



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

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

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

MUHAMMAD RIZKY RAMADHAN
NRP 02111540000176

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

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



TUGAS AKHIR – TM184835

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

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

Muhammad Rizky Ramadhan
0211154000176

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

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF
CIRCULAR CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF
RETURNING BLADE TURBINE TO THE SAVONIUS
WIND TURBINE PERFORMANCE**

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

Muhammad Rizky Ramadhan
02111540000176

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

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

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

"Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu $S/D = 1.6$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$ dan 1.0 ; pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ "

TUGAS AKHIR

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

Oleh:

Muhammad Rizky Ramadhan

NRP. 02111540000176

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD. (Penguji 1)
NIP. 196412281990031002
3. Deddy Zulhidayat Noor, S.T., M.T (Penguji 2)
NIP. 197512062005011002



**SURABAYA
JANUARI, 2020**

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

“Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu $S/D = 1.6$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ dan $1,0$; pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ ”

Nama Mahasiswa : Muhammad Rizky Ramadhan
NRP : 021 1 15 4000 0176
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Populasi penduduk di Indonesia menduduki peringkat ke-4 di dunia dan terus meningkat setiap tahunnya, hal ini berdampak juga kepada kebutuhan energi listrik yang meningkat setiap tahunnya. Namun, dari seluruh energi listrik yang di produksi di Indonesia sebagian besar masih menggunakan energi yang tidak dapat diperbaharui. Penggunaan energi yang tidak dapat diperbaharui memiliki dampak buruk terhadap lingkungan sehingga solusinya menggunakan energi terbarukan, salah satunya energi angin. Salah satu pemanfaatan energi angin adalah menggunakan turbin angin. Turbin angin dapat mengkonversi energi angin menjadi listrik.

Pada penelitian ini menggunakan turbin angin tipe Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) jenis Savonius yang memiliki sudu dengan diameter turbin (D) sebesar 167,1 mm, diameter end plate (D_o) sebesar 320 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Penelitian ini dilakukan dengan variasi diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0. Dan letak silinder pengganggu terhadap returning blade (S/D) sebesar 1,6. Serta variasi ReynoldsNumber

sebesar $Re = 97 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Alat ukur yang digunakan adalah anemometer, torque meter, tachometer, dan brake dynamometer.

Setelah dilakukan penelitian didapatkan hasil bahwa penambahan silinder pengganggu didepan returning blade efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius. Ukuran diameter $d/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ adalah yang paling efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini dibuktikan dengan meningkatnya nilai coefficient of power maksimum sebesar 44,74%, coefficient of moment maksimum sebesar 32,04% dan meningkatkan kemampuan self-starting turbin angin Savonius di semua posisi sudut dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa pengganggu.

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

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF
CIRCULAR CYLINDER DIAMETER SIZE IN FRONT OF
RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND
TURBINE PERFORMANCE**

“Study Case of Ratio Variation $S/D = 1.6$; $y/D = 0.5$; $d/D = 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0,9$ and $1,0$; on $Re = 9,7 \times 10^4$ and $13,6 \times 10^4$ ”

Name of Student : Muhammad Rizky Ramadhan
NRP : 021 1 15 4000 0176
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Indonesia's population is ranked 4th in the world and continues to increase every year, and it also affects the needs of electrical energy in Indonesia. However, from all the electrical energy produced in Indonesia is largely still using unrenewable energy. The use of unrenewable energy has a bad impact on the environment, so the solution is to use renewable energy such as wind energy. One of wind energy utilization is using wind turbine. Wind turbines can convert wind energy into electricity.

In the study, the type of Savonius Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) has a turbine diameter (D) of 167.1 mm. The end plate diameter (Do) is 320 mm, height (H) of 298 mm and the diameter of the shaft (b) by 19 mm. This research was conducted with variation of circular cylinder diameter against the turbine's blade diameter (d/D) of 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; and 1.0. And the location of the circular cylinder against the returning blade (S/D) of 1.6. As well as a variation of Reynolds Number of $Re = 97 \times 10^4$ and $13,6 \times 10^4$. The measuring instruments used are anemometer, torque meter, tachometer, and brake dynamometer.

After research was obtained the results that the addition of circular cylinder in front of returning blade effectively increased the performance of the Savonius wind turbine. The size diameter $d/D = 0.5$ at $Re = 9, 7 \times 10^4$ was the most effective on improving the performance of the Savonius wind turbine. This is evidenced by the increase of the maximum coefficient of power value of 44.74%, coefficient of the maximum moment by 32.04% and increase the self-starting capability of Savonius wind turbine in all angular positions compared to the wind turbine Savonius without circular cylinder .

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

KATA PENGANTAR

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

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

1. Orangtua dan keluarga besar atas doa dan dukungannya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA. Selaku dosen pembimbing Tugas Akhir
3. Seluruh civitas akademika teknik mesin FTIRS-ITS yang membantu dalam pengerjaan tugas akhir
4. Seluruh rekan tugas akhir bimbingan pak Triyogi
5. Seluruh teman-teman dekat yang telah menemani penulis dikala susah dan senang
6. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

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

Surabaya, Januari 2020

Muhammad Rizky Ramadhan

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
<i>ABSTRACT</i>	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian	6
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Turbin Angin	7
2.1.1. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)	7
2.1.2. Turbin Angin Horizontal (HAWT)	9
2.2 Turbin Angin Savonius	10
2.3 Bilangan Reynolds	11
2.4 Coefficient of Power (CoP)	12
2.5 Coefficient of Moment (CM)	15

2.6	Tip Speed Ratio (λ)	15
2.7	Gaya Drag	17
2.8	Aliran Pada Silinder.....	19
2.9	Penelitian Terdahulu.....	20
2.9.1.	Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius	20
2.9.2.	Pengurangan Drag Sebuah Silinder Sirkular pada Suatu Aliran Udara.....	29
2.9.3.	Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius	32
BAB III		39
METODE PENELITIAN		39
3.1.	Setting Eksperimental.....	39
3.1.1.	Analisa Parameter.....	39
3.1.2.	Analisa Dimensi	41
a.	Analisa Dimensi Coefficient of Power	41
b.	Analisa Dimensi Coefficient of Moment (CM)	44
3.2.	Peralatan Penelitian	47
3.2.1.	Axial Fan	47
3.2.2.	Honeycomb	48
3.2.3.	Turbin Savonius.....	49
3.2.4.	Silinder Penghalang.....	50
3.2.5.	Penyangga Turbin Angin Savonius.....	51
3.3.	Alat Ukur.....	52

3.3.1.	Anemometer	52
3.3.2.	Tachometer	53
3.3.3.	Voltage Regulator.....	54
3.3.4.	Torque meter Statis.....	55
3.3.5.	Jangka Sorong	56
3.3.6.	Brake Dynamometer.....	57
3.4.	Prosedur Penelitian.....	59
	Berikut adalah prosedur untuk mencari torsi dinamis dan torsi statis pada penelitian ini:	59
3.4.1.	Torsi Dinamis	60
3.4.2.	Torsi Statis.....	61
3.5.	FlowChart Penelitian	63
	Torsi Dinamis.....	63
3.5.1.	Torsi Statis.....	65
3.6.	Perhitungan Uncertainty	67
3.7.	Hasil yang didapat	70
3.8.	Jadwal Penelitian	70
	Berikut adalah jadwal yang telah dibuat bertujuan agar pelaksanaan penelitian ini berjalan dengan lancar.	70
BAB IV		71
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		71
4.1.	Contoh Perhitungan	71
4.1.1.	Perhitungan Reynolds Number	71
4.1.2.	Perhitungan Tip Speed Ratio	73

4.1.3.	Perhitungan Coefficient of Power (CoP)	74
4.1.4.	Perhitungan Coefficient of Moment (CM).....	74
4.2.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	75
4.2.1.	Analisa Nilai Coefficient of Power (CoP ₀) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	76
4.2.2.	Analisa Nilai Coefficient of Moment (CM ₀) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	78
4.2.3.	Analisa Nilai Torsi Statis (Ts ₀) Terhadap Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	79
4.3.	Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu	81
4.3.1.	Analisa Nilai Coefficient of Power (CoP) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Re = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	81
4.3.2.	Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maximum (CoP _{max}) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP _{max} /CoP _{0max}) Terhadap Fungsi variasi d/D pada Re = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	86
4.3.3.	Analisa Nilai Coefficient of Moment (C _M) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Re = $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	88

4.3.3.	Analisa Nilai Torsi Statis (Ts) Terhadap Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	92
4.4	Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu	93
4.4.1.	Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maximum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	94
BAB V	.....	99
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	99
5.1.	Kesimpulan.....	99
5.2.	Saran.....	100
	Berikut merupakan saran-saran yang dapat digunakan agar penelitian selanjutnya dapat lebih baik lagi:	100
DAFTAR PUSTAKA	.....	101
LAMPIRAN	.....	103
A.	UNIFORMITY FLOW TEST	103
B.	Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	105
C.	Data Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu	108
D.	Perhitungan Uncertainty	129
BIODATA PENULIS	.....	138

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1(a) Turbin angin Darrieus (b) Turbin angin H rotor (c) Turbin angin Savonius [sumber: google image].....	7
Gambar 2. 2 Macam-macam desain kincir angin VAWT [7]	8
Gambar 2. 3 Desain Turbin Angin Horizontal (sumber: https://indonesian.alibaba.com/product-detail/horizontal-axis-500w-small-wind-turbine-for-home-647909255.html).....	9
Gambar 2. 4 Macam-macam desain turbin angin HAWT[6].....	10
Gambar 2. 5(a) Skema turbin angin Savonius (b) Pola aliran turbin angin Savonius. [5]	10
Gambar 2. 6 Skema Turbin Savonius	12
Gambar 2. 7 Skema FBD Brake Dynamometer.....	14
Gambar 2. 8 Grafik Hubungan antara Coefficient Of Power Dengan Tip Speed Ratio untuk Berbagai Jenis Turbin Angin [10]	17
Gambar 2. 9 Perilaku aliran inviscid dan viscous [9]	19
Gambar 2. 10 Skema single-stage turbin Savonius: (a) tampak depan; (b) tampak atas. [3]	20
Gambar 2. 11 Hubungan antara power coefficient dan kecepatan angin untuk turbin dengan dua, tiga dan empat blades. [3].....	21
Gambar 2. 12 Hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades (a) aspect ratio = 0,5 dan (b) aspect ratio = 5 [3] ..	22
Gambar 2. 13 Hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades (a) aspect ratio = 0,5; single stage, (b) aspect ratio = 5; single stage, dan (c) aspect ratio = 0,5; double stages. [3]	23
Gambar 2. 14 Hubungan antara specific power dan kecepatan angin pada turbin Savonius single stage dan double stages [3] ..	24

Gambar 2. 15 Hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius single stage dan double stages [3] 25

Gambar 2. 16 Hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi overlap ratio [3] 26

Gambar 2. 17 Hubungan antara coefficient of power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi aspect ratio [3]..... 27

Gambar 2. 18 Hubungan antara mechanical power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya End Plate dan tanpa end plate [3] 28

Gambar 2. 19 Geometri Aliran [4] 29

Gambar 2. 20 Distribusi Tekanan di Dekat Silinder Sirkular. (a) Efek Re dan (b) Efek d/D [4]..... 30

Gambar 2. 21 Titik Separasi [4] 31

Gambar 2. 22 Koefisien Drag [4] 32

Gambar 2. 23 Skema penelitian silinder pengganggu (kiri) dan turbin angin Savonius (kanan) [5] 33

Gambar 2. 24 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ [5] 34

Gambar 2. 25 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ [5] 34

Gambar 2. 26 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ [5] 35

Gambar 2. 27 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ [5] 36

Gambar 2. 28 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ [5]	36
Gambar 2. 29 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ [5]	37
Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius	39
Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur	40
Gambar 3. 3 Axial Fan Gambar 3. 4 Spesifikasi Axial Fan	48
Gambar 3. 5 Honeycomb yang digunakan dalam Penelitian	48
Gambar 3. 6 Turbin Angin Savonius	49
Gambar 3. 7 Silinder Penghalang	50
Gambar 3. 8 Penyangga Turbin Savonius	51
Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141	52
Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12.....	53
Gambar 3. 11 Powell voltage regulator	54
Gambar 3. 12 Torque meter LUTRON model TQ-8800	55
Gambar 3. 13 Jangka Sorong.....	56
Gambar 3. 14 Gambar skema brake dynamometer.....	57
Gambar 3. 15 Neraca pegas.....	58
Gambar 3. 16 Pemberat	59
Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power (CoP_0) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	76
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment (C_{M0}) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	78
Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis (T_{s0}) Terhadap Fungsi Sudut (θ) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu	79

Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP _o) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan S/D = 1,6 dan variasi d/D = 0,1-1,0 pada (a) Re = 9,7x10 ⁴ dan (b) Re = 13,6x10 ⁴	82
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Coefficient of Power antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoPmax/CoP0max) terhadap variasi diameter d/D = 0.1 – 1.0.....	87
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0 pada (a) Re = 9,7x10 ⁴	89
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts0) terhadap Fungsi Sudut (θ) dengan d/D = 0,5; S/D = 1,6; pada (a) Re = 9,7x10 ⁴ dan (b) Re = 13,6x10 ⁴	93
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoPmax/CoPmax) terhadap variasi d/D di S/D = 1,6 s.d 3,0 pada (a) Re = 9,7x10 ⁴ dan (b) Re = 13,6x10 ⁴	95
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoPmax/CoPmax) terhadap variasi S/D di d/D = 0,1 s.d 1,0 pada (a) Re = 9,7x10 ⁴ dan (b) Re = 13,6x10 ⁴	98
Gambar A. 1 Posisi titik pengambilan uniformity test.....	103
Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal	104
Gambar A. 3Grafik distribusi kecepatan vertical.....	104

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Coefficient Drag [9]	18
Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP	42
Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM	45
Tabel 3. 3 Spesifikasi Honeycomb	49
Tabel 3. 4 Spesifikasi Turbin Angin Savonius	50
Tabel 3. 5 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141	53
Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12	54
Tabel 3. 7 Spesifikasi Powell Voltage Regulator	55
Tabel 3. 8 Spesifikasi Torque meter LUTRON model TQ-8800	56
Tabel 3. 9 Spesifikasi Neraca pegas	59
Tabel 4. 1 Tabel perbandingan CoP turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	83
Tabel 4. 2 Tabel Uncertainty CoP	85
Tabel 4. 3 Tabel perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	90
Tabel 4. 4 Tabel <i>Uncertainty Coefficient of Moment</i>	91
Tabel A. 1 Data keseragaman kecepatan angin	104
Tabel B. 1 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$	105
Tabel B. 2 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	106

Tabel B. 3 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ 107

Tabel C. 1 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,1$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 108

Tabel C. 2 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,2$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 109

Tabel C. 3 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,3$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 110

Tabel C. 4 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,4$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 111

Tabel C. 5 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,5$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 112

Tabel C. 6 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,6$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 113

Tabel C. 7 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,7$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 114

Tabel C. 8 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,8$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 115

Tabel C. 9 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,9$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ 116

Tabel C. 10 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 1,0$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$	117
Tabel C. 11 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,1$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	118
Tabel C. 12 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,2$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	119
Tabel C. 13 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,3$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	120
Tabel C. 14 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,4$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	121
Tabel C. 15 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,5$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	122
Tabel C. 16 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,6$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	123
Tabel C. 17 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,7$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	124
Tabel C. 18 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,8$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	125
Tabel C. 19 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,9$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	126

Tabel C. 20 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 1,0$ pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$	127
Tabel C. 21 Data torsi statis turbin ngina Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$	128

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara yang memiliki jumlah penduduk terbesar ke-4 di dunia dan memiliki berbagai macam energi melimpah didalamnya baik energi yang sifatnya dapat diperbaharui seperti energi air, matahari, angin, biomassa, panas bumi dan energy laut. Maupun energi yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi, gas alam, batu bara dan kandungan energi nuklir. Hal ini menyebabkan energi menjadi suatu kebutuhan yang sangat vital bagi kehidupan manusia saat ini. Berdasarkan keterangan dan data yang didapat tentang penggunaan energy, Indonesia ternyata masih bergantung sepenuhnya pada energy yang tidak dapat diperbaharui. Menurut Institute for Essential Services Reform (IESR) merilis laporan Indonesia Clean Energy Outlook: Reviewing 2018, Outlooking 2019. Laporan ini memperkirakan prospek energy terbarukan tahun 2019 akan lebih menurun karena belum mencapai target 23% yang telah ditetapkan. Laporan ini juga mengatakan kurangnya kapasitas terpasang baru dari pembangkit listrik energy terbarukan dalam tiga tahun terakhir[1]. Penggunaan energy tidak terbarukan juga berdampak buruk bagi lingkungan sekitar seperti polusi udara, global warming, dsb. Sehingga solusi dari permasalahan diatas adalah memperbanyak lagi penggunaan energy terbarukan.

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) merupakan salah satu upaya meningkatkan penggunaan energy terbarukan di Indonesia. Menurut Global Wind Atlas, wilayah Indonesia mempunyai potensi angin sebesar 2-6 m/s. Dikarenakan kecepatan angin yang rendah, turbin angin Savonius cocok digunakan di Indonesia. Turbin angin Savonius adalah jenis turbin angin dengan axis vertical yang mampu mengubah energy angin horizontal menjadi energy kinetic rotasi. Turbin angin Savonius memiliki bentuk dasar sudu setengah silinder. Turbin

angin Savonius yang termasuk kedalam tipe VAWT dapat berputar tanpa mempedulikan arah angin serta turbin dapat berputar dengan laju angin yang relatif kecil sehingga sangat cocok digunakan pada daerah yang memiliki arah angin tidak menentu dan laju angin yang relatif rendah. Turbin Savonius memiliki dua jenis blade yaitu advancing blade dan returning blade. Advancing blade merupakan sudu cekung yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran dan returning blade merupakan sudu cembung yang tegak lurus terhadap arah datangnya aliran. Konsep kerja turbin angin ini cukup sederhana dimana turbin angin ini menghasilkan daya dengan cara memanfaatkan gaya drag yang dihasilkan tiap-tiap sudunya yang diakibatkan dorongan aliran pada kedua blade. Perbedaan arah cekungan pada kedua blade mengakibatkan perbedaan nilai gaya drag yang dihasilkan. Selisih kedua gaya ini akan menyebabkan torsi sehingga turbin Savonius dapat berputar. Semakin besar selisih torsinya maka semakin besar pula daya yang dihasilkan turbin Savonius. Turbin Savonius memiliki efisiensi yang rendah dibandingkan turbin lainnya. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius dilakukanlah banyak penelitian seperti memberikan pengganggu berupa silinder didepan returning blade sehingga dapat menurunkan gaya drag yang terjadi di returning blade sehingga selisih drag akan menjadi lebih besar. Selisih drag yang semakin besar akan mengakibatkan torsi, daya, dan efisiensi pada turbin Savonius meningkat.

Penelitian tentang peningkatan performa dari turbin savonius pernah dilakukan oleh N.H. Mahmoud et al (2012) dengan menggunakan beberapa variasi. Variasi pertama adalah variasi dari jumlah blades yaitu dengan menggunakan dua blades, tiga blades, dan empat blades. Variasi kedua adalah variasi jumlah stage turbin yaitu single stage dan double stages. Variasi ketiga adalah variasi overlap ratio (β) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35 dan aspect ratio (α) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5 dengan ada tidaknya end plates. Dari penelitian didapatkan bahwa turbin dengan dua blades menghasilkan efisiensi lebih besar daripada

turbin dengan jumlah blades tiga dan empat. Turbin Savonius dengan double stages menghasilkan hasil yang lebih optimum daripada single stage. Turbin Savonius dengan tanpa overlap ratio menghasilkan tenaga yang lebih tinggi. Turbin Savonius dengan aspect ratio yang tinggi menghasilkan C_p yang lebih tinggi. Lalu turbin Savonius yang menggunakan end plate menghasilkan efisiensi lebih tinggi daripada tanpa end plate.

Pada penelitian Tsusui dan Igarashi (2002) dilakukan sebuah penelitian mengenai aliran fluida pada sebuah silinder sirkular yang diberi pengganggu berupa silinder sirkular lain. Penelitian ini memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu dan harga bilangan Reynolds pada rentang $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$. Pada penelitian ini didapatkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds (Re) serta variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar wake dibelakangan silinder sirkular utama semakin menyempit.

Penelitian lain yang pernah dilakukan adalah dengan cara memperbesar selisih gaya drag dengan mengurangi gaya drag pada returning blade menggunakan silinder pengganggu oleh Syafardinah (2018) dengan variasi parameter: $d/D = 1.0$; jarak $S/D = 1.6$; Bilangan Reynolds (Re) = 9.7×10^4 ; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 ; dengan $y/D = 0$; 0.25 ; 0.5 . Studi eksperimen ini menunjukkan hasil bahwa peletakan silinder pengganggu didepan returning blade efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai coefficient of power, coefficient of moment, dan torsi statis turbin angin Savonius. Namun penambahan silinder pengganggu $d/D = 1$; $S/D = 1.6$ didepan returning blade tidak efektif dalam meningkatkan putaran turbin angin Savonius untuk semua konfigurasi bilangan Reynolds dan rasio jarak y/D dikarenakan tidak terjadinya peningkatan nilai putaran pada turbin dengan pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu.

Dari beberapa penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk meningkatkan

performa dari turbin Savonius. Penelitian yang akan dilakukan menggunakan pengganggu dengan bentuk silinder yang diletakkan didepan returning blade. Penelitian ini menggunakan rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonis (S/D) sebesar 1.6 dan variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0. Penelitian ini dilakukan dengan bilangan Reynolds sebesar $9,7 \times 10^4$, dan $13,6 \times 10^4$ untuk kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, pengganggu berupa silinder diletakkan didepan returning blade. Pengganggu yang digunakan berbentuk silinder sirkular dengan menggunakan variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D). hipotesa awal dari penilitian ini adalah:

1. Pemberian silinder pengganggu ini diduga dapat menurunkan tekanan antara silinder pengganggu dan returning blade sehingga perbedaan tekanan antara bagian depan dan belakang returning blade semakin kecil. Hal ini menyebabkan pressure drag pada returning blade menurun dan gaya drag pada returning blade akan menurun juga. Dengan menurunnya gaya drag pada returning blade maka torsi dan daya dari turbin Savonius meningkat.
2. Aliran yang melewati silinder pengganggu akan membentuk Wake di belakang silinder pengganggu. Shear layer yang terlepas dari silinder pengganggu akan mengenai permukaan returning blade dan akan mengganggu Boundary layer pada permukaan returning blade sehingga mempercepat perubahan boundary layer menjadi turbulen. Akibatnya titik separasi pada permukaan returning blade akan mundur sehingga wake yang terbentuk akan lebih sempit. Hal ini mengakibatkan

gaya drag pada returning blade menurun sehingga selisih gaya drag antara returning blade dan advancing blade akan meningkat sehingga mengakibatkan torsi dan daya pada turbin Savonius akan meningkat.

3. Ukuran diameter silinder pengganggu yang diletakkan didepan returning blade mempunyai variasi rasio (d/D) sebesar 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0. variasi ini diduga mempengaruhi performa turbin Savonius dimana jika ukuran diameter silinder pengganggu terlalu kecil diduga kurang efektif dalam menurunkan tekanan di depan returning blade. Jika ukuran diameter silinder pengganggu terlalu besar diduga terjadi defleksi aliran sehingga menghalangi free stream yang menuju advancing blade yang menyebabkan torsi dan daya turbin menurun. Oleh karena itu harus dicari ukuran diameter yang optimum agar dapat meningkatkan performa turbin Savonius.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini menggunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian menggunakan analisa aliran external flow
2. Aliran yang mengalir adalah steady, incompressible, dan uniform flow
3. Perpindahan panas akibat gesekan udara dengan komponen alat diabaikan
4. Analisis dilakukan dengan perbandingan jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonis (S/D) sebesar 1.6.
5. Analisis menggunakan variasi rasio antara diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; dan 1.0.
6. Kecepatan angin yang digunakan adalah 5 m/s dan 7 m/s.
7. Bilangan Reynolds yang digunakan adalah $9,7 \times 10^4$, dan $13,6 \times 10^4$

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan performa dari turbin Savonius dengan data yang akan diambil adalah sebagai berikut:

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

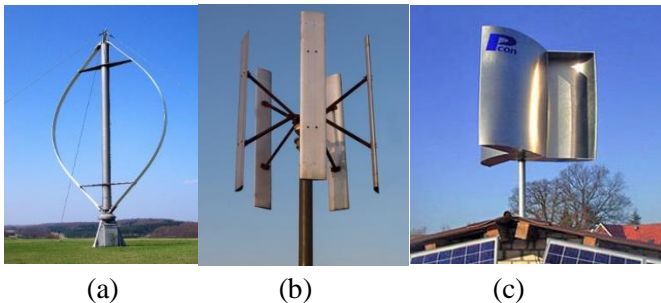
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin merupakan sebuah alat yang digunakan dalam Sistem Konversi Energi Angin (SKEA). Turbin angin berfungsi merubah energy kinetic dari angin menjadi energy mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik dari dynamo, generator, dsb.

Desaom dari turbin angin sangat banyak macam jenisnya, berdasarkan bentuk poros dan rotornya, turbin angin dibagi menjadi dua tipe, yaitu turbin angin sumbu mendatar (horizontal axis wind turbine) dan turbin angin sumbu vertical (Vertical Axis Wind Turbine). [6]

2.1.1. Turbin Angin Sumbu Vertikal (VAWT)

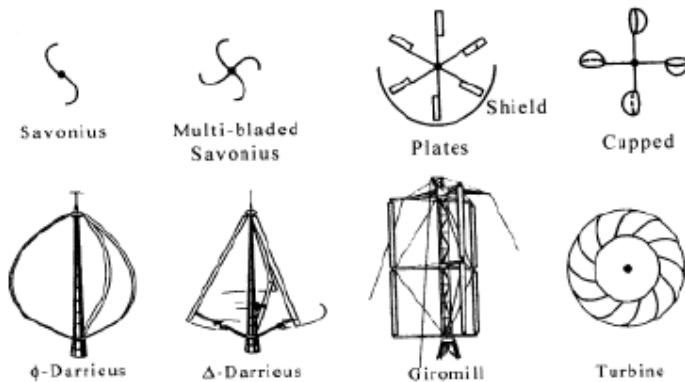


Gambar 2. 1(a) Turbin angin Darrieus (b) Turbin angin H rotor
(c) Turbin angin Savonius [sumber: google image]

Turbin angin sumbu vertical adalah turbin angin yang gerakan poros dan rotor/blade sejajar dengan arah angin, sehingga memiliki kelebihan salah satunya dapat berputar pada semua arah angin. Kelebihan lainnya adalah memiliki torsi tinggi sehingga

dapat berputar pada kecepatan angin yang rendah, generator dapat ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga mempermudah perawatan dan kerja turbin tidak dipengaruhi arah angin. Kekurangannya adalah kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai tower akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu horizontal. Turbin angin sumbu vertical memiliki beberapa macam desain seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.

Ada tiga model rotor pada turbin angin sumbu vertical, yaitu: Darrieus seperti pada gambar 2.1(a), H rotor seperti pada gambar 2.1(b), dan Savonius seperti pada gambar 2.1(c). Turbin Savonius memanfaatkan gaya drag sedangkan Darrieus dan H rotor memanfaatkan gaya lift. [7]



Gambar 2. 2 Macam-macam desain kincir angin VAWT [7]

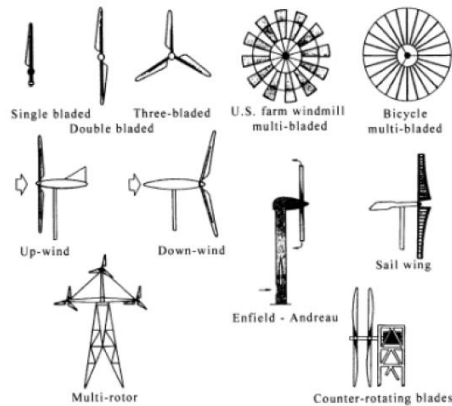
2.1.2. Turbin Angin Horizontal (HAWT)



Gambar 2. 3 Desain Turbin Angin Horizontal (sumber: <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/horizontal-axis-500w-small-wind-turbine-for-home-647909255.html>)

Turbin angin horizontal seperti pada gambar 2.3 diatas adalah turbin angin yang poros utamanya sejajar dengan arah angin dan tegak lurus dengan arah putaran rotor/blade. Biasanya turbin ini memiliki blade berbentuk airfoil seperti bentuk sayap pada pesawat. Secara umum semakin banyak jumlah blade, semakin tinggi putaran turbin. Macam-macam desain turbin ini dapat dilihat pada gambar 2.4 dibawah.

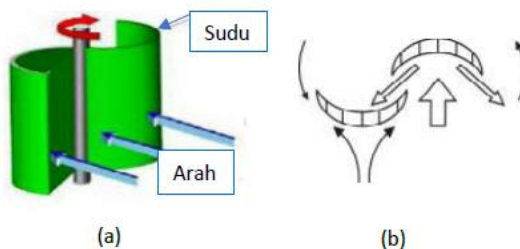
Setiap desain rotor/blade mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini yaitu memiliki efisiensi yang tinggi, dancut-in wind speed rendah. Kekurangannya yaitu turbin jenis ini memiliki desain yang lebih rumit karena rotor/blade hanya dapat menangkap angin dari satu arah sehingga dibutuhkan pengarah angin.[6]



Gambar 2. 4 Macam-macam desain turbin angin HAWT[6]

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius adalah Turbin angin yang termasuk dalam kategori Turbin angin sumbu vertical. Turbin angin Savonius ini ditemukan oleh sarjana Finlandia bernama Sigurd J. Savonius (1992). Turbin angin ini memiliki rotor/blade dengan bentuk dasar setengah silinder seperti terlihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5(a) Skema turbin angin Savonius (b) Pola aliran turbin angin Savonius. [5]

Dari beberapa jenis turbin angin sumbu vertical, Savonius adalah jenis turbin angin yang menghasilkan daya dengan

memanfaatkan gaya drag yang dihasilkan dari tiap-tiap sudutnya. Selisih gaya drag dari advancing blade dan returning blade akan menghasilkan torsi, yang apabila dikalikan dengan kecepatan angular dari turbin angin maka akan menghasilkan daya turbin. Sehingga semakin besar perbedaan gaya drag antara advancing blade dan returning blade maka torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar. Turbin angin Savonius memiliki torsi awal yang besar. Efisiensi yang dihasilkan turbin ini relative rendah. Namun, turbin angin Savonius ini memiliki desain yang sederhana. [5]

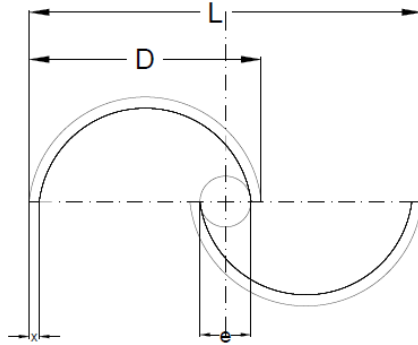
2.3 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah perbandingan antara gaya inersia ($V\rho$) terhadap gaya viskositas (μ/L) yang nantinya digunakan untuk mengidentifikasi jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Faktor yang mempengaruhi keadaan aliran ada tiga yaitu kekentalan, rapat massa zat cair (ρ), dan diameter pipa atau panjang karakteristik (L). Pada aliran tak mampu mampat biasanya diambil asumsi kerapatan, viskositas dan temperature tidak mengalami perubahan sehingga berat spesifiknya konstan. Untuk diameter dan panjang pipa tertentu, kerugian tekanan di dalam pipa disebabkan adanya efek gesekan sebagai fungsi bilangan Reynolds. Persamaan dari Bilangan Reynolds adalah sebagai berikut: [5]

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (2.1)$$

Dimana :

Re	= Bilangan Reynolds
ρ	= Densitas dari Fluida (Kg/m^3)
L	= panjang karakteristik (m)
v	= Kecepatan fluida (m/s)
μ	= viskositas dinamik (Ns/m)



Gambar 2. 6 Skema Turbin Savonius

Berdasarkan gambar 2.6, panjang karakteristik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$L = 2D - e - 2x \quad (2.2)$$

dimana :

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

Nilai Bilangan Reynolds pada dua plat datar adalah sebagai berikut :

- $Re < 3 \times 10^5$ untuk aliran laminar
- $3 \times 10^5 \leq Re \leq 5 \times 10^5$ untuk aliran transisi
- $Re > 5 \times 10^5$ untuk aliran turbulen

2.4 Coefficient of Power (CoP)

Coefficient of Power (CoP) adalah perhitungan yang menentukan besarnya performa turbin angin. Coefficient of Power (CoP) dipengaruhi oleh dua faktor utama yaitu daya mekanik dari turbin karena terkena angin dan daya kinetic dari angin itu sendiri. Persamaan CoP adalah sebagai berikut:

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

dimana :

- P_T : daya aktual pada turbin (Watt)
 P_W : daya teoritis (Watt)

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 :

$$P_T = \tau \cdot \omega \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

- P_T : daya aktual pada turbin (Watt)
 τ : torsi dinamis turbin yang diukur dengan brake dynamometer (N-m)
 ω : putaran dari turbin angin Savonius (rad/detik)

Daya teoritis yang dihasilkan oleh angin (P_w) menggunakan persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana :

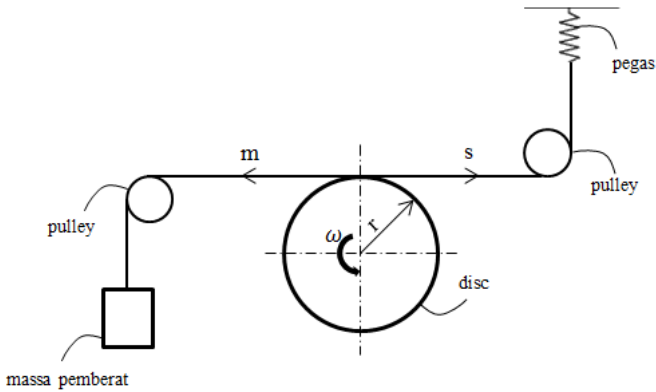
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
 A : luas karakteristik turbin yang terkena fluida (m^2)
 U : kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s)

Sehingga, didapatkan persamaan Coefficient of Power seperti berikut:

$$CoP = \frac{\tau \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana, besarnya torsi yang dibaca dengan brake dynamometer dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\tau = F \times r \dots\dots\dots (2.7)$$



Gambar 2. 7 Skema FBD Brake Dynamometer

Berdasarkan gambar 2.7, nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$\tau = \{(s - m)g\} \times r \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana:

- s : massa yang terbaca pada pegas (kg)
- m : massa beban (kg)
- g : gravitasi (m/s²)
- r : jari-jari silinder yang menerima beban (m)

2.5 Coefficient of Moment (C_M)

Coefficient of Moment (C_M) merupakan salah satu parameter untuk menentukan performa pada turbin angin. Coefficient of Moment sendiri merupakan perbandingan antara torsi yang dihasilkan oleh turbin dan torsi dari hasil perhitungan teoritis. Torsi dari turbin didapatkan dari pembacaan dari alat torsi statis. Persamaan untuk Coefficient of Moment adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{T_\infty} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana :

T_∞ : torsi teoritis (N.m)

T_D : torsi dinamis turbin yang diukur dengan Brake Dynamometer (N.cm)

Persamaan torsi teoritis adalah sebagai berikut:

$$T_\infty = \frac{1}{2} \rho A U^2 D \dots\dots\dots(2.10)$$

dimana :

ρ : massa jenis fluida (kg.m³)

A : luas karakteristik turbin yang terkena fluida (m²)

U : kecepatan rata-rata fluida yang mengalir (m/s)

D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)

2.6 Tip Speed Ratio (λ)

Tip speed ratio adalah rasio kecepatan ujung sudu terhadap kecepatan angin bebas. Untuk kecepatan angin nominal yang tertentu, tip speed ratio akan berpengaruh pada kecepatan rotor. Turbin angin tipe lift akan memiliki tip speed ratio yang

relatif lebih besar dibandingkan dengan turbin angin tipe drag. Tip speed ratio dapat dihitung dengan persamaan:

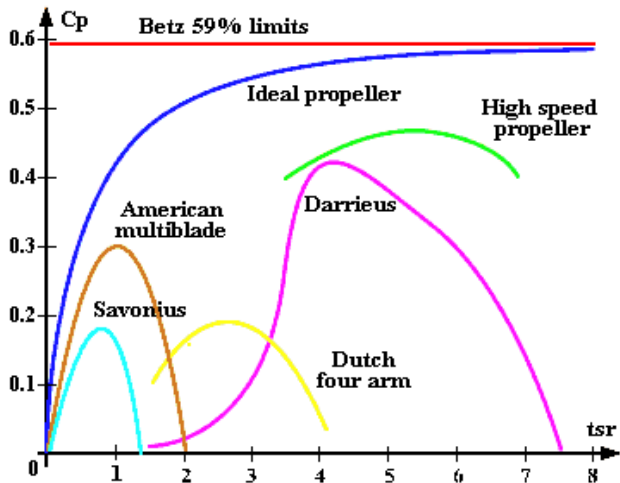
$$\lambda = \frac{\omega D}{U} \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana :

- λ : tip speed ratio
- ω : kecepatan sudut turbin (rad/s)
- D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)
- U : kecepatan angin (m/s)

Hubungan antara Coefficient of Power (CoP) dengan Tip Speed Ratio dapat dilihat pada gambar 2.8.

Albert Betz, seorang ahli aerodinamika Jerman, menemukan bahwa batas maksimum Coefficient of Power untuk suatu turbin adalah 59,3%. Dari gambar 2.8 dapat dilihat bahwa setiap tipe turbin angin memiliki karakter yang berbeda mengenai hubungan antara Coefficient of Power dan Coefficient of Moment dengan Tip Speed Ratio. Setiap turbin memiliki titik mulai Tip Speed Ratio yang berbeda. Jika titik mulai berada pada Tip Speed Ratio rendah maka turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah, begitu pula sebaliknya. [11]



Gambar 2. 8 Grafik Hubungan antara Coefficient Of Power Dengan Tip Speed Ratio untuk Berbagai Jenis Turbin Angin [10]

2.7 Gaya Drag

Drag adalah gaya yang sifatnya menghambat pergerakan sebuah benda padat melalui sebuah fluida (cairan atau gas) dimana gaya tersebut mempunyai arah yang sejajar dengan sumbu kecepatan aliran terhadap luas penampang dari suatu benda yang berlawanan dengan arah aliran tersebut. Gaya ini timbul ketika benda bergerak dalam medan fluida viscous. Pada turbin Savonius gaya inilah yang membuat turbin Savonius dapat berputar sehingga gaya ini dapat termasuk dalam kategori yang menguntungkan. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung gaya drag:

$$F_D = 1/2 \rho v^2 C_D A \dots \dots \dots (2.12)$$

dimana :

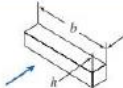






$$F_D = \text{Gaya drag}$$

ρ = densitas fluida
 v = kecepatan fluida
 C_D = koefisien drag
 A = luas bidang yang terkena aliran fluida

Coefficient drag (C_D) merupakan suatu bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menunjukkan gaya drag pada suatu benda. Nilai C_D berbeda-beda dari setiap geometri benda yang ada.

Dapat dilihat pada tabel 2.1 bahwa pada turbin Savonius nilai C_D dari advancing blade lebih besar daripada C_D dari returning blade dimana pada advancing blade nilai C_D sebesar 2,30 sedangkan pada returning blade nilai C_D sebesar 1,20.

Tabel 2. 1 Coefficient Drag [9]

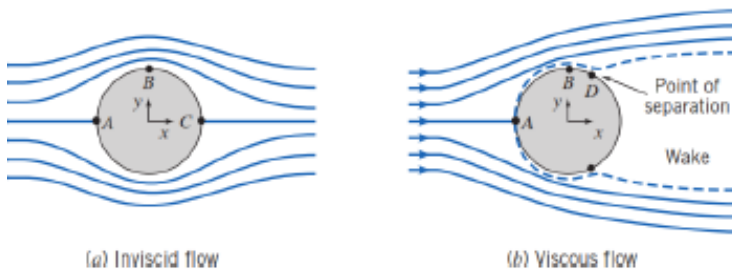
Drag Coefficient Data for Selected Objects ($Re \approx 10^3$) ^a			
Object	Diagram		$C_D(Re \approx 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$	2.05
		$b/h = 1$	1.05
Disk			1.17
Ring			1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing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

^aData from Hoerner [16].

^bBased on ring area.

2.8 Aliran Pada Silinder

Aliran fluida jika dilihat dari pengaruh viskositasnya dapat dibedakan menjadi dua yaitu aliran viscous dan aliran inviscid. Aliran viscous adalah aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser aliran pada dinding ($\tau_{yx} \neq 0$). Aliran inviscid adalah aliran dimana viskositas fluida dianggap nol, sehingga tegangan geser dianggap tidak berpengaruh ($\tau_{yx} = 0$). Aliran viscous dan aliran inviscid pada bola pejal dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Perilaku aliran inviscid dan viscous [9]

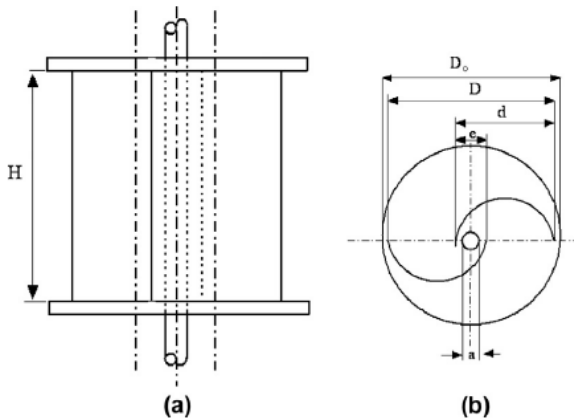
Pada gambar 2.9.b. menunjukkan aliran viscous pada suatu silinder. Titik A adalah titik stagnasi dimana aliran fluida menyentuh silinder sehingga kecepatan diperlambat hingga nol dan tekanan tinggi. Kemudian terjadi boundary layer di titik A. Dari titik A ke titik B terjadi peningkatan kecepatan dan penurunan tekanan. Dari titik B ke titik D terjadi penurunan kecepatan dan peningkatan tekanan. Di titik D momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser dan adverse pressure gradient sehingga boundary layer terpecah. Titik D disebut titik separasi. Diantara titik-titik pemisahan boundary layer membentuk daerah yang disebut wake. [9]

2.9 Penelitian Terdahulu

Untuk memudahkan dan memperoleh hasil yang valid dalam penelitian ini maka dibutuhkan studi referensi dari penelitian – penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Penelitian yang dicantumkan adalah sebagai berikut :

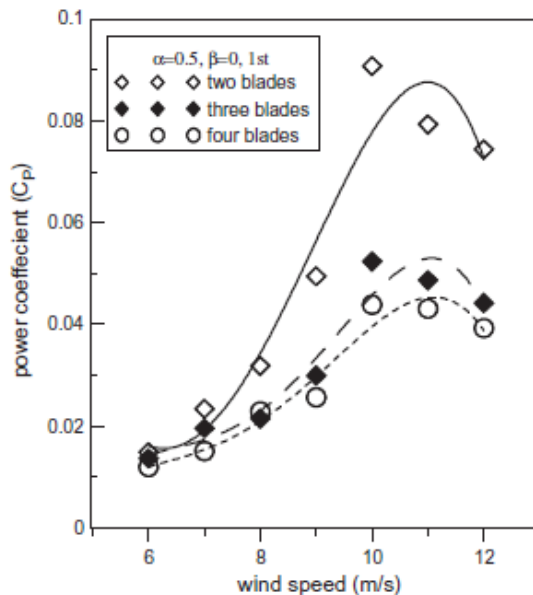
2.9.1. Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius

Pada penelitian N.H. Mahmoud et al (2012) dilakukan percobaan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan menggunakan beberapa variasi yaitu: Jumlah blade adalah dua blades (2b), tiga blades (3b) dan empat blades (4b); single stage (1st) dan double stages (2st); overlap ratio (β) 0, 0.2, 0.25, 0.3 dan 0.35; dan aspect ratio 0.5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada tidaknya end plates. Berikut skema single-stage turbin angin Savonius pada gambar 2.10:



Gambar 2. 10 Skema single-stage turbin Savonius: (a) tampak depan; (b) tampak atas. [3]

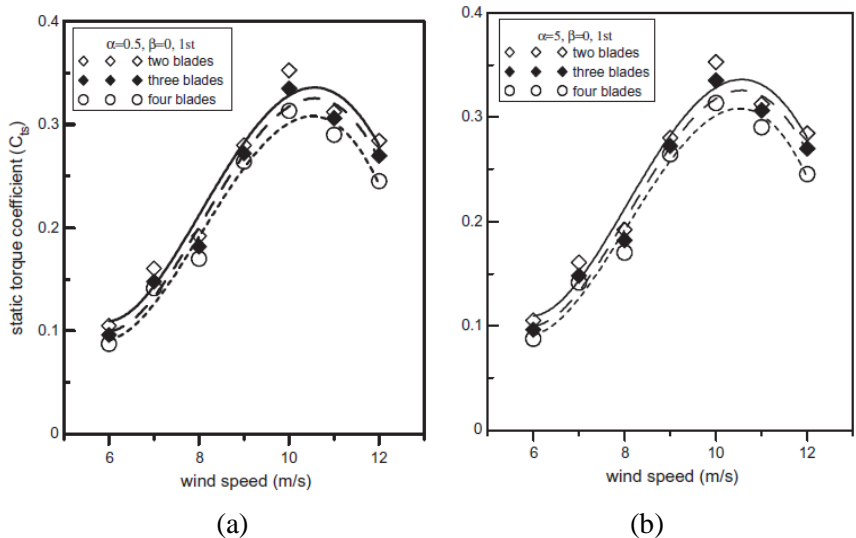
Dari gambar 2.10 dapat dilihat skema dari turbin angin Savonius. Sudu turbin terbuat dari PVC dengan diameter yang berbeda (0.3, 0.2, 0.1 dan 0.08m). Tebal end plate adalah 2.5 mm. Diameter end plate lebih besar 10% dari diameter turbin. Poros turbin Savonius memiliki diameter 14mm. Berikut adalah hasil yang didapat dari percobaan ini dimulai dari pengaruh jumlah blade, pengaruh jumlah stage, pengaruh dari overlap ratio dan pengaruh dari aspect ratio berturut-turut adalah:



Gambar 2. 11 Hubungan antara power coefficient dan kecepatan angin untuk turbin dengan dua, tiga dan empat blades. [3]

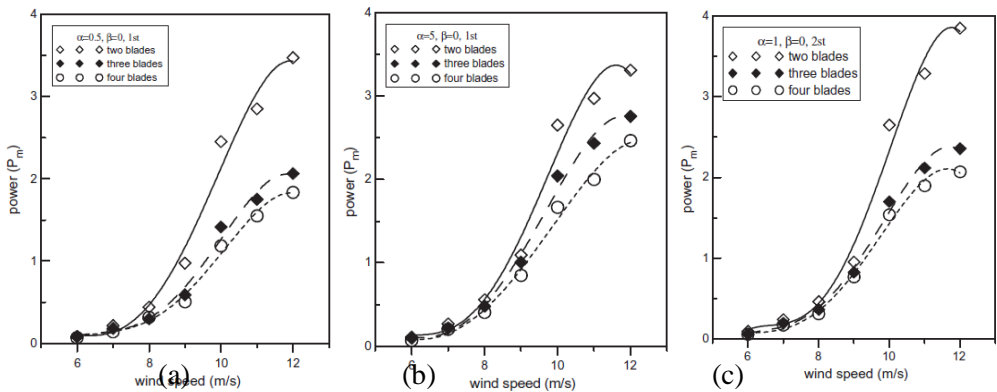
Gambar 2.11 diatas menunjukkan hubungan antara power coefficient dan kecepatan angin dari jumlah blade yang berbeda dengan aspect ratio 0.5, overlap ratio 0 dan single stage. Hasilnya adalah power coefficient untuk turbin yang menggunakan dua

blades lebih tinggi daripada turbin yang menggunakan tiga, dan empat blade.



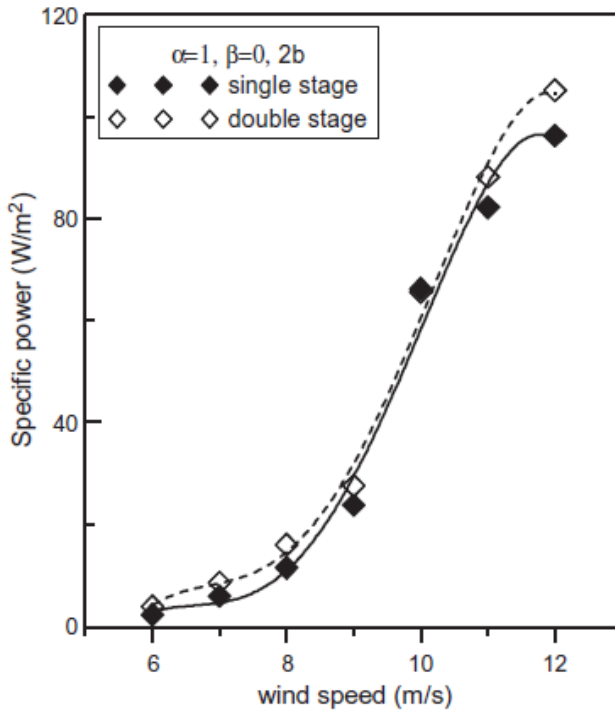
Gambar 2. 12 Hubungan antara koefisien torsi statis dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades (a) aspect ratio = 0,5 dan (b) aspect ratio = 5 [3]

Pada penelitian ini gambar 2.12 menunjukkan pengaruh jumlah blades terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius pada aspect ratio sebesar 0,5 dan 5, overlap ratio sebesar 0 dengan kondisi single stage rotor. Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa torsi statis pada turbin Savonius dengan dua blades lebih tinggi daripada torsi statis pada turbin Savonius dengan tiga dan empat blades pada aspect ratio 0,5 dan 5.



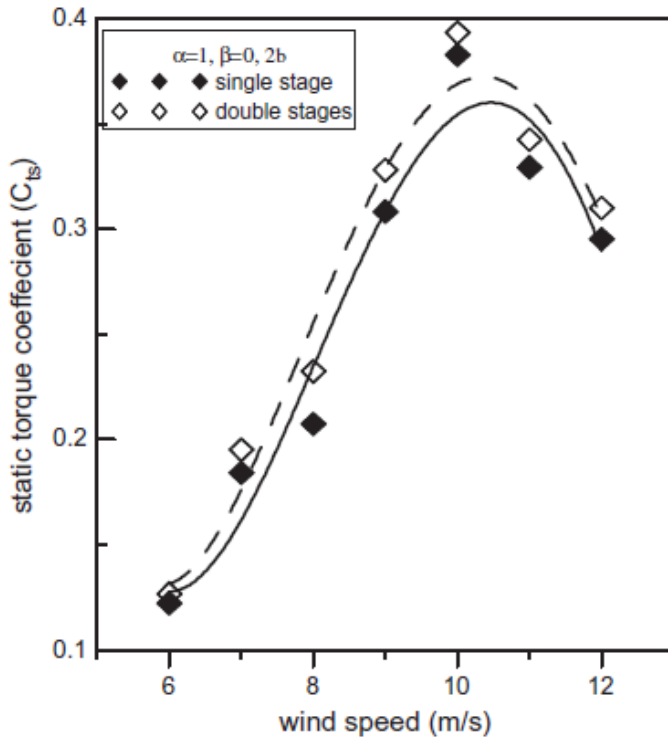
Gambar 2. 13 Hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades
 (a) aspect ratio = 0,5; single stage, (b) aspect ratio = 5; single stage, dan (c) aspect ratio = 0,5; double stages. [3]

Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat blades terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa turbin dengan dua blades mempunyai performa lebih baik daripada tiga dan empat blades untuk semua aspect ratio dan pada single stage maupun double stages.



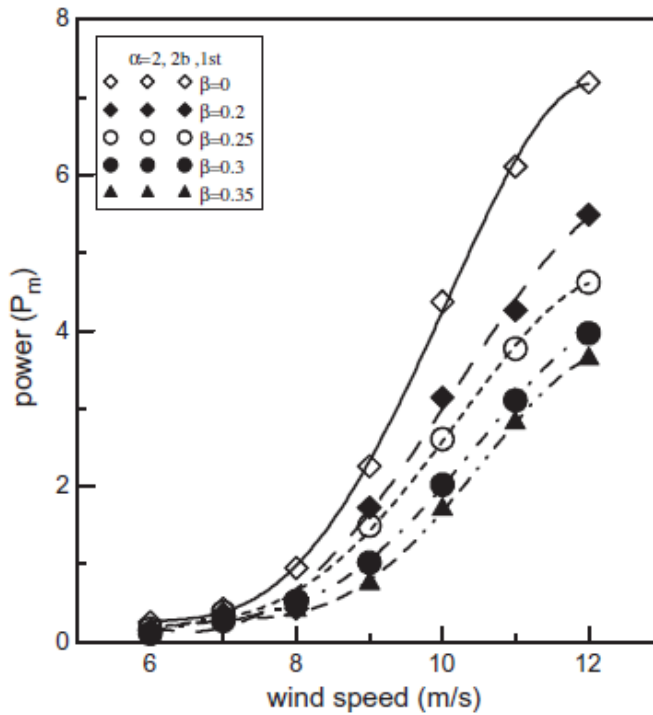
Gambar 2. 14 Hubungan antara specific power dan kecepatan angin pada turbin Savonius single stage dan double stages [3]

Dari gambar 2.14 diatas didapatkan hubungan antara specific power dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai *specific power* pada turbin Savonius double stages lebih besar daripada specific power pada turbin Savonius single stage.



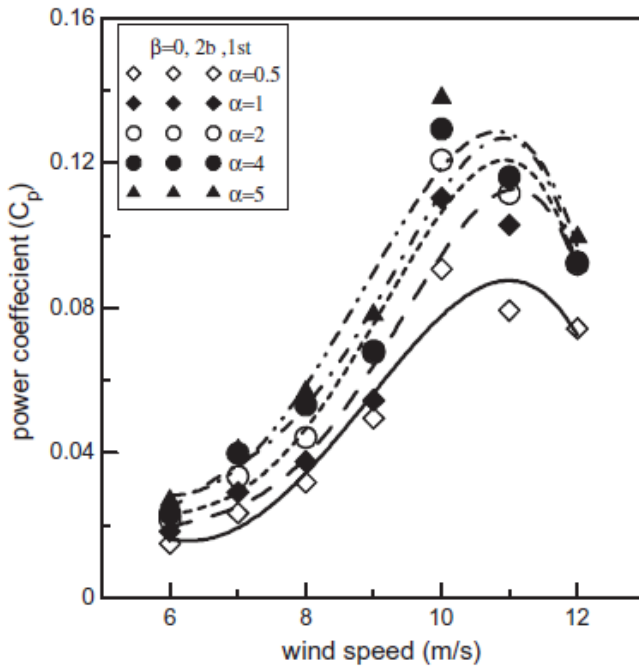
Gambar 2. 15 Hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius single stage dan double stages [3]

Pada gambar 2.15 didapatkan hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius single stage dan double stages terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai torsi statis pada turbin Savonius double stages lebih besar daripada torsi statis pada turbin Savonius single stage.



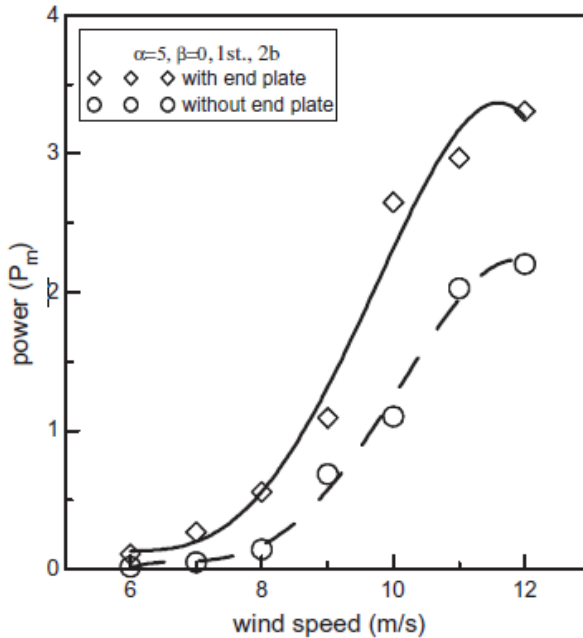
Gambar 2. 16 Hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi overlap ratio [3]

Pada gambar 2.16 didapatkan hubungan antara mechanical power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi overlap ratio terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari mechanical power akan menurun seiring meningkatnya overlap ratio pada turbin Savonius.



Gambar 2. 17 Hubungan antara coefficient of power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi aspect ratio [3]

Pada gambar 2.17 didapatkan hubungan antara coefficient of power dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi aspect ratio terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Dari gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari coefficient of power akan meningkat seiring meningkatnya aspect ratio pada turbin Savonius.

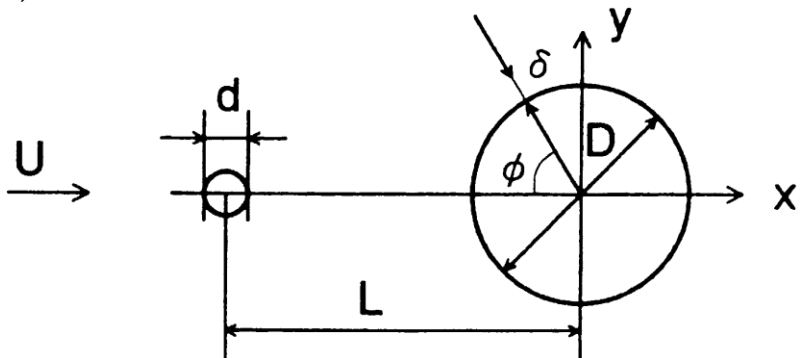


Gambar 2. 18 Hubungan antara mechanical power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya End Plate dan tanpa end plate [3]

Gambar 2.18 menunjukkan hubungan antara mechanical power dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan adanya *End Plate* dan tanpa *end plate* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa turbin Savonius yang menggunakan end plate memiliki nilai mechanical power yang lebih tinggi daripada tanpa menggunakan end plate.

2.9.2. Pengurangan Drag Sebuah Silinder Sirkular pada Suatu Aliran Udara

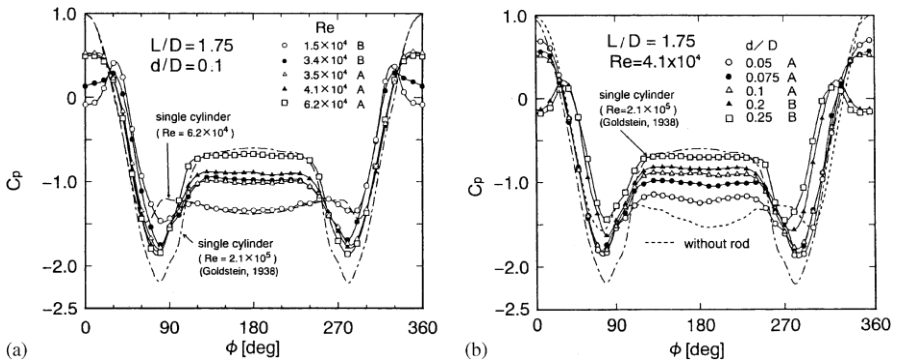
Penelitian ini dilakukan oleh T. Tsutsui dan T. Igarashi (2002) mengenai penempatan sebuah silinder pengganggu pada sisi upstream dari sebuah silinder sirkular, seperti gambar 2.19. Eksperimen dilakukan di low speed wind tunnel dengan dimensi tinggi 400 mm, lebar 150 mm, dan panjang 800 mm. Diameter silinder sirkular (D) sebesar 40 mm, dan diameter tongkat (d) dengan rentang dari 1 sampai 10 mm. Jarak antara pusat silinder sirkular dengan pusat silinder pengganggu (L) divariasi dari 50 sampai 120 mm sehingga L/D yang digunakan adalah 1,25-3,0. Bilangan Reynolds diatur berdasarkan D dari $1,5 \times 10^4$ sampai $6,2 \times 10^4$.



Gambar 2. 19 Geometri Aliran [4]

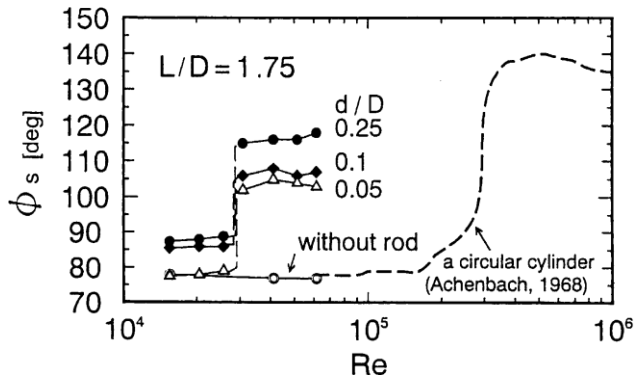
Dalam penelitian ini, diketahui ada 2 pola aliran yang terbentuk, yaitu pola aliran A dan pola aliran B. Pada pola aliran A terjadi vortex shedding dan pada pola aliran B terjadi quasi-static vortex. Pada gambar 2.20 (a) menunjukkan variasi distribusi tekanan dengan bilangan Reynolds pada $L/D = 1,75$ dan $d/D = 0,1$. Pola aliran berubah dari B ke A pada rentang $Re = (3,4 - 3,5) \times 10^4$. Ada perbedaan yang mencolok antara pola A dan B

pada bagian depan silinder sirkular. Untuk pola A, nilai C_p pada bagian depan silinder sirkular menurun sampai 0,5 karena penurunan kecepatan mendekati silinder sirkular. Untuk pola B, nilai C_p pada bagian depan silinder sirkular memiliki nilai negatif karena quasi-static vortex terbentuk diantara silinder pengganggu dan silinder sirkular, dan C_p maksimum pada 0,2-0,5 pada daerah reattachment dari shear layer yang terseparasi dari silinder pengganggu. Nilai minimum C_p pada $\phi = 70 - 90^\circ$ ($270 - 290^\circ$) menurun dan posisinya berpindah ke belakang seiring meningkatnya bilangan Reynolds. Base Pressure Coefficient (C_{pb}) naik seiring kenaikan bilangan Reynolds karena transisi dari laminar menjadi turbulen terjadi dan titik separasi mundur kebelakang seperti sebuah silinder tunggal pada daerah bilangan Reynolds kritis. Pada gambar 2.20 (b), didapatkan efek dari diameter silinder pengganggu di distribusi tekanan pada $L/D = 1,75$ dan $Re = 4,1 \times 10^4$. Pola aliran A terjadi pada $d/D \leq 0,05$ dan pola aliran B terjadi pada $d/D \geq 0,75$, nilai C_{pb} naik seiring kenaikan d/D .



Gambar 2. 20 Distribusi Tekanan di Dekat Silinder Sirkular. (a) Efek Re dan (b) Efek d/D [4]

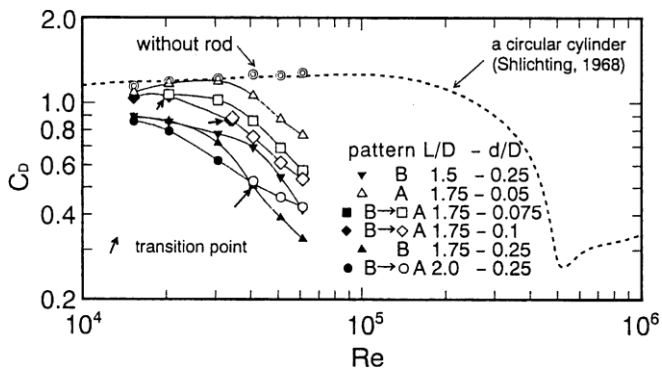
Pergerakan titik separasi pada silinder sirkular ditunjukkan pada gambar 2.21. Garis putus-putus menunjukkan titik separasi dari silinder sirkular tunggal. Derajat dari ϕ_s naik seiring dengan kenaikan d/D . Seiring bilangan Reynolds naik di atas 3×10^4 , titik separasi berpindah ke belakang secara cepat, karena terbentuknya separation bubble.



Gambar 2. 21 Titik Separasi [4]

Koefisien pressure drag C_D dari silinder sirkular ditunjukkan pada gambar 2.22. Garis putus-putus menunjukkan C_D pada silinder sirkular tunggal. Nilai C_D menurun seiring dengan kenaikan bilangan Reynolds, khususnya, melebihi 3×10^4 dengan cara yang sama seperti penurunan C_D dari silinder tunggal pada daerah bilangan Reynolds kritis. Nilai dari C_D menurun seiring meningkatnya d/D serta penurunan L/D . Saat ini penurunan drag tampaknya serupa dengan penurunan drag yang dapat di sebabkan oleh dimasukkannya turbulensi pada free stream atau dengan kekasaran permukaan yang menyebabkan transisi. Untuk kondisi $L/D = 1,75$, $d/D = 0,075$; 1 dan $L/D = 2,0$, $d/D = 0,25$, aliran berubah dari pola B ke A. Penurunan pressure drag terjadi karena penurunan tekanan di depan permukaan silinder sirkular dan titik separasi berpindah ke belakang pada silinder sirkular. Oleh karena itu, pola B lebih efektif daripada pola A untuk mereduksi C_D . Kondisi optimum untuk penurunan

pressure drag coefficient (C_D) adalah $d/D = 0,25$, $L/D = 2,0$ untuk $Re < 4,1 \times 10^4$ dan $d/D = 0,25$, $L/D = 1,75$ untuk $Re \geq 4,1 \times 10^4$ pada pola B. Sebagai contoh, nilai C_D pada $d/D = 0,25$, $L/D = 1,75$, $Re = 6,2 \times 10^4$ adalah 0,33, pengurangan dari pressure drag kira-kira sebesar 73% dibandingkan dengan silinder sirkular tunggal. Pengurangan dari total pressure drag coefficient (C_D) termasuk drag dari silinder pengganggu sebesar 63% dibandingkan dengan silinder tunggal.

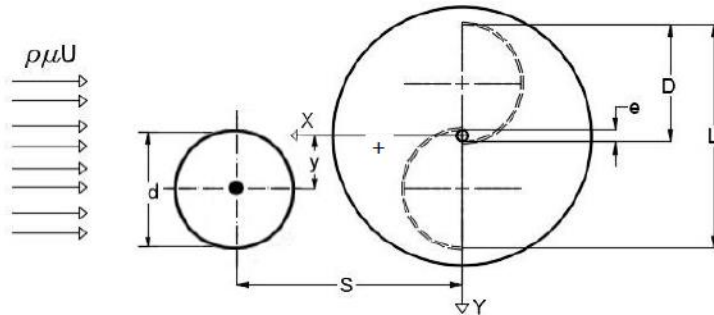


Gambar 2. 22 Koefisien Drag [4]

2.9.3. Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

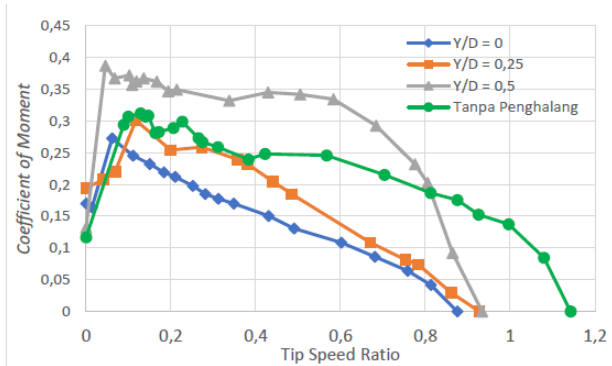
Pada penelitian ini dilakukan oleh Sri Gandari Putri Syafardinah (2018) tentang peningkatan performa turbin Savonius dengan cara menambahkan silinder pengganggu di depan returning blade. Penelitian ini memiliki beberapa variasi, yaitu: $d/D = 1.0$; $S/D = 1.6$; Bilangan Reynolds (Re) = 9.7×10^4 ; 14.5×10^4 ; 17.8×10^4 ; dengan $y/D = 0$; 0.25 ; 0.5 . Hasil yang akan diamati dari penelitian ini adalah nilai torsi turbin, coefficient of moment dan coefficient of power ketika turbin angin Savonius

diberi silinder pengganggu dengan turbin angin Savonius yang tidak diberi gangguan. Berikut adalah skema penelitian seperti yang ditunjukkan gambar 2.23 dibawah ini:

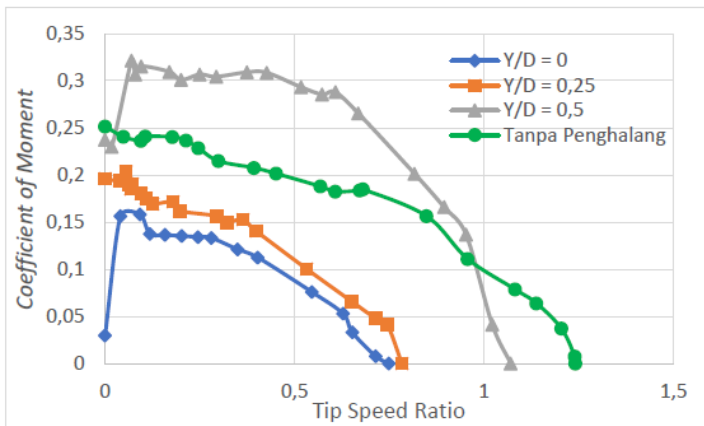


Gambar 2. 23 Skema penelitian silinder pengganggu (kiri) dan turbin angin Savonius (kanan) [5]

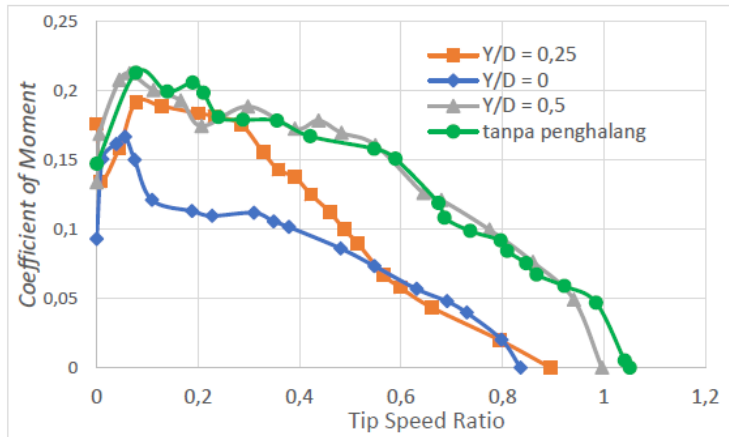
Pada penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki diameter (D) = 165.2 mm dan tinggi (H) = 294.4 mm, dan sebagai pengganggu digunakan silinder sirkular yang memiliki diameter (d) = 165.2 mm dan diletakkan di depan returning blade turbin. Berikut adalah hasil yang didapat dari penelitian ini:



Gambar 2. 24 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ [5]

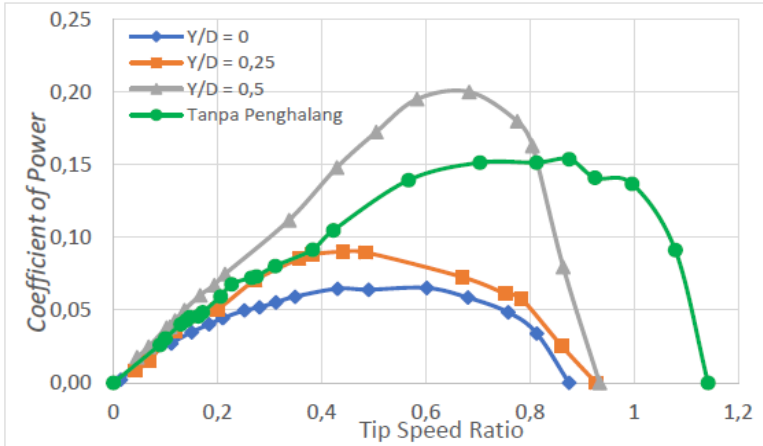


Gambar 2. 25 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ [5]

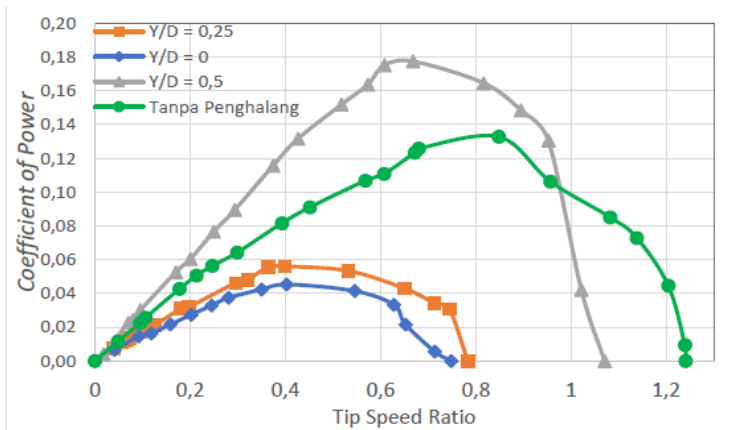


Gambar 2. 26 Grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ [5]

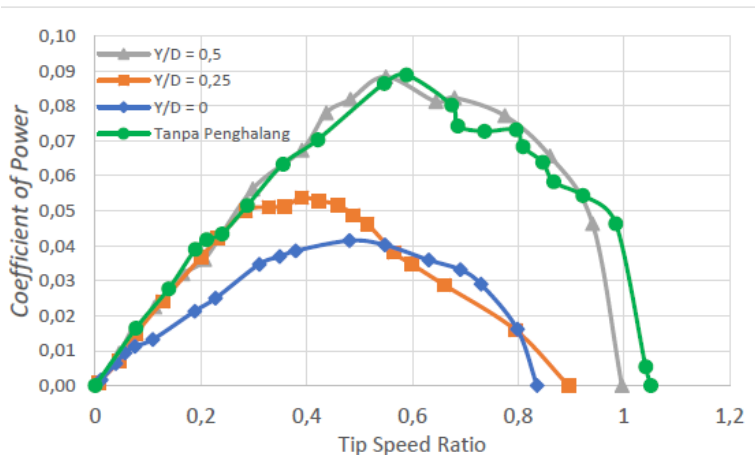
Dari gambar 2.24; 2.25 dan 2.26 menunjukkan grafik coefficient of moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa penghalang sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada variasi Reynolds number 9.7×10^4 , 14.5×10^4 , 17.8×10^4 . Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa coefficient of moment maksimum untuk $y/D = 0.5$ lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa penghalang, sehingga peletakan silinder penghalang didepan turbin angin Savonius pada rasio jarak $y/D = 0.5$ pada ketiga nilai Re diatas efektif dalam meningkatkan coefficient of moment. Peningkatan nilai coefficient of moment ini mengindikasikan peningkatan nilai torsi dinamis turbin angin Savonius.



Gambar 2. 27 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 9.7 \times 10^4$ [5]



Gambar 2. 28 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 14.5 \times 10^4$ [5]



Gambar 2. 29 Grafik coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada $Re = 17.8 \times 10^4$ [5]

Dari gambar 2.27; 2.28 dan 2.29 menunjukkan grafik coefficient of power turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi tip speed ratio (TSR) pada variasi Reynolds number 9.7×10^4 , 14.5×10^4 , 17.8×10^4 . Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi rasio jarak $y/D = 0.5$ memiliki nilai coefficient of power maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan nilai coefficient of power turbin Savonius tanpa penghalang. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.3 kali. Sehingga dapat dikatakan pada variasi jarak $y/D = 0.5$ untuk ketiga variasi Re diatas efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

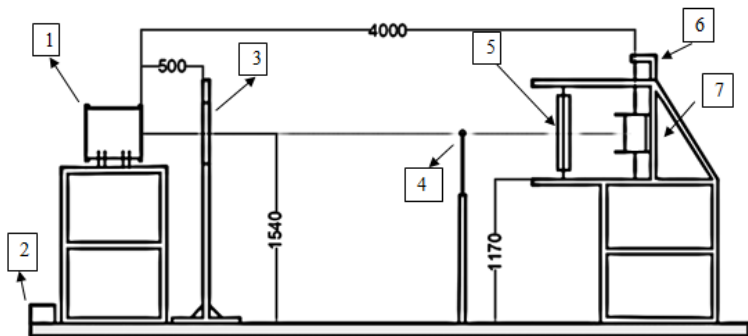
BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Setting Eksperimental

Pada subbab ini akan membahas skema penelitian dan parameter-parameter apa saja yang akan mempengaruhi.

3.1.1. Analisa Parameter

Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui apa saja parameter yang mempengaruhi terhadap penelitian ini. Berdasarkan gambar dibawah ini, dapat dilihat skema penelitian dan parameter-parameter yang akan dianalisa. Parameter yang akan dianalisa adalah densitas udara (ρ), kecepatan udara (v), viskositas udara (μ), diameter penghalang (d), diameter turbin (D), jarak titik pusat silinder pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin (y) dan letak penghalang terhadap returning blade (S).

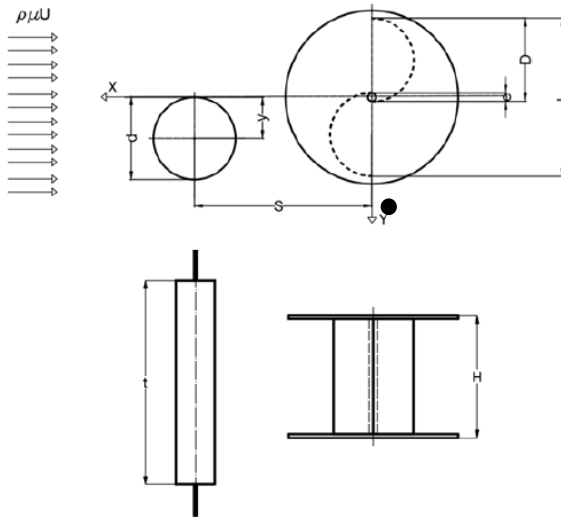


Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Savonius

Keterangan :

1. Axial Fan
2. Voltage Regulator

3. Honeycomb
4. Anemometer
5. Silinder Pengganggu
6. Torsimeter
7. Turbin Angin Savonius



Gambar 3. 2 Skema Penelitian dan Parameter Ukur

Dimana :

- D : Diameter sudu Turbin Savonius (m)
 S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin Savonius pararel dengan datangnya angin (m)
 d : Diameter silinder pengganggu (m)
 e : Diameter Poros Turbin Savonius (m)
 H : Tinggi turbin Savonius (m)
 U : Kecepatan aliran angin (m/s)
 ρ : Densitas udara (kg/m^3)
 μ : Viskositas dinamik udara (N.s/m^2)

y/D : 0,5
 d/D : 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0
 S/D : 1,6
 Re : $9,7 \times 10^4$; dan $13,6 \times 10^4$

3.1.2. Analisa Dimensi

Analisa dimensi ini bertujuan untuk mengetahui parameter apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dengan diameter tertentu. Metode yang digunakan dalam menganalisa dimensi ini adalah Teorema Phi Buckingham.

a. Analisa Dimensi Coefficient of Power

Berikut ini adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisa dimensi nilai coefficient of power sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi power

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

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)
 e : diameter poros (m)
 d : diameter silinder pengganggu (m)
 S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (m)
 H : tinggi turbin angin Savonius (m)
 n : putaran turbin (rpm)

- h : panjang silinder pengganggu (m)
 y : posisi silinder penghalang terhadap sudu SAVonius tegak lurus dengan arah datangnya angin (m)

- 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 3.1

Tabel 3. 1 Dimensi tiap parameter CoP

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

- 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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah :

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

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

Pada penelitian ini, $\frac{s}{D}, \frac{e}{D}, \frac{y}{D}, \frac{h}{D}$ 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 $L = 2D - e - 2x$. Nilai x pada kasus ini tetap sehingga didapatkan persamaan :

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

Atau dapat ditulis juga menjadi :

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

b. Analisa Dimensi Coefficient of Moment (CM)

Berikut ini adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisa dimensi nilai coefficient of power sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi Moment

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

Jumlah parameter (n) = 11 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah :

T	: torsi (N.m)
ρ	: massa jenis udara (kg/m^3)
μ	: viskositas absolut udara (N.s/m^2)
U	: kecepatan aliran udara (m/s)
D	: diameter sudu turbin angin Savonius (m)
e	: diameter poros (m)
d	: diameter silinder pengganggu (m)
S	: Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
H	: tinggi turbin angin Savonius (m)
n	: putaran turbin (rpm)
H	: panjang silinder pengganggu (m)

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

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

Tabel 3. 2 Dimensi tiap parameter CM

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6. Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah :

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

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

Pada penelitian ini, $\frac{s}{D}, \frac{e}{D}, \frac{y}{D}, \frac{h}{D}$ 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 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 $L = 2D - e - 2x$. 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 Penelitian

Berikut ini merupakan peralatan-peralatan penunjang pelaksanaan penelitian ini sebagai berikut:

3.2.1. Axial Fan

Pada penelitian ini, digunakan Axial Fan sebagai sumber fluida angin yang menghasilkan kecepatan angin untuk memutar sudu turbin angin Savonius. Axial Fan yang digunakan bernama CKE SPV-18 seperti pada gambar 3.3 dengan spesifikasi seperti gambar 3.4 sebagai berikut:



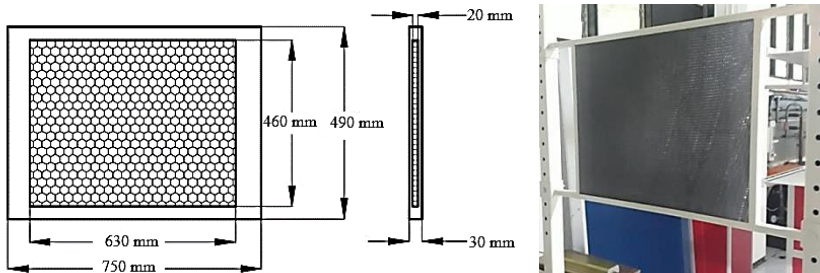
Gambar 3. 3 Axial Fan



Gambar 3. 4 Spesifikasi Axial Fan

3.2.2. Honeycomb

Pada penelitian ini, digunakan honeycomb seperti pada gambar 3.5 untuk menyeragamkan fluida angin yang bergerak menuju turbin angin Savonius. Honeycomb ini diletakkan di antara Axial Fan dengan turbin angin Savonius.



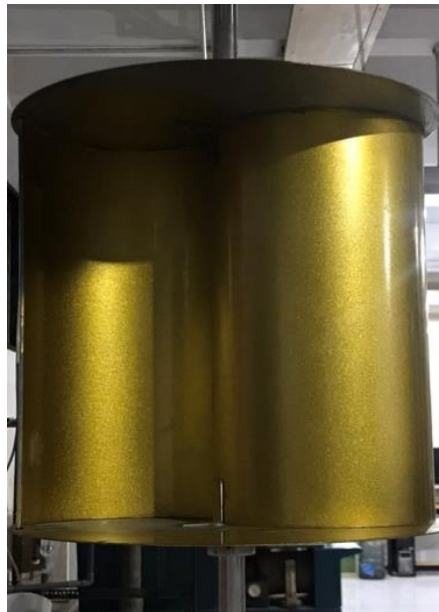
Gambar 3. 5 Honeycomb yang digunakan dalam Penelitian

Tabel 3. 3 Spesifikasi Honeycomb

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

3.2.3. Turbin Savonius

Pada Penelitian ini digunakan turbin angin dengan jenis Savonius seperti pada gambar 3.6 dengan spesifikasi seperti tabel 3.4 sebagai berikut:



Gambar 3. 6 Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 4 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

Spesifikasi Turbin Angin Savonius	
Diameter sudu turbin (D)	167,10 mm
Tinggi Turbin (H)	298 mm
Diameter Poros (e)	19 mm
Diameter end plate (Do)	320 mm
Tebal end plate	1,80 mm
Tebal sudu turbin (x)	2,95 mm

3.2.4. Silinder Penghalang



Gambar 3. 7 Silinder Penghalang

Pada penelitian ini silinder penghalang seperti pada gambar 3.7 digunakan untuk mengurangi gaya drag pada turbin Savonius sehingga diharapkan torsi dari turbin Savonius meningkat. Silinder penghalang diletakkan didepan returning blade dari turbin Savonius. Spesifikasi dari silinder pengganggu adalah sebagai berikut :

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

3.2.5. Penyangga Turbin Angin Savonius

Dalam melakukan penelitian ini, turbin angin Savonius dan plat penghalang ditopang oleh suatu penyangga seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Penyangga Turbin Savonius

3.3. Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan alat ukur untuk menunjang pelaksanaan penelitian ini, sebagai berikut:

3.3.1. Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer model Omega HHF141 seperti pada gambar 3.9 dengan high resolution sebesar 0,01 m/s. Spesifikasi dari anemometer ini dapat dilihat pada tabel 3.5.



Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 5 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: $\pm(0.50\%$ of F.S. $+0.75\%$ of reading $+1$ digit
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/sec	
Operating Temperature	Instrument	: 32° to 125°F (0° to 50°C)
	Probes	: -4° to 212°F (-20° to 100°C)
Power Supply	3 AA alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours, without backlight	
Battery Check	Automatic Low Battery display	
Display	0.5" LCD, 4 digits, with LED backlight	

3.3.2. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA HHT12 seperti pada gambar 3.10 dengan akurasi pembacaan sebesar 0,01%. Spesifikasi tachometer dapat dilihat pada tabel 3.6.



Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12

Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA HHT12

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

3.3.3. Voltage Regulator

Voltage Regulator merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengatur kecepatan putar dari fan. Voltage regulator yang digunakan adalah Ling Bridge TDGC 2J-3 seperti pada gambar 3.11 untuk mengatur kecepatan fan, perlu mengubah voltage output dari regulator. Untuk spesifikasi lengkapnya dapat dilihat di tabel 3.7.



Gambar 3. 11 Powell voltage regulator

Tabel 3. 7 Spesifikasi Powell Voltage Regulator

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

3.3.4. Torque meter Statis

Torque meter merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi dari suatu objek. Torque meter yang digunakan dalam penelitian ini adalah torque meter LUTRON model TQ-8800 seperti pada gambar 3.12 dengan high resolution sebesar 0,1 Newton-cm. Spesifikasi torque meter ini dapat dilihat pada tabel 3.9.



Gambar 3. 12 Torque meter LUTRON model TQ-8800

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

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

3.3.5. Jangka Sorong

Pada penelitian ini digunakan jangka sorong Sigmat 15cm seperti pada gambar 3.13 dibawah.



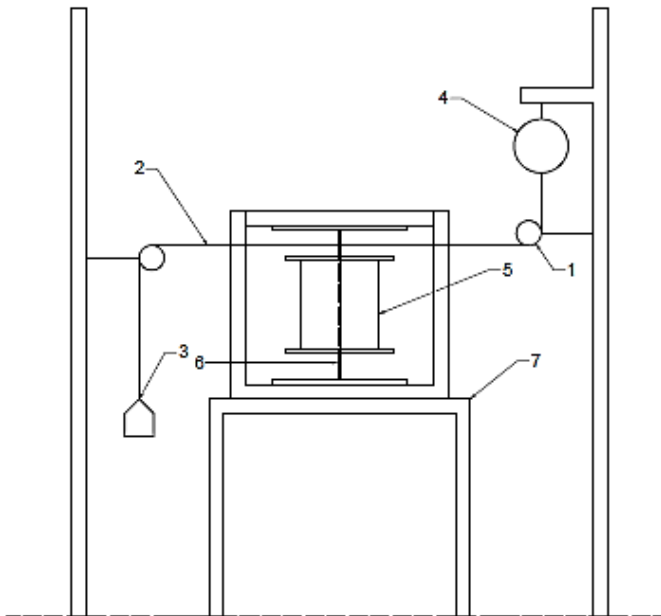
Gambar 3. 13 Jangka Sorong

Jangka sorong merupakan alat ukur yang mampu mengukur jarak, kedalaman, maupun diameter dalam suatu objek dengan tingkat akurasi dan presisi yang sangat baik ($\pm 0,05$ mm).

hasil pengukuran dari ketiga fungsi alat tersebut dibaca dengan cara yang sama.

3.3.6. Brake Dynamometer

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



Gambar 3. 14 Gambar skema brake dynamometer

Keterangan :

1. Pulley
2. Benang nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas

5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

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



Gambar 3. 15 Neraca pegas

Tabel 3. 9 Spesifikasi Neraca pegas

Specification	
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. 16 Pemberat

Untuk proses pembebanan pada proses pengambilan data torsi dinamis digunakan pembebanan seperti gambar 3.15 dengan beberapa variasi beban.

3.4. **Prosedur Penelitian**

Berikut adalah prosedur untuk mencari torsi dinamis dan torsi statis pada penelitian ini:

3.4.1. Torsi Dinamis

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Meletakkan benda uji pada test section.
3. Mengukur temperature ruangan dengan menggunakan termometer.
4. Menyalakan axial fan dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan voltage regulator sehingga kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan Reynolds yang diinginkan, yaitu $9,7 \times 10^4$.
6. Setelah memperoleh bilangan Reynolds dan steady, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros tanpa silinder pengganggu dan beban dengan menggunakan tachometer.
7. Mengukur torsi dinamis tanpa silinder pengganggu dan beban dengan brake dynamometer.
8. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan (untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 5 gr dan 10 gr; $Re = 13,6 \times 10^4$ sebesar 10 gr dan 20 gr).
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan tachometer.
10. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 – 10 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
12. Mengulangi langkah 5 – 11 dengan mengubah bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$.
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur perbandingan antara diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius (d/D) sebesar 0,1 dan (S/D) sebesar 1,6
14. Mengukur kecepatan angin dengan anemometer pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$.
15. Setelah memperoleh bilangan Reynolds dan steady, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan

putaran poros dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan menggunakan tachometer.

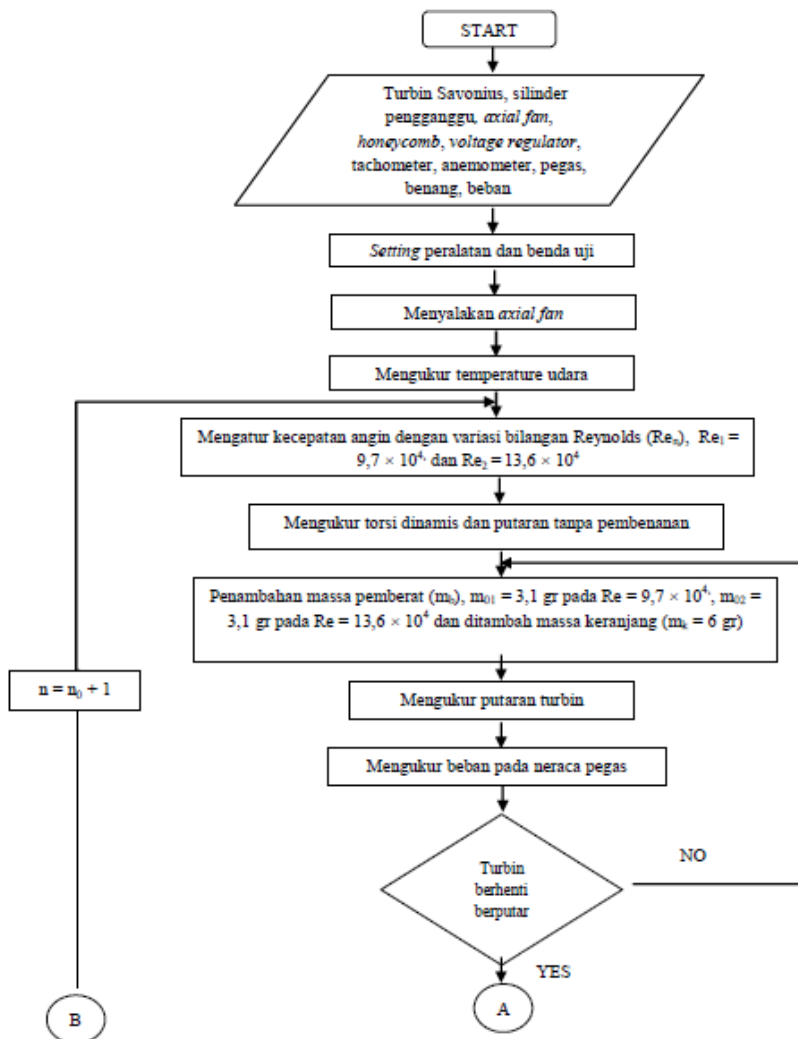
16. Mengukur torsi dinamis dengan silinder pengganggu dan tanpa beban dengan brake dynamometer.
17. Memberikan massa pemberat sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan (untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ sebesar 3,1 gr; $Re = 13,6 \times 10^4$ sebesar 3,1 gr).
18. Mengukur kecepatan putaran poros dengan tachometer.
19. Mengukur massa yang terbaca pada timbangan pegas untuk nilai torsi dinamis.
20. Mengulangi langkah 17 – 19 hingga turbin Savonius berhenti berputar.
21. Mengulangi langkah 14 – 20 dengan mengubah bilangan Reynolds = $13,6 \times 10^4$.
22. Mengulangi langkah 13 – 21 dengan mengubah variasi d/D menjadi 0,2; 0,3; 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 putaran (n) terhadap λ dan bilangan Reynolds, perbandingan coefficient of power dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ , dan perbandingan coefficient of moment dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap λ .

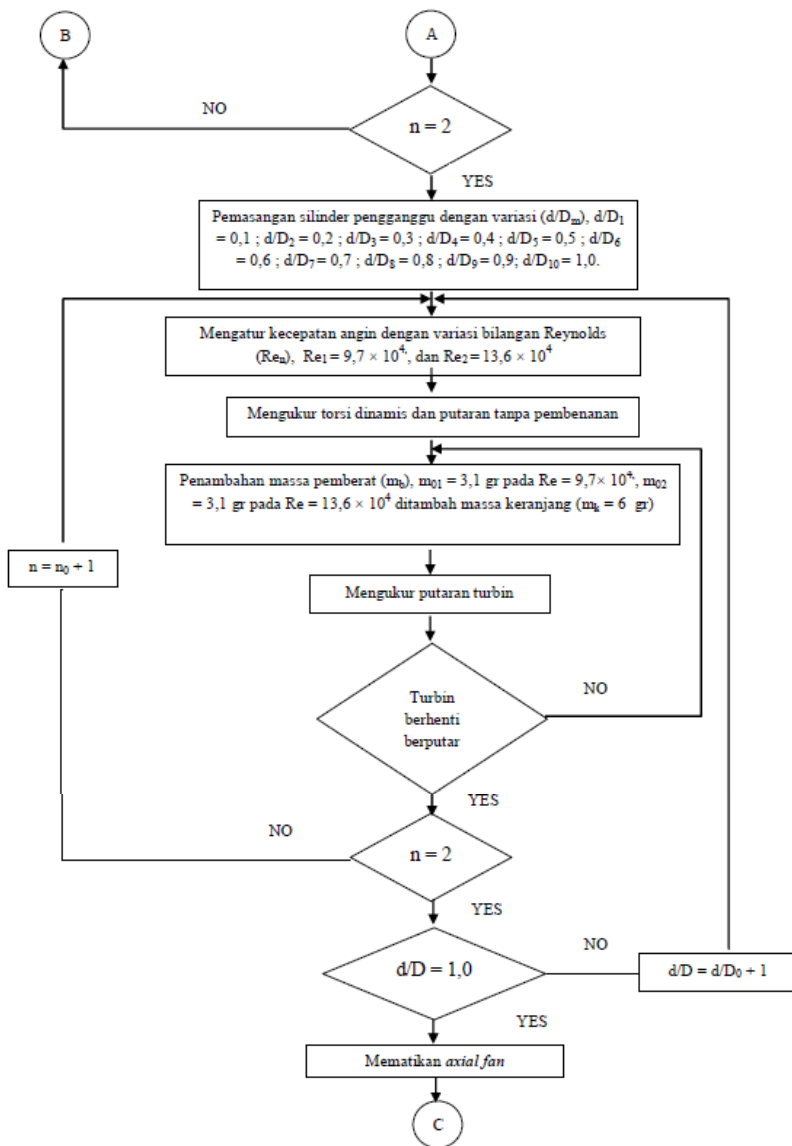
3.4.2. Torsi Statis

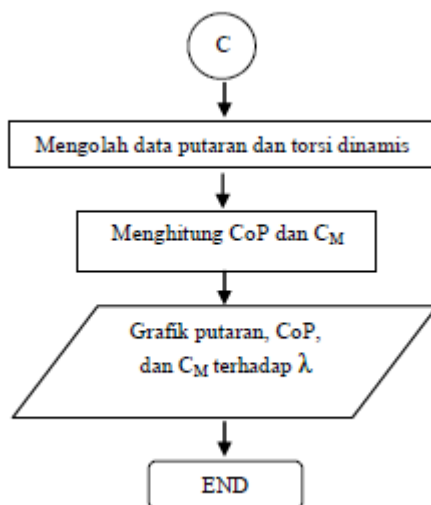
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Meletakkan benda uji pada test section.
3. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar 0° .
4. Menyalakan axial fan dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan voltage regulator sehingga kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh bilangan Reynlods yang diinginkan, yaitu $9,7 \times 10^4$.

6. Setelah memperoleh bilangan Reynolds dan steady, kemudian melakukan pengukuran torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan torquemeter.
7. Mematikan axial fan.
8. Mengulangi langkah 3 - 7 dengan variasi sudut tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (dengan kenaikan 10° tiap pengamatan).
9. Mengulangi langkah 3 - 8 dengan variasi mengubah bilangan Reynolds menjadi $13,6 \times 10^4$.
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur perbandingan antara diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius (d/D) sebesar 0,5 dan (S/D) sebesar 1,6.
11. Mengatur sudut bukaan sudu turbin Savonius sebesar 0° .
12. Menyalakan axial fan dan mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer pada bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$.
13. Setelah memperoleh bilangan Reynolds dan steady, kemudian melakukan pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan torquemeter..
14. Mematikan axial fan.
15. Mengulangi langkah 11 - 14 dengan mengubah variasi sudut tubin angin Savonius (θ) menjadi $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ (dengan kenaikan 10° tiap pengamatan).
16. Mengulangi langkah 11 - 15 dengan mengubah bilangan Reynolds menjadi $13,6 \times 10^4$.
17. Mengulangi langkah 10 – 16 dengan mengubah variasi d/D menjadi 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0.
18. Mengolah data torsi statis yang diperoleh dan melakukan plotting grafik, perbandingan torsi statis dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap θ .

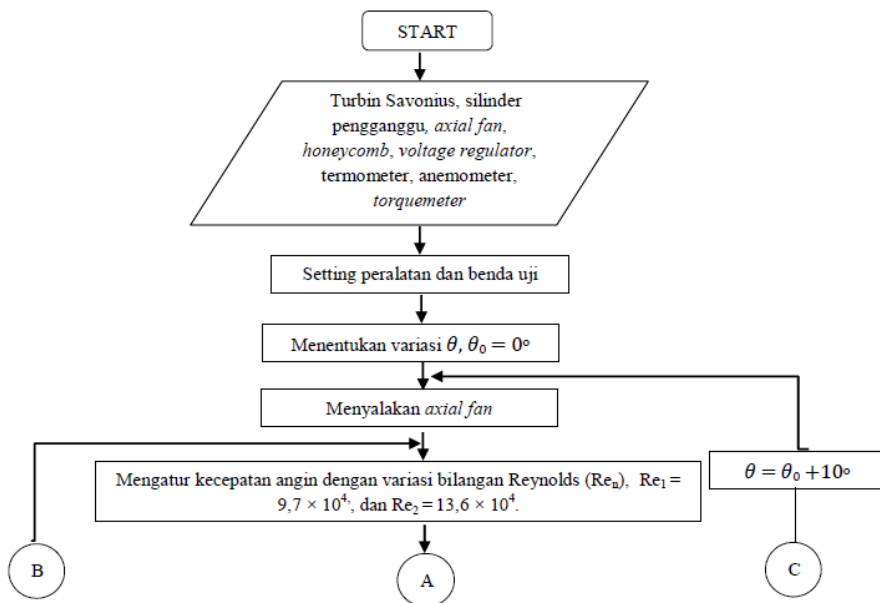
3.5. FlowChart Penelitian Torsi Dinamis

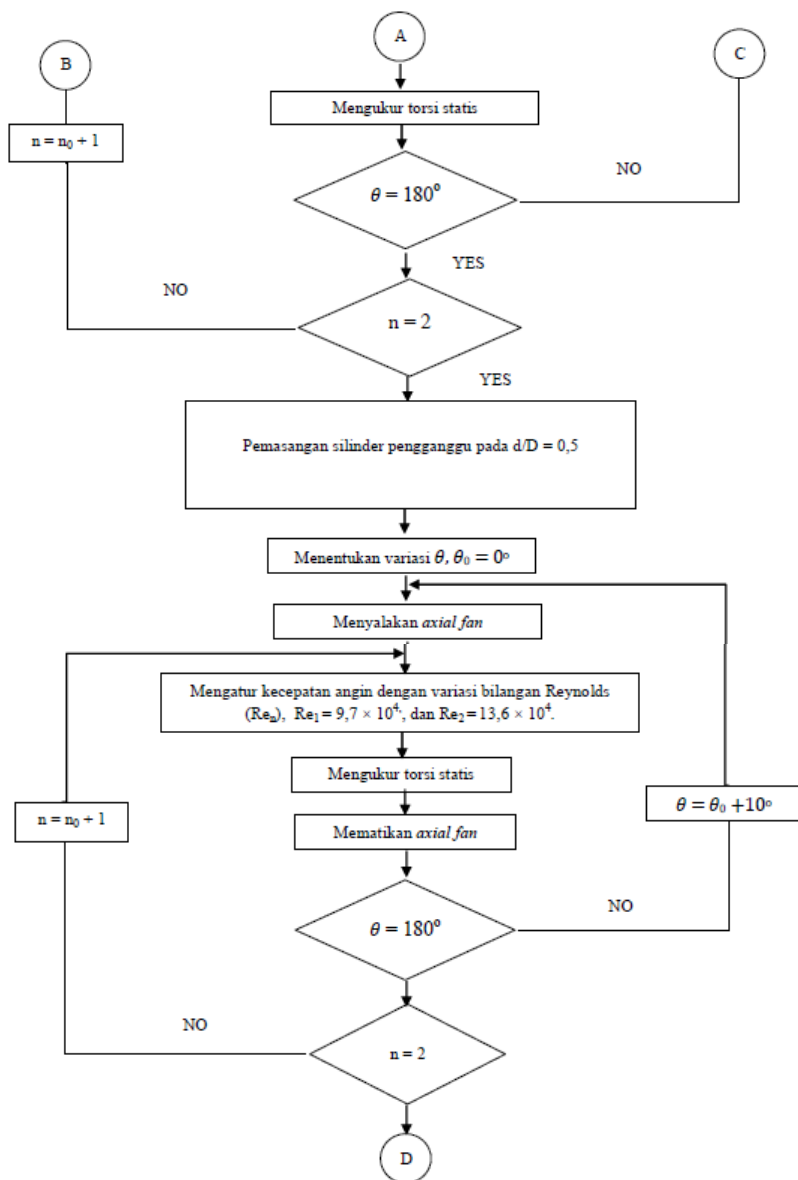


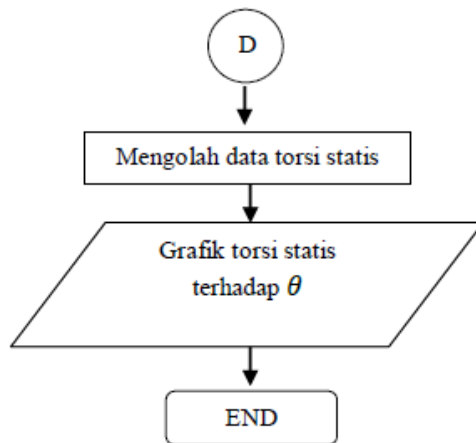




3.5.1. Torsi Statis







3.6. Perhitungan Uncertainty

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

- Uncertainty pada pembacaan tip speed ratio (λ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_{\omega} = \pm \{ [u_n]^2 \}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{237,2} = \pm 4,21 \times 10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

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

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (U)

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

Selanjutnya substitusi hasil uncertainty ω , R, dan U ke persamaan 3.1 sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

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

$$u_{\lambda} = \pm \{ (4,2 \times 10^{-4})^2 + (3,24 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

- Uncertainty pada pembacaan coefficient of power (CoP)

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

$$u_{CoP} = \pm \left\{ (0,04498)^2 + (4,21 \times 10^{-4})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (-3 \times 0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 45,58 \times 10^{-3} = 4,56\%$$

- Uncertainty pada pembacaan coefficient of moment (C_M)

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

$$u_{CM} = \pm \left\{ (0,04498)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 45,74 \times 10^{-3} = 4,57\%$$

- Uncertainty pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

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

$$u_{RE} = \pm \left\{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,62 \times 10^{-3})^2 + (-5,316 \times 10^{-3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 6,87 \times 10^{-3} = 0,69\%$$

Berikut nilai dari uncertainty yang didapatkan pada $Re = 9,7 \times 10^4$ pada CoP maksimum turbin angin Savonius dengan penempatan silinder pada ukuran diameter $d/D = 0,5$ dan jarak $S/D = 1,6$ sebagai berikut.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Contoh Perhitungan

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

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

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

4.1.1. Perhitungan Reynolds Number

- **Step pertama mencari Massa Jenis Udara (ρ)**

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

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

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

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

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

$m_1 = m_2$. Berdasarkan batasan tersebut, maka persamaan 4.3 menjadi:

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

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

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

- **Step kedua mencari Viskositas Udara**

Untuk perhitungan viskositas udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu:

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

dimana untuk udara:

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

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

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

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

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

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

- **Reynolds Number**

Berdasarkan persamaan 2.1, maka bilangan Reynolds pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

dimana :

L = Panjang karakteristik yang diukur dari medan aliran, dalam kasus ini adalah diameter turbin = $2D - e - 2x = (2 \times 167) - 19 - (2 \times 3) = 309 \text{ mm} = 0,309 \text{ m}$

Setelah mendapatkan nilai panjang karakteristik, nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan 2.1, sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

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

4.1.2. Perhitungan Tip Speed Ratio

Berdasarkan persamaan 2.11 untuk mendapatkan nilai Tip Speed Ratio (λ) pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

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

dimana:

n = jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)

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

R = jari-jari turbin angin Savonius

$$\begin{aligned} \frac{L}{2} &= \frac{(2D - e - 2x)}{2} = \frac{(2 \times 167,1) - 19 - (2 \times 2,95)}{2} = 154,5 \text{ mm} \\ &= 0,1545 \text{ m} \end{aligned}$$

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

Sehingga didapatkan nilai:

$$\lambda = \frac{34,87 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1545 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,078$$

4.1.3. Perhitungan Coefficient of Power (CoP)

Berdasarkan persamaan 2.6 untuk mendapatkan nilai Coefficient of Power (CoP) pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ ($V = 5 \text{ m/s}$) adalah sebagai berikut:

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

dimana :

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

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

r = Jari-jari silinder yang menerima beban = 12,5 mm
= 0,0125 m

ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius = 34,873 rad/s

m = massa pembebanan (kg) = 6 gr = 0,006 kg

s = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 0,15 kg

Sehingga didapatkan nilai CoP :

$$\begin{aligned} CoP &= \frac{\left| \frac{6 - 150}{1000} \right| \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,0125 \text{ m} \cdot 34,873 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,092 \text{ m}^2 \cdot \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^3} \\ &= 0,092 \\ &= 9,2\% \end{aligned}$$

4.1.4. Perhitungan Coefficient of Moment (CM)

Berdasarkan persamaan 2.9 dan 2.10 untuk mendapatkan nilai Coefficient of Moment (C_M) pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{T_\infty} \quad (2.9)$$

$$C_M = \frac{(m-s) g \cdot r}{T_\infty} \quad (2.10)$$

dimana :

- T_∞ = torsi teoritis (N.m)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)
 = 20,38 N.cm = 0,2038 N.m
 = 9,81 m/s^2
 m = massa pembebanan (kg) = 6 gr = 0,006 kg
 r = jari-jari silinder yang menerimabeban
 = 12,5 mm = 0,0125 m
 s = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 0,15 kg

Sehingga didapatkan nilai C_M :

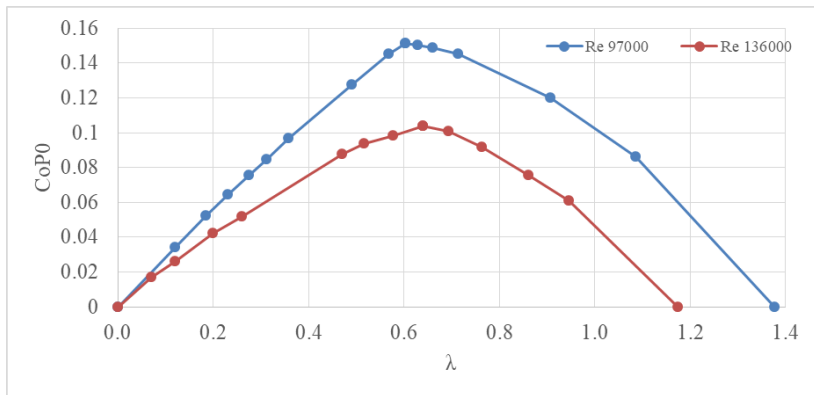
$$C_M = \frac{(0,006-0,15) \cdot 9,81 \cdot 0,0125}{0,2038} = 0,8663$$

4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

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

4.2.1. Analisa Nilai Coefficient of Power (CoP_0) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini didapatkan nilai CoP_0 terhadap TSR turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.1 dalam bentuk grafik.



Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power (CoP_0) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Pada gambar 4.1 dapat dilihat grafik CoP_0 terhadap TSR turbin memiliki trendline parabolic dimana nilai CoP_0 akan naik dan kemudian turun seiring dengan bertambahnya nilai TSR sehingga puncak dari trendline tersebut adalah nilai maksimum dari CoP_0 turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ didapatkan nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,152 atau 15,2% pada $TSR = 0,603$. Lalu pada bilangan

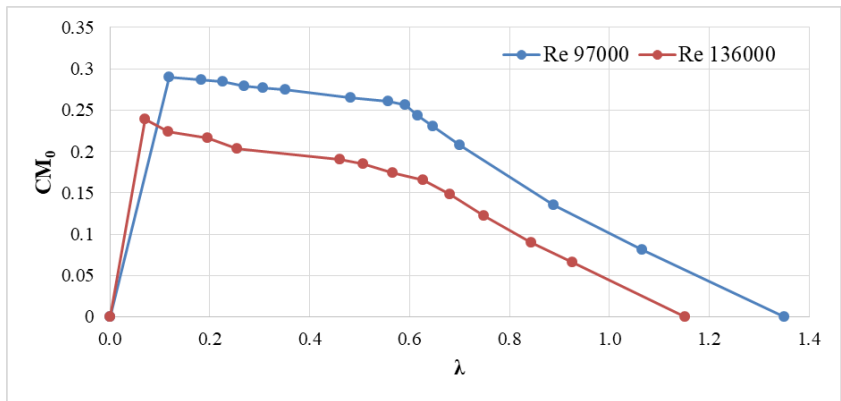
Reynolds $13,6 \times 10^4$ didapatkan nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,104 atau 10,4% pada $TSR = 0,64$. Dapat dilihat dari kedua grafik tersebut bahwa nilai CoP_0 maksimum tertinggi terjadi pada $Re 9,7 \times 10^4$.

Jika dilihat dari trendline bahwa nilai CoP_0 pada $Re 9,7 \times 10^4$ menuju $13,6 \times 10^4$ mengalami penurunan, hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai Re mempengaruhi nilai CoP turbin angin Savonius. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan bilangan Reynolds tidak berbanding lurus dengan peningkatan CoP yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat dan turbin akan membentuk seperti *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna, sehingga daya turbin yang dihasilkan justru akan rendah. Hal tersebut diperkuat dengan eksperimen Mahmoud, et al. 2012 pada gambar 2.12 yang menunjukkan nilai CoP turbin angin Savonius fungsi kecepatan angin mempunyai bentuk grafik parabolic yang akan naik sampai CoP maksimum pada kecepatan angin tertentu dan akan turun setelah mencapai titik maksimumnya. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan Reynolds maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi. Dari hasil tersebut juga didapatkan nilai $CoP = 0$ pada $TSR = 0$ dan TSR maksimum. Hal ini dikarenakan nilai CoP merupakan hasil perkalian antara putaran turbin dengan torsi dinamis. Nilai torsi dinamis didapatkan dari beban yang diberikan kepada turbin sehingga pada kondisi nilai TSR maksimum merupakan kondisi dimana turbin belum diberikan pembebanan sehingga nilai torsi dinamis = 0 akibatnya nilai $CoP = 0$. Begitu juga ketika nilai $TSR = 0$ maka turbin berhenti berputar sehingga didapatkan nilai $CoP = 0$.

Pada penelitian ini, perhitungan CoP memiliki nilai *uncertainty* sebesar 4,56% yang artinya jika didapatkan hasil CoP dengan *range* tersebut maka nilainya dianggap sama.

4.2.2. Analisa Nilai Coefficient of Moment (CM_0) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini didapatkan nilai CM_0 terhadap TSR turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada $Re\ 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.2 dalam bentuk grafik.



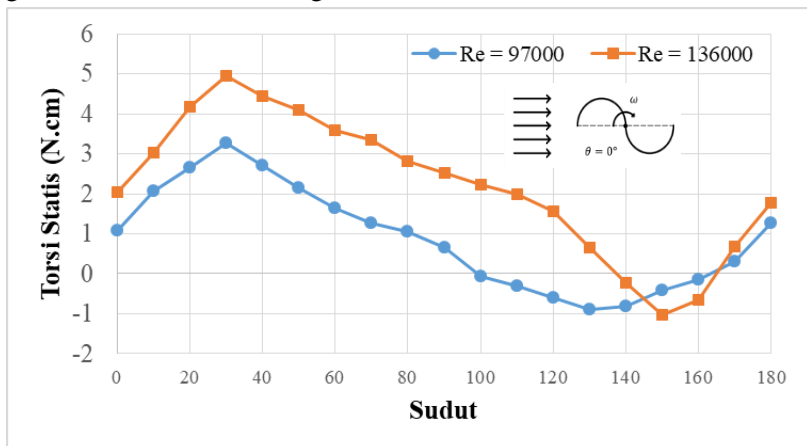
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment (C_{M0}) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa grafik *coefficient of moment* terhadap tip speed ratio (TSR) memiliki trendline yang cenderung turun seiring meningkatnya nilai tip speed ratio (TSR).

Torsi dinamis maksimum didapat saat turbin angin Savonius diberikan pembebanan maksimum, akibatnya disaat tersebut didapatkan nilai coefficient of moment maksimum. Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ nilai coefficient of moment maksimum sebesar 0,284 pada TSR 0,12, lalu pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ coefficient of moment maksimum sebesar 0,234 pada TSR 0,07. Hal ini menunjukkan bahwa variasi dari bilangan Reynolds mempengaruhi kecepatan aliran fluida yang kemudian akan mempengaruhi nilai coefficient of moment turbin angin Savonius.

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

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



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

Pada gambar 4.3 dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada kedua bilangan Reynolds. Pada kedua bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ didapatkan bahwa nilai torsi statis mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30° . Lalu nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds tersebut mengalami penurunan hingga sudut 130° untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ dan sudut 150° untuk $Re = 13,6 \times 10^4$. Lalu nilai torsi statis pada kedua bilangan Reynolds tersebut mengalami kenaikan hingga sudut 180° . Pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar $3,28 \text{ N.cm}$ pada sudut 30° dan nilai torsi statis minimum sebesar $-0,9 \text{ N.cm}$ pada sudut 130° . Pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ didapatkan nilai torsi statis maksimum sebesar $4,96 \text{ N.cm}$ pada sudut 30° dan nilai torsi statis minimum sebesar $-1,04 \text{ N.cm}$ pada sudut 150° . Torsi statis negatif pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ berada pada sudut 100° sampai 160° , pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$ berada pada sudut 140° sampai 160° . Torsi statis maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$, karena semakin besar bilangan Reynolds semakin besar pula kecepatan dan gaya drag yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan self starting sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut 30° untuk kedua bilangan Reynolds dan untuk torsi negatif terbesar pada sudut 130° untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ dan 150° untuk $Re = 13,6 \times 10^4$. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30° sampai dengan sudut 130° dan 150° dikarenakan posisi advancing blade yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan

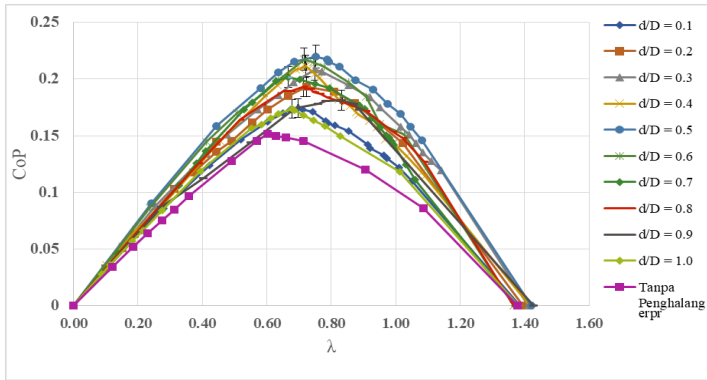
gaya drag pada sisi advancing blade mengecil dan sisi returning blade mendekati datangnya arah angin sehingga gaya drag yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya drag antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga. Pada sudut 0° sampai 30° , sudut 130° sampai 180° dan pada sudut 150° sampai 180° terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya drag pada advancing blade meningkat sedangkan gaya drag pada returning blade berkurang sehingga selisih gaya drag pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut 30° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan torsi statis maksimum.

4.3. Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu

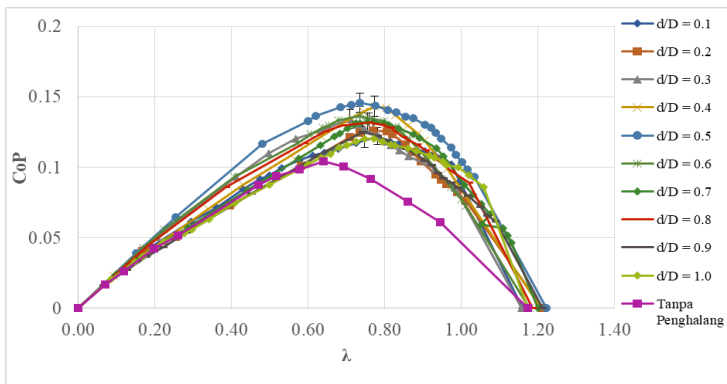
Analisa ini bertujuan untuk mengetahui kondisi performa turbin angin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu. Analisa yang dilakukan meliputi coefficient of power terhadap TSR, perbandingan nilai Coefficient of Power maximum (CoP_{max}) antara turbin angin savonius dengan dan tanpa siliner pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi d/D , coefficient of moment terhadap TSR dan torsi statis terhadap sudut yang dihasilkan turbin.

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

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



(a)



(b)

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

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

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

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				% kenaikan CoP	
	Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$	Re = $13,6 \times 10^4$
	CoP ₀ max	λ	CoP ₀ max	λ	CoP _{max}	λ	CoP _{max}	λ		
0,1	0,152	0,60	0,104	0,64	0,175	0,78	0,122	0,94	15.13%	17.31%
0,2					0,193	0,84	0,126	0,77	26.97%	21.15%
0,3					0,208	0,82	0,134	0,71	36.84%	28.85%
0,4					0,211	0,72	0,143	0,84	38.82%	37.50%
0,5					0,220	0,64	0,146	0,74	44.74%	40.38%
0,6					0,217	0,74	0,136	0,74	42.76%	30.77%
0,7					0,202	0,67	0,132	0,76	32.89%	26.92%
0,8					0,193	0,72	0,131	0,76	26.97%	25.96%
0,9					0,181	0,83	0,125	0,74	19.08%	20.19%
1,0					0,174	0,68	0,120	0,75	14.47%	15.38%

Pada tabel 4.1 menunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds memiliki nilai CoP yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di seluruh variasi d/D sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,6$ efektif meningkatkan CoP turbin. Dari seluruh variasi d/D, nilai CoP maksimum tertinggi terjadi di $Re =$

$9,7 \times 10^4$ pada variasi $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,22 atau 22% pada TSR 0,64 dengan kenaikan sebesar 44,74% dari sebelum diberi penghalang. Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ nilai CoP maksimum tertinggi juga terjadi di $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,146 atau 14,6% pada TSR 0,74 dengan kenaikan sebesar 40,38% dari sebelum diberi penghalang. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa penambahan silinder pengganggu di depan returning blade turbin dapat menurunkan gaya drag pada returning blade sehingga selisih gaya drag antara advancing blade dan returning blade meningkat yang menyebabkan daya turbin meningkat. Serta didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Igarashi pada tahun 2002 bahwa pemberian silinder pengganggu di depan sebuah silinder dapat menurunkan gaya drag yang diterima oleh silinder tersebut.

Dari hasil tersebut juga didapatkan nilai $CoP = 0$ pada TSR = 0 dan TSR maksimum. Hal ini dikarenakan nilai CoP merupakan hasil perkalian antara putaran turbin dengan torsi dinamis. Nilai torsi dinamis didapatkan dari beban yang diberikan kepada turbin sehingga pada kondisi nilai TSR maksimum merupakan kondisi dimana turbin belum diberikan pembebanan sehingga nilai torsi dinamis = 0 akibatnya nilai $CoP = 0$. Begitu juga ketika nilai TSR = 0 maka turbin berhenti berputar sehingga didapatkan nilai $CoP = 0$.

Tabel 4. 2 Tabel Uncertainty CoP

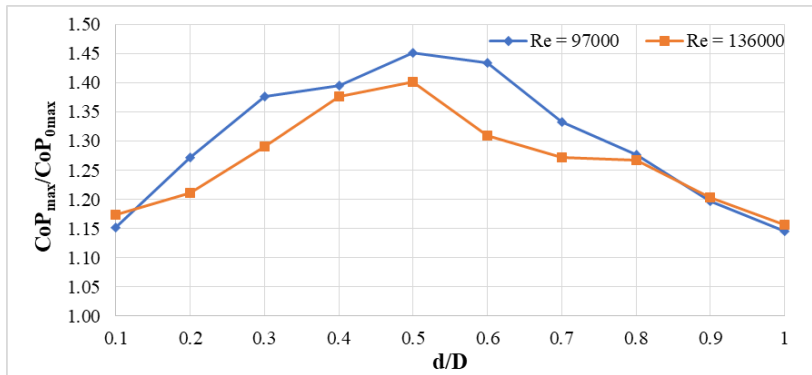
d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CoPmax	Uncertainty	Range	CoPmax	Uncertainty	Range
0.1	0.175	4.72	0.167 - 0.183	0.122	4.5	0.116 - 0.127
0.2	0.193	4.65	0.184 - 0.202	0.126	4.46	0.120 - 0.132
0.3	0.208	4.6	0.198 - 0.218	0.134	4.36	0.128 - 0.140
0.4	0.211	4.55	0.201 - 0.221	0.143	4.37	0.137 - 0.150
0.5	0.22	4.56	0.211 - 0.230	0.146	4.33	0.140 - 0.152
0.6	0.217	4.52	0.207 - 0.227	0.136	4.37	0.130 - 0.142
0.7	0.202	4.53	0.193 - 0.211	0.132	4.41	0.126 - 0.138
0.8	0.193	4.63	0.184 - 0.202	0.131	4.41	0.125 - 0.137
0.9	0.181	4.91	0.172 - 0.190	0.125	4.44	0.119 - 0.131
1	0.174	4.7	0.166 - 0.182	0.12	4.47	0.115 - 0.125

Pada penelitian ini, perhitungan CoP memiliki nilai *uncertainty* seperti pada tabel 4.2 diatas. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang artinya setiap nilai CoP yang diukur pada penelitian ini memiliki *range* seperti ditunjukkan pada tabel 4.2 diatas. *Range* tersebut adalah batas toleransi yang didapatkan sesuai dengan ketelitian alat ukur. Hal ini menunjukkan bahwa pada batas toleransi tersebut nilai CoP_{max} dianggap sama. Batas toleransi pada CoP ini juga dapat dilihat pada gambar 4.4 diatas dimana secara visualisasi grafik pada beberapa variasi d/D saling berdekatan hingga masuk kedalam batas toleransi tersebut. Oleh karena itu, ukuran yang bersinggungan dapat diambil pada salah satu variasi d/D. Adapun variasi d/D setelah dilakukan eliminasi yaitu 0,2; 0,5; dan 0,7 untuk seluruh variasi bilangan Reynolds.

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

Pada subbab ini akan dianalisa peningkatan nilai CoP turbin angin Savonius dengan membandingkan nilai CoP_{max} antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap d/D pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ sehingga dapat dilihat nilai peningkatannya. Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah dalam bentuk grafik.

Dapat dilihat dari gambar 4.5 dibawah bahwa kedua grafik tersebut memiliki bentuk parabolik dimana *trendline* nilai perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} akan naik pada d/D 0.1 sampai dengan d/D 0.5 kemudian turun sampai dengan d/D 1.0 sehingga puncak dari *trendline* tersebut adalah nilai tertinggi dari CoP_{max}/CoP_{0max} . Hal ini membuktikan bahwa variasi ukuran diameter silinder pengganggu mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi berada pada $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 1,4517 yang artinya nilai CoP_{max} turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,1515 menjadi 0,2200. Selanjutnya pada $Re = 13,6 \times 10^4$, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi berada pada $d/D = 0,5$ juga yaitu sebesar 1,4022 yang artinya nilai CoP_{max} turbin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu meningkat dari 0,1040 menjadi 0,1458.



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Coefficient of Power antara Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi diameter $d/D = 0.1 - 1.0$.

Dari hasil-hasil tersebut juga menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu dengan variasi ukuran diameter antara d/D 0.1 sampai dengan 1.0 efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dari sebelum ditambahkan silinder pengganggu di kedua bilangan Reynolds, dibuktikan dengan seluruh nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang lebih besar dari 1. Hal ini dikarenakan penambahan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada *returning* blade sehingga selisih gaya drag antara *advancing* blade dan *returning* blade semakin besar dan menyebabkan performa turbin meningkat.

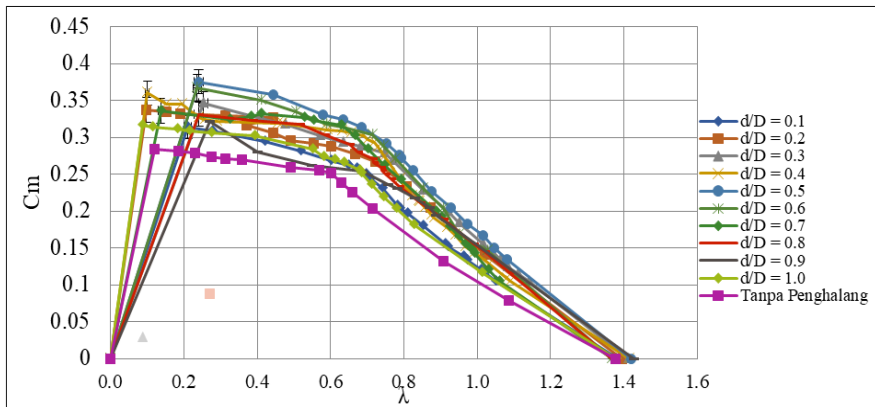
Dari hasil-hasil tersebut juga didapatkan bahwa ukuran diameter silinder pengganggu yang paling optimum dalam meningkatkan CoP_{max} turbin Savonius adalah pada $d/D = 0.5$. Hal ini dikarenakan ukuran diameter silinder pengganggu tersebut paling efektif menurunkan gaya drag pada *returning* blade. Jika ukuran diameter silinder pengganggu terlalu kecil/besar maka

penurunan gaya drag pada *returning blade* menjadi kurang efektif.

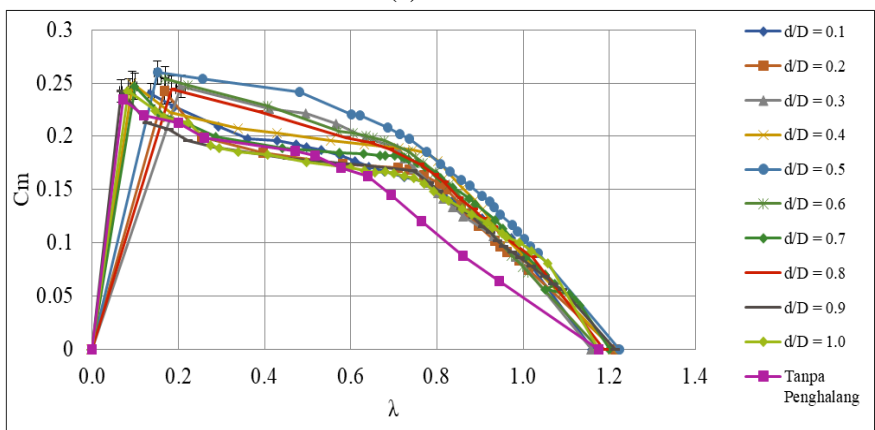
4.3.3. Analisa Nilai Coefficient of Moment (C_M) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.

Analisa nilai coefficient of moment terhadap TSR ini dilakukan dengan bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dan variasi ukuran silinder pengganggu d/D antara 0,1 sampai 1,0. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.6 (a) dan (b) dalam bentuk grafik.

Dari gambar 4.6 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa grafik coefficient of moment terhadap tip speed ratio (TSR) memiliki trendline yang cenderung turun hingga mencapai tip speed ratio (TSR) maksimum pada nilai coefficient of moment minimum. Torsi dinamis maksimum didapat saat turbin angin Savonius diberikan pembebanan maksimum, akibatnya disaat tersebut didapatkan nilai coefficient of moment maksimum. Berikut merupakan data coefficient of moment maksimum dari setiap variasi d/D pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ yang bisa dilihat pada tabel 4.2.



(a)



(b)

Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (C_m) dan tanpa silinder pengganggu (C_{m0}) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$; dan $1,0$ pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$

Tabel 4. 3 Tabel perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

d/D	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				% kenaikan C_M	
	Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$		Re = $13,6 \times 10^4$		Re = $9,7 \times 10^4$	Re = $13,6 \times 10^4$
	C_{M0} max	λ	C_{M0} max	λ	C_{Mmax}	λ	C_{Mmax}	λ		
0,1	0,284	0,12	0,234	0,07	0,314	0,21	0,240	0,16	10,56%	2,56%
0,2					0,338	0,10	0,242	0,17	19,01%	3,42%
0,3					0,346	0,25	0,247	0,21	21,83%	5,56%
0,4					0,360	0,10	0,250	0,16	26,76%	6,84%
0,5					0,375	0,24	0,259	0,15	32,04%	10,68%
0,6					0,367	0,24	0,254	0,17	29,23%	8,55%
0,7					0,336	0,14	0,247	0,10	18,31%	5,56%
0,8					0,331	0,24	0,244	0,18	16,55%	4,27%
0,9					0,322	0,27	0,242	0,07	13,38%	3,85%
1,0					0,317	0,09	0,242	0,10	11,62%	3,42%

Tabel 4.3 menunjukkan data nilai coefficient of moment maksimum di setiap variasi d/D pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Dapat dilihat untuk seluruh variasi d/D pada kedua bilangan Reynolds, nilai C_M maksimumnya lebih tinggi daripada nilai C_{M0} maksimum sebelum diberikan silinder pengganggu sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif meningkatkan nilai coefficient of moment maksimum turbin angin Savonius. Dapat dilihat juga pada tabel diatas, untuk $Re = 9,7 \times 10^4$ nilai C_M maksimum tertinggi terdapat pada d/D = 0,5 yaitu sebesar 0,375 di $TSR = 0,24$ dengan kenaikan sebesar 32,04% dari sebelum diberi penghalang. Lalu untuk $Re = 13,6 \times 10^4$ nilai C_M maksimum tertinggi terdapat pada d/D = 0,5 yaitu sebesar 0,259 di $TSR = 0,15$ dengan kenaikan sebesar 10,68% dari sebelum diberi pengganggu.

Tabel 4. 4 Tabel *Uncertainty Coefficient of Moment*

d/D	Bilangan Reynolds					
	97000			136000		
	CMmax	Uncertainty	Range	CMmax	Uncertainty	Range
0.1	0.314	4.52	0.299 - 0.328	0.24	4.26	0.229 - 0.250
0.2	0.338	4.48	0.323 - 0.353	0.242	4.26	0.232 - 0.252
0.3	0.346	4.44	0.331 - 0.361	0.247	4.25	0.236 - 0.258
0.4	0.36	4.44	0.344 - 0.376	0.25	4.26	0.239 - 0.261
0.5	0.375	4.39	0.358 - 0.391	0.259	4.23	0.248 - 0.269
0.6	0.367	4.41	0.351 - 0.383	0.254	4.24	0.243 - 0.265
0.7	0.336	4.47	0.321 - 0.351	0.247	4.26	0.236 - 0.258
0.8	0.331	4.45	0.316 - 0.346	0.244	4.25	0.234 - 0.254
0.9	0.322	4.5	0.308 - 0.336	0.242	4.28	0.232 - 0.252
1	0.317	4.53	0.303 - 0.331	0.242	4.27	0.232 - 0.252

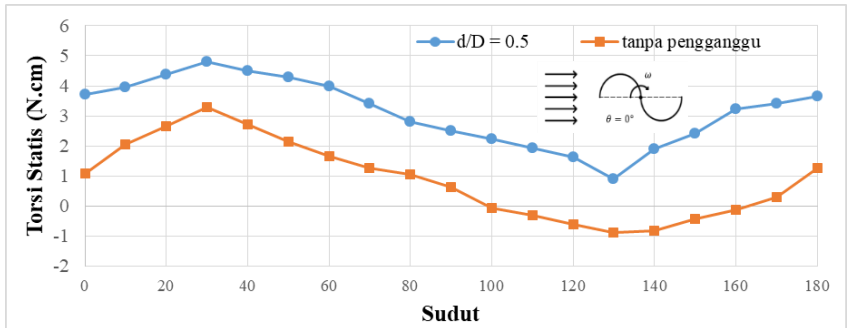
Pada penelitian ini, perhitungan C_M memiliki nilai *uncertainty* seperti pada tabel 4.2 diatas. Nilai *uncertainty* merupakan tolak ukur ketidakpastian yang artinya setiap nilai C_M yang diukur pada penelitian ini memiliki *range* seperti ditunjukkan pada tabel 4.6 diatas. *Range* tersebut adalah batas toleransi yang didapatkan sesuai dengan ketelitian alat ukur. Hal ini menunjukkan bahwa pada batas toleransi tersebut nilai C_{Mmax} dianggap sama. Batas toleransi pada C_M ini juga dapat dilihat pada gambar 4.6 diatas dimana secara visualiasi grafik pada beberapa variasi d/D saling berdekatan hingga masuk kedalam batas toleransi tersebut. Oleh karena itu, ukuran yang bersinggungan dapat diambil pada salah satu variasi d/D. Adapun variasi d/D setelah dilakukan eliminasi yaitu 0,2; 0,5; dan 0,7 untuk seluruh variasi bilangan Reynolds.

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

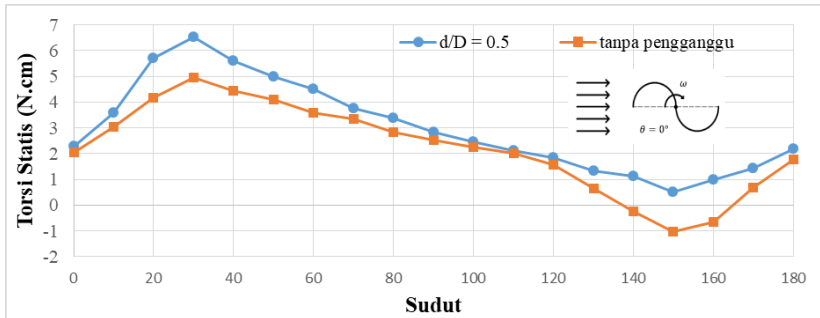
Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi statis terhadap fungsi sudut turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di $S/D = 1.6$ dan diameter $d/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Data hasil pengukuran ini akan dibandingkan dengan torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu yang dapat dilihat pada gambar 4.7 (a) dan (b) dalam bentuk grafik.

Pada gambar 4.7 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa kedua grafik membentuk grafik sinusoidal. Dari gambar 4.7 (a) dapat dilihat penambahan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 3,28 N.cm menjadi 4,79 N.cm pada sudut 30° serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum yaitu dari -0,9 N.cm menjadi 0,91 N.cm pada sudut 130° . Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ seperti pada gambar 4.7 (b) pemberian silinder pengganggu juga efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 4,96 N.cm menjadi 6,52 N.cm pada sudut 30° serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum dari -1,04 N.cm menjadi 0,52 N.cm pada sudut 150° .

Dari hasil-hasil tersebut dapat dikatakan bahwa penambahan silinder pengganggu dengan diameter $d/D = 0,5$ di $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ efektif dalam meningkatkan nilai torsi statis maksimum dan minimum. Torsi statis minimum di kedua bilangan Reynolds sudah tidak memiliki nilai negatif yang artinya setelah diberikan silinder pengganggu, turbin angin Savonius memiliki kemampuan self starting di setiap sudut.



(a)



(b)

Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (T_s) dan tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) terhadap Fungsi Sudut (θ) dengan $d/D = 0,5$; $S/D = 1,6$; pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$.

4.4 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Penambahan Silinder Pengganggu

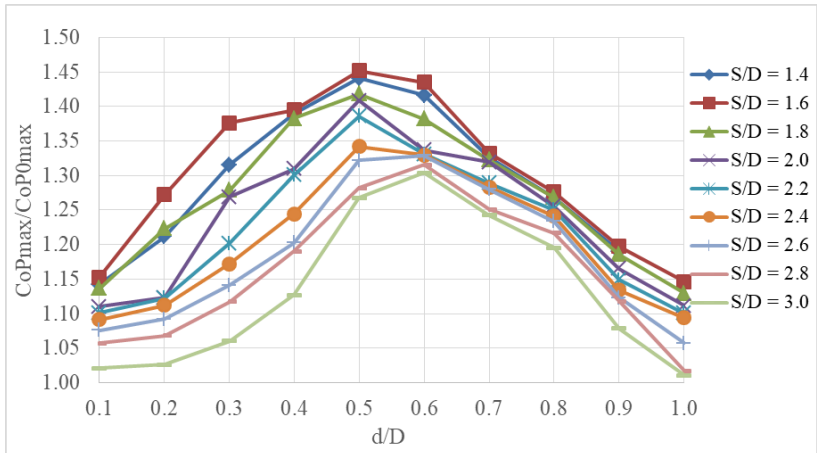
Pada penelitian ini dilakukan oleh delapan mahasiswa dengan variasi S/D yang berbeda – beda yaitu $S/D = 1,6$ yang dilakukan oleh Muhammad Rizky Ramadhan (2020), $S/D = 1,8$ oleh Markus Sarsanto (2020), $S/D = 2,0$ oleh Muhammad Ghiyats Humam (2020), $S/D = 2,2$ oleh Lazuardhi (2020), $S/D = 2,4$ oleh

Prabasworo (2020), $S/D = 2,6$ oleh Ardy Makarim (2020), $S/D = 2,8$ oleh Hilda Malil (2020) dan $S/D = 3,0$ Asri Melati (2020). Sehingga akan dilakukan analisa performa turbin angin Savonius pada variasi S/D tersebut. Data yang akan dianalisa meliputi perbandingan nilai (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi d/D di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ dan perbandingan (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi S/D di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.

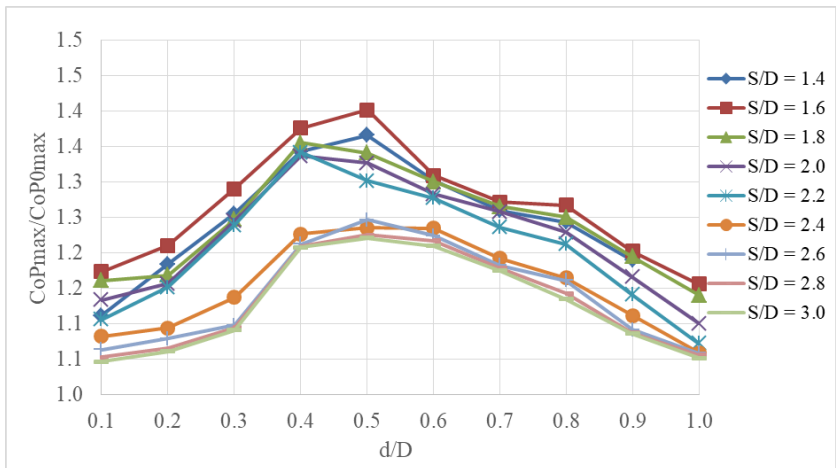
4.4.1. Analisa Perbandingan Nilai Coefficient of Power maximum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi d/D di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.

Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai CoP_{max} antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap d/D pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.8 (a) dan (b) dibawah dalam bentuk grafik.

Dapat dilihat dari kedua gambar dibawah bahwa seluruh grafik pada kedua bilangan Reynolds menunjukkan trendline dimana nilai CoP_{max}/CoP_{0max} akan terus naik kemudian turun seiring bertambahnya diameter silinder pengganggu sehingga puncak dari trendline tersebut adalah nilai tertingginya. Hal ini membuktikan bahwa variasi ukuran diameter silinder pengganggu mempengaruhi performa dari turbin Savonius. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ didapatkan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} tertinggi pada $d/D = 0,5$ di jarak $S/D = 1,6$. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada penelitian ini turbin angin Savonius memiliki performa paling baik pada saat penambahan silinder pengganggu di ukuran diameter $d/D = 0,5$ di jarak $S/D = 1,6$.



(a)



(b)

Gambar 4. 8 Grafik perbandingan Coefficient of Power antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi d/D di $S/D = 1,6$ s.d $3,0$ pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$

Dari hasil-hasil tersebut juga menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu dengan variasi ukuran diameter antara d/D 0.1 sampai dengan 1.0 efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius dari sebelum ditambahkan silinder pengganggu di kedua bilangan Reynolds, dibuktikan dengan seluruh nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang lebih besar dari 1. Hal ini dikarenakan penambahan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar dan menyebabkan performa turbin meningkat.

Hasil tersebut masih sesuai dengan hipotesa bahwasannya ukuran diameter silinder pengganggu yang terlalu besar/kecil akan memperkecil pengaruh dari penambahan pengganggu tersebut.

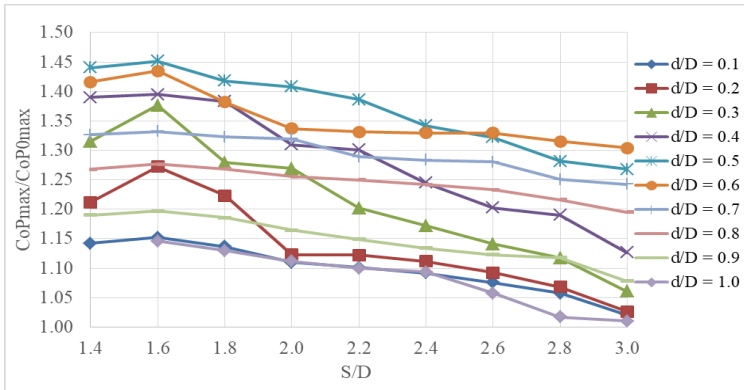
4.4.1 Analisa Perbandingan Nilai CoP_{max} antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) Terhadap Variasi S/D di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$.

Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai CoP_{max} antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi S/D di $d/D = 0,1$ s.d $1,0$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$. Hasil data tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9 (a) dan (b) diatas.

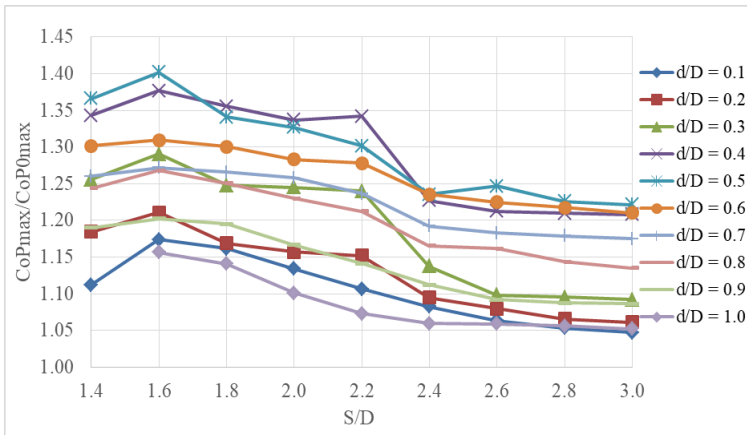
Dari gambar 4.9 (a) dan (b) menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu efektif meningkatkan CoP_{max} turbin Savonius di seluruh variasi S/D dan di kedua bilangan Reynolds, dibuktikan dengan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang lebih

besar dari 1. Hal ini dikarenakan penambahan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada *returning blade* sehingga selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin besar dan menyebabkan performa turbin meningkat. Penurunan gaya drag tersebut disebabkan karena tekanan di daerah depan *returning blade* mengalami penurunan akibat daerah *wake* yang dihasilkan oleh silinder pengganggu sehingga *pressure drag* pada *returning blade* menurun dan menyebabkan gaya drag pada *returning blade* juga menurun. Penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu akan memberikan gangguan terhadap *boundary layer returning blade*. Sehingga mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen. Oleh karena itu aliran lebih dapat menahan *adverse pressure gradient* dan gaya gesek yang terjadi sehingga titik separasi mundur ke belakang dan daerah *wake* di belakang *returning blade* menyempit. Daerah *wake* yang semakin menyempit ini mengakibatkan tekanan di belakang *returning blade* meningkat dan *pressure drag* menurun mengakibatkan gaya drag pada *returning blade* menurun.

Pada grafik tersebut juga menunjukkan bahwa semua grafik memiliki *trendline* yang sama dimana nilai CoP_{max} akan naik dari S/D 1.4 ke 1.6 kemudian turun sampai dengan S/D 3.0. hal ini menunjukkan bahwa jarak S/D 1.6 adalah yang paling optimum dalam menurunkan gaya drag pada *returning blade* turbin Savonius yang artinya pada jarak S/D 1.6 *shear layer* dari silinder pengganggu akan sangat efektif mengganggu *boundary layer* dari *returning blade*. Apabila jarak silinder pengganggu terlalu jauh/dekat maka *shear layer* dari silinder pengganggu sudah semakin tidak efektif dalam mengganggu *boundary layer returning blade*.



(a)



(b)

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

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan dari penelitian mengenai pengaruh penambahan silinder pengganggu didepan returning blade dengan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0$; $S/D = 1,6$ dan $y/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan silinder pengganggu didepan returning blade turbin Savonius dengan jarak $S/D = 1,6$ pada seluruh variasi d/D efektif meningkatkan nilai coefficient of power maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ nilai CoP maksimum tertinggi terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 44,74%. Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ nilai CoP maksimum tertinggi juga terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 40,38%.
2. Penambahan silinder pengganggu didepan returning blade turbin Savonius dengan jarak $S/D = 1,6$ pada seluruh variasi d/D efektif meningkatkan nilai coefficient of moment maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds. Pada $Re = 9,7 \times 10^4$ nilai CM maksimum tertinggi terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 32,04%. Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ nilai CM maksimum tertinggi juga terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 10,68%.
3. Penambahan silinder pengganggu didepan returning blade turbin Savonius pada $d/D = 0,5$ dan $S/D = 1,6$ efektif menaikkan torsi statis disemua bilangan Reynolds sehingga turbin angin Savonius memiliki kemampuan self starting di setiap sudut.

4. Ukuran diameter silinder pengganggu yang paling optimum dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius yaitu pada $d/D = 0,5$ dibuktikan dengan peningkatan nilai CoP maksimum, CM maksimum dan torsi statis.
5. Turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini memiliki karakteristik bahwa performa yang dihasilkan lebih baik pada saat $Re = 9,7 \times 10^4$ dibandingkan dengan $Re = 13,6 \times 10^4$.
6. Setelah dilakukan diskusi hasil penelitian yang dilakukan oleh delapan mahasiswa dengan variasi S/D yang berbeda di setiap mahasiswa yaitu antara 1,6 sampai dengan 3,0 maka didapatkan S/D paling optimum terletak pada jarak 1,6 dengan d/D paling optimum yaitu 0,5.

5.2. Saran

Berikut merupakan saran-saran yang dapat digunakan agar penelitian selanjutnya dapat lebih baik lagi:

1. Menggunakan neraca pegas yang memiliki ketelitian yang lebih kecil agar pembacaan beban yang kecil lebih akurat.
2. Melakukan pelumasan pada bearing secara berkala ketika putaran dari turbin dirasa terlalu kecil.
3. Melakukan pengecekan kecepatan angin menggunakan anemometer secara berkala untuk mencegah agar kecepatan angin tidak berubah.

DAFTAR PUSTAKA

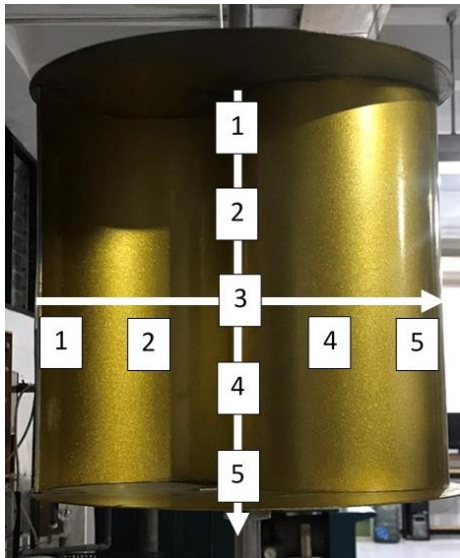
- [1]. Arinaldo, D., Adiatama, J.C. & Simamora, P., 2018. "Indonesia Clean Energy Outlook. Reviewing 2018, Outlooking 2019". Jakarta: Institute for Essential Services Reform
- [2]. Badan Pusat Statistik (BPT). 2018. "Proyeksi Penduduk Indonesia 2015-2045 Hasil SUPAS 2015". Jakarta.
- [3]. Mahmoud, N.H., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2012, "An experimental study on improvement of Savonius rotor performance". Mesir: Alexandria university
- [4]. Tsutsui, T. & Igarashi, T., 2002, "Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream". Wind Engineering and Industrial Aerodynamic, Issue 90, pp. 527-541.
- [5]. Syafardinah, S.G.P., 2018."Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [6]. Daryanto, Y., 2007."Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu". Balai PPTAGG-UPT-LAGG
- [7]. Mittal, Neeraj. 2001."Investigation of Performance Characteristics of a Novel VAWT". Thesis. UK: Departement of Mechanical Engineering University of Strathclyde
- [8]. Fernando, D. 2017."Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Tipe Savonius". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

- [9]. Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. "Introduction to Fluid Mechanics". 8th penyunt. USA: John Willey & Sons Inc..
- [10]. Al-Shemmeri, T., 2011."Wind Turbin: First Edition. ISBN 978-87-7681-692-6".
- [11]. Rustam, J.A. 2018."Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius". Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

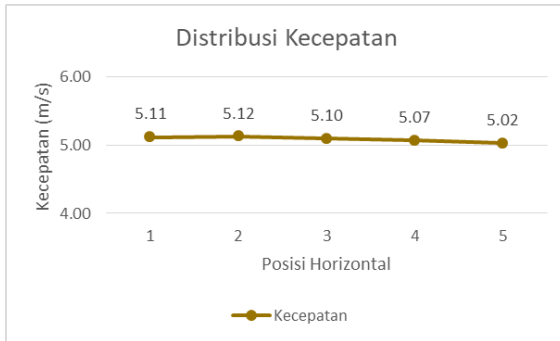
LAMPIRAN

A. UNIFORMITY FLOW TEST

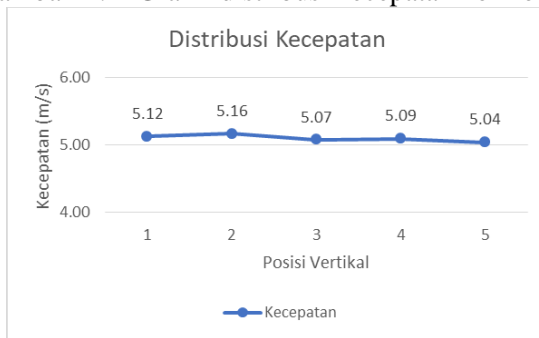
Uji uniformity test bertujuan untuk melihat keseragaman aliran pada titik-titik tertentu, keseragaman aliran dibutuhkan dalam penelitian ini agar didapatkan hasil yang ideal. Dalam penelitian ini digunakan honeycomb yang berfungsi untuk menyeragamkan aliran karena penelitian dilakukan pada kondisi terbuka. Uniformity test aliran udara dilakukan pada sisi upstream turbin angin Savonius dengan melakukan pengukuran kecepatan aliran fluida udara pada 5 titik vertical dan 5 titik horizontal. Berikut data hasil pengukuran.



Gambar A. 1 Posisi titik pengambilan uniformity test



Gambar A. 2 Grafik distribusi kecepatan horizontal



Gambar A. 3 Grafik distribusi kecepatan vertical

Tabel A. 1 Data keseragaman kecepatan angin

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

B. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Tabel B. 1 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	426	44.588	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.378	0	0	0
28,5	5	336.1	35.178	6	140	0,0125	0,092	1,17	1.087	0.01643	0.08592	0.07904
28,5	5	280.38	29.346	15.3	240	0,0125	0,092	1,17	0.907	0.02755	0.12019	0.13255
28,5	5	220.74	23.104	24.6	370	0,0125	0,092	1,17	0.714	0.04235	0.14546	0.20375
28,5	5	203.98	21.350	27.7	410	0,0125	0,092	1,17	0.660	0.04688	0.14877	0.22551
28,5	5	194.6	20.368	30.8	435	0,0125	0,092	1,17	0.629	0.04957	0.15006	0.23843
28,5	5	186.4	19.510	33.9	460	0,0125	0,092	1,17	0.603	0.05225	0.15153	0.25135
28,5	5	175.86	18.407	37	470	0,0125	0,092	1,17	0.569	0.0531	0.14527	0.25542
28,5	5	151.96	15.905	40.1	480	0,0125	0,092	1,17	0.491	0.05394	0.12753	0.25949
28,5	5	110.84	11.601	43.2	500	0,0125	0,092	1,17	0.358	0.05602	0.0966	0.26946
28,5	5	96.58	10.109	49.4	510	0,0125	0,092	1,17	0.312	0.05648	0.08487	0.2717
28,5	5	85.06	8.903	55.6	520	0,0125	0,092	1,17	0.275	0.05695	0.07536	0.27394
28,5	5	71.4	7.473	68	540	0,0125	0,092	1,17	0.231	0.05788	0.06429	0.27843
28,5	5	57.5	6.018	83.5	560	0,0125	0,092	1,17	0.186	0.05843	0.05227	0.28108
28,5	5	37.36	3.910	99	580	0,0125	0,092	1,17	0.121	0.05898	0.03428	0.28373
28,5	5	0	0.000	130	650	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.05273	0	0

Tabel B. 2 Data turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu
pada bilangan Reynolds $13,6 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	508.4	53.213	0	0	0,0125	0.092	1,17	1.174	0	0	0
28,5	7	409.2	42.830	6	220	0,0125	0.092	1,17	0.945	0.02624	0.06088	0.06441
28,5	7	372.66	39.005	18.4	310	0,0125	0.092	1,17	0.861	0.03576	0.07555	0.08776
28,5	7	330.54	34.597	30.8	430	0,0125	0.092	1,17	0.764	0.04895	0.09174	0.12014
28,5	7	300.26	31.427	37	520	0,0125	0.092	1,17	0.694	0.05923	0.10083	0.14536
28,5	7	277.08	29.001	40.1	580	0,0125	0.092	1,17	0.640	0.06621	0.10401	0.16249
28,5	7	249.9	26.156	43.2	610	0,0125	0.092	1,17	0.577	0.0695	0.09848	0.17058
28,5	7	223.6	23.403	46.3	650	0,0125	0.092	1,17	0.517	0.07403	0.09385	0.18169
28,5	7	203.46	21.295	49.4	670	0,0125	0.092	1,17	0.470	0.0761	0.08779	0.18678
28,5	7	112.74	11.800	58.7	720	0,0125	0.092	1,17	0.260	0.08109	0.05184	0.19903
28,5	7	86.14	9.016	74.2	780	0,0125	0.092	1,17	0.199	0.08655	0.04227	0.21242
28,5	7	51.8	5.422	89.7	820	0,0125	0.092	1,17	0.120	0.08955	0.0263	0.21979
28,5	7	30.96	3.240	120.7	900	0,0125	0.092	1,17	0.072	0.09556	0.01677	0.23454
28,5	7	0	0.000	151.7	950	0,0125	0.092	1,17	0.000	0.09789	0	0

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

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

C. Data Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	437	45.739	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.386	0	0	0
28,5	5	331.48	34.695	6	180	0,0125	0,092	1,17	1.051	0.02134	0.11004	0.10467
28,5	5	318.5	33.336	9.1	210	0,0125	0,092	1,17	1.010	0.02464	0.12207	0.12085
28,5	5	306.68	32.099	12.2	235	0,0125	0,092	1,17	0.973	0.02732	0.13036	0.13403
28,5	5	303.7	31.787	15.3	245	0,0125	0,092	1,17	0.963	0.02817	0.13309	0.13818
28,5	5	290.14	30.368	18.4	270	0,0125	0,092	1,17	0.920	0.03085	0.13927	0.15135
28,5	5	288.04	30.148	21.5	280	0,0125	0,092	1,17	0.913	0.0317	0.14205	0.1555
28,5	5	268.84	28.139	24.6	325	0,0125	0,092	1,17	0.853	0.03684	0.15407	0.18071
28,5	5	255.48	26.740	27.7	355	0,0125	0,092	1,17	0.810	0.04014	0.15953	0.19689
28,5	5	249.32	26.095	30.8	370	0,0125	0,092	1,17	0.791	0.04159	0.16134	0.20405
28,5	5	246.72	25.823	33.9	380	0,0125	0,092	1,17	0.782	0.04244	0.16291	0.2082
28,5	5	234.02	24.494	37	420	0,0125	0,092	1,17	0.742	0.04697	0.171	0.2304
28,5	5	224.02	23.447	40.1	445	0,0125	0,092	1,17	0.710	0.04965	0.17305	0.24357
28,5	5	219.6	22.985	43.2	460	0,0125	0,092	1,17	0.696	0.05111	0.17462	0.25073
28,5	5	212.06	22.196	46.3	475	0,0125	0,092	1,17	0.673	0.05257	0.17344	0.25789
28,5	5	204.56	21.411	49.4	485	0,0125	0,092	1,17	0.649	0.05342	0.17	0.26204
28,5	5	190	19.887	52.5	500	0,0125	0,092	1,17	0.603	0.05487	0.16221	0.2692
28,5	5	164	17.165	61.8	530	0,0125	0,092	1,17	0.520	0.05741	0.14649	0.28165
28,5	5	132.76	13.896	71.1	560	0,0125	0,092	1,17	0.421	0.05995	0.12383	0.29411
28,5	5	88.12	9.223	86.6	600	0,0125	0,092	1,17	0.279	0.06296	0.08631	0.30884
28,5	5	66.46	6.956	117.6	640	0,0125	0,092	1,17	0.211	0.06406	0.06624	0.31426
28,5	5	0	0.000	148.6	670	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.06394	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	440	46.053	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.395	0	0	0
28,5	5	322.1	33.713	6	240	0,0125	0,092	1,17	1.022	0.02869	0.14379	0.14077
28,5	5	275	28.783	9.1	350	0,0125	0,092	1,17	0.872	0.0418	0.17885	0.20507
28,5	5	255	26.690	12.2	400	0,0125	0,092	1,17	0.809	0.04755	0.18866	0.23329
28,5	5	228	23.864	15.3	460	0,0125	0,092	1,17	0.723	0.05453	0.19344	0.26752
28,5	5	210	21.980	18.4	480	0,0125	0,092	1,17	0.666	0.0566	0.18493	0.27768
28,5	5	190	19.887	21.5	500	0,0125	0,092	1,17	0.603	0.05868	0.17345	0.28785
28,5	5	175	18.317	24.6	510	0,0125	0,092	1,17	0.555	0.05952	0.16206	0.292
28,5	5	155	16.223	27.7	520	0,0125	0,092	1,17	0.492	0.06037	0.14558	0.29615
28,5	5	140	14.653	30.8	540	0,0125	0,092	1,17	0.444	0.06244	0.136	0.30632
28,5	5	117	12.246	33.9	560	0,0125	0,092	1,17	0.371	0.06451	0.11743	0.31648
28,5	5	100	10.467	37	580	0,0125	0,092	1,17	0.317	0.06659	0.10359	0.32665
28,5	5	99	10.362	52.5	600	0,0125	0,092	1,17	0.314	0.06714	0.10341	0.32936
28,5	5	60	6.280	68	620	0,0125	0,092	1,17	0.190	0.06769	0.06319	0.33206
28,5	5	48	5.024	83.5	640	0,0125	0,092	1,17	0.152	0.06824	0.05096	0.33477
28,5	5	31	3.245	99	660	0,0125	0,092	1,17	0.098	0.06879	0.03318	0.33748
28,5	5	0	0.000	114.5	700	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.0718	0	0

Tabel C. 3 Data turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D 0,3$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	445	46.577	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.411	0	0	0
28,5	5	360	37.680	6	180	0,0125	0,092	1,17	1.142	0.02134	0.1195	0.10467
28,5	5	350	36.633	9.1	200	0,0125	0,092	1,17	1.110	0.02341	0.12747	0.11484
28,5	5	342	35.796	12.2	220	0,0125	0,092	1,17	1.085	0.02548	0.13558	0.12501
28,5	5	335	35.063	15.3	240	0,0125	0,092	1,17	1.062	0.02755	0.14361	0.13517
28,5	5	328	34.331	18.4	260	0,0125	0,092	1,17	1.040	0.02963	0.15118	0.14534
28,5	5	320	33.493	21.5	280	0,0125	0,092	1,17	1.015	0.0317	0.15781	0.1555
28,5	5	300	31.400	24.6	330	0,0125	0,092	1,17	0.951	0.03745	0.17479	0.184
28,5	5	290	30.353	27.7	360	0,0125	0,092	1,17	0.920	0.04075	0.18385	0.200
28,5	5	269	28.155	30.8	410	0,0125	0,092	1,17	0.853	0.0465	0.19461	0.22811
28,5	5	243	25.434	33.9	480	0,0125	0,092	1,17	0.771	0.0547	0.20681	0.268
28,5	5	236.06	24.708	37	500	0,0125	0,092	1,17	0.749	0.05678	0.20851	0.279
28,5	5	215	22.503	40.1	520	0,0125	0,092	1,17	0.682	0.05885	0.19684	0.289
28,5	5	200	20.933	43.2	530	0,0125	0,092	1,17	0.634	0.05969	0.18574	0.293
28,5	5	180	18.840	46.3	550	0,0125	0,092	1,17	0.571	0.06177	0.17297	0.303
28,5	5	150	15.700	52.5	580	0,0125	0,092	1,17	0.476	0.06468	0.15095	0.317
28,5	5	130	13.607	58.7	600	0,0125	0,092	1,17	0.412	0.06638	0.13425	0.326
28,5	5	80	8.373	74.2	650	0,0125	0,092	1,17	0.254	0.07061	0.08788	0.346
28,5	5	0	0.000	105.2	700	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.07294	0	0.000

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	446	46.681	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.414	0	0	0
28,5	5	344.24	36.030	6	180	0,0125	0,092	1,17	1.092	0.02134	0.11427	0.10467
28,5	5	340.92	35.683	9.1	190	0,0125	0,092	1,17	1.081	0.02218	0.11766	0.10882
28,5	5	325.96	34.117	12.2	225	0,0125	0,092	1,17	1.034	0.02609	0.13233	0.12801
28,5	5	313.24	32.786	15.3	255	0,0125	0,092	1,17	0.993	0.02939	0.14324	0.1442
28,5	5	305.04	31.928	18.4	270	0,0125	0,092	1,17	0.967	0.03085	0.14642	0.15135
28,5	5	296.48	31.032	21.5	300	0,0125	0,092	1,17	0.940	0.03415	0.15753	0.16754
28,5	5	289.56	30.307	24.6	320	0,0125	0,092	1,17	0.918	0.03622	0.16319	0.1777
28,5	5	278.64	29.164	27.7	345	0,0125	0,092	1,17	0.884	0.03891	0.16867	0.19088
28,5	5	276.36	28.926	30.8	355	0,0125	0,092	1,17	0.876	0.03976	0.17093	0.19503
28,5	5	270.72	28.335	33.9	375	0,0125	0,092	1,17	0.859	0.04183	0.17617	0.20519
28,5	5	266.14	27.856	37	390	0,0125	0,092	1,17	0.844	0.04329	0.17923	0.21235
28,5	5	265.3	27.768	40.1	395	0,0125	0,092	1,17	0.841	0.04352	0.17963	0.2135
28,5	5	259.76	27.188	43.2	410	0,0125	0,092	1,17	0.824	0.04498	0.18178	0.22065
28,5	5	254.58	26.646	46.3	430	0,0125	0,092	1,17	0.807	0.04705	0.18636	0.23082
28,5	5	248.96	26.058	49.4	455	0,0125	0,092	1,17	0.790	0.04974	0.19265	0.24399
28,5	5	240.6	25.183	52.5	490	0,0125	0,092	1,17	0.763	0.05365	0.20082	0.26318
28,5	5	235.92	24.693	55.6	510	0,0125	0,092	1,17	0.748	0.05572	0.20452	0.27335
28,5	5	229.92	24.065	58.7	535	0,0125	0,092	1,17	0.729	0.05841	0.20893	0.28653
28,5	5	227	23.759	61.8	550	0,0125	0,092	1,17	0.720	0.05987	0.21143	0.29368
28,5	5	221.64	23.198	64.9	560	0,0125	0,092	1,17	0.703	0.06071	0.20935	0.29783
28,5	5	217.52	22.767	68	570	0,0125	0,092	1,17	0.690	0.06156	0.20832	0.30199
28,5	5	207.18	21.685	71.1	580	0,0125	0,092	1,17	0.657	0.0624	0.20115	0.30614
28,5	5	199.28	20.858	77.3	590	0,0125	0,092	1,17	0.632	0.06287	0.19492	0.30842
28,5	5	186.96	19.568	83.5	600	0,0125	0,092	1,17	0.593	0.06334	0.18423	0.31071
28,5	5	147.98	15.489	89.7	620	0,0125	0,092	1,17	0.469	0.06503	0.14971	0.31901
28,5	5	143.82	15.053	99	630	0,0125	0,092	1,17	0.456	0.06511	0.1457	0.31943
28,5	5	91.66	9.594	114.5	650	0,0125	0,092	1,17	0.291	0.06567	0.09364	0.32214
28,5	5	81.68	8.549	130	670	0,0125	0,092	1,17	0.259	0.06622	0.08415	0.32485
28,5	5	75.82	7.936	145.5	690	0,0125	0,092	1,17	0.240	0.06677	0.07876	0.32755
28,5	5	61.44	6.431	175.6	750	0,0125	0,092	1,17	0.195	0.07044	0.06733	0.34554
28,5	5	48	5.024	205.7	780	0,0125	0,092	1,17	0.152	0.07042	0.05259	0.34548
28,5	5	31.76	3.324	221.2	820	0,0125	0,092	1,17	0.101	0.07343	0.03628	0.36022
28,5	5	0	0.000	251.3	900	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.07955	0	0

Tabel C. 5 Data turbin angin Savonius dengan silinder
 pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds
 $9,7 \times 10^4$

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	448	46.891	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.421	0	0	0
28,5	5	341	35.691	6	230	0,0125	0,092	1,17	1.081	0.02747	0.14573	0.13475
28,5	5	330	34.540	9.1	260	0,0125	0,092	1,17	1.047	0.03077	0.15796	0.15093
28,5	5	320	33.493	12.2	290	0,0125	0,092	1,17	1.015	0.03407	0.1696	0.16711
28,5	5	307	32.133	15.3	320	0,0125	0,092	1,17	0.974	0.03736	0.17846	0.1833
28,5	5	293	30.667	18.4	360	0,0125	0,092	1,17	0.929	0.04189	0.19095	0.20549
28,5	5	276	28.888	21.5	400	0,0125	0,092	1,17	0.875	0.04641	0.1993	0.22769
28,5	5	260	27.213	24.6	450	0,0125	0,092	1,17	0.825	0.05216	0.21101	0.25591
28,5	5	250	26.167	27.7	480	0,0125	0,092	1,17	0.793	0.05546	0.21572	0.27209
28,5	5	248	25.957	30.8	490	0,0125	0,092	1,17	0.787	0.05631	0.21726	0.27624
28,5	5	237.2	24.827	33.9	520	0,0125	0,092	1,17	0.752	0.05961	0.21998	0.29242
28,5	5	216	22.608	37	560	0,0125	0,092	1,17	0.685	0.06413	0.21552	0.31462
28,5	5	200	20.933	40.1	580	0,0125	0,092	1,17	0.634	0.06621	0.206	0.32479
28,5	5	183	19.154	49.4	600	0,0125	0,092	1,17	0.580	0.06752	0.19223	0.33122
28,5	5	140	14.653	64.9	660	0,0125	0,092	1,17	0.444	0.07297	0.15895	0.35799
28,5	5	76	7.955	95.9	720	0,0125	0,092	1,17	0.241	0.07653	0.09049	0.37544
28,5	5	0	0.000	126.9	800	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.08254	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	431	45.111	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.367	0	0	0
28,5	5	324	33.912	6	250	0,0125	0,092	1,17	1.028	0.02992	0.15082	0.14678
28,5	5	300	31.400	9.1	290	0,0125	0,092	1,17	0.951	0.03445	0.16077	0.16898
28,5	5	286	29.935	12.2	350	0,0125	0,092	1,17	0.907	0.04142	0.18431	0.20321
28,5	5	269	28.155	15.3	400	0,0125	0,092	1,17	0.853	0.04717	0.19743	0.23142
28,5	5	245	25.643	18.4	470	0,0125	0,092	1,17	0.777	0.05538	0.21108	0.27167
28,5	5	235	24.597	21.5	500	0,0125	0,092	1,17	0.745	0.05868	0.21453	0.28785
28,5	5	225,5	23.602	24.6	530	0,0125	0,092	1,17	0.715	0.06197	0.21743	0.30403
28,5	5	200	20.933	27.7	550	0,0125	0,092	1,17	0.634	0.06405	0.19929	0.3142
28,5	5	186	19.468	30.8	560	0,0125	0,092	1,17	0.590	0.06489	0.18779	0.31835
28,5	5	160	16.747	33.9	590	0,0125	0,092	1,17	0.507	0.06819	0.16975	0.33453
28,5	5	130	13.607	37	620	0,0125	0,092	1,17	0.412	0.07149	0.14459	0.35071
28,5	5	74.5	7.798	40.1	650	0,0125	0,092	1,17	0.236	0.07479	0.08669	0.36689
28,5	5	0	0.000	55.6	750	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.08515	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	432	45.216	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.370	0	0	0
28,5	5	334.46	35.007	6	180	0,0125	0,092	1,17	1.061	0.02134	0.11103	0.10467
28,5	5	325.28	34.046	9.1	210	0,0125	0,092	1,17	1.032	0.02464	0.12467	0.12085
28,5	5	313.34	32.796	12.2	250	0,0125	0,092	1,17	0.994	0.02916	0.14215	0.14305
28,5	5	311.08	32.560	15.3	260	0,0125	0,092	1,17	0.987	0.03001	0.14522	0.1472
28,5	5	308.86	32.327	18.4	270	0,0125	0,092	1,17	0.980	0.03085	0.14825	0.15135
28,5	5	305.64	31.990	21.5	280	0,0125	0,092	1,17	0.969	0.0317	0.15073	0.1555
28,5	5	299.86	31.385	24.6	300	0,0125	0,092	1,17	0.951	0.03377	0.15755	0.16567
28,5	5	291.62	30.523	27.7	325	0,0125	0,092	1,17	0.925	0.03646	0.1654	0.17885
28,5	5	285.08	29.838	30.8	350	0,0125	0,092	1,17	0.904	0.03914	0.17361	0.19202
28,5	5	279.92	29.298	33.9	365	0,0125	0,092	1,17	0.888	0.0406	0.17682	0.19918
28,5	5	250.24	26.192	37	440	0,0125	0,092	1,17	0.794	0.04942	0.1924	0.24243
28,5	5	236.04	24.706	40.1	475	0,0125	0,092	1,17	0.749	0.05333	0.19584	0.26162
28,5	5	221.56	23.190	43.2	515	0,0125	0,092	1,17	0.703	0.05785	0.19943	0.28382
28,5	5	210.08	21.988	46.3	550	0,0125	0,092	1,17	0.666	0.06177	0.20188	0.30301
28,5	5	198.12	20.737	49.4	575	0,0125	0,092	1,17	0.628	0.06445	0.19866	0.31618
28,5	5	175.06	18.323	52.5	590	0,0125	0,092	1,17	0.555	0.06591	0.17951	0.32334
28,5	5	166.58	17.435	55.6	600	0,0125	0,092	1,17	0.528	0.06676	0.17301	0.32749
28,5	5	129.68	13.573	58.7	610	0,0125	0,092	1,17	0.411	0.0676	0.13639	0.33164
28,5	5	120.6	12.623	74.2	620	0,0125	0,092	1,17	0.382	0.06693	0.12558	0.32833
28,5	5	102.96	10.776	89.7	630	0,0125	0,092	1,17	0.327	0.06625	0.10613	0.32503
28,5	5	43.24	4.526	120.7	680	0,0125	0,092	1,17	0.137	0.06858	0.04614	0.33646
28,5	5	0	0.000	151.7	780	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.07705	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoPo	Cm ₀
28,5	5	431	45.111	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.367	0	0	0
28,5	5	343.48	35.951	6	200	0,0125	0,092	1,17	1.089	0,02379	0,12713	0,1167
28,5	5	322.18	33.722	9.1	250	0,0125	0,092	1,17	1.022	0,02954	0,14807	0,14492
28,5	5	312.28	32.685	12.2	270	0,0125	0,092	1,17	0.990	0,03161	0,15359	0,15508
28,5	5	286.62	30.000	15.3	330	0,0125	0,092	1,17	0.909	0,03859	0,17208	0,18931
28,5	5	266.32	27.875	18.4	370	0,0125	0,092	1,17	0.845	0,04311	0,17864	0,21151
28,5	5	248.38	25.997	21.5	410	0,0125	0,092	1,17	0.788	0,04764	0,18409	0,23371
28,5	5	241.6	25.287	24.6	430	0,0125	0,092	1,17	0.766	0,04971	0,18686	0,24387
28,5	5	236.24	24.726	27.7	445	0,0125	0,092	1,17	0.749	0,05117	0,18808	0,25103
28,5	5	233.64	24.454	30.8	455	0,0125	0,092	1,17	0.741	0,05202	0,18908	0,25518
28,5	5	232.56	24.341	33.9	465	0,0125	0,092	1,17	0.738	0,05286	0,19127	0,25933
28,5	5	226.32	23.688	37	480	0,0125	0,092	1,17	0.718	0,05432	0,19128	0,26649
28,5	5	225.34	23.586	40.1	490	0,0125	0,092	1,17	0.715	0,05517	0,19341	0,27064
28,5	5	213.08	22.302	43.2	510	0,0125	0,092	1,17	0.676	0,05724	0,18976	0,28081
28,5	5	205.44	21.503	46.3	530	0,0125	0,092	1,17	0.652	0,05931	0,18958	0,29098
28,5	5	184.3	19.290	55.6	560	0,0125	0,092	1,17	0.584	0,06185	0,17735	0,30343
28,5	5	162.76	17.036	71.1	600	0,0125	0,092	1,17	0.516	0,06486	0,16423	0,31817
28,5	5	122.92	12.866	102.1	640	0,0125	0,092	1,17	0.390	0,06596	0,12614	0,32358
28,5	5	76.12	7.967	133.1	700	0,0125	0,092	1,17	0.241	0,06755	0,08	0,3314
28,5	5	0	0.000	164.1	750	0,0125	0,092	1,17	0.000	0,07185	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	450	47.100	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.427	0	0	0
28,5	5	279.9	29.296	6	330	0,0125	0,092	1,17	0.888	0.03973	0.17301	0.19491
28,5	5	274.4	28.721	9.1	350	0,0125	0,092	1,17	0.870	0.0418	0.17846	0.20507
28,5	5	262.06	27.429	12.2	375	0,0125	0,092	1,17	0.831	0.04449	0.18139	0.21825
28,5	5	246.58	25.809	15.3	400	0,0125	0,092	1,17	0.782	0.04717	0.18097	0.23142
28,5	5	238.94	25.009	18.4	410	0,0125	0,092	1,17	0.758	0.04802	0.17851	0.23557
28,5	5	216.84	22.696	27.7	450	0,0125	0,092	1,17	0.688	0.05178	0.1747	0.25404
28,5	5	173.18	18.126	43.2	480	0,0125	0,092	1,17	0.549	0.05356	0.14432	0.26276
28,5	5	126.9	13.282	74.2	540	0,0125	0,092	1,17	0.402	0.05712	0.11277	0.28021
28,5	5	85.7	8.970	105.2	640	0,0125	0,092	1,17	0.272	0.06558	0.08744	0.32172
28,5	5	0	0.000	136.2	700	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.06913	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	5	435	45.530	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,380	0	0	0
28,5	5	319.4	33.431	6	200	0,0125	0,092	1,17	1.013	0.02379	0.11821	0.1167
28,5	5	261.2	27.339	9.1	310	0,0125	0,092	1,17	0.828	0.0369	0.14994	0.18101
28,5	5	245.8	25.727	12.2	350	0,0125	0,092	1,17	0.780	0.04142	0.15841	0.20321
28,5	5	235	24.597	15.3	380	0,0125	0,092	1,17	0.745	0.04472	0.16351	0.21939
28,5	5	225	23.550	18.4	410	0,0125	0,092	1,17	0.714	0.04802	0.1681	0.23557
28,5	5	216	22.608	21.5	440	0,0125	0,092	1,17	0.685	0.05132	0.17246	0.25176
28,5	5	213.96	22.394	24.6	450	0,0125	0,092	1,17	0.679	0.05216	0.17365	0.25591
28,5	5	200.5	20.986	27.7	470	0,0125	0,092	1,17	0.636	0.05424	0.16919	0.26607
28,5	5	193.18	20.220	30.8	480	0,0125	0,092	1,17	0.613	0.05508	0.16555	0.27022
28,5	5	183.78	19.236	33.9	490	0,0125	0,092	1,17	0.583	0.05593	0.15992	0.27437
28,5	5	173.82	18.193	37	510	0,0125	0,092	1,17	0.551	0.058	0.15685	0.28454
28,5	5	123.86	12.964	46.3	550	0,0125	0,092	1,17	0.393	0.06177	0.11902	0.30301
28,5	5	86.82	9.087	55.6	565	0,0125	0,092	1,17	0.275	0.06247	0.08437	0.30644
28,5	5	67.8	7.096	71.1	585	0,0125	0,092	1,17	0.215	0.06302	0.06647	0.30914
28,5	5	57.76	6.046	86.6	605	0,0125	0,092	1,17	0.183	0.06357	0.05712	0.31185
28,5	5	36.08	3.776	102.1	625	0,0125	0,092	1,17	0.114	0.06412	0.03599	0.31456
28,5	5	27.64	2.893	117.6	645	0,0125	0,092	1,17	0.088	0.06467	0.02781	0.31727
28,5	5	0	0.000	148.6	680	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.06516	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	512.62	53.654	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.161	0	0	0
28,5	7	440	46.053	6	300	0,0125	0,092	1,17	0.997	0.03605	0.08994	0.09023
28,5	7	430	45.007	9.1	350	0,0125	0,092	1,17	0.974	0.0418	0.10192	0.10463
28,5	7	420	43.960	12.2	380	0,0125	0,092	1,17	0.951	0.0451	0.1074	0.11289
28,5	7	410	42.913	15.3	400	0,0125	0,092	1,17	0.929	0.04717	0.10966	0.11807
28,5	7	400	41.867	18.4	420	0,0125	0,092	1,17	0.906	0.04925	0.11169	0.12326
28,5	7	380	39.773	21.5	450	0,0125	0,092	1,17	0.861	0.05254	0.11321	0.13152
28,5	7	370	38.727	24.6	480	0,0125	0,092	1,17	0.838	0.05584	0.11715	0.13977
28,5	7	360	37.680	27.7	500	0,0125	0,092	1,17	0.816	0.05792	0.11821	0.14496
28,5	7	345.02	36.112	30.8	540	0,0125	0,092	1,17	0.782	0.06244	0.12215	0.15628
28,5	7	320	33.493	33.9	560	0,0125	0,092	1,17	0.725	0.06451	0.11705	0.16147
28,5	7	300	31.400	37	580	0,0125	0,092	1,17	0.680	0.06659	0.11326	0.16666
28,5	7	284	29.725	40.1	600	0,0125	0,092	1,17	0.643	0.06866	0.11056	0.17185
28,5	7	270	28.260	43.2	620	0,0125	0,092	1,17	0.612	0.07073	0.10828	0.17703
28,5	7	255	26.690	46.3	640	0,0125	0,092	1,17	0.578	0.0728	0.10526	0.18222
28,5	7	235	24.597	49.4	660	0,0125	0,092	1,17	0.532	0.07487	0.09976	0.18741
28,5	7	220	23.027	52.5	670	0,0125	0,092	1,17	0.498	0.07572	0.09445	0.18952
28,5	7	210	21.980	61.8	690	0,0125	0,092	1,17	0.476	0.07703	0.09172	0.19281
28,5	7	190	19.887	71.1	710	0,0125	0,092	1,17	0.430	0.07835	0.0844	0.19609
28,5	7	160	16.747	86.6	730	0,0125	0,092	1,17	0.362	0.0789	0.07157	0.19747
28,5	7	130	13.607	117.6	800	0,0125	0,092	1,17	0.294	0.08368	0.06168	0.20944
28,5	7	85	8.897	148.6	890	0,0125	0,092	1,17	0.193	0.09091	0.04381	0.22755
28,5	7	60	6.280	179.6	960	0,0125	0,092	1,17	0.136	0.0957	0.03256	0.23952
28,5	7	0	0.000	210.6	1200	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.12133	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	535.4	56.039	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.213	0	0	0
28,5	7	447.42	46.830	6	250	0,0125	0,092	1,17	1.014	0.02992	0.0759	0.07489
28,5	7	437.24	45.764	9.1	280	0,0125	0,092	1,17	0.990	0.03322	0.08235	0.08314
28,5	7	424.98	44.481	12.2	310	0,0125	0,092	1,17	0.963	0.03652	0.08799	0.0914
28,5	7	418.06	43.757	15.3	330	0,0125	0,092	1,17	0.947	0.03859	0.09147	0.09659
28,5	7	412.32	43.156	18.4	350	0,0125	0,092	1,17	0.934	0.04066	0.09506	0.10178
28,5	7	395.3	41.375	21.5	400	0,0125	0,092	1,17	0.895	0.04641	0.10403	0.11617
28,5	7	384.56	40.251	24.6	440	0,0125	0,092	1,17	0.871	0.05094	0.11107	0.12749
28,5	7	377.7	39.533	27.7	470	0,0125	0,092	1,17	0.856	0.05424	0.11615	0.13575
28,5	7	362.52	37.944	30.8	520	0,0125	0,092	1,17	0.821	0.05999	0.1233	0.15015
28,5	7	356.18	37.280	33.9	540	0,0125	0,092	1,17	0.807	0.06206	0.12533	0.15533
28,5	7	339.9	35.576	37	570	0,0125	0,092	1,17	0.770	0.06536	0.12596	0.16359
28,5	7	325.22	34.040	40.1	590	0,0125	0,092	1,17	0.737	0.06743	0.12434	0.16878
28,5	7	313.14	32.775	43.2	600	0,0125	0,092	1,17	0.709	0.06828	0.12122	0.17089
28,5	7	256.8	26.878	52.5	620	0,0125	0,092	1,17	0.582	0.06959	0.10132	0.17418
28,5	7	174.64	18.279	68	670	0,0125	0,092	1,17	0.396	0.07382	0.0731	0.18477
28,5	7	112.14	11.737	99	750	0,0125	0,092	1,17	0.254	0.07983	0.05076	0.19981
28,5	7	73.86	7.731	130	920	0,0125	0,092	1,17	0.167	0.09687	0.04057	0.24247
28,5	7	0	0.000	161	950	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.11649	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	511.68	53.556	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.159	0	0	0
28,5	7	434.3	45.457	6	290	0,0125	0,092	1,17	0.984	0.03483	0.08575	0.08717
28,5	7	411.2	43.039	9.1	355	0,0125	0,092	1,17	0.931	0.04242	0.09889	0.10616
28,5	7	380.94	39.872	12.2	420	0,0125	0,092	1,17	0.863	0.05001	0.10801	0.12516
28,5	7	369.98	38.725	15.3	450	0,0125	0,092	1,17	0.838	0.05331	0.11182	0.13342
28,5	7	360.4	37.722	18.4	480	0,0125	0,092	1,17	0.816	0.0566	0.11566	0.14167
28,5	7	354.74	37.129	21.5	500	0,0125	0,092	1,17	0.804	0.05868	0.11802	0.14686
28,5	7	344.86	36.095	24.6	535	0,0125	0,092	1,17	0.781	0.06259	0.12238	0.15665
28,5	7	330.48	34.590	27.7	580	0,0125	0,092	1,17	0.749	0.06773	0.1269	0.16951
28,5	7	320.8	33.577	30.8	615	0,0125	0,092	1,17	0.727	0.07164	0.1303	0.1793
28,5	7	313.36	32.798	33.9	650	0,0125	0,092	1,17	0.710	0.07555	0.13423	0.18909
28,5	7	280.26	29.334	37	685	0,0125	0,092	1,17	0.635	0.07946	0.12627	0.19888
28,5	7	250.48	26.217	40.1	730	0,0125	0,092	1,17	0.567	0.0846	0.12015	0.21174
28,5	7	219.46	22.970	49.4	770	0,0125	0,092	1,17	0.497	0.08836	0.10995	0.22117
28,5	7	182.38	19.089	64.9	800	0,0125	0,092	1,17	0.413	0.09014	0.09321	0.22562
28,5	7	90.82	9.506	95.9	900	0,0125	0,092	1,17	0.206	0.0986	0.05077	0.2468
28,5	7	0	0.000	126.9	990	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.10584	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	533.88	55.879	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.209	0	0	0
28,5	7	426	44.588	6	340	0,0125	0,092	1,17	0.965	0.04096	0.09892	0.10251
28,5	7	415	43.437	9.1	380	0,0125	0,092	1,17	0.940	0.04548	0.10702	0.11384
28,5	7	400	41.867	12.2	440	0,0125	0,092	1,17	0.906	0.05246	0.11897	0.1313
28,5	7	392	41.029	15.3	470	0,0125	0,092	1,17	0.888	0.05576	0.12393	0.13956
28,5	7	380	39.773	18.4	510	0,0125	0,092	1,17	0.861	0.06028	0.12988	0.15088
28,5	7	366	38.308	21.5	560	0,0125	0,092	1,17	0.829	0.06603	0.13703	0.16528
28,5	7	355	37.157	24.6	600	0,0125	0,092	1,17	0.804	0.07056	0.14202	0.1766
28,5	7	341.9	35.786	27.7	630	0,0125	0,092	1,17	0.775	0.07386	0.14317	0.18486
28,5	7	329	34.435	30.8	640	0,0125	0,092	1,17	0.745	0.0747	0.13935	0.18698
28,5	7	315	32.970	33.9	650	0,0125	0,092	1,17	0.714	0.07555	0.13493	0.18909
28,5	7	280	29.307	43.2	670	0,0125	0,092	1,17	0.634	0.07686	0.12202	0.19238
28,5	7	245	25.643	52.5	690	0,0125	0,092	1,17	0.555	0.07817	0.10859	0.19566
28,5	7	190	19.887	68	730	0,0125	0,092	1,17	0.430	0.08118	0.08745	0.20318
28,5	7	150	15.700	83.5	760	0,0125	0,092	1,17	0.340	0.08296	0.07055	0.20763
28,5	7	80	8.373	114.5	840	0,0125	0,092	1,17	0.181	0.08896	0.04035	0.22267
28,5	7	41	4.291	145.5	960	0,0125	0,092	1,17	0.093	0.09988	0.02322	0.24999
28,5	7	0	0.000	176.5	1000	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.10098	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	540	56.520	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.223	0	0	0
28,5	7	456.66	47.797	6	300	0,0125	0,092	1,17	1.034	0.03605	0.09334	0.09023
28,5	7	448.62	46.956	9.1	325	0,0125	0,092	1,17	1.016	0.03874	0.09853	0.09696
28,5	7	442.4	46.305	12.2	350	0,0125	0,092	1,17	1.002	0.04142	0.1039	0.10368
28,5	7	435.14	45.545	15.3	375	0,0125	0,092	1,17	0.986	0.04411	0.10882	0.1104
28,5	7	430.52	45.061	18.4	400	0,0125	0,092	1,17	0.975	0.04679	0.11422	0.11712
28,5	7	418.22	43.774	21.5	435	0,0125	0,092	1,17	0.947	0.05071	0.12023	0.12691
28,5	7	411.82	43.104	24.6	460	0,0125	0,092	1,17	0.933	0.05339	0.12467	0.13363
28,5	7	407.2	42.620	27.7	480	0,0125	0,092	1,17	0.922	0.05546	0.12805	0.13882
28,5	7	399.36	41.800	30.8	500	0,0125	0,092	1,17	0.905	0.05754	0.13028	0.14401
28,5	7	386.68	40.473	33.9	535	0,0125	0,092	1,17	0.876	0.06145	0.13472	0.1538
28,5	7	377.72	39.535	37	555	0,0125	0,092	1,17	0.856	0.06352	0.13603	0.15899
28,5	7	366.66	38.377	40.1	585	0,0125	0,092	1,17	0.831	0.06682	0.13891	0.16724
28,5	7	356.68	37.333	43.2	610	0,0125	0,092	1,17	0.808	0.0695	0.14056	0.17396
28,5	7	342.92	35.892	46.3	650	0,0125	0,092	1,17	0.777	0.07403	0.14393	0.18529
28,5	7	324.9	34.006	49.4	695	0,0125	0,092	1,17	0.736	0.07917	0.14584	0.19815
28,5	7	315.36	33.008	52.5	710	0,0125	0,092	1,17	0.714	0.08063	0.14416	0.2018
28,5	7	302.3	31.641	55.6	735	0,0125	0,092	1,17	0.685	0.08331	0.1428	0.20852
28,5	7	274.28	28.708	64.9	780	0,0125	0,092	1,17	0.621	0.08769	0.13637	0.21948
28,5	7	265.08	27.745	80.4	800	0,0125	0,092	1,17	0.600	0.08824	0.13262	0.22086
28,5	7	212.48	22.240	111.4	900	0,0125	0,092	1,17	0.481	0.0967	0.1165	0.24204
28,5	7	112.68	11.794	142.4	970	0,0125	0,092	1,17	0.255	0.10148	0.06484	0.25401
28,5	7	66.64	6.975	173.4	1020	0,0125	0,092	1,17	0.151	0.10381	0.03922	0.25984
28,5	7	0	0.000	176.5	1500	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.16229	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoPo	Cm ₀
28,5	7	520.04	54.431	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.178	0	0	0
28,5	7	446.96	46.782	6	240	0,0125	0,092	1,17	1.012	0.02869	0.07272	0.07182
28,5	7	441.64	46.225	9.1	260	0,0125	0,092	1,17	1.000	0.03077	0.07704	0.07701
28,5	7	429.96	45.002	12.2	300	0,0125	0,092	1,17	0.974	0.03529	0.08603	0.08833
28,5	7	400.42	41.911	15.3	400	0,0125	0,092	1,17	0.907	0.04717	0.1071	0.11807
28,5	7	381.66	39.947	18.4	470	0,0125	0,092	1,17	0.865	0.05538	0.11983	0.13861
28,5	7	375.02	39.252	21.5	495	0,0125	0,092	1,17	0.850	0.05806	0.12346	0.14533
28,5	7	366.26	38.335	24.6	530	0,0125	0,092	1,17	0.830	0.06197	0.1287	0.15512
28,5	7	352.48	36.893	27.7	570	0,0125	0,092	1,17	0.798	0.0665	0.1329	0.16644
28,5	7	339.94	35.580	30.8	600	0,0125	0,092	1,17	0.770	0.0698	0.13453	0.1747
28,5	7	331.52	34.699	33.9	620	0,0125	0,092	1,17	0.751	0.07187	0.13509	0.17989
28,5	7	324.94	34.010	37	640	0,0125	0,092	1,17	0.736	0.07394	0.13623	0.18507
28,5	7	300.22	31.423	40.1	680	0,0125	0,092	1,17	0.680	0.07847	0.13357	0.1964
28,5	7	288.82	30.230	43.2	690	0,0125	0,092	1,17	0.654	0.07931	0.12988	0.19852
28,5	7	281.56	29.470	46.3	700	0,0125	0,092	1,17	0.638	0.08016	0.12797	0.20063
28,5	7	268.36	28.088	49.4	710	0,0125	0,092	1,17	0.608	0.08101	0.12326	0.20275
28,5	7	253.04	26.485	52.5	720	0,0125	0,092	1,17	0.573	0.08185	0.11743	0.20487
28,5	7	180.04	18.844	55.6	800	0,0125	0,092	1,17	0.408	0.09128	0.09318	0.22847
28,5	7	99	10.362	71.1	880	0,0125	0,092	1,17	0.224	0.09919	0.05568	0.24827
28,5	7	74.58	7.806	102.1	930	0,0125	0,092	1,17	0.169	0.10152	0.04293	0.2541
28,5	7	0	0.000	83.5	950	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.10625	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	530.24	55.498	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.201	0	0	0
28,5	7	500	52.333	6	140	0,0125	0,092	1,17	1.133	0.01643	0.04658	0.04113
28,5	7	495	51.810	9.1	160	0,0125	0,092	1,17	1.121	0.0185	0.05193	0.04631
28,5	7	490	51.287	12.2	180	0,0125	0,092	1,17	1.110	0.02058	0.05717	0.0515
28,5	7	485	50.763	15.3	200	0,0125	0,092	1,17	1.099	0.02265	0.06228	0.05669
28,5	7	475	49.717	18.4	220	0,0125	0,092	1,17	1.076	0.02472	0.06658	0.06188
28,5	7	465	48.670	21.5	250	0,0125	0,092	1,17	1.053	0.02802	0.07387	0.07013
28,5	7	455	47.623	24.6	280	0,0125	0,092	1,17	1.031	0.03132	0.08079	0.07839
28,5	7	445	46.577	27.7	310	0,0125	0,092	1,17	1.008	0.03462	0.08734	0.08664
28,5	7	421.26	44.092	30.8	400	0,0125	0,092	1,17	0.954	0.04527	0.10813	0.11332
28,5	7	413.24	43.252	33.9	430	0,0125	0,092	1,17	0.936	0.04857	0.1138	0.12157
28,5	7	393.26	41.161	37	480	0,0125	0,092	1,17	0.891	0.05432	0.12112	0.13597
28,5	7	386.48	40.452	40.1	500	0,0125	0,092	1,17	0.875	0.0564	0.12358	0.14115
28,5	7	369.68	38.693	43.2	540	0,0125	0,092	1,17	0.837	0.06092	0.12769	0.15248
28,5	7	357.64	37.433	46.3	570	0,0125	0,092	1,17	0.810	0.06422	0.13022	0.16073
28,5	7	353.04	36.952	49.4	585	0,0125	0,092	1,17	0.800	0.06568	0.13147	0.16439
28,5	7	341.28	35.721	52.5	610	0,0125	0,092	1,17	0.773	0.06836	0.13228	0.17111
28,5	7	333.64	34.921	55.6	625	0,0125	0,092	1,17	0.756	0.06982	0.13208	0.17476
28,5	7	324.82	33.998	58.7	640	0,0125	0,092	1,17	0.736	0.07128	0.13128	0.17841
28,5	7	320.64	33.560	61.8	650	0,0125	0,092	1,17	0.726	0.07213	0.13113	0.18053
28,5	7	317.38	33.219	64.9	655	0,0125	0,092	1,17	0.719	0.07236	0.13021	0.18111
28,5	7	310.58	32.507	68	660	0,0125	0,092	1,17	0.704	0.07259	0.12783	0.1817
28,5	7	301.28	31.534	77.3	670	0,0125	0,092	1,17	0.682	0.07268	0.12415	0.18191
28,5	7	295.76	30.956	86.6	680	0,0125	0,092	1,17	0.670	0.07277	0.12202	0.18213
28,5	7	278.84	29.185	102.1	700	0,0125	0,092	1,17	0.632	0.07332	0.11591	0.18351
28,5	7	254.18	26.604	117.6	720	0,0125	0,092	1,17	0.576	0.07387	0.10646	0.18489
28,5	7	195.2	20.431	133.1	750	0,0125	0,092	1,17	0.442	0.07565	0.08372	0.18934
28,5	7	126.86	13.278	148.6	800	0,0125	0,092	1,17	0.287	0.07988	0.05745	0.19993
28,5	7	99.54	10.419	164.1	850	0,0125	0,092	1,17	0.225	0.08411	0.04747	0.21052
28,5	7	69.16	7.239	179.6	900	0,0125	0,092	1,17	0.157	0.08834	0.03464	0.22111
28,5	7	43.56	4.559	195.1	1000	0,0125	0,092	1,17	0.099	0.0987	0.02438	0.24704
28,5	7	0	0.000	210.6	1300	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.13359	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	523.82	54.826	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.187	0	0	0
28,5	7	450.74	47.177	6	290	0,0125	0,092	1,17	1.021	0.034826	0.089001	0.087166
28,5	7	430.24	45.032	9.1	335	0,0125	0,092	1,17	0.975	0.039963	0.097487	0.100026
28,5	7	417.26	43.673	12.2	370	0,0125	0,092	1,17	0.945	0.043875	0.1038	0.109816
28,5	7	410.32	42.947	15.3	390	0,0125	0,092	1,17	0.929	0.045948	0.106895	0.115003
28,5	7	400.34	41.902	18.4	420	0,0125	0,092	1,17	0.907	0.049246	0.111782	0.123259
28,5	7	390.48	40.870	21.5	450	0,0125	0,092	1,17	0.885	0.052545	0.116332	0.131516
28,5	7	375.1	39.260	24.6	490	0,0125	0,092	1,17	0.850	0.05707	0.121373	0.142841
28,5	7	360.24	37.705	27.7	540	0,0125	0,092	1,17	0.816	0.062821	0.128312	0.157236
28,5	7	350.22	36.656	30.8	565	0,0125	0,092	1,17	0.793	0.065506	0.130075	0.163957
28,5	7	335.06	35.070	33.9	600	0,0125	0,092	1,17	0.759	0.069418	0.131876	0.173748
28,5	7	304.36	31.856	37	650	0,0125	0,092	1,17	0.689	0.075169	0.129717	0.188143
28,5	7	285	29.830	46.3	680	0,0125	0,092	1,17	0.646	0.077707	0.125568	0.194496
28,5	7	260.26	27.241	61.8	710	0,0125	0,092	1,17	0.590	0.079486	0.117291	0.198946
28,5	7	170.18	17.812	92.8	820	0,0125	0,092	1,17	0.386	0.089173	0.086042	0.223193
28,5	7	81.36	8.516	123.8	920	0,0125	0,092	1,17	0.184	0.097634	0.045038	0.244371
28,5	7	0	0.000	154.8	1050	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.109774	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	535,3	56.028	0	0	0,0125	0,092	1,17	1.213	0	0	0
28,5	7	482	50.449	6	190	0,0125	0,092	1,17	1.092	0.022563	0.061662	0.056473
28,5	7	472	49.403	9,1	210	0,0125	0,092	1,17	1.069	0.024635	0.065928	0.06166
28,5	7	464	48.565	12.2	235	0,0125	0,092	1,17	1.051	0.027321	0.071876	0.068382
28,5	7	450	47.100	15.3	270	0,0125	0,092	1,17	1.019	0.031233	0.079688	0.078173
28,5	7	438	45.844	18.4	300	0,0125	0,092	1,17	0.992	0.034531	0.085754	0.086429
28,5	7	430	45.007	21.5	320	0,0125	0,092	1,17	0.974	0.036604	0.089241	0.091616
28,5	7	421	44.065	24.6	340	0,0125	0,092	1,17	0.954	0.038676	0.092319	0.096803
28,5	7	415	43.437	27.7	360	0,0125	0,092	1,17	0.940	0.040748	0.09558	0.10199
28,5	7	408	42.704	30.8	390	0,0125	0,092	1,17	0.924	0.044047	0.101893	0.110246
28,5	7	400	41.867	33.9	410	0,0125	0,092	1,17	0.906	0.046119	0.104595	0.115433
28,5	7	390	40.820	37	440	0,0125	0,092	1,17	0.883	0.049418	0.109275	0.123689
28,5	7	378	39.564	40.1	470	0,0125	0,092	1,17	0.856	0.052716	0.112982	0.131945
28,5	7	365	38.203	43.2	500	0,0125	0,092	1,17	0.827	0.056015	0.115923	0.140202
28,5	7	355	37.157	46.3	530	0,0125	0,092	1,17	0.804	0.059314	0.119386	0.148458
28,5	7	345	36.110	49.4	560	0,0125	0,092	1,17	0.782	0.062612	0.122476	0.156714
28,5	7	328.6	34.393	52.5	600	0,0125	0,092	1,17	0.744	0.067137	0.125084	0.168039
28,5	7	276.4	28.930	55.6	620	0,0125	0,092	1,17	0.626	0.06921	0.108461	0.173226
28,5	7	200.1	20.944	64.9	650	0,0125	0,092	1,17	0.453	0.071748	0.0814	0.179579
28,5	7	125.3	13.115	80.4	700	0,0125	0,092	1,17	0.284	0.075978	0.053977	0.190168
28,5	7	98.2	10.278	111.4	750	0,0125	0,092	1,17	0.222	0.078308	0.0436	0.196
28,5	7	78.4	8.206	126.9	800	0,0125	0,092	1,17	0.178	0.082539	0.03669	0.206589
28,5	7	56.2	5.882	157.9	850	0,0125	0,092	1,17	0.127	0.084869	0.027043	0.21242
28,5	7	29.3	3.067	188.9	980	0,0125	0,092	1,17	0.066	0.097009	0.016116	0.242805
28,5	7	0	0.000	219.9	1080	0,0125	0,092	1,17	0.000	0.10547	0	0

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

T (C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP ₀	Cm ₀
28,5	7	518.8	54.301	0	0	0,0125	0,092	1,17	1,175	0	0	0
28,5	7	467.9	48.974	6	270	0,0125	0,092	1,17	1,060	0.03237	0.08588	0.08103
28,5	7	450.54	47.157	9.1	310	0,0125	0,092	1,17	1,021	0.0369	0.09426	0.09235
28,5	7	437.98	45.842	12.2	340	0,0125	0,092	1,17	0,992	0.0402	0.09982	0.10061
28,5	7	425.14	44.498	15.3	360	0,0125	0,092	1,17	0,963	0.04227	0.10189	0.1058
28,5	7	420.48	44.010	18.4	375	0,0125	0,092	1,17	0,953	0.04373	0.10425	0.10945
28,5	7	410.58	42.974	21.5	395	0,0125	0,092	1,17	0,930	0.0458	0.10662	0.11463
28,5	7	405.02	42.392	24.6	410	0,0125	0,092	1,17	0,917	0.04726	0.10853	0.11829
28,5	7	389.86	40.805	27.7	440	0,0125	0,092	1,17	0,883	0.05056	0.11176	0.12654
28,5	7	380.12	39.786	30.8	460	0,0125	0,092	1,17	0,861	0.05263	0.11343	0.13173
28,5	7	365.18	38.222	33.9	490	0,0125	0,092	1,17	0,827	0.05593	0.1158	0.13999
28,5	7	360.36	37.718	37	500	0,0125	0,092	1,17	0,816	0.05678	0.116	0.1421
28,5	7	350.62	36.698	40.1	525	0,0125	0,092	1,17	0,794	0.05946	0.11821	0.14883
28,5	7	340.92	35.683	43.2	550	0,0125	0,092	1,17	0,772	0.06215	0.12013	0.15555
28,5	7	330.4	34.582	46.3	570	0,0125	0,092	1,17	0,748	0.06422	0.1203	0.16073
28,5	7	320.1	33.504	49.4	580	0,0125	0,092	1,17	0,725	0.06506	0.11809	0.16285
28,5	7	309.66	32.411	52.5	590	0,0125	0,092	1,17	0,701	0.06591	0.11572	0.16497
28,5	7	301.04	31.509	55.6	600	0,0125	0,092	1,17	0,682	0.06676	0.11394	0.16709
28,5	7	290.44	30.399	58.7	600	0,0125	0,092	1,17	0,658	0.06638	0.10931	0.16614
28,5	7	279.9	29.296	61.8	610	0,0125	0,092	1,17	0,634	0.06722	0.10668	0.16825
28,5	7	264.98	27.735	64.9	620	0,0125	0,092	1,17	0,600	0.06807	0.10227	0.17037
28,5	7	220.3	23.058	68	640	0,0125	0,092	1,17	0,499	0.07014	0.08761	0.17556
28,5	7	180.24	18.865	83.5	680	0,0125	0,092	1,17	0,408	0.07315	0.07475	0.18308
28,5	7	150.58	15.761	114.5	720	0,0125	0,092	1,17	0,341	0.07425	0.06339	0.18584
28,5	7	130.98	13.709	145.5	760	0,0125	0,092	1,17	0,297	0.07535	0.05596	0.1886
28,5	7	122.3	12.801	176.5	800	0,0125	0,092	1,17	0,277	0.07646	0.05302	0.19137
28,5	7	98.6	10.320	207.5	900	0,0125	0,092	1,17	0,223	0.08492	0.04747	0.21254
28,5	7	74.4	7.787	238.5	950	0,0125	0,092	1,17	0,169	0.08725	0.0368	0.21837
28,5	7	65.2	6.824	269.5	1000	0,0125	0,092	1,17	0,148	0.08958	0.03311	0.22421
28,5	7	37	3.873	300.5	1090	0,0125	0,092	1,17	0,084	0.09681	0.02031	0.24231
28,5	7	0	0.000	331.5	1130	0,0125	0,092	1,17	0,000	1.07892	0	0

Tabel C. 21 Data torsi statis turbin ngina Savonius dengan silinder pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$

Sudut (θ)	T_{s0} (N.cm)	
	$Re = 9,7 \times 10^4$	$Re = 13,6 \times 10^4$
0	3.7	2.28
10	3.94	3.58
20	4.39	5.7
30	4.79	6.52
40	4.5	5.6
50	4.28	4.98
60	3.97	4.52
70	3.42	3.74
80	2.81	3.38
90	2.51	2.84
100	2.22	2.44
110	1.92	2.12
120	1.61	1.84
130	0.91	1.32
140	1.9	1.14
150	2.42	0.52
160	3.23	0.98
170	3.42	1.44
180	3.65	2.18

D. Perhitungan Uncertainty

Perhitungan uncertainty ini menggunakan data coefficient of power di titik maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu di $d/D = 0,5$ pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$.

- Uncertainty pada pembacaan tip speed ratio (λ)

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

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

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

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

$$\triangleright \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = R u^{-1}$$

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

$$\triangleright \frac{\partial \lambda}{\partial U} = -U^{-2} \omega R$$

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

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

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

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

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_{\omega} = \pm \{[u_n]^2\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{237,2} = \pm 4,21 \times 10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

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

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (U)

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

Selanjutnya substitusi hasil uncertainty ω , R, dan U ke persamaan sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

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

$$u_\lambda = \pm \{ (4,21 \times 10^{-4})^2 + (3,24 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

- Uncertainty Torsi Dinamis (T_D)

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

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

$$\triangleright \frac{\partial T_D}{\partial (s-m)} = r$$

$$\triangleright \frac{\partial T_D}{\partial r} = (s-m)$$

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

$$\frac{(s-m)}{((s-m) \times r)} \cdot r \cdot U_{(s-m)} = U_{(s-m)}$$

$$U_{T_D,r} = \frac{\delta T_{D,r}}{T_D} = \frac{r}{T_D} \frac{\partial T_D}{\partial r} U_r = \frac{r}{((s-m) \times r)} \cdot (s-m) \cdot U_r = U_r$$

Maka:

$$U_{T_D} = \pm \left\{ [U_{(s-m)}]^2 + [U_r]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

- Uncertainty pada pembacaan neraca pegas (s-m)

$$u_{(s-m)} = \pm \frac{10}{486.1} = \pm 0,0206$$

- Uncertainty pada pembacaan jari-jari silinder yang menerima beban (r)

$$u_{(r)} = \pm \frac{0.5}{12.5} = \pm 0,04$$

$$U_{T_D} = \pm \left\{ [0,0206]^2 + [0.04]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{T_D} = \pm 0,04498$$

$$U_{T_D} = \pm 4,50\%$$

- Uncertainty Massa Jenis (ρ)

$$\rho \times T = C$$

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

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

$$u_{\rho,T} = \frac{\delta \rho T}{\rho} = \frac{T}{T^{-1}} -T^{-2} u_T = -u_T$$

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

$$u_\rho = u_T$$

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

- Uncertainty Luas (A)

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

$$U_{A,L} = \frac{\delta A, L}{A} = \frac{L}{A} \frac{\partial A}{\partial L} U_L = \frac{L}{(L \times H)} \cdot H \cdot U_L = U_L$$

$$U_{A,H} = \frac{\delta A, H}{A} = \frac{H}{A} \frac{\partial A}{\partial H} U_H = \frac{H}{(L \times H)} \cdot L \cdot U_H = U_H$$

$$U_A = \pm \{[U_L]^2 + [U_H]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

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

$$U_A = \pm 0,00233$$

$$U_A = \pm 0,23\%$$

- Uncertainty pada pembacaan coefficient of power (CoP)

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

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

$$d\text{CoP} = \frac{\partial \text{CoP}}{\partial T_d} + \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \omega} + \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \rho} + \frac{\partial \text{CoP}}{\partial A} + \frac{\partial \text{CoP}}{\partial V}$$

$$\triangleright \frac{\partial \text{CoP}}{\partial T_d} = (2 \omega \rho^{-1} V^{-3} A^{-1})$$

$$\begin{aligned}
\triangleright \frac{\partial CoP}{\partial \omega} &= (2T_d \rho^{-1} V^{-3} A^{-1}) \\
\triangleright \frac{\partial CoP}{\partial \rho} &= (-2 \rho^{-2} T_d \omega V^{-3} A^{-1}) \\
\triangleright \frac{\partial CoP}{\partial V} &= (-6V^{-4} A^{-1} T_d \omega \rho^{-1}) \\
\triangleright \frac{\partial CoP}{\partial A} &= (-2A^{-2} T_d \omega \rho^{-1} V^{-3})
\end{aligned}$$

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

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

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

$$u_{\omega} = u_{\omega}$$

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

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

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

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

Maka:

$$\begin{aligned}
u_{CoP} &= \pm \{ (0,04498)^2 + (4,21 \times 10^{-4})^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 \\
&\quad + (-3 \times 0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,04558 = 4,56\%$$

- Uncertainty pada pembacaan coefficient of moment (C_M)

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

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

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

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

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

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

$$\triangleright \frac{\partial C_M}{\partial V} = (-4V^{-3}T_D \rho^{-1}A^{-1}R^{-1})$$

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

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

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

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

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

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

$$u_{C_M} = \pm \{ (0,04498)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (-2 \times 0,002)^2 + (2,33 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,04574 = 4,57\%$$

- Uncertainty pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

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

$$Re = \rho VL\mu^{-1}$$

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

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

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

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

$$\triangleright \frac{\partial Re}{\partial \mu} = (-\mu^{-2}\rho VL)$$

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

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

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

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

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

Uncertainty miu (μ)

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

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

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

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

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

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

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

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

$$U_{\mu} = \pm \left[\left(\frac{3}{2} 3,509 \times 10^{-3} \right)^2 + \left(7,46 \times 10^{-4} \right)^2 \right]^{0.5}$$

$$U_{\mu} = \pm 5,316 \times 10^{-3}$$

Maka:

$$u_{RE} = \pm \left\{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (1,62 \times 10^{-3})^2 + \right.$$

$$\left. (-5,316 \times 10^{-3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 6,87 \times 10^{-3} = 0.69\%$$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BIODATA PENULIS



Muhammad Rizky Ramadhan merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis lahir di Pangkalan Brandan, Medan pada tanggal 29 Januari 1997, memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Islamic Village Tangerang, kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMP Islamic Village Tangerang dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 8 Tangerang. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut

Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2015.

Semasa kuliah penulis aktif dalam seluruh kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan yaitu sebagai staff Divisi Umum Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) ITS periode 2016-2017 dan periode 2018-2019, Kabiro Internal Divisi Umum LBMM periode 2016-2017. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan yaitu sebagai Koordinator Sponsorship dalam sebuah *event* pengabdian masyarakat bernama *Engine Tune Up* pada tahun 2017 dan 2019 oleh LBMM-ITS dan Wakil Ketua *Event Mechanic's Skill Competition* 2018 skala Nasional oleh LBMM-ITS

Apabila terdapat pesan atau informasi yang hendak disampaikan kepada penulis dapat melalui email: kikirmdn29@gmail.com