statis minimum -0,9 N.cm dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut 180° , sedangkan pada grafik torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) grafik naik dari 0° hingga 30° dengan nilai torsi statis maksimal sebesar 3,82 N.cm kemudian turun hingga sudut 130° dengan nilai torsi statis minimum 0,86 N.cm dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut 180° . Pada bilangan Reynolds 136000, torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s_0}) mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° dengan nilai torsi maksimal sebesar 4,96 N.cm kemudian turun hingga sudut 150° dengan nilai torsi statis minimum -1,04 N.cm dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut 180° , sedangkan pada grafik torsi statis dengan silinder pengganggu (T_s) grafik naik dari 0° hingga 30° dengan nilai torsi statis maksimal sebesar 6,6 N.cm kemudian turun

hingga sudut 150° dengan nilai torsi statis minimum $0,38 \text{ N.cm}$ dan mengalami peningkatan kembali hingga sudut 180° .

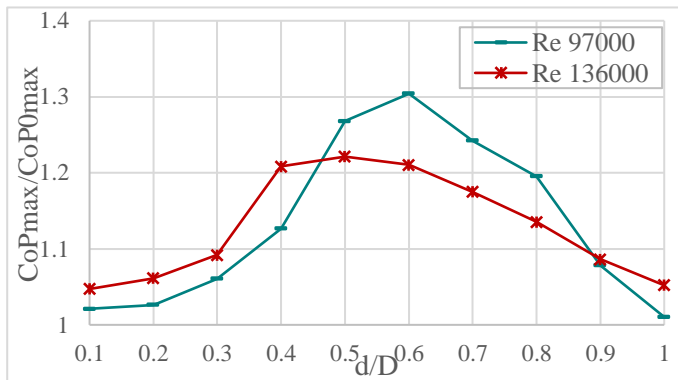
Torsi statis di definisikan sebagai torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu memiliki torsi statis yang nilainya selalu positif, dimana hal ini menandakan bahwa turbin angin Savonius yang diberikan silinder pengganggu mempunyai kemampuan *self-starting* pada semua posisi angular sudut karena mampu menangkap angin dari berbagai posisi. Hal ini membuktikan bahwa nilai torsi statis pada turbin angin Savonius dipengaruhi oleh datangnya fluida kerja berupa angin. Pada turbin angin Savonius yang tidak diberikan silinder pengganggu memiliki torsi statis negatif pada sudut 100° hingga 160° untuk Re 97000 dan untuk Re 136000 pada sudut 140° hingga 160° menandakan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu tidak mempunyai kemampuan *self starting*.

4.4 Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh penulis dan rekan satu kelompok penulis, didapatkan nilai torsi dinamis dari turbin tanpa dan dengan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0$ dengan variasi ukuran diameter silinder pengganggu $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$ untuk bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Masing-masing data diolah untuk kemudian mendapatkan nilai *coefficient of power*. Data yang akan di analisis yaitu kenaikan kinerja turbin angin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu ($CoP_{\max}/CoP_{0\max}$) terhadap variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) dan variasi jarak penempatan silinder pengganggu (S/D).

4.4.1. Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu Pada Jarak $S/D = 3,0$

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh penulis, didapatkan nilai torsi dinamis dari turbin tanpa pengganggu dan turbin dengan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 3,0$ dengan variasi ukuran diameter d/D 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 untuk bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Masing-masing data diolah untuk kemudian mendapatkan nilai *coefficient of power*. Dilakukan analisis perbandingan antara kinerja turbin angin Savonius dengan dan tanpa menggunakan silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D). Data hasil pengukuran kenaikan *coefficient of power* dengan penambahan silinder pengganggu dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik Kenaikan Nilai Maksimal *Coefficient of Performance* Turbin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D Pada Bilangan Reynolds 97000 dan 136000 ($S/D = 3,0$; $y/D = 0,5$)

Pada gambar 4.10 menunjukkan grafik kenaikan nilai CoP_{max} yang terjadi ketika turbin angin Savonius diberikan silinder pengganggu pada jarak (S/D) = 3,0) dengan variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6;

0,7; 0,8; 0,9 dan 1,0. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kedua grafik mempunyai *trendline* yang berbentuk parabolik dimana nilai CoP_{max}/CoP_{0max} naik hingga titik tertentu dan kemudian turun kembali seiring dengan bertambahnya variasi ukuran diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D). Pada bilangan Reynolds 97000 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} maksimal terdapat pada ukuran $d/D = 0,6$ sebesar 1,3043 dengan kenaikan sebesar 30,43% dan pada bilangan Reynolds 136000 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} maksimal terdapat pada ukuran $d/D = 0,5$ sebesar 1,2212 dengan kenaikan sebesar 22,12%.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa penambahan silinder pengganggu efektif meningkatkan *coefficient of power* turbin angin Savonius karena nilai $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$ pada seluruh variasi d/D sehingga dapat dikatakan bahwa variasi ukuran diameter silinder pengganggu mempengaruhi performa turbin angin Savonius. Variasi ukuran diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) yang paling optimum untuk kedua bilangan Reynolds terletak pada ukuran (d/D) = 0,5 dan 0,6 dimana ukuran ini terletak pada *range* tengah dari beragam variasi ukuran d/D yang digunakan pada studi eksperimen ini. Peningkatan *coefficient of power* yang paling besar terjadi pada ukuran diameter silinder pengganggu yang berada di *range* tengah ini dapat disebabkan karena dengan ukuran diameter silinder pengganggu kurang dari (d/D) = 0,5 kurang efektif menurunkan tekanan didepan *returning blade* dan menunda titik separasi, sedangkan untuk ukuran diameter silinder pengganggu yang lebih dari (d/D) = 0,6 menyebabkan aliran *free stream* yang menuju *advancing blade* terhalangi dan dapat menurunkan kinerja turbin angin Savonius. Data perbandingan kenaikan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu dapat dilihat pada tabel 4.5.

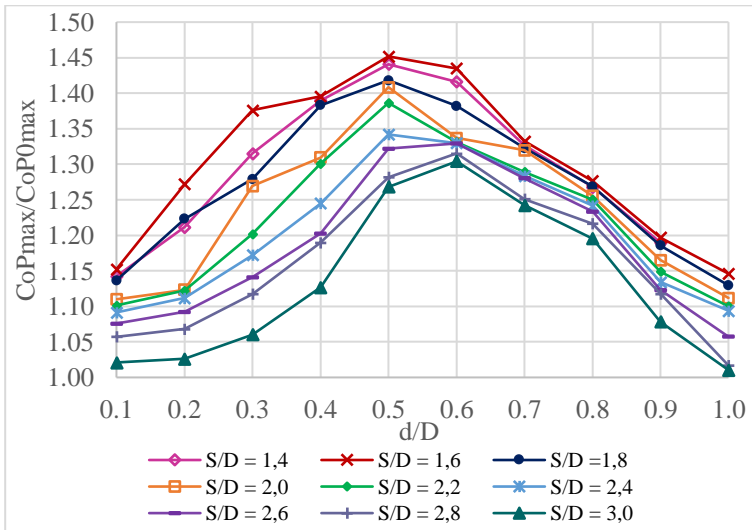
Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Maksimal Turbin dengan dan tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Fungsi Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) untuk Penempatan Jarak (S/D) = 3,0

d/D	Re 97000			Re 136000		
	CoP_{0max} (%)	CoP_{max} (%)	CoP_{max}/CoP_{0max} (%)	CoP_{0max} (%)	CoP_{max} (%)	CoP_{max}/CoP_{0max} (%)
0,1	15,15	15,47	2,11	10,40	10,89	4,71
0,2		15,55	2,64		11,04	6,15
0,3		16,07	06,07		11,35	9,13
0,4		17,07	12,67		12,57	20,86
0,5		19,21	26,80		12,70	22,12
0,6		19,76	30,43		12,59	21,06
0,7		18,82	24,22		12,22	17,50
0,8		18,11	19,54		11,81	13,56
0,9		16,34	7,85		11,30	8,65
1,0		15,31	1,06		10,94	5,20

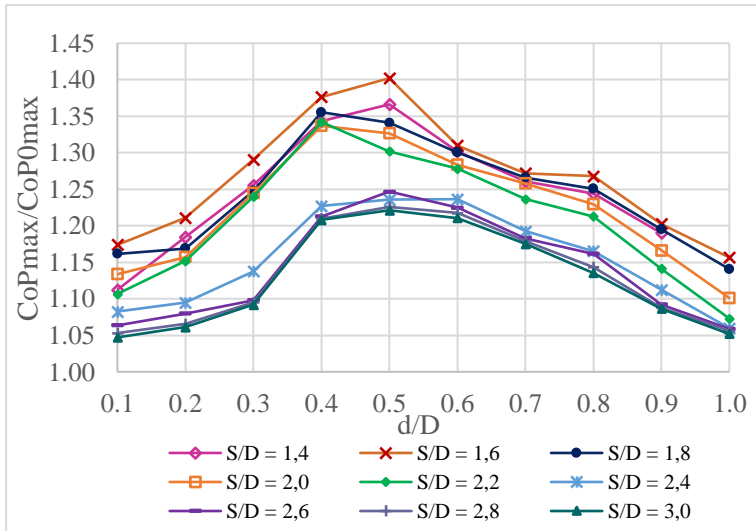
4.4.2. Analisis Kenaikan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu Pada Variasi Jarak $S/D = 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0$

Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh penulis dan rekan satu kelompok penulis, didapatkan nilai torsi dinamis dari turbin tanpa pengganggu dan turbin dengan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,6$ yang diperoleh dari data saudara Muhammad Rizky Ramadhan, jarak $S/D = 1,8$ yang diperoleh dari data saudara Markus Sarsanto, jarak $S/D = 2,0$ yang diperoleh dari data saudara Muhammad Ghiyats Humam, jarak $S/D = 2,2$ yang diperoleh dari data saudara Lazuardhi Rahim Yamin, jarak $S/D = 2,4$ yang diperoleh dari data saudara Prabasworo Drestanto, jarak $S/D = 2,6$ yang diperoleh dari data saudara Muhammad Ardy Makarim, jarak $S/D = 2,8$ yang diperoleh dari data saudari Hilda Mailil Haq dan untuk jarak $S/D = 3,0$ merupakan data yang diperoleh penulis. Pada eksperimen ini digunakan variasi ukuran diameter d/D sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan

1,0 pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Masing-masing data diolah untuk kemudian mendapatkan nilai *coefficient of power*. Dilakukan analisis perbandingan antara kinerja turbin angin Savonius dengan dan tanpa menggunakan silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D). Data hasil pengukuran kenaikan *coefficient of power* dengan penambahan silinder pengganggu dapat dilihat pada gambar 4.11, 4.12, 4.13 dan 4.14.



Gambar 4. 11 Grafik Kenaikan Nilai *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) Pada Bilangan Reynolds 97000 ($y/D = 0,5$)



Gambar 4. 12 Grafik Kenaikan Coefficient of Power Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu (d/D) Pada Bilangan Reynolds 136000 ($y/D = 0,5$)

Pada gambar 4.11 dan gambar 4.12 dapat dilihat kenaikan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) untuk setiap jarak penempatan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk setiap variasi jarak penempatan silinder pengganggu membentuk *trendline* parabolik dimana nilai CoP_{max}/CoP_{0max} naik hingga nilai tertentu kemudian turun seiring dengan bertambahnya variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D). Pada kedua bilangan Reynolds, kenaikan CoP_{max} untuk setiap variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) yang paling besar adalah pada variasi jarak $S/D = 1,6$ dan paling kecil adalah pada jarak $S/D = 3,0$. Data perbandingan kenaikan *coefficient of power* dengan dan tanpa

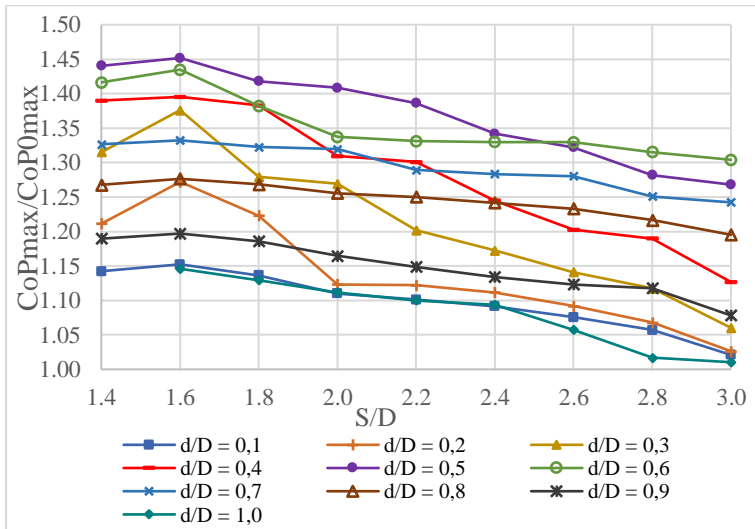
silinder pengganggu terhadap variasi d/D dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Tabel Kenaikan *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D dan S/D

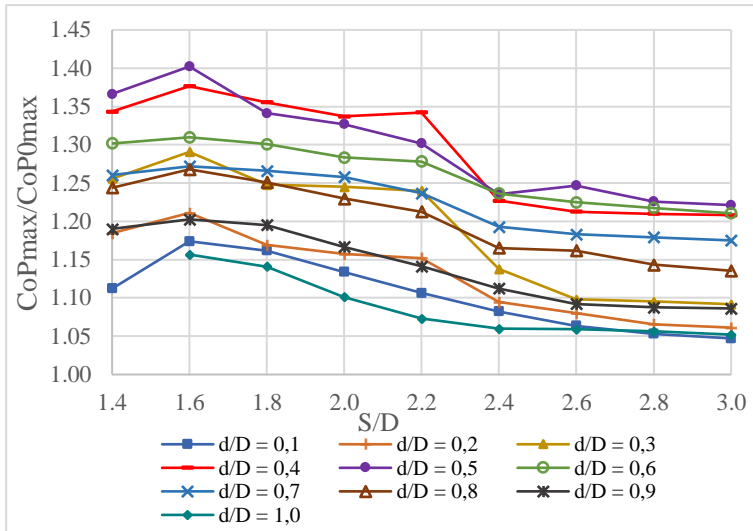
Re 97000										
S/D	d/D									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,4	1.14	1.21	1.32	1.39	1.44	1.42	1.33	1.27	1.19	
1,6	1.15	1.27	1.38	1.40	1.45	1.43	1.33	1.28	1.20	1.15
1,8	1.14	1.22	1.28	1.38	1.42	1.38	1.32	1.27	1.19	1.13
2,0	1.11	1.12	1.27	1.31	1.41	1.34	1.32	1.26	1.16	1.11
2,2	1.10	1.12	1.20	1.30	1.39	1.33	1.29	1.25	1.15	1.10
2,4	1.09	1.11	1.17	1.24	1.34	1.33	1.28	1.24	1.13	1.09
2,6	1.08	1.09	1.14	1.20	1.32	1.33	1.28	1.23	1.12	1.06
2,8	1.06	1.07	1.12	1.19	1.28	1.32	1.25	1.22	1.12	1.02
3,0	1.02	1.03	1.06	1.13	1.27	1.30	1.24	1.20	1.08	1.01
Re 136000										
S/D	d/D									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,4	1.11	1.18	1.26	1.34	1.37	1.30	1.26	1.24	1.19	
1,6	1.17	1.21	1.29	1.38	1.40	1.31	1.27	1.27	1.20	1.16
1,8	1.16	1.17	1.25	1.36	1.34	1.30	1.27	1.25	1.20	1.14
2,0	1.13	1.16	1.25	1.34	1.33	1.28	1.26	1.23	1.17	1.10
2,2	1.11	1.15	1.24	1.34	1.30	1.28	1.24	1.21	1.14	1.07
2,4	1.08	1.09	1.14	1.23	1.24	1.24	1.19	1.17	1.11	1.06
2,6	1.06	1.08	1.10	1.21	1.25	1.22	1.18	1.16	1.09	1.06
2,8	1.05	1.07	1.10	1.21	1.23	1.22	1.18	1.14	1.09	1.06
3,0	1.05	1.06	1.09	1.21	1.22	1.21	1.18	1.14	1.09	1.05

Dari tabel 4.4 dapat dilihat bahwa untuk seluruh variasi jarak S/D dan d/D nilai CoP_{max}/CoP_{0max} selalu lebih dari satu yang menandakan bahwa penambahan silinder pengganggu efektif meningkatkan *coefficient of power* (CoP). Untuk bilangan Reynolds 97000 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi terjadi pada rasio $(d/D) = 0,5$ untuk variasi jarak $(S/D) = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6$ dan untuk jarak $(S/D) = 2,8$ dan $3,0$ nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi terletak pada rasio $(d/D) = 0,6$. Untuk bilangan Reynolds 136000 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi yaitu pada rasio $(d/D) = 0,5$ untuk variasi jarak $(S/D) = 1,4; 1,6; 2,6; 2,8;$ dan $3,0$, pada $(d/D) =$

0,4 untuk variasi jarak (S/D) = 1,8; 2,0; dan 2,2 serta untuk jarak (S/D) = 2,4 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi terjadi pada (d/D) = 0,6. Pada kedua bilangan Reynolds, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi untuk semua variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D), jarak peletakan (S/D) yang paling optimum adalah pada (S/D) = 1,6, dimana variasi ukuran diameter yang digunakan adalah (d/D) = 0,5. Untuk semua variasi peletakan silinder pengganggu (S/D) nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi didapatkan pada ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,4; 0,5; dan 0,6, dimana ketiga variasi ukuran diameter silinder pengganggu ini terletak pada *range* tengah dari variasi ukuran diameter silinder pengganggu yang digunakan pada studi eksperimen yang dilakukan.



Gambar 4. 13 Grafik Kenaikan *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Jarak Penempatan Silinder Pengganggu (S/D) Pada Bilangan Reynolds 97000 ($y/D = 0,5$)



Gambar 4. 14 Grafik Kenaikan *Coefficient of Power* Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi Jarak Penempatan Silinder Pengganggu (S/D) Pada Bilangan Reynolds 136000 ($y/D = 0,5$)

Gambar 4.13 dan 4.14 menunjukkan kenaikan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi jarak penempatan silinder pengganggu (S/D) untuk semua variasi ukuran diameter silinder pengganggu pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds 97000 untuk setiap variasi ukuran diameter silinder pengganggu membentuk *trendline* yang naik dari jarak (S/D) = 1,4 ke (S/D) = 1,6 kemudian terus menurun hingga (S/D) = 3,0, dimana kenaikan CoP_{max} untuk setiap variasi penempatan silinder pengganggu (S/D) yang paling besar adalah pada variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,5 dan 0,6 dan kenaikan yang paling sedikit adalah pada ukuran (d/D) = 0,1 dan 1,0. Pada bilangan Reynolds 136000 dapat dilihat bahwa *trendline* grafik cenderung menurun dari penempatan jarak (S/D) = 1,6 hingga (S/D) = 3,0, dimana kenaikan CoP_{max} paling besar

adalah pada variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) sebesar 0,4; 0,5; dan 0,6 dan kenaikan yang paling sedikit adalah pada ukuran (d/D) = 0,1 dan 1,0. Data perbandingan kenaikan *coefficient of power* dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap variasi d/D dapat dilihat pada tabel 4.6.

Dari tabel 4.6 serta gambar 4.13 dan 4.14 dapat dilihat bahwa untuk kedua bilangan Reynolds, semakin dekat jarak penempatan silinder pengganggu ($S/D = 1,4$) kenaikan nilai *coefficient of power* tidak terlalu besar kemudian nilai CoP_{max}/CoP_{0max} mencapai titik puncak kenaikan pada jarak $S/D = 1,6$ dan kemudian semakin jauh jarak penempatan silinder pengganggu ($S/D > 1,6$) maka semakin turun besar kenaikan *coefficient of power* dan nilai maksimal *coefficient of power*. Hal ini dapat disebabkan karena ketika jarak penempatan silinder pengganggu terlalu dekat kurang efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga kurang efektif menunda titik separasi, selanjutnya ketika diletakkan pada jarak yang tidak terlalu dekat ($S/D \geq 1,6$) efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* sehingga lebih efektif menunda titik separasi. Selain itu dengan penempatan silinder pengganggu yang tidak terlalu dekat ($S/D \geq 1,6$) dapat menurunkan tekanan di bagian depan *returning blade* dan meningkatkan selisih tekanan di bagian depan dan belakang *returning blade*, sehingga selisih gaya *drag* antara *returning blade* dan *advancing blade* juga meningkat dan meningkatkan kinerja turbin angin Savonius.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu yang diletakkan dengan rasio jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 3,0 dan (y/D) = 0,5 dengan variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0 serta pada bilangan Reynolds 97000 dan 136000 dengan tujuan untuk menganalisis peningkatan kinerja turbin angin Savonius. Hasil dari studi eksperimen yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Penambahan silinder pengganggu didepan sisi *returning blade* turbin angin Savonius efektif meningkatkan kinerja turbin angin Savonius.
2. Penambahan silinder pengganggu pada jarak (S/D) = 3,0 didepan sisi *returning blade* efektif meningkatkan *coefficient of power* maksimal untuk semua variasi bilangan Reynolds. Pada bilangan Reynolds 97000 kenaikan *coefficient of power* maksimal tertinggi adalah sebesar 30,43% pada ukuran diameter (d/D) = 0,6 dengan nilai *coefficient of power* sebesar 19,76%. Untuk bilangan Reynolds 136000 kenaikan *coefficient of power* maksimal tertinggi adalah sebesar 22,12% pada ukuran diameter (d/D) = 0,5, dengan nilai *coefficient of power* sebesar 12,70%.
3. Penambahan silinder pengganggu pada jarak (S/D) = 3,0 didepan sisi *returning blade* efektif meningkatkan *coefficient of moment* maksimal untuk semua variasi bilangan Reynolds. Pada bilangan Reynolds 97000 kenaikan *coefficient of moment* maksimal tertinggi adalah sebesar 34,26% pada ukuran diameter (d/D) = 0,6 dengan nilai *coefficient of moment* sebesar 38,09%. Untuk bilangan Reynolds 136000 kenaikan *coefficient of moment* maksimal tertinggi adalah sebesar 20,55% pada ukuran

diameter (d/D) = 0,5 dengan nilai *coefficient of moment* sebesar 28,27%.

4. Penambahan silinder pengganggu didepan sisi *returning blade* menyebabkan turbin angin Savonius mempunyai kemampuan *self-starting* yang baik pada semua posisi angular sudu, dimana pada seluruh variasi bilangan Reynolds tidak terdapat torsi statis yang bernilai negatif.
5. Pada kedua bilangan Reynolds, kenaikan CoP_{max} untuk setiap variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) yang paling besar adalah pada variasi jarak $S/D = 1,6$ dan paling kecil adalah pada jarak $S/D = 3,0$.
6. Pada kedua bilangan Reynolds, kenaikan CoP_{max} untuk setiap variasi jarak penempatan silinder pengganggu (S/D) yang paling optimal adalah dengan variasi ukuran diameter silinder pengganggu (d/D) = 0,4; 0,5; 0,6.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan neraca pegas digital atau yang mempunyai ketelitian yang lebih tinggi.
2. Diperlukan studi numerik terkait pengaruh variasi ukuran diameter silinder pengganggu yang diletakkan didepan *returning blade* turbin angin Savonius.
3. Peralatan yang digunakan dipastikan berada pada pengaturan *setting* yang sama untuk setiap pengukuran agar pembacaan hasil pengukuran lebih konstan.
4. Untuk penggunaan turbin angin Savonius dengan konfigurasi geometri dan pengondisian yang sama, variasi ukuran silinder pengganggu yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja turbin adalah (d/D) = 0,4; 0,5; dan 0,6.

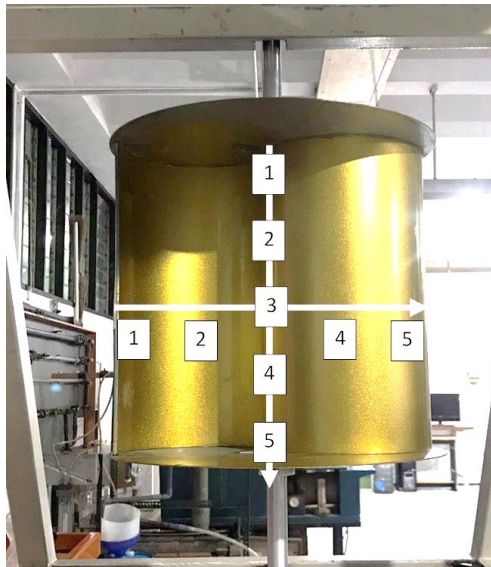
DAFTAR PUSTAKA

- Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). *A review on the performance of Savonius wind turbines*. 16(5), 3054–3064.
- Al-Shimmeri, T. (2010). *Wind Turbines*. Suffolk, England: Bookboon.com (Ventus Publishing ApS).
- Aprilia, J., & Yuwono, T. (2018). *Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius*.
- Daffa, D. A., & Yuwono, T. (2019). *STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DIDEPAN RETURNING BLADE TURBIN “Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Sirkular $d/D = 1,0$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,4$; $2,6$; $2,8$; $3,0$; dan $3,2$; $Re = 96.000$, 134.000 dan 173* .
- Dr. Hamdi, H. (2016). *Energi Terbarukan.pdf* (C. Rahayu, Ed.). Jakarta: KENCANA PRENADAMEDIA GROUP.
- Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2008). *Introduction to Fluid Mechanics* (8TH ed.). USA: JOHN WILEY & SONS, INC.
- Lee, S.-J., Lee, S.-I., & Park, C.-W. (2004). Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod Sang-Joon. *Fluid Dynamics Research*, 34, 233–250.
- Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Tsutsui, T., & Igarashi, T. (2002). Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod. *Wind Engineering*. wikipedia. (n.d.). *Savonius wind turbine* (pp. 1–4). pp. 1–4.

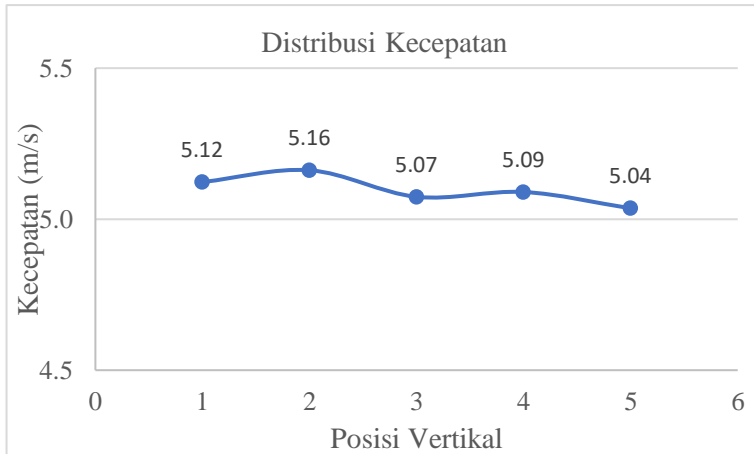
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN A

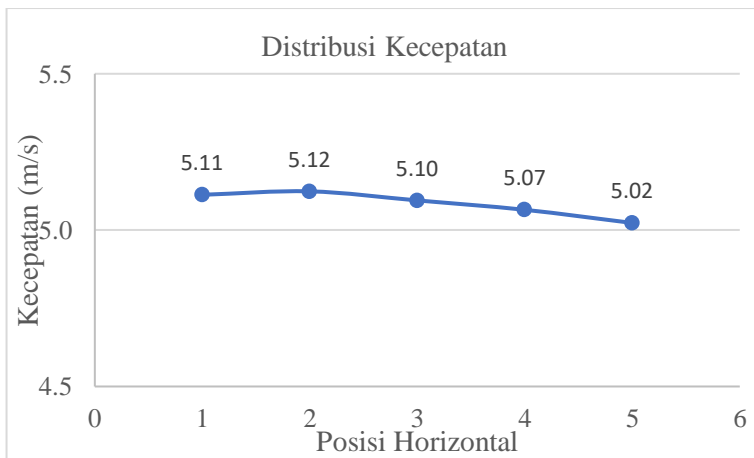
Keseragaman aliran (*uniform flow*) diperlukan dalam melakukan studi eksperimen ini agar didapatkan hasil yang ideal selama pengujian dilakukan. Pada penelitian ini, cara yang digunakan untuk menentukan keseragaman aliran fluida adalah dengan mengatur jarak turbin angin Savonius dan *axial fan*. Alat yang digunakan untuk mengetahui besarnya kecepatan aliran angin adalah anemometer. Selanjutnya untuk menentukan keseragaman aliran angin diambil lima titik vertikal dan lima titik horizontal dengan mengatur ketinggian peletakan anemometer. Hasil yang didapatkan adalah keseragaman aliran didapat pada jarak 670 mm didepan turbin angin Savonius. Berikut merupakan data keseragaman aliran yang diukur pada jarak 670 mm didepan turbin angin Savonius.



Gambar A. 1 Posisi Titik Pengambilan Data Kecepatan Angin



Gambar A. 2 Distribusi Kecepatan Posisi Vertikal



Gambar A. 3 Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal

Tabel A. 1 Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal dan Vertikal
Uji Uniformity

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN B

Tabel B. 1 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu, bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	426	44.588	0	0	0.092	1.17	1.378	0	0	0
28.5	5	336.1	35.178	6	140	0.092	1.17	1.087	0.016	0.086	0.079
28.5	5	280.38	29.346	15.3	240	0.092	1.17	0.907	0.028	0.120	0.132
28.5	5	220.74	23.104	24.6	370	0.092	1.17	0.714	0.042	0.145	0.204
28.5	5	203.98	21.350	27.7	410	0.092	1.17	0.660	0.047	0.149	0.225
28.5	5	194.6	20.368	30.8	435	0.092	1.17	0.629	0.050	0.150	0.238
28.5	5	186.4	19.510	33.9	460	0.092	1.17	0.603	0.052	0.152	0.251
28.5	5	175.86	18.407	37	470	0.092	1.17	0.569	0.053	0.145	0.255
28.5	5	151.96	15.905	40.1	480	0.092	1.17	0.491	0.054	0.127	0.259
28.5	5	110.84	11.601	43.2	500	0.092	1.17	0.358	0.056	0.097	0.269
28.5	5	96.58	10.109	49.4	510	0.092	1.17	0.312	0.056	0.085	0.272
28.5	5	85.06	8.903	55.6	520	0.092	1.17	0.275	0.057	0.075	0.274
28.5	5	71.4	7.473	68	540	0.092	1.17	0.231	0.058	0.064	0.278
28.5	5	57.5	6.018	83.5	560	0.092	1.17	0.186	0.058	0.052	0.281
28.5	5	37.36	3.910	99	580	0.092	1.17	0.121	0.059	0.034	0.284
28.5	5	0	0.000	130	600	0.092	1.17	0	0.058	0	0

Tabel B. 2 Data Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu, Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	T	CoP	C _M
28.5	7	508.4	53.213	0	0	0.092	1.17	1.174	0	0	0
28.5	7	409.2	42.830	6	220	0.092	1.17	0.945	0.026	0.061	0.064
28.5	7	372.66	39.005	18.4	310	0.092	1.17	0.861	0.036	0.076	0.088
28.5	7	330.54	34.597	30.8	430	0.092	1.17	0.764	0.049	0.092	0.120
28.5	7	300.26	31.427	37	520	0.092	1.17	0.694	0.059	0.101	0.145
28.5	7	277.08	29.001	40.1	580	0.092	1.17	0.640	0.066	0.104	0.162
28.5	7	249.9	26.156	43.2	610	0.092	1.17	0.577	0.069	0.098	0.171
28.5	7	223.6	23.403	46.3	650	0.092	1.17	0.517	0.074	0.094	0.182
28.5	7	203.46	21.295	49.4	670	0.092	1.17	0.470	0.076	0.088	0.187
28.5	7	112.74	11.800	58.7	720	0.092	1.17	0.260	0.081	0.052	0.199
28.5	7	86.14	9.016	74.2	780	0.092	1.17	0.199	0.086	0.042	0.212
28.5	7	51.8	5.422	89.7	820	0.092	1.17	0.120	0.090	0.026	0.220
28.5	7	30.96	3.240	120.7	900	0.092	1.17	0.072	0.096	0.017	0.234
28.5	7	0	0.000	151.7	950	0.092	1.17	0.000	0.098	0	0

Tabel B. 3 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu

Sudut	Ts (N.cm)	
	97000	136000
0	1.08	2.04
10	2.06	3.04
20	2.66	4.18
30	3.28	4.96
40	2.7	4.44
50	2.14	4.1
60	1.64	3.58
70	1.26	3.36
80	1.06	2.82
90	0.64	2.52
100	-0.08	2.24
110	-0.32	2
120	-0.6	1.56
130	-0.9	0.66
140	-0.82	-0.24
150	-0.42	-1.04
160	-0.14	-0.66
170	0.3	0.68
180	1.26	1.78

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN C

Tabel C. 1 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,1$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	420.94	44.058	0	0	0.092	1.17	1.361	0	0	0
28.5	5	305.58	31.984	6	230	0.092	1.17	0.988	0.027	0.131	0.132
28.5	5	295.86	30.967	9.1	260	0.092	1.17	0.957	0.031	0.142	0.148
28.5	5	290.2	30.374	12.2	280	0.092	1.17	0.939	0.033	0.148	0.158
28.5	5	282.88	29.608	15.3	300	0.092	1.17	0.915	0.035	0.154	0.168
28.5	5	264.48	27.682	18.4	325	0.092	1.17	0.855	0.038	0.155	0.181
28.5	5	253.72	26.556	21.5	335	0.092	1.17	0.821	0.038	0.152	0.185
28.5	5	244	25.539	24.6	345	0.092	1.17	0.789	0.039	0.149	0.189
28.5	5	204.84	21.440	40.1	390	0.092	1.17	0.662	0.042	0.137	0.206
28.5	5	193.58	20.261	55.6	420	0.092	1.17	0.626	0.045	0.135	0.215
28.5	5	145.94	15.275	86.6	500	0.092	1.17	0.472	0.051	0.115	0.244
28.5	5	97.08	10.161	117.6	570	0.092	1.17	0.314	0.055	0.084	0.267
28.5	5	53.9	5.642	148.6	640	0.092	1.17	0.174	0.060	0.050	0.290
28.5	5	0	0.000	210.6	710	0.092	1.17	0	0.061	0	0

Tabel C. 2 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,1 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	594.4	62.214	0	0	0.092	1.17	1.373	0	0	0
28.5	7	516.8	54.092	6	250	0.092	1.17	1.194	0.030	0.088	0.073
28.5	7	504	52.752	9.1	290	0.092	1.17	1.164	0.034	0.098	0.084
28.5	7	493.8	51.684	12.2	305	0.092	1.17	1.141	0.036	0.100	0.088
28.5	7	487.8	51.056	15.3	320	0.092	1.17	1.127	0.037	0.103	0.092
28.5	7	477	49.926	18.4	340	0.092	1.17	1.102	0.039	0.107	0.097
28.5	7	462.8	48.440	21.5	360	0.092	1.17	1.069	0.041	0.109	0.102
28.5	7	439.4	45.991	30.8	380	0.092	1.17	1.015	0.043	0.107	0.105
28.5	7	434	45.425	40.1	390	0.092	1.17	1.003	0.043	0.106	0.105
28.5	7	431	45.111	49.4	400	0.092	1.17	0.996	0.043	0.105	0.105
28.5	7	401.2	41.992	58.7	420	0.092	1.17	0.927	0.044	0.101	0.109
28.5	7	370.2	38.748	89.7	470	0.092	1.17	0.855	0.047	0.098	0.114
28.5	7	333.8	34.938	120.7	520	0.092	1.17	0.771	0.049	0.093	0.120
28.5	7	318.2	33.305	151.7	560	0.092	1.17	0.735	0.050	0.090	0.123
28.5	7	203.2	21.268	182.7	680	0.092	1.17	0.469	0.061	0.070	0.150
28.5	7	178.6	18.693	213.7	760	0.092	1.17	0.413	0.067	0.068	0.164
28.5	7	138.6	14.507	244.7	840	0.092	1.17	0.320	0.073	0.057	0.179
28.5	7	97.8	10.236	275.7	950	0.092	1.17	0.226	0.083	0.046	0.203
28.5	7	44.2	4.626	306.7	1120	0.092	1.17	0.102	0.099	0.025	0.245
28.5	7	0	0.000	337.7	1150	0.092	1.17	0	0.100	0	0

Tabel C. 3 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,2$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	396.24	41.473	0	0	0.092	1.17	1.281	0	0	0
28.5	5	315.5	33.022	6	200	0.092	1.17	1.020	0.024	0.117	0.114
28.5	5	298.38	31.230	9.1	245	0.092	1.17	0.965	0.029	0.134	0.139
28.5	5	286.12	29.947	12.2	270	0.092	1.17	0.925	0.032	0.141	0.152
28.5	5	270.32	28.293	15.3	300	0.092	1.17	0.874	0.035	0.147	0.168
28.5	5	254.86	26.675	18.4	330	0.092	1.17	0.824	0.038	0.152	0.184
28.5	5	240.8	25.204	21.5	360	0.092	1.17	0.779	0.041	0.155	0.200
28.5	5	224.64	23.512	24.6	380	0.092	1.17	0.726	0.044	0.152	0.210
28.5	5	201.38	21.078	27.7	400	0.092	1.17	0.651	0.046	0.143	0.220
28.5	5	163.4	17.103	37	435	0.092	1.17	0.528	0.049	0.124	0.235
28.5	5	104.94	10.984	52.5	480	0.092	1.17	0.339	0.052	0.086	0.252
28.5	5	51.64	5.405	83.5	580	0.092	1.17	0.167	0.061	0.049	0.293
28.5	5	0	0.000	114.5	620	0.092	1.17	0	0.062	0	0

Tabel C. 4 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,2$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	540.08	56.528	0	0	0.092	1.17	1.248	0	0	0
28.5	7	481.04	50.349	6	240	0.092	1.17	1.111	0.029	0.078	0.070
28.5	7	474.96	49.712	9.1	260	0.092	1.17	1.097	0.031	0.083	0.075
28.5	7	465.28	48.699	12.2	280	0.092	1.17	1.075	0.033	0.087	0.081
28.5	7	455.12	47.636	15.3	300	0.092	1.17	1.051	0.035	0.090	0.086
28.5	7	446.18	46.700	18.4	320	0.092	1.17	1.031	0.037	0.094	0.091
28.5	7	442.68	46.334	21.5	330	0.092	1.17	1.023	0.038	0.095	0.093
28.5	7	434.66	45.494	24.6	350	0.092	1.17	1.004	0.040	0.098	0.098
28.5	7	428.98	44.900	27.7	360	0.092	1.17	0.991	0.041	0.099	0.100
28.5	7	425.66	44.552	30.8	370	0.092	1.17	0.983	0.042	0.100	0.102
28.5	7	419.62	43.920	33.9	390	0.092	1.17	0.969	0.044	0.104	0.107
28.5	7	414.04	43.336	37	405	0.092	1.17	0.956	0.045	0.106	0.111
28.5	7	397	41.553	40.1	440	0.092	1.17	0.917	0.049	0.110	0.120
28.5	7	378.32	39.597	43.2	460	0.092	1.17	0.874	0.051	0.109	0.125
28.5	7	340.32	35.620	46.3	490	0.092	1.17	0.786	0.054	0.105	0.133
28.5	7	295.92	30.973	55.6	530	0.092	1.17	0.684	0.058	0.098	0.143
28.5	7	130.52	13.661	71.1	720	0.092	1.17	0.301	0.080	0.059	0.195
28.5	7	75.32	7.883	102.1	910	0.092	1.17	0.174	0.099	0.042	0.243
28.5	7	0	0.000	133.1	1000	0.092	1.17	0	0.106	0	

Tabel C. 5 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,3 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	401.26	41.999	0	0	0.092	1.17	1.298	0	0	0
28.5	5	262.04	27.427	6	250	0.092	1.17	0.847	0.0299	0.122	0.144
28.5	5	230.34	24.109	9.1	335	0.092	1.17	0.745	0.040	0.143	0.192
28.5	5	222.34	23.272	12.2	355	0.092	1.17	0.719	0.042	0.145	0.202
28.5	5	211.4	22.127	15.3	390	0.092	1.17	0.684	0.046	0.151	0.221
28.5	5	203.1	21.258	18.4	420	0.092	1.17	0.657	0.049	0.156	0.237
28.5	5	198.7	20.797	21.5	435	0.092	1.17	0.643	0.051	0.157	0.244
28.5	5	184.98	19.361	24.6	480	0.092	1.17	0.598	0.056	0.161	0.269
28.5	5	175.62	18.382	27.7	500	0.092	1.17	0.568	0.058	0.158	0.279
28.5	5	132.54	13.873	30.8	515	0.092	1.17	0.429	0.059	0.122	0.286
28.5	5	100.7	10.540	40.1	535	0.092	1.17	0.326	0.061	0.095	0.292
28.5	5	82.54	8.639	55.6	560	0.092	1.17	0.267	0.062	0.079	0.297
28.5	5	48.2	5.045	86.6	590	0.092	1.17	0.156	0.062	0.046	0.297
28.5	5	0	0.000	117.6	630	0.092	1.17	0	0.063	0	0

Tabel C. 6 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,3$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	521.26	54.559	0	0	0.092	1.17	1.204	0	0	0
28.5	7	404.88	42.377	6	270	0.092	1.17	0.935	0.032	0.074	0.080
28.5	7	384.92	40.288	9.1	340	0.092	1.17	0.889	0.041	0.089	0.100
28.5	7	370.4	38.769	12.2	405	0.092	1.17	0.856	0.048	0.101	0.118
28.5	7	345.24	36.135	15.3	475	0.092	1.17	0.798	0.056	0.110	0.138
28.5	7	332.24	34.774	18.4	510	0.092	1.17	0.767	0.060	0.114	0.148
28.5	7	290.38	30.393	21.5	560	0.092	1.17	0.671	0.066	0.109	0.162
28.5	7	233.62	24.452	24.6	620	0.092	1.17	0.540	0.073	0.097	0.179
28.5	7	192.12	20.109	33.9	650	0.092	1.17	0.444	0.075	0.082	0.185
28.5	7	123.24	12.899	49.4	720	0.092	1.17	0.285	0.082	0.057	0.202
28.5	7	87.64	9.173	80.4	800	0.092	1.17	0.202	0.088	0.044	0.217
28.5	7	39.24	4.107	111.4	920	0.092	1.17	0.091	0.099	0.022	0.243
28.5	7	0	0.000	142.4	1000	0.092	1.17	0	0.105	0	0

Tabel C. 7 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,4$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	402.08	42.084	0	0	0.092	1.17	1.300	0	0	0
28.5	5	305.92	32.020	6	145	0.092	1.17	0.989	0.017	0.081	0.082
28.5	5	295.68	30.948	9.1	165	0.092	1.17	0.956	0.019	0.088	0.092
28.5	5	286.34	29.970	12.2	180	0.092	1.17	0.926	0.021	0.092	0.099
28.5	5	269.68	28.227	15.3	210	0.092	1.17	0.872	0.024	0.100	0.115
28.5	5	258.56	27.063	18.4	235	0.092	1.17	0.836	0.027	0.107	0.128
28.5	5	251.8	26.355	21.5	250	0.092	1.17	0.814	0.028	0.100	0.135
28.5	5	246.82	25.834	24.6	270	0.092	1.17	0.798	0.030	0.116	0.145
28.5	5	239.86	25.105	27.7	290	0.092	1.17	0.776	0.032	0.120	0.155
28.5	5	233.04	24.392	30.8	310	0.092	1.17	0.754	0.034	0.124	0.165
28.5	5	225.04	23.554	33.9	330	0.092	1.17	0.728	0.036	0.127	0.175
28.5	5	217.56	22.771	37	350	0.092	1.17	0.704	0.038	0.130	0.185
28.5	5	215.18	22.522	40.1	370	0.092	1.17	0.696	0.040	0.135	0.195
28.5	5	210.16	21.997	43.2	390	0.092	1.17	0.680	0.042	0.139	0.205
28.5	5	203.9	21.342	46.3	430	0.092	1.17	0.659	0.047	0.149	0.226
28.5	5	199.9	20.923	49.4	450	0.092	1.17	0.646	0.050	0.153	0.236
28.5	5	194.18	20.324	52.5	475	0.092	1.17	0.628	0.052	0.156	0.249
28.5	5	189.08	19.790	55.6	500	0.092	1.17	0.611	0.054	0.160	0.262
28.5	5	187.06	19.579	58.7	520	0.092	1.17	0.605	0.057	0.165	0.272

28.5	5	183.94	19.252	61.8	540	0.092	1.17	0.595	0.059	0.168	0.282
28.5	5	179.98	18.838	64.9	555	0.092	1.17	0.582	0.060	0.168	0.289
28.5	5	178.26	18.658	68	570	0.092	1.17	0.576	0.062	0.170	0.296
28.5	5	169.6	17.751	71.1	590	0.092	1.17	0.548	0.063	0.168	0.306
28.5	5	165.76	17.350	74.2	595	0.092	1.17	0.536	0.064	0.165	0.307
28.5	5	129.22	13.525	83.5	620	0.092	1.17	0.418	0.066	0.132	0.316
28.5	5	98.24	10.282	92.8	660	0.092	1.17	0.318	0.070	0.106	0.335
28.5	5	86.74	9.079	108.3	690	0.092	1.17	0.280	0.071	0.096	0.343
28.5	5	64.4	6.741	123.8	730	0.092	1.17	0.208	0.074	0.074	0.358
28.5	5	41.88	4.383	139.3	770	0.092	1.17	0.135	0.077	0.050	0.372
28.5	5	0	0.000	169.4	840	0.092	1.17	0	0.082	0	0

Tabel C. 8 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,4 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	555.84	58.178	0	0	0.092	1.17	1.284	0	0	0
28.5	7	458.28	47.967	6	240	0.092	1.17	1.059	0.029	0.075	0.070
28.5	7	441.42	46.202	9.1	280	0.092	1.17	1.020	0.033	0.083	0.081
28.5	7	430.52	45.061	12.2	320	0.092	1.17	0.995	0.038	0.092	0.093
28.5	7	417.82	43.732	15.3	355	0.092	1.17	0.965	0.042	0.099	0.102
28.5	7	412.86	43.213	18.4	370	0.092	1.17	0.954	0.043	0.101	0.106
28.5	7	409.8	42.892	21.5	380	0.092	1.17	0.947	0.044	0.102	0.108

28.5	7	403.54	42.237	24.6	400	0.092	1.17	0.932	0.046	0.105	0.113
28.5	7	395.56	41.402	27.7	420	0.092	1.17	0.914	0.048	0.108	0.118
28.5	7	390.76	40.900	30.8	430	0.092	1.17	0.903	0.049	0.108	0.120
28.5	7	387.96	40.606	33.9	445	0.092	1.17	0.896	0.050	0.111	0.124
28.5	7	381.88	39.970	37	465	0.092	1.17	0.882	0.052	0.114	0.129
28.5	7	370.08	38.735	40.1	495	0.092	1.17	0.855	0.056	0.117	0.137
28.5	7	367.66	38.482	43.2	510	0.092	1.17	0.850	0.057	0.119	0.140
28.5	7	357.82	37.452	46.3	530	0.092	1.17	0.827	0.059	0.120	0.146
28.5	7	352.22	36.866	49.4	550	0.092	1.17	0.814	0.061	0.123	0.151
28.5	7	350.8	36.717	52.5	560	0.092	1.17	0.810	0.062	0.124	0.153
28.5	7	347.52	36.374	55.6	570	0.092	1.17	0.803	0.063	0.124	0.155
28.5	7	343.42	35.945	58.7	585	0.092	1.17	0.793	0.064	0.126	0.158
28.5	7	332.34	34.785	61.8	595	0.092	1.17	0.768	0.065	0.123	0.160
28.5	7	323.76	33.887	64.9	600	0.092	1.17	0.748	0.065	0.121	0.161
28.5	7	312.05	32.661	68	610	0.092	1.17	0.721	0.066	0.118	0.163
28.5	7	304.04	31.823	71.1	620	0.092	1.17	0.702	0.067	0.116	0.165
28.5	7	292.7	30.636	74.2	630	0.092	1.17	0.676	0.068	0.113	0.167
28.5	7	289.03	30.252	77.3	635	0.092	1.17	0.668	0.069	0.112	0.168
28.5	7	255.4	26.732	80.4	650	0.092	1.17	0.590	0.070	0.101	0.171
28.5	7	237.56	24.865	83.5	670	0.092	1.17	0.549	0.072	0.097	0.176
28.5	7	162.28	16.985	86.6	700	0.092	1.17	0.375	0.075	0.069	0.185
28.5	7	101.95	10.671	89.7	750	0.092	1.17	0.235	0.081	0.047	0.199
28.5	7	95.525	9.998	92.8	770	0.092	1.17	0.221	0.083	0.045	0.204

28.5	7	67.24	7.038	95.9	820	0.092	1.17	0.155	0.089	0.034	0.218
28.5	7	47.9	5.014	105.2	900	0.092	1.17	0.111	0.097	0.026	0.239
28.5	7	32.8	3.433	120.7	950	0.092	1.17	0.076	0.102	0.019	0.250
28.5	7	24.24	2.537	151.7	1050	0.092	1.17	0.056	0.110	0.015	0.270
28.5	7	0	0.000	182.7	1300	0.092	1.17	0	0.137	0	0

Tabel C. 9 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,5 Pada Jarak (S/D) = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	402.74	42.153	0	0	0.092	1.17	1.302	0	0	0
28.5	5	360.48	37.730	6	160	0.092	1.17	1.166	0.019	0.106	0.091
28.5	5	352.6	36.905	9.1	190	0.092	1.17	1.140	0.022	0.122	0.107
28.5	5	350.54	36.690	12.2	205	0.092	1.17	1.134	0.024	0.129	0.114
28.5	5	344.28	36.035	15.3	230	0.092	1.17	1.113	0.026	0.141	0.127
28.5	5	339.18	35.501	18.4	245	0.092	1.17	1.097	0.028	0.147	0.134
28.5	5	335.3	35.095	21.5	255	0.092	1.17	1.084	0.029	0.149	0.138
28.5	5	333.64	34.921	24.6	265	0.092	1.17	1.079	0.029	0.153	0.142
28.5	5	328.96	34.431	27.7	280	0.092	1.17	1.064	0.031	0.158	0.149
28.5	5	326.06	34.128	30.8	290	0.092	1.17	1.054	0.032	0.161	0.153
28.5	5	316.06	33.081	33.9	320	0.092	1.17	1.022	0.035	0.172	0.169
28.5	5	310.76	32.526	37	335	0.092	1.17	1.005	0.036	0.177	0.176
28.5	5	308.52	32.292	40.1	345	0.092	1.17	0.998	0.037	0.179	0.180

28.5	5	305.28	31.953	43.2	355	0.092	1.17	0.987	0.038	0.182	0.184
28.5	5	297.18	31.105	46.3	370	0.092	1.17	0.961	0.040	0.183	0.191
28.5	5	289.32	30.282	49.4	390	0.092	1.17	0.936	0.042	0.188	0.201
28.5	5	277.84	29.081	55.6	415	0.092	1.17	0.899	0.044	0.190	0.212
28.5	5	269.86	28.245	61.8	435	0.092	1.17	0.873	0.045	0.192	0.220
28.5	5	264.58	27.693	71.1	450	0.092	1.17	0.856	0.046	0.191	0.223
28.5	5	251.76	26.351	86.6	470	0.092	1.17	0.814	0.047	0.184	0.226
28.5	5	236.04	24.706	102.1	500	0.092	1.17	0.763	0.049	0.179	0.235
28.5	5	214.88	22.491	117.6	540	0.092	1.17	0.695	0.052	0.173	0.249
28.5	5	205.42	21.501	133.1	560	0.092	1.17	0.664	0.053	0.167	0.252
28.5	5	194.36	20.343	148.6	590	0.092	1.17	0.629	0.054	0.164	0.260
28.5	5	182.72	19.125	164.1	620	0.092	1.17	0.591	0.060	0.159	0.269
28.5	5	162.22	16.979	195.1	690	0.092	1.17	0.525	0.061	0.153	0.292
28.5	5	102.7	10.749	226.1	790	0.092	1.17	0.332	0.069	0.110	0.333
28.5	5	72.34	7.572	257.1	870	0.092	1.17	0.234	0.075	0.085	0.361
28.5	5	0	0.000	288.1	900	0.092	1.17	0	0.075	0	0

Tabel C. 10 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,5 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	565.82	59.222	0	0	0.092	1.17	1.307	0	0	0
28.5	7	468.3	49.015	6	330	0.092	1.17	1.082	0.040	0.105	0.097
28.5	7	462.64	48.423	9.1	345	0.092	1.17	1.069	0.041	0.108	0.101
28.5	7	442.22	46.286	12.2	385	0.092	1.17	1.022	0.046	0.115	0.112
28.5	7	436.52	45.689	15.3	400	0.092	1.17	1.008	0.047	0.117	0.116
28.5	7	404.42	42.329	18.4	455	0.092	1.17	0.934	0.053	0.123	0.131
28.5	7	393.84	41.222	21.5	475	0.092	1.17	0.910	0.056	0.124	0.136
28.5	7	376.38	39.394	24.6	510	0.092	1.17	0.869	0.059	0.127	0.146
28.5	7	367.86	38.503	27.7	520	0.092	1.17	0.850	0.060	0.126	0.148
28.5	7	360.26	37.707	30.8	530	0.092	1.17	0.832	0.061	0.125	0.150
28.5	7	311.56	32.610	40.1	590	0.092	1.17	0.720	0.067	0.119	0.165
28.5	7	297.02	31.088	55.6	625	0.092	1.17	0.686	0.070	0.118	0.171
28.5	7	213.22	22.317	86.6	730	0.092	1.17	0.493	0.079	0.095	0.194
28.5	7	166.34	17.410	117.6	800	0.092	1.17	0.384	0.084	0.079	0.205
28.5	7	113.82	11.913	148.6	890	0.092	1.17	0.263	0.091	0.059	0.223
28.5	7	74.32	7.779	179.6	1000	0.092	1.17	0.172	0.101	0.042	0.247
28.5	7	34.34	3.594	210.6	1150	0.092	1.17	0.079	0.115	0.022	0.283
28.5	7	0	0.000	241.6	1200	0.092	1.17	0	0.117	0	0

Tabel C. 11 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,6$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	403.54	42.237	0	0	0.092	1.17	1.305	0	0	0
28.5	5	306.08	32.036	6	250	0.092	1.17	0.990	0.030	0.142	0.144
28.5	5	286.06	29.941	9.1	320	0.092	1.17	0.925	0.038	0.170	0.183
28.5	5	266.82	27.927	12.2	380	0.092	1.17	0.863	0.045	0.187	0.217
28.5	5	254.96	26.686	15.3	415	0.092	1.17	0.825	0.049	0.194	0.236
28.5	5	239.98	25.118	18.4	450	0.092	1.17	0.776	0.053	0.198	0.255
28.5	5	215.42	22.547	21.5	480	0.092	1.17	0.697	0.056	0.188	0.270
28.5	5	196.24	20.540	24.6	490	0.092	1.17	0.635	0.057	0.174	0.275
28.5	5	174.22	18.235	27.7	520	0.092	1.17	0.563	0.060	0.164	0.290
28.5	5	153.5	16.066	30.8	540	0.092	1.17	0.496	0.062	0.149	0.300
28.5	5	145.8	15.260	33.9	550	0.092	1.17	0.472	0.063	0.144	0.304
28.5	5	133.86	14.011	37	560	0.092	1.17	0.433	0.064	0.134	0.309
28.5	5	115.12	12.049	40.1	580	0.092	1.17	0.372	0.066	0.119	0.318
28.5	5	103.58	10.841	43.2	590	0.092	1.17	0.335	0.067	0.108	0.323
28.5	5	71.64	7.498	74.2	720	0.092	1.17	0.232	0.079	0.088	0.381
28.5	5	0	0.000	105.2	800	0.092	1.17	0	0.085	0	0

Tabel C. 12 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,6 Pada Jarak (S/D) = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	525.2	54.971	0	0	0.092	1.17	1.213	0	0	0
28.5	7	434.88	45.517	6	280	0.092	1.17	1.005	0.034	0.083	0.082
28.5	7	417.08	43.654	9.1	330	0.092	1.17	0.964	0.039	0.093	0.097
28.5	7	380.24	39.798	12.2	440	0.092	1.17	0.878	0.052	0.113	0.129
28.5	7	370.56	38.785	15.3	470	0.092	1.17	0.856	0.056	0.117	0.137
28.5	7	357.84	37.454	18.4	510	0.092	1.17	0.827	0.060	0.122	0.148
28.5	7	346.06	36.221	21.5	540	0.092	1.17	0.799	0.064	0.125	0.156
28.5	7	332.02	34.751	24.6	570	0.092	1.17	0.767	0.067	0.126	0.164
28.5	7	314.5	32.918	27.7	590	0.092	1.17	0.727	0.069	0.123	0.169
28.5	7	300	31.400	30.8	615	0.092	1.17	0.693	0.072	0.122	0.176
28.5	7	270.88	28.352	40.1	650	0.092	1.17	0.626	0.075	0.115	0.184
28.5	7	132.76	13.896	55.6	830	0.092	1.17	0.307	0.095	0.071	0.233
28.5	7	75.82	7.936	86.6	980	0.092	1.17	0.175	0.110	0.047	0.269
28.5	7	0	0.000	117.6	1100	0.092	1.17	0	0.120	0	0

Tabel C. 13 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,7 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	404.74	42.363	0	0	0.092	1.17	1.309	0	0	0
28.5	5	297.44	31.132	6	280	0.092	1.17	0.962	0.034	0.155	0.162
28.5	5	286.08	29.943	9.1	330	0.092	1.17	0.925	0.039	0.175	0.189
28.5	5	284.52	29.780	12.2	340	0.092	1.17	0.920	0.040	0.178	0.193
28.5	5	278.82	29.183	15.3	360	0.092	1.17	0.902	0.042	0.183	0.203
28.5	5	272.86	28.559	18.4	380	0.092	1.17	0.882	0.044	0.188	0.213
28.5	5	250.34	26.202	21.5	400	0.092	1.17	0.810	0.046	0.181	0.223
28.5	5	240.76	25.200	24.6	410	0.092	1.17	0.779	0.047	0.177	0.227
28.5	5	225.04	23.554	27.7	420	0.092	1.17	0.728	0.048	0.168	0.231
28.5	5	213.66	22.363	30.8	430	0.092	1.17	0.691	0.049	0.163	0.235
28.5	5	190.02	19.889	46.3	460	0.092	1.17	0.615	0.051	0.150	0.244
28.5	5	174.58	18.273	61.8	490	0.092	1.17	0.565	0.053	0.143	0.253
28.5	5	97.94	10.251	92.8	540	0.092	1.17	0.317	0.055	0.084	0.264
28.5	5	77.54	8.116	123.8	590	0.092	1.17	0.251	0.057	0.069	0.275
28.5	5	46.64	4.882	154.8	670	0.092	1.17	0.151	0.063	0.046	0.304
28.5	5	0	0.000	185.8	750	0.092	1.17	0	0.069	0	0

Tabel C. 14 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,7 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	565.82	59.222	0	0	0.092	1.17	1.307	0	0	0
28.5	7	491.28	51.421	6	220	0.092	1.17	1.135	0.026	0.073	0.064
28.5	7	413.38	43.267	9.1	375	0.092	1.17	0.955	0.045	0.105	0.110
28.5	7	394.32	41.272	12.2	410	0.092	1.17	0.911	0.049	0.109	0.120
28.5	7	363.36	38.032	15.3	470	0.092	1.17	0.839	0.056	0.115	0.137
28.5	7	351.46	36.786	18.4	500	0.092	1.17	0.812	0.059	0.118	0.145
28.5	7	330.92	34.636	21.5	550	0.092	1.17	0.764	0.065	0.122	0.159
28.5	7	322.32	33.736	24.6	570	0.092	1.17	0.745	0.067	0.122	0.164
28.5	7	302.72	31.685	27.7	605	0.092	1.17	0.699	0.071	0.122	0.174
28.5	7	285.6	29.893	37	630	0.092	1.17	0.660	0.073	0.118	0.178
28.5	7	272.3	28.501	46.3	655	0.092	1.17	0.629	0.075	0.115	0.183
28.5	7	237.84	24.894	61.8	700	0.092	1.17	0.549	0.078	0.106	0.192
28.5	7	201.96	21.138	92.8	750	0.092	1.17	0.467	0.081	0.092	0.198
28.5	7	98.14	10.272	123.8	870	0.092	1.17	0.227	0.092	0.051	0.225
28.5	7	40.7	4.260	154.8	960	0.092	1.17	0.094	0.099	0.023	0.242
28.5	7	0	0.000	185.8	1050	0.092	1.17	0	0.106	0	0

Tabel C. 15 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,8 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	404.86	42.375	0	0	0.092	1.17	1.309	0	0	0
28.5	5	336.64	35.235	6	150	0.092	1.17	1.089	0.018	0.092	0.085
28.5	5	312.06	32.662	9.1	200	0.092	1.17	1.009	0.023	0.114	0.113
28.5	5	304.68	31.890	12.2	220	0.092	1.17	0.985	0.025	0.121	0.123
28.5	5	295.22	30.900	15.3	245	0.092	1.17	0.955	0.028	0.129	0.135
28.5	5	282.12	29.529	18.4	275	0.092	1.17	0.912	0.031	0.138	0.151
28.5	5	273.12	28.587	21.5	300	0.092	1.17	0.883	0.034	0.145	0.164
28.5	5	262.14	27.437	24.6	330	0.092	1.17	0.848	0.037	0.153	0.180
28.5	5	255.1	26.700	27.7	360	0.092	1.17	0.825	0.041	0.162	0.196
28.5	5	247.58	25.913	30.8	395	0.092	1.17	0.801	0.045	0.172	0.215
28.5	5	241	25.225	33.9	420	0.092	1.17	0.779	0.047	0.178	0.228
28.5	5	236.52	24.756	37	435	0.092	1.17	0.765	0.049	0.180	0.235
28.5	5	234.46	24.540	40.1	445	0.092	1.17	0.758	0.050	0.181	0.239
28.5	5	230.42	24.117	43.2	450	0.092	1.17	0.745	0.050	0.179	0.240
28.5	5	223.3	23.372	46.3	460	0.092	1.17	0.722	0.051	0.176	0.244
28.5	5	219.26	22.949	49.4	470	0.092	1.17	0.709	0.052	0.176	0.248
28.5	5	209.38	21.915	52.5	480	0.092	1.17	0.677	0.052	0.171	0.252
28.5	5	199.06	20.835	55.6	495	0.092	1.17	0.644	0.054	0.167	0.259
28.5	5	191.9	20.086	58.7	505	0.092	1.17	0.621	0.055	0.163	0.263

28.5	5	181.66	19.014	61.8	520	0.092	1.17	0.588	0.056	0.159	0.270
28.5	5	154.3	16.150	71.1	540	0.092	1.17	0.499	0.057	0.138	0.277
28.5	5	143.06	14.974	80.4	550	0.092	1.17	0.463	0.058	0.128	0.277
28.5	5	114.18	11.951	95.9	580	0.092	1.17	0.369	0.059	0.105	0.286
28.5	5	90.7	9.493	126.9	650	0.092	1.17	0.293	0.064	0.091	0.309
28.5	5	79.46	8.317	142.4	680	0.092	1.17	0.257	0.066	0.081	0.317
28.5	5	54.94	5.750	157.9	710	0.092	1.17	0.178	0.068	0.058	0.326
28.5	5	43.78	4.582	173.4	740	0.092	1.17	0.142	0.069	0.047	0.334
28.5	5	24.78	2.594	188.9	780	0.092	1.17	0.080	0.072	0.028	0.349
28.5	5	0	0.000	204.4	830	0.092	1.17	0	0.077	0	0

Tabel C. 16 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,8$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	530.86	55.563	0	0	0.092	1.17	1.226	0	0	0
28.5	7	423	44.274	6	310	0.092	1.17	0.977	0.037	0.089	0.091
28.5	7	415	43.437	9.1	340	0.092	1.17	0.959	0.041	0.095	0.100
28.5	7	408	42.704	12.2	360	0.092	1.17	0.943	0.043	0.099	0.105
28.5	7	400	41.867	15.3	390	0.092	1.17	0.924	0.046	0.104	0.113
28.5	7	390	40.820	18.4	430	0.092	1.17	0.901	0.050	0.112	0.124
28.5	7	383	40.087	21.5	450	0.092	1.17	0.885	0.053	0.114	0.129
28.5	7	373	39.041	24.6	480	0.092	1.17	0.862	0.056	0.118	0.137

28.5	7	355	37.157	27.7	500	0.092	1.17	0.820	0.058	0.117	0.142
28.5	7	320	33.493	37	550	0.092	1.17	0.739	0.063	0.114	0.154
28.5	7	270	28.260	52.5	620	0.092	1.17	0.624	0.070	0.107	0.171
28.5	7	220	23.027	83.5	720	0.092	1.17	0.508	0.078	0.097	0.192
28.5	7	180	18.840	114.5	810	0.092	1.17	0.416	0.085	0.087	0.209
28.5	7	90	9.420	145.5	950	0.092	1.17	0.208	0.099	0.050	0.242
28.5	7	0	0.000	176.5	1050	0.092	1.17	0	0.107	0	0

Tabel C. 17 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 0,9 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	364.18	38.118	0	0	0.092	1.17	1.178	0	0	0
28.5	5	229.94	24.067	6	340	0.092	1.17	0.744	0.041	0.147	0.197
28.5	5	221.44	23.177	9.1	380	0.092	1.17	0.716	0.045	0.157	0.219
28.5	5	210	21.980	12.2	420	0.092	1.17	0.679	0.050	0.163	0.241
28.5	5	196.52	20.569	15.3	430	0.092	1.17	0.636	0.051	0.155	0.245
28.5	5	164.46	17.213	18.4	440	0.092	1.17	0.532	0.052	0.132	0.249
28.5	5	131.04	13.716	27.7	490	0.092	1.17	0.424	0.057	0.116	0.273
28.5	5	68.32	7.151	43.2	550	0.092	1.17	0.221	0.062	0.066	0.299
28.5	5	55.12	5.769	74.2	610	0.092	1.17	0.178	0.066	0.056	0.316
28.5	5	0	0.000	105.2	680	0.092	1.17	0	0.070	0	0

Tabel C. 18 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu ($d/D = 0,9$ Pada Jarak ($S/D = 3,0$) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	537.2	56.227	0	0	0.092	1.17	1.241	0	0	0
28.5	7	479.7	50.209	6	190	0.092	1.17	1.108	0.023	0.061	0.055
28.5	7	468	48.984	9.1	210	0.092	1.17	1.081	0.025	0.065	0.060
28.5	7	462	48.356	12.2	235	0.092	1.17	1.067	0.027	0.072	0.067
28.5	7	450.8	47.184	15.3	270	0.092	1.17	1.041	0.031	0.080	0.077
28.5	7	438.3	45.875	18.4	300	0.092	1.17	1.013	0.035	0.086	0.085
28.5	7	430	45.007	21.5	320	0.092	1.17	0.993	0.037	0.089	0.090
28.5	7	420.1	43.970	24.6	340	0.092	1.17	0.970	0.039	0.092	0.095
28.5	7	415	43.437	27.7	360	0.092	1.17	0.959	0.041	0.096	0.100
28.5	7	408	42.704	30.8	390	0.092	1.17	0.943	0.044	0.102	0.108
28.5	7	400	41.867	33.9	410	0.092	1.17	0.924	0.046	0.105	0.113
28.5	7	390	40.820	37	440	0.092	1.17	0.901	0.049	0.109	0.121
28.5	7	378	39.564	40.1	470	0.092	1.17	0.873	0.053	0.113	0.129
28.5	7	357.7	37.439	43.2	490	0.092	1.17	0.826	0.055	0.111	0.134
28.5	7	307.2	32.154	52.5	540	0.092	1.17	0.710	0.060	0.104	0.147
28.5	7	270	28.260	68	600	0.092	1.17	0.624	0.065	0.100	0.160
28.5	7	210.1	21.990	99	710	0.092	1.17	0.485	0.075	0.089	0.184
28.5	7	156.2	16.349	130	800	0.092	1.17	0.361	0.082	0.073	0.202
28.5	7	93.6	9.797	161	910	0.092	1.17	0.216	0.092	0.049	0.225
28.5	7	56.2	5.882	192	1000	0.092	1.17	0.130	0.099	0.032	0.243
28.5	7	0	0.000	223	1200	0.092	1.17	0	0.120	0	0

Tabel C. 19 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 1,0 Pada Jarak (S/D) = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 97000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	5	410.6	42.976	0	0	0.092	1.17	1.328	0	0	0
28.5	5	290.46	30.401	6	230	0.092	1.17	0.939	0.027	0.124	0.132
28.5	5	249.44	26.108	9.1	310	0.092	1.17	0.807	0.037	0.143	0.177
28.5	5	242.7	25.403	12.2	325	0.092	1.17	0.785	0.038	0.145	0.185
28.5	5	235.94	24.695	15.3	340	0.092	1.17	0.763	0.040	0.146	0.192
28.5	5	234.64	24.559	18.4	350	0.092	1.17	0.759	0.041	0.148	0.196
28.5	5	227.52	23.814	21.5	370	0.092	1.17	0.736	0.043	0.151	0.206
28.5	5	225.8	23.634	24.6	380	0.092	1.17	0.730	0.044	0.153	0.210
28.5	5	214.9	22.493	27.7	395	0.092	1.17	0.695	0.045	0.151	0.217
28.5	5	210.48	22.030	30.8	405	0.092	1.17	0.681	0.046	0.150	0.221
28.5	5	200.06	20.940	40.1	430	0.092	1.17	0.647	0.048	0.149	0.230
28.5	5	178.36	18.668	49.4	470	0.092	1.17	0.577	0.052	0.143	0.248
28.5	5	124.86	13.069	58.7	540	0.092	1.17	0.404	0.059	0.115	0.284
28.5	5	86.62	9.066	74.2	600	0.092	1.17	0.280	0.064	0.087	0.310
28.5	5	54.62	5.717	105.2	680	0.092	1.17	0.177	0.070	0.060	0.339
28.5	5	0	0.000	136.2	750	0.092	1.17	0	0.075	0	0

Tabel C. 20 Data Turbin Angin Savonius Variasi Diameter Pengganggu (d/D) = 1,0 Pada Jarak (S/D = 3,0) untuk Bilangan Reynolds 136000

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td	CoP	C _M
28.5	7	560.2	58.634	0	0	0.092	1.17	1.294	0	0	0
28.5	7	481	50.345	6	225	0.092	1.17	1.111	0.027	0.073	0.066
28.5	7	449	46.995	9.1	300	0.092	1.17	1.037	0.036	0.091	0.088
28.5	7	436.2	45.656	12.2	325	0.092	1.17	1.008	0.038	0.095	0.094
28.5	7	422.98	44.272	15.3	350	0.092	1.17	0.977	0.041	0.098	0.101
28.5	7	413.66	43.296	18.4	370	0.092	1.17	0.956	0.043	0.101	0.106
28.5	7	396.32	41.481	21.5	400	0.092	1.17	0.916	0.046	0.104	0.114
28.5	7	388.58	40.671	24.6	415	0.092	1.17	0.898	0.048	0.105	0.117
28.5	7	379.12	39.681	27.7	435	0.092	1.17	0.876	0.050	0.107	0.123
28.5	7	369.3	38.653	30.8	455	0.092	1.17	0.853	0.052	0.109	0.128
28.5	7	359.7	37.649	33.9	470	0.092	1.17	0.831	0.053	0.109	0.131
28.5	7	354.24	37.077	37	480	0.092	1.17	0.818	0.054	0.109	0.133
28.5	7	349.84	36.617	40.1	490	0.092	1.17	0.808	0.055	0.109	0.135
28.5	7	330.22	34.563	43.2	510	0.092	1.17	0.763	0.057	0.107	0.140
28.5	7	312.9	32.750	46.3	530	0.092	1.17	0.723	0.059	0.105	0.146
28.5	7	289.22	30.272	49.4	550	0.092	1.17	0.668	0.061	0.101	0.151
28.5	7	271.1	28.375	52.5	580	0.092	1.17	0.626	0.065	0.099	0.159
28.5	7	228.82	23.950	61.8	620	0.092	1.17	0.529	0.068	0.089	0.168
28.5	7	194.42	20.349	71.1	680	0.092	1.17	0.449	0.075	0.082	0.183
28.5	7	153.58	16.075	86.6	770	0.092	1.17	0.355	0.084	0.073	0.206

28.5	7	116.56	12.200	117.6	850	0.092	1.17	0.269	0.090	0.059	0.220
28.5	7	83.875	8.779	148.6	920	0.092	1.17	0.194	0.095	0.045	0.232
28.5	7	48.84	5.112	179.6	1000	0.092	1.17	0.113	0.101	0.028	0.247
28.5	7	36.5	3.820	210.6	1070	0.092	1.17	0.084	0.105	0.022	0.259
28.5	7	0	0.000	241.6	1150	0.092	1.17	0	0.111	0	0

Tabel C. 21 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Pengganggu Pada Jarak (S/D) = 3,0

Sudut	Ts (N.cm)	
	97000	136000
0	2.6	2.376
10	3.07	3.16
20	3.37	5.2
30	3.82	6.6
40	3.46	5.16
50	3.11	4.7
60	2.75	4.46
70	2.51	4.14
80	2.32	3.52
90	1.85	3.26
100	1.5	2.84
110	1.2	2.44
120	1.06	2.12
130	0.86	1.56
140	1.33	0.94
150	1.72	0.38
160	2.19	1.08
170	2.38	1.38
180	2.64	1.76

LAMPIRAN D

Uncertainty Luas (A)

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

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

$$u_{A,L} = \frac{\delta A, L}{A} = \frac{L}{A} \frac{\partial A}{\partial L} u_L = \frac{L}{LH} (H) u_L = u_L = \pm \frac{0,5 \text{ mm}}{309 \text{ mm}} \\ = \pm 1,618 \times 10^{-3}$$

$$u_{A,H} = \frac{\delta A, H}{A} = \frac{H}{A} \frac{\partial A}{\partial H} u_H = \frac{H}{LH} (L) u_H = u_H = \pm \frac{0,5 \text{ mm}}{298 \text{ mm}} \\ = \pm 1,678 \times 10^{-3}$$

$$u_A = \pm [(u_L)^2 + (u_H)^2]^{1/2}$$

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

$$u_A = \pm 2,331 \times 10^{-3} = \pm 0,233\%$$

Uncertainty Massa Jenis (ρ)

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

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

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

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

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

Uncertainty Viskositas Dinamis (μ)

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

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

$$\frac{d\mu}{dT} \approx \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(30^\circ\text{C}) - \mu(27^\circ\text{C})}{(30 - 27)^\circ\text{C}}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dT} &= \frac{(1,8601 \times 10^{-5}) - (1,846 \times 10^{-5}) \text{ kg/ms}}{3^\circ\text{C}} \\ &= 4,7 \times 10^{-8} \text{ N s/m}^2\text{C} \end{aligned}$$

$$u_{\mu(T)} = \pm \frac{1}{1,853 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}} (4,7 \times 10^{-8} \text{ N s/m}^2\text{C}) (\pm 0,1^\circ\text{C})$$

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

Uncertainty Bilangan Reynolds (Re)

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

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

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

$$\begin{aligned} u_{Re,\rho} &= \frac{\delta Re, \rho}{Re} = \frac{\rho}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} u_\rho = \rho \frac{\mu}{\rho V L} \frac{VL}{\mu} u_\rho = u_\rho \\ &= \pm 3,332 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Uncertainty Torsi Dinamis (T_D)

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

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

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

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

$$u_{(m-s)} = \pm \left(\frac{0,1 \text{ gr}}{18,4 \text{ gr}} \right) - \left(\frac{10 \text{ gr}}{450 \text{ gr}} \right) = \pm 0,0168$$

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

$$u_{T_D} = \pm \left[(u_{(m-s)})^2 (u_r)^2 \right]^{1/2} = [(0,0168)^2 + (0,04)^2]^{1/2}$$

$$u_{T_D} = \pm 0,04338 = \pm 4,338\%$$

Uncertainty Tip Speed Ratio (λ)

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

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

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

$$\begin{aligned} u_{\lambda, \omega} &= \frac{\delta \lambda \omega}{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} u_{\omega} = \frac{\omega}{\omega R V^{-1}} (R V^{-1}) u_{\omega} = u_{\omega} \\ &= \frac{0,1/\text{min}}{239,98/\text{min}} = \pm 4,167 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{\lambda, R} &= \frac{\delta \lambda R}{\lambda} = \frac{R}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial R} u_R = \frac{R}{\omega R V^{-1}} (\omega V^{-1}) u_R = u_R \\ &= \pm \frac{0,5\text{mm}}{154,5\text{mm}} = \pm 3,236 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

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

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

$$u_{\lambda} = \pm [(4,167 \times 10^{-4})^2 + (3,236 \times 10^{-3})^2 + (2 \times 10^{-3})^2]^{1/2}$$

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

Uncertainty Coefficient of Power (CoP)

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

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

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

$$u_{CoP, T_D} = \frac{\delta CoP, T_D}{CoP} = \frac{T_D}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial T_D} u_{T_D} \\ = T_D \left(\frac{\rho V^3 A}{\omega} \right) \left(\frac{\omega}{\rho V^3 A} \right) u_{T_D} = u_{T_D} = \pm 0,04338$$

$$u_{CoP, \omega} = \frac{\delta CoP, \omega}{CoP} = \frac{\omega}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \omega} u_{\omega} = \omega \left(\frac{\rho V^3 A}{T_D} \right) \left(\frac{T_D}{\rho V^3 A} \right) u_{\omega} \\ = u_{\omega} = \pm \frac{0,1/min}{239,98/min} = \pm 4,167 \times 10^{-4}$$

$$u_{CoP, \rho} = \frac{\delta CoP, \rho}{CoP} = \frac{\rho}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \rho} u_{\rho} = \rho \left(\frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left(-\frac{T_D \omega}{\rho^2 V^3 A} \right) u_{\rho} \\ = -u_{\rho} = \pm (-3,332 \times 10^{-3})$$

$$u_{CoP, V} = \frac{\delta CoP, V}{CoP} = \frac{V}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial V} u_V = V \left(\frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left(-\frac{3T_D \omega}{\rho V^4 A} \right) u_V \\ = -3u_V = \pm (-3 \times 2 \times 10^{-3})$$

$$u_{CoP, A} = \frac{\delta CoP, A}{CoP} = \frac{A}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial A} u_A = A \left(\frac{\rho V^3 A}{T_D \omega} \right) \left(-\frac{T_D \omega}{\rho V^3 A} \right) u_A \\ = -u_A = \pm (-2,331 \times 10^{-3})$$

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

$$u_{CoP} = \pm \left[(0,04338)^2 + (4,167 \times 10^{-4})^2 + (-3,332 \times 10^{-3})^2 + (-3 \times 2 \times 10^{-3})^2 + (-2,331 \times 10^{-3})^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,04386 = \pm 4,386\%$$

Uncertainty Coefficient of Moment (C_M)

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

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

$$\begin{aligned} dC_M &= (\rho^{-1} A^{-1} V^{-2} R^{-1}) dT_D + [(-\rho^2) T_D A^{-1} V^{-2} R^{-1}] d\rho \\ &\quad + [(-A^2) T_D \rho^{-1} V^{-2} R^{-1}] dA \\ &\quad + [(-2V^3) T_D \rho^{-1} A^{-1} R^{-1}] dV \\ &\quad + [(-R^2) T_D \rho^{-1} A^{-1} V^{-2}] dR \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{C_M, T_D} &= \frac{\delta C_M, T_D}{C_M} = \frac{T_D}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial T_D} u_{T_D} = T_D \left(\frac{\rho A V^2 R}{T_D} \right) \left(\frac{1}{\rho A V^2 R} \right) u_{T_D} \\ &= u_{T_D} = \pm 0,04338 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{C_M, \rho} &= \frac{\delta C_M, \rho}{C_M} = \frac{\rho}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial \rho} u_\rho = \rho \left(\frac{\rho A V^2 R}{T_D} \right) \left(-\frac{T_D}{\rho^2 A V^2 R} \right) u_\rho \\ &= -u_\rho = \pm (-3,332 \times 10^{-3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{C_M, A} &= \frac{\delta C_M, A}{C_M} = \frac{A}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial A} u_A = A \left(\frac{\rho A V^2 R}{T_D} \right) \left(-\frac{T_D}{\rho A^2 V^2 R} \right) u_A \\ &= -u_A = \pm (-2,331 \times 10^{-3}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{C_M, V} &= \frac{\delta C_M, V}{C_M} = \frac{V}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial V} u_V = V \left(\frac{\rho A V^2 R}{T_D} \right) \left(-\frac{2T_D}{\rho A V^3 R} \right) u_V \\ &= -2u_V = \pm (-2 \times 2 \times 10^{-3}) \end{aligned}$$

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

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

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

$$u_{C_M} = \pm \left[(0,04338)^2 + (-3,332 \times 10^{-3})^2 \right. \\ \left. + (-2,331 \times 10^{-3})^2 \right. \\ \left. + (-2 \times 2 \times 10^{-3})^2 + (-3,236 \times 10^{-3})^2 \right]^{1/2}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,04375 = \pm 4,375$$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Asri Melati Wijayanti lahir di Bandar Lampung pada tanggal 1 April 1997, memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Al-Azhar 2 Bandar Lampung pada tahun 2003, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 2 Bandar Lampung lulus tahun 2012 dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 2 Bandar Lampung lulus tahun 2015. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015

melalui jalur SNMPTN.

Semasa kuliah penulis aktif dalam seluruh kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis pernah menjadi asisten praktikum di Laboratorium Rekayasa Termal. Dalam bidang organisasi, penulis aktif sebagai staf Departemen Pengembangan Profesi dan Ilmiah Mahasiswa HMM FTI-ITS di tahun 2016-2017. Dan pada tahun 2017-2018, penulis menjabat sebagai Sekretaris Departemen Pengembangan Profesi dan Ilmiah Mahasiswa di HMM FTI-ITS.

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