



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

# STUDI EKSPERIMEN PENINGKATAN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER SIRKULAR DIDEPAN RETURNING BLADE TURBIN

“Studi Kasus untuk ukuran Silinder Pengganggu  $d/D = 0,5$  diletakkan pada posisi  $S/D = 2,4$  ;  $y/D=0,5$  dan dengan Kecepatan Aliran Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s”

MICHAEL LAWRENCE BUDIHARTONO  
NRP. 02111640000107

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

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





**TUGAS AKHIR – TM184835**

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

**“Studi Kasus untuk ukuran Silinder Pengganggu  $d/D = 0.5$ ;  
diletakkan pada posisi  $S/D = 2/4$ ;  $y/D = 0.5$ ; dan dengan  
Kecepatan Aliran Udara 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s”**

**MICHAEL LAWRENCE BUDIHARTONO**  
NRP. 02111640000107

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

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





**FINAL PROJECT – TM184835**

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF  
DISTURBANCE CYLINDER TO SAVONIUS WIND  
TURBINE'S PERFORMANCE**

**“Case Study for Ratio  $d/D = 0.5$ ;  $y/D = 0.5$ ; Placed at  $S/D = 2.4$   
and Wind Speed = 3.8; 4.4; 5; 6; 7; 8; and 9 m/s”**

**MICHAEL LAWRENCE BUDIHARTONO**  
NRP. 0211164000107

Advising Lecturer:  
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020



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

“Studi Kasus untuk ukuran Silinder Pengganggu  $d/D = 0,5$  ;  
diletakkan pada posisi  $S/D = 2,4$  ;  $y/D = 0,5$  ; dan dengan  
Kecepatan Aliran Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s”

**Nama** : Michael Lawrence Budihartono  
**NRP** : 02111640000107  
**Departemen** : Teknik Mesin  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

**ABSTRAK**

Menurut Dewan Energi Nasional (DEN) dari Kementerian ESDM, Indonesia memiliki target potensi penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada 2025. Sedangkan berdasarkan data dari BMKG, kecepatan angin rata-rata di Indonesia pada 2019 relatif rendah, antara 2-6 m/s saja; dengan potensi energi angin sebesar 970 MW. Turbin Savonius adalah salah satu turbin yang dapat memanfaatkan potensi energi angin di Indonesia dengan mengubah gaya dari hembusan angin menjadi energi listrik. Karena efisinesinya rendah maka diperlukan penelitian untuk meningkatkan kinerja Turbin Savonius. Studi eksperimen Turbin Savonius dengan pemasangan silinder penghalang di depan *returning blade* dilakukan sebagai salah satu cara untuk meningkatkan performa turbin.

Studi eksperimen ini menggunakan instalasi Turbin Savonius yang memiliki 2 sudu dengan diameter sudu (D) sebesar 167,1 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm, diameter poros (b) sebesar 19,56 mm, dan diameter *end plate* (Do) sebesar 321 mm. Pengganggu yang digunakan berbentuk silinder berdiameter (d) sebesar 88,8 mm dan tinggi (t) sebesar 500 mm, dan diletakkan di

depan *returning blade* untuk mengurangi gaya *drag* pada sisi *returning blade* turbin angin Savonius dan meningkatkan selisih torsi yang dihasilkan putaran turbin. Angin berasal dari *axial fan* yang kecepatan putarnya diatur oleh *voltage* regulator; serta dibantu oleh *honeycomb* di depannya untuk menciptakan aliran *uniform*. Rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin  $d/D = 0,5$  dengan variasi pada rasio jarak dari titik pusat pengganggu sampai titik pusat turbin terhadap diameter sudu turbin  $S/D = 2,4$ , dan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 ; 4,4 ; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Untuk mengukur kecepatan angin menggunakan anemometer, untuk mengukur putaran turbin menggunakan *tachometer*, dan untuk mengukur torsi statis menggunakan *torquemeter*. Selain itu digunakan suatu instalasi *brake dynamometer* untuk mengukur torsi dinamis turbin dengan menggunakan beban pemberat.

Hasil dari penelitian ini adalah bahwa pemberian silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  pada turbin mampu menghasilkan peningkatan performa turbin Savonius pada seluruh variasi kecepatan angin. CoP tertinggi yang dihasilkan pada kecepatan angin 6 m/s, dengan kenaikan CoP sebesar 11,65% dari 0,0724 menjadi 0,0808 pada TSR 0,78; dan  $C_M$  yang dihasilkan naik sebesar 21,7 % dari 0,1381 menjadi 0,168 pada TSR 0. Selain itu pemberian silinder pengganggu juga meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* (Cts) turbin pada seluruh variasi kecepatan meskipun masih terdapat beberapa nilai Cts yang negatif pada sudut turbin tertentu.

**Kata kunci : Turbin Savonius, Silinder Penghalang, Torsi Dinamis, *Static Torque Coefficient*, *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment***



***EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF  
DISTURBANCE CYLINDER TO SAVONIUS WIND  
TURBINE'S PERFORMANCE***

*“Case Study for Ratio  $d/D = 0.5$  ;  $y/D = 0.5$ ; placed at  $S/D = 2.4$ ;  
and Wind Speed = 3.8 ; 4.4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; and 9 m/s”*

**Name** : Michael Lawrence Budihartono  
**NRP** : 02111640000107  
**Department** : Mechanical Engineering  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

***ABSTRACT***

*According to National Energy Council (DEN) from Ministry of Energy, Indonesia have set 23% target of Renewable Energy usage in 2025. Meanwhile, based on National Climatology Bureau (BMKG), Indonesia's average wind speed in 2019 was relatively low between 2-6 m/s only, with 970 MW wind energy potential. Savonius Wind Turbine is one device which can utilize wind energy and convert it into electricity. Due to its low performance, this experimental study of Savonius Wind Turbine with disturbance cylinder is done to increase the turbine's performance.*

*This study used Savonius Turbine with 2 blades and has blade diameter (D) of 167.1 mm, height (H) of 298 mm, shaft diameter (b) of 19.56 mm, and end plate diameter (Do) of 321 mm. The disturbance cylinder has diameter (d) of 88.8 mm and height (t) of 500 mm, and was placed in front of the turbine's returning blade to reduce drag force on the returning blade side, thus increase the torque difference generated by the rotation of turbine. The wind was produced from axial fan which speed was continuously controlled by a voltage regulator; and a honeycomb to create uniform wind flow. This study was done by using disturbance cylinder with  $d/D = 0.5$  that placed at  $y/D = 0.5$  and*

*S/D = 2.4; and wind speed variations used were 3.8 ; 4.4 ; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. An anemometer was used to measure the wind speed, tachometer to measure the turbine rotational speed, and a torquemeter to measure the turbine's static torque. Besides, a brake dynamometer with weight was also used to measure the dynamic torque of the turbine.*

*The result of the study showed that compared to conventional Savonius Wind Turbine, the disturbance cylinder ( $d/D = 0.5$ ) placed in  $S/D = 2.4$  had produced the positive impact on increasing the turbine's performance in all wind speed variations used. The highest Coefficient of Power (CoP) and Coefficient of Moment ( $C_M$ ) were obtained at wind speed of 6 m/s; where the CoP increased around 11.65% from 0.0724 into 0.0808 (8.08%) on Tip Speed Ratio of 0.78; the  $C_M$  increased around 21.7% from 0.1381 into 0.168 on Tip Speed Ratio of 0. Furthermore, the disturbance cylinder also increased the Static Torque Coefficient ( $C_t$ s) of the turbine in all wind speed variation, even though there were still some negative values on certain blade angle ranges.*

***Key word : Savonius Wind Turbine, Disturbance Cylinder, Static Torque Coefficient, Dynamic Torque, Coefficient of Power, Coefficient of Moment***

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

“Studi Kasus untuk ukuran Silinder Pengganggu  $d/D = 0,5$ ;  
diletakkan pada posisi  $S/D = 2,4$  ;  $y/D = 0,5$  ; dan dengan  
Kecepatan Aliran Udara 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 (m/s)”

**TUGAS AKHIR**

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

Oleh :

**MICHAEL LAWRENCE BUDIHARTONO**

NRP. 0211164000107

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

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

SURABAYA  
AGUSTUS, 2020

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur kepada Tuhan Yesus Kristus atas berkat anugrah dan pertolongan-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan pendidikan sarjana S-1 di departemen Teknik Mesin ITS. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini :

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. selaku dosen pembimbing penulis, yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyusun tugas akhir ini.
2. Orang tua penulis, Bp. Suhartojo Budihartono dan Ibu Yenny Widjaja, dan kedua adik penulis, Clairine dan Sharon, atas doa dan dukungannya terhadap penulis dalam menyusun tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., Bapak Nur Ikhwan, S.T.,M.Eng., Bapak Dr.Wawan Aries Widodo, dan Ibu Vivien Suphandani ,S.T., M.E., Ph.D., selaku dosen-dosen penguji seminar proposal dan sidang tugas akhir penulis, atas saran dan kritik untuk tugas akhir ini.
4. Teman-teman kelompok 7 Tugas Akhir Savonius : Bagas, Elza, Festy, Tatya, Dion, Vega, dan Afiyah, atas kebersamaan dan bantuannya selama ini dalam eksperimen dan penyusunan laporan tugas akhir.
5. Teman-teman Laboratorium Perpan : Agung, Alfa, Favian, Shafira, Tri, Mas Fazri, Ajie, dll; Valent, serta arek Happiest Group : Albert, Excel, Kenvar, Kenny W, Fayyadh, Adrian, Yosua, dan Leo, atas kebersamaannya selama ini dalam suka maupun duka. Sampai jumpa di puncak kesuksesan.
6. Teman-teman penulis dari Semarang : Hananta, H.S., Joshua, Antoni, Hadrian, Edo, dan semuanya, atas

hiburannya dikala penulis sedang penat dalam menyusun laporan tugas akhir ini.

7. Teman-teman M59 Teknik Mesin ITS, atas kebersamaannya selama 4 tahun ini.
8. Seluruh pihak yang telah membantu yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, dengan segala keterbatasan pengetahuan penulis, penulisan tugas akhir ini jauh dari sempurna, sehingga penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak agar dapat bermanfaat bagi semua orang.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xxv
DAFTAR SIMBOL .....	xxvii
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	5
1.3. Batasan Masalah.....	7
1.4. Tujuan Penelitian.....	7
1.5. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II .....	9
DASAR TEORI.....	9
2.1. Turbin Angin .....	9
2.2. Turbin Savonius.....	11
2.3. Bilangan Reynolds.....	12
2.4. Gaya Drag.....	14
2.5. Torsi.....	15
2.6. Perhitungan Daya Turbin .....	16
2.6.1. Perhitungan Daya Turbin Teoritis.....	16
2.6.2. Perhitungan Daya Aktual Turbin .....	17

2.7. Coefficient of Power (CoP) .....	18
2.8. Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) .....	19
2.9. Coefficient of Moment ( $C_M$ ) dan Coefficient of Static Torque (Cts).....	20
2.10. Aliran Melalui Silinder.....	22
2.11. Penelitian Terdahulu.....	24
2.11.1. Penelitian Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Silinder Utama .....	24
2.11.2. Penelitian Silinder Pengganggu dengan Pemasangan Tandem .....	26
2.11.3. Peningkatan Performa Turbin Savonius dengan Variasi Geometri .....	29
2.11.4 Penelitian untuk Meningkatkan Performa Turbin Savonius dengan Pemasangan Silinder Pengganggu .....	36
2.11.5 Studi Ekperimental dan Numerik untuk Meningkatkan Performa Turbin Savonius dengan Pemasangan Silinder Pengganggu Tipe I-65°.....	45
2.11.6 Studi Eksperimen Turbin Savonius dengan Penghalang Silinder .....	51
BAB III.....	55
METODOLOGI PERCOBAAN .....	55
3.1. Parameter yang Diukur.....	55
3.2. Analisa Dimensi .....	56
3.2.1. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i> .....	56
3.2.2. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Moment</i> .....	59
3.3. Peralatan .....	61
3.3.1. Axial Fan.....	62



3.3.2. Benda Uji .....	63
3.3.3. Honeycomb .....	65
3.3.4. Instalasi Peralatan .....	66
3.3.5. Alat Ukur .....	68
3.4. Langkah Pengukuran .....	76
3.4.1. Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Dinamis .....	76
3.4.2. Prosedur Penelitian Pengukuran Torsi Statis .....	77
3.5. Flowchart Percobaan .....	80
3.5.1. Flowchart Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Dinamis .....	80
3.5.2. Flowchart Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Statis .....	82
3.6. Perhitungan Uncertainty .....	84
3.7. Pengujian Uniformity .....	88
3.8. Jadwal Penelitian .....	90
BAB IV .....	91
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	91
4.1. Contoh Perhitungan .....	91
4.1.1. Perhitungan Densitas Udara ( $\rho$ ) .....	91
4.1.2. Perhitungan Reynolds Number .....	92
4.1.3. Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> .....	93
4.1.4. Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP) .....	93
4.1.5. Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) .....	94
4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	95

4.2.1. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	95
4.2.2. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum ( $CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin ( $U$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....	98
4.2.3. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	99
4.2.4. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{t0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	102
4.3. Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu.....	105
4.3.1. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s s.d. $9$ m/s. ....	105
4.3.1.1. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s .....	105
4.3.1.2. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s .....	107
4.3.1.3. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5$ m/s .....	110
4.3.1.4. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s .....	112

4.3.1.5. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s .....	114
4.3.1.6. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s .....	116
4.3.1.7. Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9$ m/s .....	118
4.3.1.8. Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) maksimum Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s .....	120
4.3.2. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s.....	123
4.3.2.1. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s .....	123
4.3.2.2. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s .....	125
4.3.2.3. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5$ m/s .....	127
4.3.2.4. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s.....	129
4.3.2.5. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s.....	131

4.3.2.6. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s.....	133
4.3.2.7. Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9$ m/s.....	135
4.3.2.8. Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s .....	137
4.3.3. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s s.d. $9$ m/s.....	140
4.3.3.1. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s.....	140
4.3.3.2. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s.....	141
4.3.3.3. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5$ m/s.....	143
4.3.3.4. Analisa <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s.....	145
4.3.3.5. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s.....	147
4.3.3.6. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s.....	149

4.3.3.7. Analisa Nilai <i>Static Torque Coefficient</i> (Cts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9 \text{ m/s}$ .....	151
4.4. Analisa Perbandingan Eksperimen Turbin Savonius dengan Silinder Pengganggu yang Dilakukan Michael (2020) terhadap Penelitian Prabasworo Drestanto (2019) .....	153
4.5. Analisa Grafik $CoP_{max}/CoP_{0max}$ Turbin Savonius dengan Pengganggu Terhadap Fungsi S/D untuk Tujuh Variasi Kecepatan .....	155
4.6. Analisa Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum Turbin Savonius tanpa pengganggu ( $CoP_{0max}$ ) dengan Turbin dengan pengganggu ( $CoP_{max}$ ).....	158
BAB V .....	161
KESIMPULAN DAN SARAN .....	161
5.1. Kesimpulan.....	161
5.2. Saran.....	162
DAFTAR PUSTAKA.....	163
A. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	165
B. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu .....	180
C. Perhitungan Uncertainty .....	194
BIODATA PENULIS.....	201



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Losses</i> Umum pada Turbin Angin Sederhana (Sutherland,2013).....	10
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonious (Hemami, 2012).....	11
Gambar 2.3 Geometri karakteristik daerah sapuan angin pada sudu turbin .....	13
Gambar 2.4 Skema <i>Drag dan Lift Force</i> (Hemami, 2012).....	14
Gambar 2.5 FBD <i>Brake Dynamometer</i> .....	18
Gambar 2.6 <i>Tip Speed Ratio</i> berbagai jenis turbin (Fox, 2011) ..	20
Gambar 2.7 Skema Aliran Melalui Bola Silinder. Aliran <i>viscous</i> (kanan) dan <i>inviscid</i> (kiri) (Fox, 2011).....	23
Gambar 2.8 Skema Geometri Benda Uji Silinder Utama dan Penghalang (Tsutsui,2002) .....	24
Gambar 2.9 Distribusi <i>Pressure Coefficient</i> (Cp) pada silinder utama (a) Pengaruh Bilangan Reynolds (b) Pengaruh d/D (Tsutsui, 2002).....	25
Gambar 2.10 Grafik Hubungan Bilangan Reynolds terhadap <i>Drag Coefficient</i> (Tsutsui, 2002) .....	25
Gambar 2.11 Skema Geometri Benda Uji Penelitian Silinder Utama dan Silinder Penghalang (Wang, 2006) .....	27
Gambar 2.12 Grafik Rasio <i>Drag</i> dengan Penghalang (D) terhadap <i>Drag</i> tanpa Penghalang (D0) dengan Variasi Posisi dan Ukuran Silinder Penghalang (Wang, 2006).....	28
Gambar 2.13 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan <i>Single stage</i> (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas (Mahmoud, 2010) .....	29
Gambar 2.14 Grafik Hubungan antara <i>Coefficient of Power</i> terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu (Mahmoud, 2010).....	30
Gambar 2.15 Grafik Hubungan <i>Static Torque Coefficient</i> (Cts)terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu (Mahmoud,2010) .....	31

Gambar 2.16 Grafik Hubungan <i>Specific Power</i> terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius <i>Single Stage</i> dan <i>Double Stages</i> (Mahmoud, 2010).....	32
Gambar 2.17 Grafik Hubungan Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi <i>Overlap Ratio</i> (Mahmoud, 2010) .....	33
Gambar 2.18 Grafik Hubungan antara <i>Coefficient of Power</i> terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi <i>Aspect Ratio</i> (Mahmoud, 2010) .....	34
Gambar 2.19 Grafik Hubungan antara <i>Power</i> terhadap Kecepatan Angin Turbin Savonius dengan Keberadaan <i>End Plate</i> (Mahmoud, 2010).....	35
Gambar 2.20 Skema penelitian (Drestanto,2019) .....	37
Gambar 2.21 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP <sub>0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (Drestanto,2019).....	38
Gambar 2.22 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (C <sub>M0</sub> ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (Drestanto,2019).....	39
Gambar 2.23 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Performance</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) dengan S/D = 2,4 dan variasi 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 <sup>4</sup> dan (b) Re = 13,6x10 <sup>4</sup> .(Drestanto,2019) .....	40
Gambar 2.24 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) 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 x 10 <sup>4</sup> dan (b) 13,6 x 10 <sup>4</sup> (Drestanto,2019) .....	42
Gambar 2.25 Grafik Perbandingan Torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Ts) dan tanpa silinder pengganggu (Ts <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada (a) Re = 9,7 x 10 <sup>4</sup> , d/D = 0,5 dan (b) 13,6 x 10 <sup>4</sup> , d/D = 0,6 (Drestanto,2019) .....	44



Gambar 2.26 Konfigurasi turbin Savonius dan silinder penghalang (a) dan <i>brake dynamometer</i> (b) (Gunawan,2019) .....	46
Gambar 2.27 Skema eksperimen Turbin Savonius (Gunawan,2019).....	46
Gambar 2.28 Deskripsi Skema Simulasi 3D dan <i>Boundary Condition</i> pada <i>y-axis</i> (Gunawan,2019).....	47
Gambar 2.29 Konfigurasi <i>mesh</i> untuk Simulasi CFD Turbin (a) <i>wake zone</i> dan <i>fixed zone</i> secara isometric (b) Silinder tipe I-65° diplot pada <i>y-axis</i> (Gunawan,2019) .....	47
Gambar 2.30 Perbandingan distribusi tekanan hasil Simulasi CFD Turbin sebelum (konvensional) dan sesudah diberi silinder penghalang tipe I-65° pada TSR = 0,7; Re = 9,9 x10 <sup>4</sup> ; dan S/D =1,4; (a) 30° sudut turbin konvensional, (b) 30° sudut turbin dengan silinder penghalang I-65°, (c). 90° sudut turbin konvensional, dan (d). 90° sudut turbin dengan silinder I-65° (Gunawan,2019) .....	48
Gambar 2.31 Perbandingan <i>Power Coefficient</i> (Cp) secara Eksperimen dan Numerik Turbin Savonius sebelum dan sesudah diberi silinder penghalang (Gunawan,2019) .....	49
Gambar 2.32 Perbandingan Torsi statis turbin sebelum dan sesudah diberi silinder penghalang (Gunawan,2019) .....	50
Gambar 2. 33 Skema turbin Savonius (Rustam,2018).....	51
Gambar 2.34 Grafik <i>Coefficient of Power</i> Turbin tanpa Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) (Rustam, 2018) .....	52
Gambar 2.35 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu (CoP/CoP <sub>0</sub> ) sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada Re = 9,7 x 10 <sup>4</sup> (Rustam, 2018) .....	53
Gambar 3.1 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius Tampak Atas dan Samping.....	55
Gambar 3.2 <i>Axial fan CKE SPV-18</i> .....	62
Gambar 3.3 Skema Turbin Angin Savonius.....	64
Gambar 3.4 Skema Silinder Pengganggu .....	65
Gambar 3.5 <i>Honeycomb (mm)</i> .....	65

Gambar 3.6 Instalasi Susunan Peralatan Penelitian.....	67
Gambar 3.7 Skema Susunan Peralatan Penelitian dan Dimensinya (mm) .....	68
Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12.....	69
Gambar 3.9 Anemometer .....	70
Gambar 3.10 Susunan <i>brake dynamometer</i> .....	72
Gambar 3. 11 <i>Torque meter</i> LUTRON model TQ-8800.....	73
Gambar 3.12 <i>Voltage Regulator</i> .....	74
Gambar 3.13 Neraca Pegas.....	75
Gambar 3.14 Massa pemberat .....	76
Gambar 3.15 Posisi pengukuran <i>uniformity test</i> .....	88
Gambar 3.16 Grafik Distribusi Kecepatan (a) Horizontal (b) Vertikal.....	89

Gambar 4.1 Grafik <i>Coefficient of Power</i> ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	96
Gambar 4.2 Grafik <i>Coefficient of Power</i> maksimum ( $CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin ( $U$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	98
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu .....	100
Gambar 4.4 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) bukaan turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu .....	102
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 3,8$ m/s .....	106
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 4,4$ m/s .....	108

Gambar 4.7 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 5 m/s .....	110
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 6 m/s .....	112
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 7 m/s .....	115
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 8 m/s .....	117
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP <sub>0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 9 m/s .....	119
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (C <sub>M</sub> ) dan tanpa silinder pengganggu (C <sub>M0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 3,8 m/s .....	124
Gambar 4.13 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (C <sub>M</sub> ) dan tanpa silinder pengganggu (C <sub>M0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 4,4 m/s .....	126
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (C <sub>M</sub> ) dan tanpa silinder pengganggu (C <sub>M0</sub> ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin U = 5 m/s .....	128
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (C <sub>M</sub> ) dan tanpa silinder	

pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 6$ m/s .....	130
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 7$ m/s .....	132
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 8$ m/s .....	134
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin $U = 9$ m/s .....	136
Gambar 4. 19 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 3,8$ m/s .....	140
Gambar 4. 20 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 4,4$ m/s .....	142
Gambar 4. 21 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 5$ m/s .....	144
Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 6$ m/s .....	146
Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 7$ m/s .....	148

Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 8 \text{ m/s}$ .....	150
Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan <i>Static Torque Coefficient</i> ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin $U = 9 \text{ m/s}$ .....	152
Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan $CoP_{max}/CoP_{0max}$ Turbin Savonius dengan pengganggu terhadap Fungsi S/D untuk Tujuh Variasi Kecepatan ( $3,8 \text{ m/s} - 9 \text{ m/s}$ ).....	156
Gambar 4. 27 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> maksimum Turbin Savonius tanpa pengganggu ( $CoP_{0max}$ ) dengan Turbin dengan pengganggu ( $CoP_{max}$ ) pada tujuh variasi kecepatan ( $3,8 \text{ m/s} - 9 \text{ m/s}$ ).....	158

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Dimensi Primer Parameter COP.....	57
Tabel 3.2 Dimensi Primer Parameter $C_M$ .....	60
Tabel 3. 3 Spesifikasi <i>Axial fan</i> CKE SPV-18 .....	62
Tabel 3. 4 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12.....	69
Tabel 3.5 Spesifikasi OMEGA HHF141 Digital Anemometer ...	70
Tabel 3. 6 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800 .	73
Tabel 3.7 Spesifikasi <i>Voltage Regulator</i> Model TDGC 2J-3 .....	74
Tabel 3. 8 Spesifikasi Neraca Pegas.....	75
Tabel 3.9 Hasil Perhitungan <i>Uncertainty</i> Pengukuran .....	88
Tabel 4. 1 Perbandingan nilai $CoP_{max}$ dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s.....	121
Tabel 4. 2 <i>Uncertainty</i> $CoP_{max}$ Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu $S/D = 2,4$ ; pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s .....	121
Tabel 4. 3 Perbandingan nilai $C_{Mmax}$ dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu $S/D = 2,4$ pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s .....	138
Tabel 4. 4 <i>Uncertainty</i> $C_{Mmax}$ Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu $S/D = 2,4$ pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s .....	138
Tabel 4. 5 Perbandingan Eksperimen Turbin dengan dan tanpa Penganngu antara Penelitian Prabasworo (2019) dan Michael Lawrence (2020).....	154
Tabel A. 1 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s.....	165
Tabel A. 2 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s .....	166
Tabel A. 3 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s .....	167

Tabel A. 4 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s .....	169
Tabel A. 5 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s .....	171
Tabel A. 6 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s .....	173
Tabel A. 7 Data Penelitian Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s .....	175
Tabel A. 8 Data Torsi Statis Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s .....	177
Tabel A. 9 Data <i>Static Torque Coefficient</i> (Cts) Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s .....	178
Tabel B. 1 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s.....	180
Tabel B. 2 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s .....	181
Tabel B. 3 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s .....	182
Tabel B. 4 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s .....	184
Tabel B. 5 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s .....	185
Tabel B. 6 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s .....	187
Tabel B. 7 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s .....	188
Tabel B.8 Data Torsi Statis Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s .....	190
Tabel B. 9 Data <i>Static Torque Coefficient</i> Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s .....	191



## DAFTAR SIMBOL

CoP	<i>Coefficient of Power</i> turbin
CoP <sub>0</sub>	<i>Coefficient of Power</i> turbin tanpa silinder pengganggu
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
b	Diameter <i>overlap</i> (m)
C <sub>D</sub>	<i>Coefficient of Drag</i>
C <sub>M</sub>	<i>Coefficient of Moment</i> turbin
C <sub>M0</sub>	<i>Coefficient of Moment</i> turbin tanpa silinder pengganggu
d	Diameter silinder pengganggu (m)
D <sub>0</sub>	Diameter <i>end plates</i> (m)
A	<i>Cross sectional area</i> (m <sup>2</sup> )
F <sub>D</sub>	Gaya <i>drag</i> (N)
m	Massa pemberat (kg)
PW	Daya kinetik angin (Watt)
Pr	Daya aktual turbin (Watt)
R	Jari-jari turbin (m)
r	Jari-jari silinder atau poros turbin (m)
Re	Bilangan Reynolds
T <sub>D</sub>	Torsi dinamis turbin (N.m)
T <sub>s</sub>	Torsi statis dari putaran poros (N.cm)
T <sub>s0</sub>	Torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (N.cm)
U	Kecepatan aliran fluida (m/s)
y	Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
S	Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)

s	Massa yang terbaca pada neraca pegas (kgf)
T	Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )
g	gaya gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
h	Tinggi silinder pengganggu (m)
L	Panjang karakteristik turbin angin Savonius (m)
$\rho$	Massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	Viskositas dinamis ( $\text{Ns/m}^2$ )
$\omega$	Kecepatan sudut turbin angin Savonius ( $\text{rad/s}$ )
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
$\Theta$	Sudut sudu turbin angin Savonius ( $^{\circ}$ )

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Menurut Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang disusun oleh Dewan Energi Nasional (DEN) dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Indonesia telah menetapkan target potensi penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) yang mampu mencapai bauran energi sebesar 23% pada 2025. Pada kenyataannya, menurut data dari PLN, sampai saat ini bauran energi baru mencapai kisaran 13,42%. Menurut data dari BMKG, di tahun 2019 ini kecepatan angin rata-rata di Indonesia relatif rendah, antara 2-6 m/s saja. Di samping itu, Indonesia sendiri memiliki potensi energi angin sebesar 970 MW yang belum sepenuhnya dimanfaatkan, sehingga pemerintah telah mencanangkan megaprojek Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dengan kapasitas total sebesar 1,72 GW yang tersebar di seluruh pelosok negeri, yang dimulai pada tahun 2018 lalu dimana telah diresmikan Sidrap, Sulawesi Selatan yang berkapasitas 75 MW. Selain itu terdapat proyek-proyek PLTB lainnya seperti Sukabumi dan Jeneponto (350 MW), Lebak dan Pandeglang (300 MW), Bantul (50 MW), dan masih banyak lagi.

Pemanfaatan energi angin di PLTB sendiri diaplikasikan pada turbin angin, yang berdasarkan sumbu putarnya terbagi menjadi 2 jenis yaitu *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* dan *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*. Turbin angin HAWT, seperti yang telah diresmikan di Sidrap, merupakan jenis turbin angin yang memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan turbin angin VAWT, namun biaya perawatannya lebih mahal dan mekanismenya cukup rumit karena menggunakan system roda gigi dan yawning. Turbin angin VAWT sendiri memiliki mekanisme yang lebih simple walaupun efisiensinya lebih rendah, cocok untuk penggunaan di daerah yang kecepatan anginnya relative rendah.

Salah satu jenis turbin angin VAWT yang sering dijumpai adalah Turbin Savonius, yang pertama kali ditemukan pada tahun 1922 oleh Sigurd Johannes Savonius. Turbin Savonius ini memiliki bentuk yang cukup sederhana yaitu menyerupai huruf “S” yang memampukan turbin ini menerima energi angin dari segala arah dan dengan kecepatan yang rendah. Oleh karena bentuknya yang cukup sederhana, maka biaya yang dibutuhkan untuk membuat turbin savonious menjadi lebih murah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan menggunakan prinsip perbedaan gaya drag yang dihasilkan pada masing-masing sudu turbin yang berbentuk cembung (*advancing blade*) dan cekung (*returning blade*) dari aliran angin yang selanjutnya menghasilkan torsi dan membuat rotor turbin berputar. Putaran rotor turbin ini kemudian diubah oleh generator menjadi energi listrik. Kelemahan dari Turbin Savonius seperti yang sudah disebutkan di atas adalah termasuk salah satu tipe turbin angin yang memiliki efisiensi paling rendah (di kisaran 10-20% saja), oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan efisiensi dari turbin angin tipe Savonius ini. Pada penelitian kali ini akan digunakan silinder penghalang sebagai variasi penelitian untuk meningkatkan performa turbin; oleh karena itu dibutuhkan beberapa literature penelitian pendukung dalam penelitian kali ini. Berikut merupakan beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Tsutsui & Igarashi (2002)**, mengenai aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder sirkular lain. Variasi yang digunakan adalah variasi jarak antara kedua pusat silinder ( $L/D$ ), diameter silinder pengganggu dan harga bilangan Reynolds pada rentang  $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$ . Hasil penelitian ini adalah bahwa penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds ( $Re$ ) serta variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* di belakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Jin Jun Wang (2006)**, menggunakan penghalang berupa silinder yang diletakkan di depan silinder sirkular utama yang berdiameter  $D = 60$  mm dan mengamati pengaruhnya terhadap pengurangan gaya drag pada bagian advancing blade sehingga torsi yang dihasilkan meningkat. Rasio jarak antara titik pusat silinder penghalang dengan titik pusat silinder sirkular terhadap diameter silinder utama ( $L/D$ ) yang digunakan pada percobaan ini bervariasi antara 1.5-4, dan variasi rasio silinder penghalang dibanding silinder utama yaitu ( $d/D$ ) 0,1-0,5. Selain itu divariasikan juga posisi sudut silinder pengganggu terhadap sumbu horizontal yaitu  $\alpha = 0^\circ - 45^\circ$ . Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan bilangan Reynolds 82000. Hasil dari penelitian tersebut yaitu didapatkan nilai optimum pengurangan *drag* yang terjadi pada  $d/D = 0,5$  dengan susunan tandem  $\alpha=0^\circ$ . Pengurangan nilai *drag* dengan menggunakan silinder penghalang tersebut sebesar 2,34% dibandingkan dengan tanpa silinder penghalang.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **N.H. Mahmoud et al (2010)**, dimana untuk meningkatkan performa turbin, digunakan variasi pada jumlah sudu (2,3, dan 4 sudu), *stage* turbin (*single* dan *double stage*), *overlap ratio* ( $\beta$ ) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan 0,35, *aspect ratio* ( $\alpha$ ) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5, dan ada tidaknya *end plate*. Berdasarkan eksperimen tersebut didapatkan hasil bahwa turbin angin dengan jumlah sudu 2 lebih efisien dibandingkan dengan sudu 3 atau 4; turbin angin dengan *double stages* lebih efisien dibandingkan dengan *single stage*, kemudian turbin dengan *end plates* lebih efisien dibandingkan tanpa *end plates*.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Jasmi Aprilia Rustam (2018)**, untuk meneliti pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius terhadap performa turbin tersebut. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $d/D$ ) = 0,5 ; dan nilai  $y/D = 0,0; 0,25; 0,5$ . dan dengan rasio

jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 2,0. Penelitian dilakukan *pada open circuit wind tunnel* dengan variasi Bilangan Reynolds  $Re = 9,7 \times 10^4$ ;  $14,5 \times 10^4$ ;  $17,8 \times 10^4$ . Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemberian pengganggu efektif meningkatkan performa turbin, dimana performa terbaiknya didapatkan pada  $(y/D) = 0,5$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ , dengan *Coefficient of Power* yang meningkat 1,062 kali dan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) meningkat 1,041 kali dibandingkan dari tanpa silinder pengganggu.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Prabasworo Drestanto (2019)**, penelitian dilakukan untuk membandingkan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan menggunakan silinder pengganggu. Digunakan variasi jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 2,4 dan variasi bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ , dengan variasi rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,1 – 1,0. Hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berukuran  $(d/D) = 0,5$  di depan *returning blade* pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  adalah yang paling efektif meningkatkan performa turbin.

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Sakti et al. (2019)**, penelitian secara studi eksperimen dan simulasi numerik ini dilakukan untuk membandingkan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan menggunakan silinder pengganggu tipe I-65°. Digunakan variabel jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 1,4 dan variasi bilangan Reynolds =  $9,9 \times 10^4$ . Hasil eksperimen tersebut menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu tipe I-65° efektif meningkatkan performa turbin. Turbin Savonius dengan silinder pengganggu tipe I-65° memiliki performa yang lebih baik dimana *Power Coefficient* turbin mengalami kenaikan sebesar 23,61 % (secara eksperimen) dan

25,32 % (secara simulasi numerik) dibanding saat sebelum diberi silinder pengganggu.

Pada penelitian kali ini akan dilakukan pengujian performa Turbin Savonius dengan peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin ( $d/D$ ) sebesar 0,5 dan variasi pada jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 2,4; serta variasi pada kecepatan angin yang melewati turbin yaitu sebesar 3,8; 4,4; 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Selain itu digunakan juga *endplate* pada turbin ini karena berdasarkan penelitian sebelumnya, penggunaan *endplate* menghasilkan performa turbin yang paling baik. Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, belum pernah dilakukan penelitian dengan penggunaan silinder penghalang dengan menggunakan variasi pada kecepatan angin yang digunakan di atas, sehingga penelitian ini dapat dilakukan untuk menguji dan meningkatkan performa turbin dan mengetahui pengaruh variasi kecepatan angin pada performa turbin.

## 1.2. Rumusan Masalah

Turbin Savonius merupakan turbin dengan jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yang mempunyai konstruksi rotor tegak lurus dengan sumbu vertical. Turbin Savonius memiliki 2 sudu yang masing-masing memiliki bentuk setengah lingkaran yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* adalah sudu yang memberikan gaya drag lebih besar karena arah putarnya searah dengan arah aliran angin, sedangkan *returning blade* adalah sudu yang berputar melawan arah aliran angin. Daya yang dihasilkan dari putaran turbin didapatkan dari perbedaan torsi yang dihasilkan masing-masing sudu, dimana semakin besar selisih torsi yang dihasilkan maka semakin besar daya yang dihasilkan. Untuk memperbesar selisih torsi yang dihasilkan turbin maka selisih gaya drag yang dihasilkan harus besar pula, yang berarti dapat dilakukan metode memperbesar gaya drag pada *advancing blade* atau mengurangi gaya drag pada *returning blade*. Pada penelitian

ini, digunakan metode pengurangan gaya drag pada *returning blade* dengan menambahkan silinder pengganggu. Oleh karena itu, hipotesa yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan munculnya *wake* di daerah depan *returning blade* yang menyebabkan turunnya tekanan di daerah tersebut, dan naiknya tekanan di belakang *returning blade*. Hal ini menyebabkan *pressure drag* pada *returning blade* kecil sehingga akan menghasilkan gaya *drag* yang lebih kecil pula. Gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang rendah menyebabkan selisih gaya drag antara *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar sehingga menyebabkan selisih nilai torsi yang dihasilkan semakin besar. Nilai daya yang dihasilkan turbin sebanding dengan meningkatnya torsi sehingga dayanya juga pada akhirnya meningkat.
2. Ketika silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* maka saat dialiri angin akan terbentuk *shear layer* pada silinder pengganggu tersebut. *Shear layer* ini kemudian jatuh di permukaan *returning blade* sehingga mempengaruhi bentuk *boundary layer* aliran angin pada permukaan *returning blade*, dimana lebih cepat terbentuk *turbulent boundary layer* pada *returning blade* sehingga titik separasi mundur dan menyebabkan *wake* yang terbentuk menyempit. Hal ini akan menghasilkan gaya drag pada *returning blade* akan lebih kecil serta menyebabkan selisih torsi dan daya turbin semakin besar.
3. Digunakan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 ; 4,4 ; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s. Semakin tinggi kecepatan angin, maka daya masukan pada turbin semakin meningkat sehingga *Coefficient of Power* (CoP) turbin meningkat; namun CoP akan sampai pada titik maksimum tertentu pada kecepatan optimumnya, kemudian performa turbin akan turun karena *losses* yang semakin besar pula. Pada penelitian ini akan



dicari pada kecepatan optimum berapakah *Coefficient of Power* turbin berada pada titik maksimum.

### 1.3. Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan batasan masalah sebagai berikut:

1. Aliran udara/angin adalah aliran *external, steady, incompressible*, dan *uniform*.
2. Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu Turbin Savonius ( $d/D$ ) sebesar 0,5.
3. *Aspect Ratio* ( $H/L$ ) sebesar 1.
4. Rasio jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat sudu Turbin Savonius ( $S/D$ ) adalah 2,4.
5. Variasi kecepatan angin sebesar 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s.

### 1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius terhadap peningkatan performa turbin. Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu Turbin Savonius ( $d/D$ ) = 0,5; sedangkan rasio jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat sudu turbin Savonius ( $S/D$ ) adalah 2,4; dan variasi kecepatan angin 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s. Performa turbin diukur dengan menentukan Torsi statis, dinamis, *Coefficient of Power* (CoP), dan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ).

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian tugas akhir ini adalah mengetahui dan menjelaskan pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin angin Savonius terhadap besar nilai torsi statis, torsi dinamis, *Coefficient of Power* (CoP), dan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) yang dihasilkan turbin Savonius.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB II

### DASAR TEORI

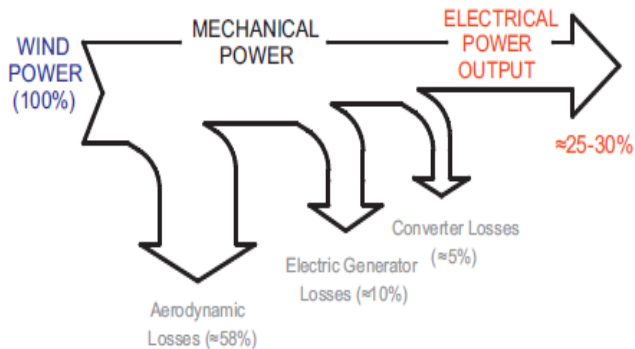
#### 2.1. Turbin Angin

Turbin angin merupakan salah satu mesin pengkonversi energi yang memanfaatkan energi kinetik angin untuk diubah menjadi energi mekanik untuk menggerakkan rotor turbin. Turbin angin merupakan suatu media alternatif untuk memanen sumber energi terbarukan yang sedang banyak dikembangkan karena menipisnya sumber energi seperti minyak bumi dan bahan bakar fosil. Di samping itu penggunaannya yang ramah lingkungan dan hanya membutuhkan energi angin sebagai penggeraknya membuat turbin angin banyak digunakan di kalangan masyarakat hingga pada pembangkit listrik di beberapa tempat, dari kapasitas yang kecil hingga sangat besar. Secara umum komponen turbin angin terdiri dari rotor, sudu yang melekat pada rotor, generator, dan struktur menara. Adapun kerja dari turbin angin adalah aliran angin memutar sudu-sudu yang terpasang pada poros turbin. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk memutar generator agar menghasilkan listrik. Turbin angin yang ada saat ini secara umum terbagi menjadi 2 berdasarkan posisi porosnya, yaitu *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT).

*Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah turbin angin yang menggunakan poros turbin horizontal yang sejajar dengan arah datangnya aliran angin. Turbin angin ini bisa berputar pada kecepatan angin yang lebih tinggi dan konstan, sehingga biasanya diletakkan di ketinggian tertentu seperti di pegunungan atau menggunakan menara tinggi, termasuk seluruh komponen-komponennya seperti generator dan sudunya. Selain itu turbin jenis ini hanya mampu menerima aliran angin dari satu arah saja. Umumnya gaya yang bekerja pada turbin jenis ini adalah gaya *lift*.

Turbin jenis ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan jenis VAWT karena sudu-sudunya selalu bergerak tegak lurus terhadap arah aliran angin sehingga semakin tinggi kecepatan angin maka daya yang dihasilkan turbin jenis ini akan semakin besar pula. Kekurangan yang dimiliki oleh turbin jenis ini yaitu posisi sudu harus selalu disesuaikan dengan arah angin dengan sistem *yaw*, semakin tinggi menara dan semakin panjang sudu, maka semakin besar biaya instalasi, lalu dibutuhkan sistem pengeraman untuk mencegah putaran sudu yang terlalu kencang akibat angin yang mempunyai kecepatan tinggi.

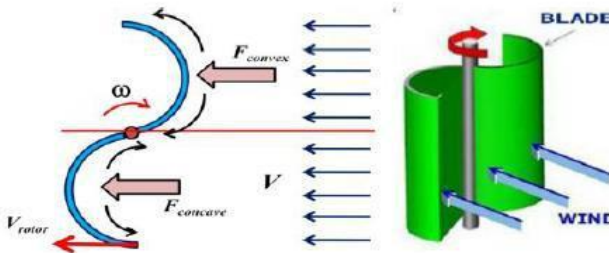
*Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah turbin angin yang menggunakan poros turbin vertikal atau tegak lurus dengan arah datangnya aliran angin. Turbin ini memiliki konstruksi yang lebih sederhana dan ekonomis jika dibandingkan HAWT, serta mampu beroperasi di kecepatan rendah dan dapat beroperasi dengan aliran angin dari segala arah. Secara umum turbin jenis ini terbagi menjadi 2 jenis berdasar gaya yang ditimbulkan untuk memutar sudunya yaitu *drag type* (contoh : Turbin Savonius) dan *lift type* (contoh : Turbin Darrieus, Turbin H). Kekurangan turbin jenis ini adalah efisiensinya yang sangat rendah dibandingkan turbin HAWT.



Gambar 2. 1 *Losses* Umum pada Turbin Angin Sederhana  
(*Sutherland, 2013*)

Seperti mesin konversi energi lainnya, turbin angin juga memiliki keterbatasan dimana tidak semua energi angin yang diserap dapat sepenuhnya dikonversikan menjadi energi listrik karena ketika komponen-komponen turbin bergerak maka akan menghasilkan *losses*. *Losses* ini yang menyebabkan turbin memiliki efisiensi yaitu rasio daya netto yang dihasilkan setelah mengalami *losses* terhadap daya input turbin dari angin. Gambar 2.1 menunjukkan *losses* umum yang timbul pada turbin angin sederhana. Bentuk *airfoil* atau sudut turbin menghasilkan gaya aerodinamik yang berbeda-beda, dan berdasarkan Hukum *Betz Limit* dimana turbin angin hanya mampu mengkonversi maksimal 59% dari total energi angin yang melewati turbin. Selain itu *losses* juga ditimbulkan oleh gesekan antar komponen mekanikal turbin seperti poros dan *bearing*, serta pada sistem konversi elektrik seperti generator dan *converter* mengakumulasi sekitar 15% *losses* yang dihasilkan. Secara umum akibat *losses-losses* tersebut maka efisiensi rata-rata turbin angin yang dihasilkan hanya berkisar 25-30% saja, tergantung pada jenis turbin dan komponen yang digunakan.

## 2.2. Turbin Savonius



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin Savonius (*Hemami, 2012*)

Turbin angin Savonius merupakan salah satu contoh turbin *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan pertama kali ditemukan

oleh Sigurd Johannes Savonius di tahun 1922. Turbin ini memiliki sudu berbentuk setengah lingkaran dan menyerupai huruf “S”. Pada umumnya terdapat 2 sudu pada turbin ini, yaitu sudu yang berbentuk cembung disebut *returning blade* dan sisi cekung yang disebut *advancing blade*. Turbin ini berputar dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag* pada sudu – sudunya yang menghasilkan resultan torsi dimana gaya *drag* pada *advancing blade* lebih besar daripada *returning blade*.

### 2.3. Bilangan Reynolds

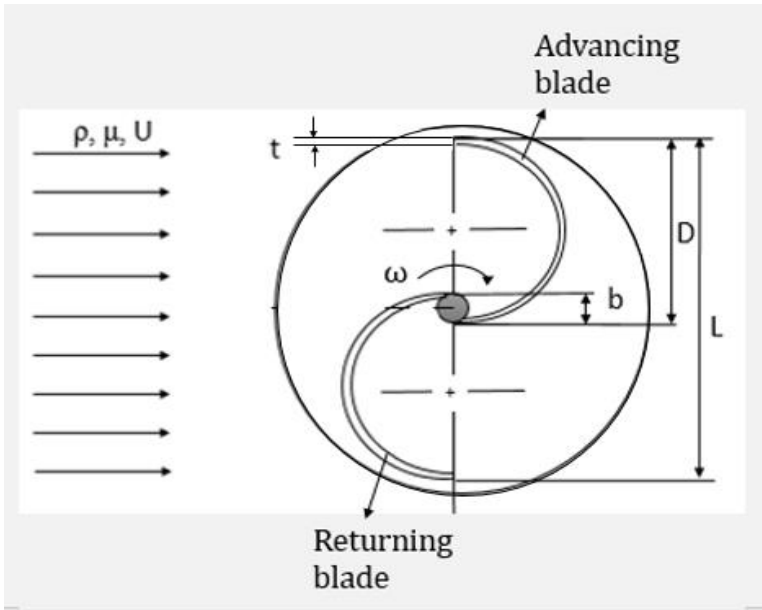
Bilangan Reynolds adalah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan apakah suatu aliran bersifat laminar, transisi, atau turbulen. Persamaan umum untuk Bilangan Reynolds adalah sebagai berikut :

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

Dimana :

- $\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $U$  : kecepatan aliran angin (m/s)
- $L$  : panjang karakteristik sapuan angin pada turbin (m)
- $\mu$  : viskositas dinamis fluida ( $\text{Ns/m}^2$ )

Berikut adalah gambar geometri karakteristik daerah sapuan angin pada turbin :



Gambar 2.3 Geometri karakteristik daerah sapuan angin pada sudu turbin

Berdasarkan gambar 2.3 di atas, persamaan 2.1 dapat diubah menjadi:

$$Re = \frac{\rho U (2D - b - 2t)}{\mu} \quad (2.2)$$

Dimana:

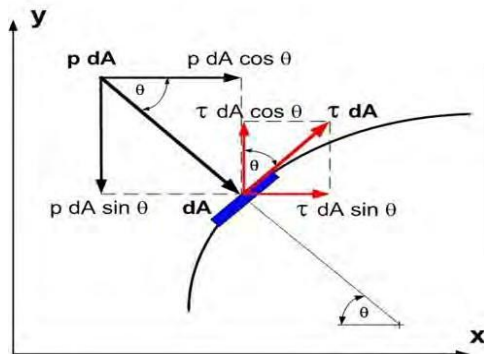
$D$  : diameter sudu turbin (m)

$b$  : diameter poros turbin (m)

$t$  : tebal sudu turbin (m)

## 2.4. Gaya Drag

Gaya drag adalah gaya hambat yang timbul akibat dari aliran fluida masuk ke daerah aliran *viscous*, yaitu aliran dikenai tegangan geser pada permukaan benda yang dilewatinya. Pada dasarnya besar gaya drag dari aliran fluida yang melintasi suatu benda bergantung pada luasan benda yang menerima gaya drag, kecepatan aliran, viskositas, dan densitas fluida. Gaya drag yang terjadi dapat berupa *Skin friction drag* (FDf), yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial, yang disebabkan oleh adanya viskositas aliran angin, dan *pressure drag* (FDp) yaitu gaya hambat tegak lurus permukaan benda yang timbul akibat adanya tekanan fluida; sebagaimana dijelaskan dalam gambar 2.4 dibawah berikut :



Gambar 2.4 Skema Drag dan Lift Force (Hemami, 2012)

Gaya drag dapat disimpulkan sebagai resultan dari *Skin friction drag* (FDf), yaitu integrasi dari seluruh permukaan luasan elemen benda yang dilewati gaya drag ( $dA$ ) terhadap gaya  $\tau dA$ , dan *pressure drag* (FDp), yaitu integrasi dari seluruh permukaan luasan benda terhadap gaya  $p \, dA$ .

$$F_D = FD_f + FD_p \quad (2.3)$$



$$F_D = \int \cos \theta \cdot (p \cdot dA) + \int \sin \theta \cdot (\tau \cdot dA) \quad (2.4)$$

Selain itu gaya drag juga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (2.5)$$

Dimana :

$F_D$  = Gaya drag (N)

$C_D$  = *Coefficient of Drag*

$\rho$  = Massa jenis fluida yang mengalir (kg/m<sup>3</sup>)

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

$A$  = Luasan depan benda yang terkena aliran fluida (m<sup>2</sup>)

*Coefficient of Drag* sendiri adalah bilangan tak berdimensi yang dimiliki suatu benda yang nilainya tergantung pada geometri bendanya. Pada turbin Savonius, nilai *Coefficient of Drag* pada sisi *advancing blade* memiliki nilai lebih besar dibandingkan dengan sisi *returning blade*, sehingga karena itu gaya drag pada *advancing blade* lebih besar daripada *returning blade* sehingga menghasilkan torsi yang membuat turbin dapat berputar.

## 2.5. Torsi

Torsi adalah nilai kuantitatif dari suatu gaya yang dapat menyebabkan suatu benda yang memiliki poros pusat dengan jari-jari tertentu dapat berputar. Torsi memiliki hubungan dengan gaya drag turbin, melalui persamaan berikut :

$$T_s = F_D \cdot R = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A R \quad (2.6)$$

Dimana :

$T_s$  = Torsi yang dihasilkan turbin (Nm)

$F_D$  = Gaya drag pada sudu turbin (N)

$R$  = jari-jari turbin (m)

## 2.6. Perhitungan Daya Turbin

Turbin angin merupakan sebuah sistem yang mengkonversikan energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapat dikonversikan menjadi daya, sebagai indikator performa dari turbin angin Savonius.

### 2.6.1. Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Putaran poros turbin adalah reaksi dari aliran angin dengan kecepatan sebesar  $U$  yang menabrak turbin. Besarnya energi kinetik dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Ek = \frac{1}{2} mU^2 \quad (2.7)$$

Besarnya laju Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin angin secara teoritis dipengaruhi oleh energi kinetik dari angin dan laju aliran massa. Berikut persamaan daya yang dihasilkan:

$$P_w = \frac{Ek}{t} = \frac{1}{2} \dot{m}U^2 \quad (2.8)$$

dimana *mass flow rate* (kg/s), sebagai berikut :

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

Sehingga daya yang dihasilkan oleh angin adalah

$$P_w = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (2.10)$$

Pada penelitian ini luas penampang aliran ( $A$ ) merupakan luas permukaan turbin yang tegak lurus dengan arah aliran fluida, sesuai dengan persamaan 2.2 :

$$A = (2D - b - 2t).H \quad (2.11)$$

Dimana :

- $P_W$  : Daya kinetik angin (Watt)
- $E_k$  : Energi kinetik (Joule)
- $\rho$  : massa jenis fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A$  : luas penampang ( $\text{m}^2$ )
- $U$  : kecepatan aliran fluida (m/s)
- $H$  : tinggi turbin angin Savonius (m)

### 2.6.2. Perhitungan Daya Aktual Turbin

Perhitungan daya aktual turbin ( $P_T$ ) menggunakan rumus berikut:

$$P_T = T_D \cdot \omega \quad (2.12)$$

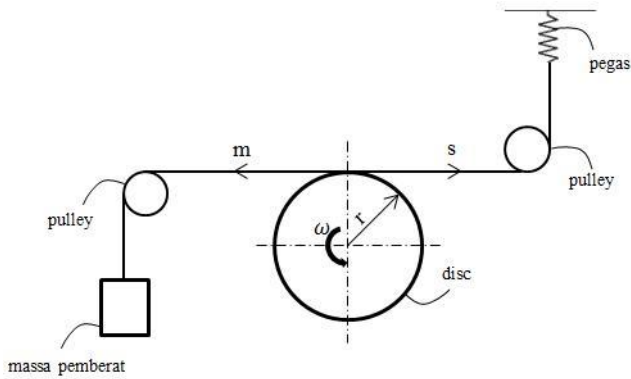
dengan

- $P_T$  : Daya aktual turbin (Watt)
- $T_D$  : Torsi dinamis turbin (Nm)
- $\omega$  : Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

Dimana

$$\omega = \frac{2\pi.n}{60} \quad (2.13)$$

Torsi dinamis adalah torsi minimum yang diperlukan untuk berputar saat poros turbin mulai berputar. Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis ( $T_D$ ), maka digunakan mekanisme *brake dynamometer* yang diterapkan pada poros turbin angin Savonius. Pengukuran yang dilakukan dapat dilihat dari pengukuran massa beban yang diberikan serta pembacaan pada neraca pegas. Skema mekanisme tersebut dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 FBD Brake Dynamometer

Torsi dinamis dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned}
 T_D &= F \cdot r \\
 &= |m - s| \cdot g \cdot r
 \end{aligned}
 \quad (2.14)$$

Dimana:

$m$  = Massa pemberat (kg)

$s$  = Massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)

$g$  = Gaya gravitasi ( $m/s^2$ )

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

Dengan persamaan-persamaan di atas, didapatkan persamaan untuk daya actual turbin sebagai berikut :

$$P_T = |m - s| \cdot g \cdot r \cdot \omega
 \quad (2.15)$$

## 2.7. Coefficient of Power (CoP)

*Coefficient of Power* adalah sebuah bilangan tak berdimensi yang menentukan seberapa besar performa suatu turbin angin.

Secara harafiah *Coefficient of Power* diartikan sebagai perbandingan daya actual yang dihasilkan turbin ( $P_T$ ) dengan daya teoritis dari aliran angin yang melewati turbin ( $P_w$ ). Nilai CoP selalu lebih kecil dari pada 1, sehingga daya yang dihasilkan turbin selalu lebih kecil dari daya yang diberikan oleh angin.

$$\text{CoP} = \frac{P_T}{P_w} = \frac{T_D \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} = \frac{|m - s| \cdot g \cdot r \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.16)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.13, maka persamaan 2.16 dapat diubah menjadi :

$$\text{CoP} = \frac{|m - s| \cdot g \cdot r \cdot \pi \cdot n}{15 \rho A U^3} \quad (2.17)$$

## 2.8. Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )

*Tip Speed Ratio* adalah bilangan yang menyatakan perbandingan antara kecepatan putar (tangensial) turbin terhadap kecepatan angin. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} = \frac{\omega 0,5 L}{U} \quad (2.18)$$

Dimana :

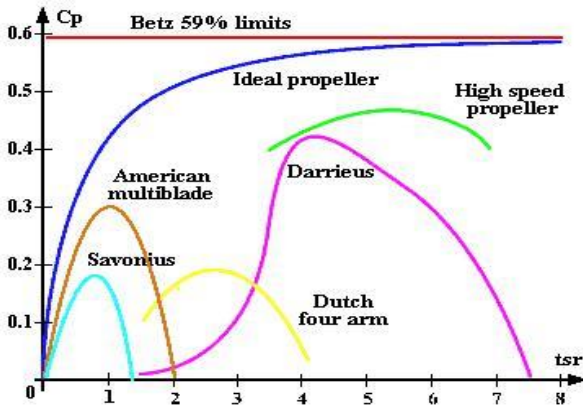
$\lambda = \text{Tip Speed Ratio}$

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

$R = \frac{1}{2} L =$  jari-jari turbin (m)

$U =$  kecepatan angin (m/s)

Hubungan *Tip Speed Ratio* dengan *Coefficient of Power* (COP) dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.6 Tip Speed Ratio berbagai jenis turbin (Fox, 2011)

Berdasarkan gambar 2.6 dapat disimpulkan bahwa ketika nilai TSR semakin meningkat maka nilai CoP nya akan meningkat juga hingga mencapai titik optimumnya, kemudian nilai CoP akan menurun seiring dengan meningkatnya nilai TSR sebagai akibat dari meningkatnya juga *losses*. Seperti mesin konversi energy lainnya, sebuah turbin angin juga tidak mampu untuk mengkonversi 100% semua energi angin yang diterima, sehingga performa turbin angin dibatasi oleh *Betz Limit.*, dimana CoP maksimum yang mampu dihasilkan oleh turbin angin adalah 0,593 (59,3%). Turbin Savonius sendiri memiliki CoP dan TSR yang relatif rendah dibandingkan jenis turbin lainnya (sekitar 0,1 hingga 0,2 saja).

## 2.9. Coefficient of Moment ( $C_M$ ) dan Coefficient of Static Torque ( $C_t$ )

*Coefficient of Moment* adalah rasio torsi dinamis turbin terhadap torsi teoritis yang dihasilkan angin yang melalui sudu-sudu pada turbin Savonius. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$C_M = \frac{T_D}{T_t} \quad (2.19)$$

Dimana:

$T_D$  : Torsi Dinamis turbin

$T_t$  : Torsi Teoritis turbin

Sedangkan untuk persamaan rumus Torsi teoritis turbin adalah sebagai berikut :

$$T_t = \frac{P_w}{\omega} = \frac{1}{2} \rho A U^2 R = \frac{1}{4} \rho A U^2 L \quad (2.20)$$

Sehingga persamaan 2.20 disubstitusikan ke persamaan 2.19 menjadi :

$$C_M = \frac{4T_D}{\rho A L U^2} \quad (2.21)$$

Nilai dari *Coefficient of Moment* juga memiliki hubungan dengan *Coefficient of Power* dan *Tip Speed Ratio* sebagai berikut\_:

$$\frac{CoP}{C_M} = \lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2.22)$$

*Coefficient of Static Torque* adalah rasio torsi statis turbin terhadap torsi teoritis yang dihasilkan angin yang melalui sudu-sudu pada turbin Savonius. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$C_{ts} = \frac{T_s}{T_t} \quad (2.23)$$

Dimana:

$T_s$  : Torsi Statis turbin

$T_t$  : Torsi Teoritis turbin

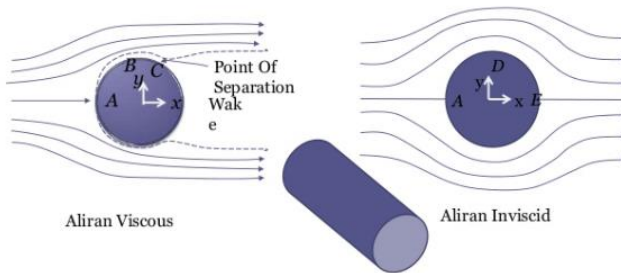
Sedangkan untuk persamaan rumus Torsi teoritis turbin ditunjukkan persamaan 2.20, sehingga rumus *Coefficient of Static Torque* didapatkan sebagai berikut :

$$C_{ts} = \frac{4T_s}{\rho A L U^2} \quad (2.24)$$

## 2.10. Aliran Melalui Silinder

Sebuah aliran yang melewati suatu benda cenderung akan mengikuti bentuk kontur benda tersebut. Hal ini dibuktikan dengan terbentuknya *streamline* aliran fluida pada tiap titik di benda yang dilewatinya. Pada silinder sirkular, salah satu factor yang mempengaruhi aliran fluida adalah viskositas fluida tersebut. Aliran fluida berdasarkan viskositasnya terbagi menjadi dua jenis yaitu aliran *viscous* dan *aliran inviscid*. Aliran *viscous* adalah kondisi aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh sehingga menyebabkan tegangan geser pada dinding benda yang bersentuhan langsung dengan fluida. Aliran *inviscid* adalah kondisi aliran dimana viskositas fluida dianggap nol sehingga aliran fluida tidak mengalami tegangan geser dan kehilangan energy, sehingga sering disebut aliran ideal. Aliran *inviscid* sering dianggap sebagai aliran yang imajiner karena tidak akan pernah terjadi pada kenyataannya. Berikut merupakan gambar yang menunjukkan aliran *viscous* dan *inviscid* yang melalui sebuah silinder.



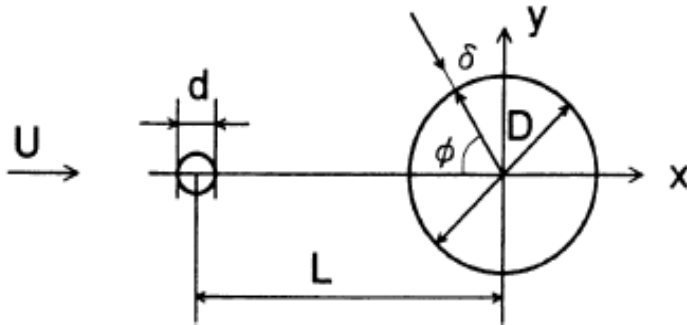


Gambar 2.7 Skema Aliran Melalui Bola Silinder. Aliran *viscous* (kanan) dan *inviscid* (kiri) (Fox, 2011)

Pada aliran *viscous* yang melalui silinder, setidaknya terdapat 3 titik yang menunjukkan ciri-ciri utama sebuah aliran *viscous*. Titik pertama adalah titik A adalah titik stagnasi dimana aliran menabrak benda secara langsung sehingga menyebabkan kecepatan menjadi nol dan tekanan bernilai maksimum. Selanjutnya dari titik A ini akan muncul *boundary layer edge*, yaitu garis yang memisahkan antara daerah *viscous* dan *inviscid*. Selanjutnya adalah titik B, pada titik ini nilai kecepatan maksimum dan tekanan minimum. Titik C yaitu titik separasi, dimana momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga terjadi *back flow*. Akibat dari adanya titik separasi ini maka muncul daerah bertekanan rendah yang disebut *wake*. Besarnya *wake* yang terjadi dipengaruhi oleh posisi munculnya titik separasi yang bergantung pada jenis aliran fluida yang melewati silinder. Aliran fluida dengan Bilangan Reynolds yang besar atau disebut aliran turbulen memiliki momentum yang lebih besar sehingga *boundary layer* mampu mengatasi *adverse pressure gradient* dan gaya gesek sehingga lebih sulit terbentuk *backflow* dan titik separasi mundur; sehingga *wake* yang dihasilkan lebih sempit.

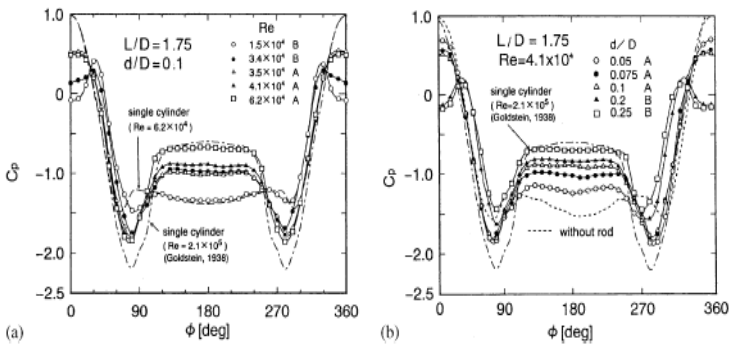
## 2.11. Penelitian Terdahulu

### 2.11.1. Penelitian Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Silinder Utama

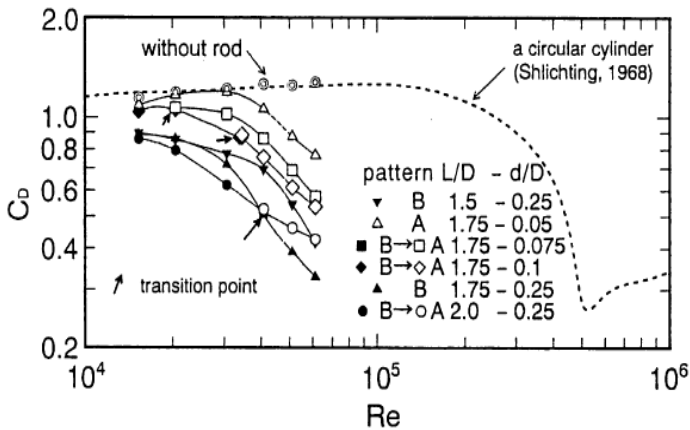


Gambar 2.8 Skema Geometri Benda Uji Silinder Utama dan Penghalang (Tsutsui,2002)

Penelitian ini dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** dengan meletakkan benda pengganggu berupa silinder sirkular yang diletakkan di depan silinder utama dan bertujuan untuk memperkecil gaya *drag* yang diterima oleh silinder utama. Skema benda uji penelitian dapat dilihat pada gambar di atas. Diameter silinder utama ( $D$ ) 40 mm, diameter silinder pengganggu ( $d$ ) bervariasi sebesar 1 hingga 10 mm, jarak pusat silinder pengganggu terhadap pusat silinder utama ( $L$ ) bervariasi 50 hingga 120 mm. Adapaun variasi yang dilakukan untuk memperoleh hasil maksimal adalah variasi jarak anatar pusat silinder ( $L/D$ ), perbandingan diameter silinder pengganggu dan silinder utama ( $d/D$ ) serta perubahan bilangan Reynolds pada rentang  $1,5 \times 10^4 \leq Re \leq 6,2 \times 10^4$ . Penelitian ini dilakukan di *low speed wind tunnel* dengan panjang 800 mm, lebar 150 mm, dan tinggi 400 mm, dengan kecepatan angin ( $U$ ) antara 4 - 24 m/s. Hasil penelitian dapat dilihat melalui gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 Distribusi *Pressure Coefficient* ( $C_p$ ) pada silinder utama (a) Pengaruh Bilangan Reynolds (b) Pengaruh  $d/D$  (Tsutsui, 2002)



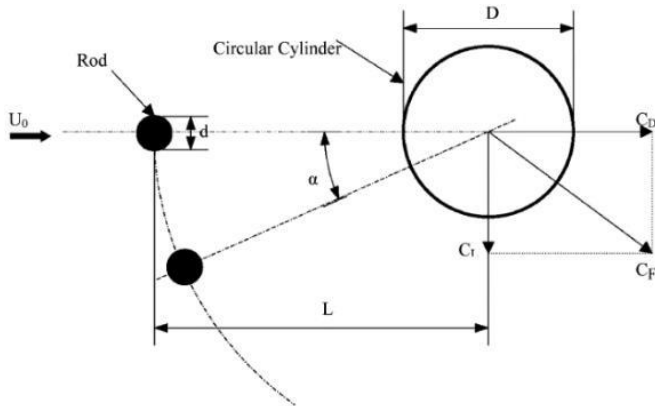
Gambar 2.10 Grafik Hubungan Bilangan Reynolds terhadap *Drag Coefficient* (Tsutsui, 2002)

Hasil penelitian ini adalah didapatkan penurunan nilai *Pressure Coefficient* ( $C_p$ ) berbanding terbalik dengan peningkatan

Bilangan Reynolds dan  $d/D$  dan penurunan  $L/D$ . Pada gambar 2.9 (a) dilakukan percobaan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada  $L/D = 1,75$  dan  $d/D = 0,1$ ; dan dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi Bilangan Reynolds di atas  $3 \times 10^4$ , terdapat fenomena separasi yang semakin tertunda diakibatkan tebal *Shear Layer* yang semakin berkurang. Hal itu menyebabkan daerah *wake* yang terbentuk pada silinder utama semakin menyempit sehingga nilai koefisien *drag* menurun, dan juga menyebabkan nilai  $C_p$  turun pada bagian depan silinder utama. Pada gambar 2.9 (b) Percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder utama dengan  $L/D = 1,75$  dan  $Re = 4,1 \times 10^4$ , dan dapat disimpulkan bahwa dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu yang semakin meningkat maka nilai  $C_p$  pada bagian depan silinder utama akan turun dan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat, maka *wake* yang timbul di belakang silinder utama akan menyempit sehingga gaya drag semakin kecil. Berdasarkan gambar 2.10 di atas disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu, seiring bertambahnya nilai Bilangan Reynolds maka harga *pressure drag coefficient* ( $C_D$ ) juga turun ; Kondisi optimum penurunan  $C_D$  didapatkan pada nilai  $d/D = 0,25$  dan  $L/D = 2$  untuk  $Re < 4,1 \times 10^4$  ; dan pada  $d/D = 0,25$  dan  $L/D = 1,75$  untuk  $Re > 4,1 \times 10^4$  .

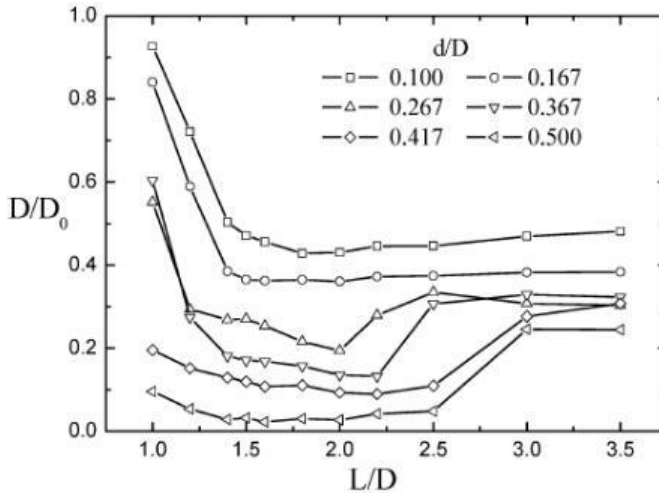
### 2.11.2. Penelitian Silinder Pengganggu dengan Pemasangan Tandem

Penelitian ini dilakukan oleh **Jin Jun Wang (2006)**, untuk mengetahui dampak pemberian penghalang berupa silinder di depan, terhadap pengurangan gaya *drag* yang dihasilkan silinder sirkular utama tersebut. Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.11 dibawah



Gambar 2.11 Skema Geometri Benda Uji Penelitian Silinder Utama dan Silinder Penghalang (Wang, 2006)

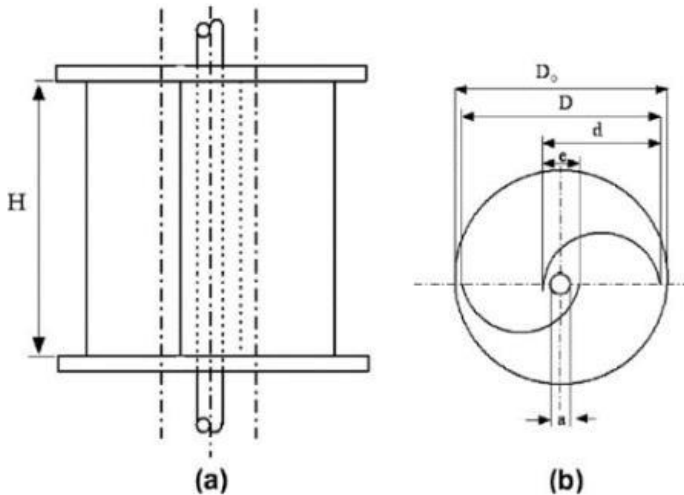
Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan bilangan Reynolds  $8,2 \times 10^4$ . Silinder sirkular utama memiliki diameter ( $D$ ) = 60 mm. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi rasio silinder penghalang terhadap silinder utama ( $d/D$ ) = 0,1 - 0,5, dan variasi rasio jarak antara titik pusat silinder penghalang dengan titik pusat silinder sirkular utama terhadap diameter silinder utama ( $L/D$ ) = 1.5 - 4. Variasi posisi sudut silinder pengganggu terhadap sumbu horizontal yaitu  $\alpha = 0^\circ - 45^\circ$ . Hasil penelitian dapat ditinjau pada gambar 2.12 berikut ini.



Gambar 2.12 Grafik Rasio *Drag* dengan Penghalang ( $D$ ) terhadap *Drag* tanpa Penghalang ( $D_0$ ) dengan Variasi Posisi dan Ukuran Silinder Penghalang (Wang, 2006)

Berdasarkan gambar 2.12 disimpulkan bahwa *drag* pada silinder utama paling kecil ketika diberi penghalang dengan rasio  $L/D$  antara 1,5 hingga 2,5 untuk semua nilai variasi  $d/D$ , dengan *drag* terkecil pada saat diberi silinder penghalang dengan  $d/D = 0,5$ . Pengurangan *drag* tersebut terjadi karena terjadinya *attachment* pada silinder utama setelah diberi silinder penghalang di depan silinder utama, sehingga akan menunda titik stagnasi.

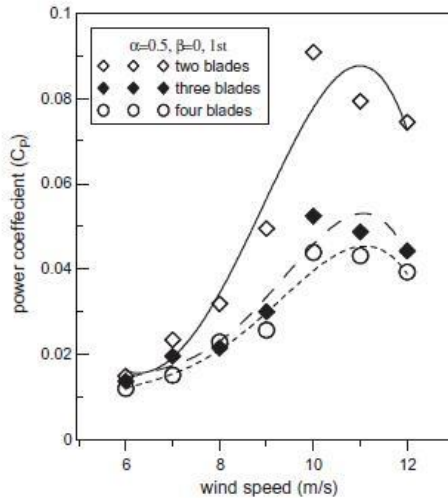
### 2.11.3. Peningkatan Performa Turbin Savonius dengan Variasi Geometri



Gambar 2.13 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan *Single stage* (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas (Mahmoud, 2010)

Penelitian ini dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)** dengan melakukan variasi pada geometri turbin angin untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius. Variasinya adalah pada jumlah sudunya, yaitu 2 sudu (2b), 3 sudu (3b), dan 4 sudu (4b); *aspect ratio* ( $\alpha$ ) sebesar 0,5; 1; 2; 4; dan 5; jumlah *stage* turbin yaitu *single stage* (1st), *double stages* (2st); *overlap ratio* ( $\beta$ ) sebesar 0; 0,2; 0,25; 0,3; dan keberadaan *end plate*. Skema penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.13. Di atas. Penelitian ini dilakukan di *wind tunnel* yang memiliki diameter 49 cm dengan jarak antara keluar *wind tunnel* sampai turbin sebesar 125 cm dan dengan kecepatan angin yang bervariasi 6-13 m/s. *End plate* yang digunakan terbuat dari kayu dengan ketebalan 2,5 mm. Poros turbin menggunakan

bahan baja dengan diameter 1,4 cm dan panjang 62 cm untuk semua model. Hasil penelitian yang didapatkan adalah sebagai berikut:

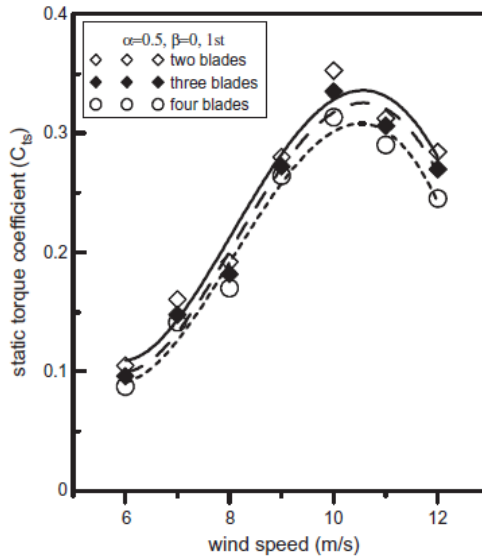


Gambar 2.14 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu (*Mahmoud, 2010*)

Berdasar gambar 2.14 yang merupakan grafik hubungan antara *coefficient of power* (CoP) terhadap kecepatan angin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; *single stage*, dan variasi pada jumlah sudunya, dapat dilihat *trendline* nya bahwa CoP akan naik seiring bertambahnya kecepatan angin dan akan sampai pada titik optimum, lalu turun. Pada grafik ini CoP optimum didapat pada kecepatan angin 10 m/s untuk semua variasi jumlah sudu. Selain itu terdapat perbedaan cukup signifikan dimana turbin dengan 2 sudu (2b) menghasilkan COP yang jauh lebih tinggi hingga 2 kali lipat dibandingkan dengan 3 atau 4 sudu. Hal tersebut dikarenakan secara teori selisih gaya *drag* pada sudu turbin yang berjumlah dua

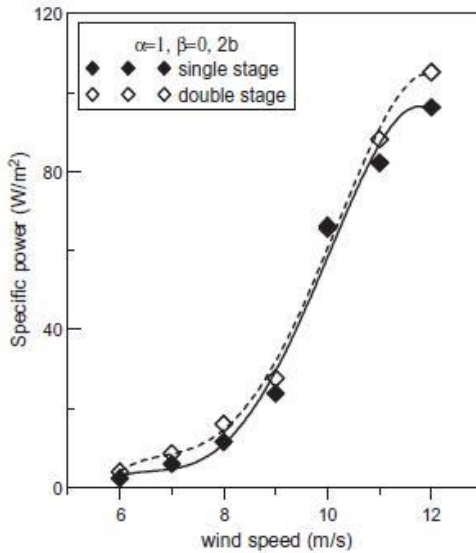


lebih besar dibandingkan dengan turbin yang berjumlah tiga atau empat sudu.



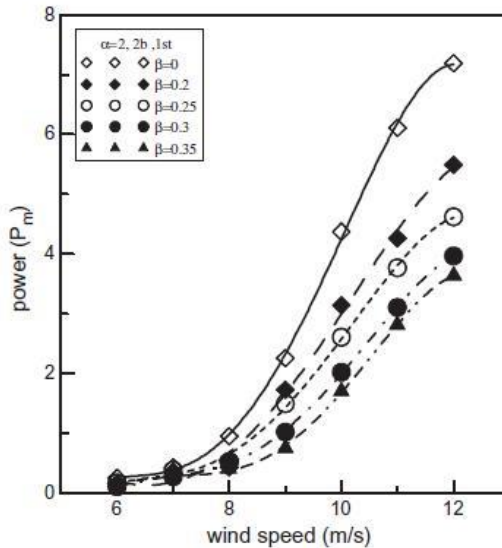
Gambar 2.15 Grafik Hubungan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu (Mahmoud, 2010)

Gambar 2.15 merupakan grafik perbandingan hubungan antara *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) terhadap kecepatan angin pada turbin dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; *single stage*, dan variasi sudu. Dapat disimpulkan bahwa *trendline* kedua grafik identik dan nilai  $C_{ts}$  turbin dengan dua sudu lebih tinggi dibandingkan turbin dengan tiga atau empat sudu.



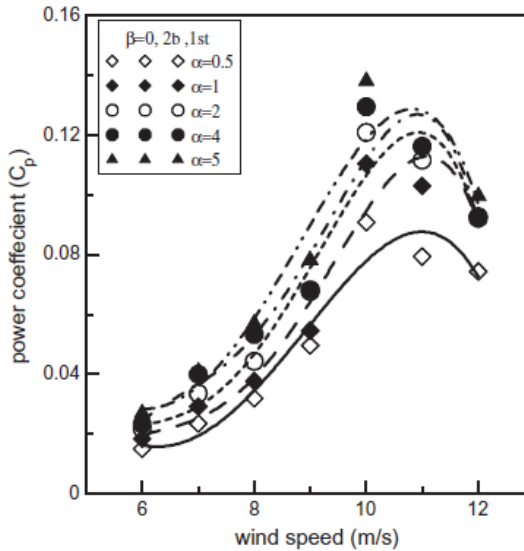
Gambar 2.16 Grafik Hubungan *Specific Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius *Single Stage* dan *Double Stages* (Mahmoud, 2010)

Gambar 2.16 merupakan grafik perbandingan hubungan antara *specific power* terhadap kecepatan angin pada turbin *single stage* dan *double stages*, dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; dan menggunakan 2 sudu . Dapat disimpulkan bahwa *trendline* kedua grafik identic dan *specific power* turbin dengan *double stage* sedikit lebih tinggi dibandingkan turbin dengan *single stage*.



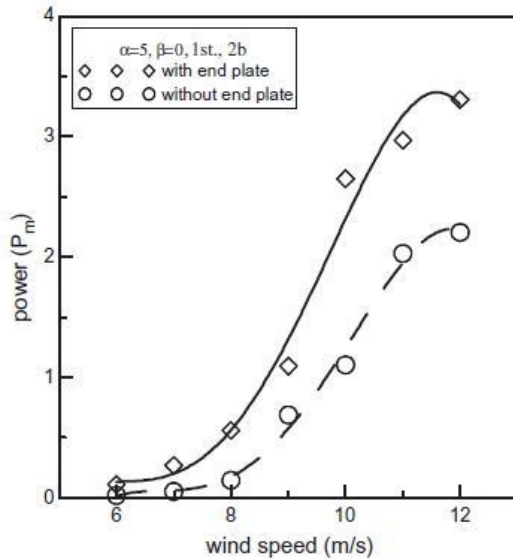
Gambar 2.17 Grafik Hubungan Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Overlap Ratio* (Mahmoud, 2010)

Gambar 2.17 merupakan grafik hubungan *power* terhadap kecepatan angin pada turbin dengan menggunakan *aspect ratio* 2; turbin dengan 2 sudu ; *single stage* dan variasi *overlap ratio* dengan nilai 0;0,2;0,25;0,3; dan 0,35. Dapat disimpulkan berdasar grafik tersebut bahwa kenaikan *overlap ratio* yang digunakan sebanding dengan *power* yang dihasilkan turbin. *Power* dari turbin dengan *overlap ratio* 0 adalah yang paling tinggi dengan *trendline* grafik yang naik lebih signifikan dibanding dengan grafik lainnya pada nilai *overlap ratio* yang lain pada kecepatan yang sama yaitu 12 m/s.



Gambar 2.18 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Aspect Ratio* (Mahmoud, 2010)

Berdasar gambar 2.18 merupakan grafik hubungan antara *Coefficient of Power* (CoP) terhadap kecepatan angin pada turbin angin dengan *overlap ratio* 0; turbin dua sudu (2b); *single stage* dan variasi pada *aspect ratio* dari 0,5 sampai 5, dapat disimpulkan bahwa kenaikan nilai CoP sebanding dengan kenaikan nilai *aspect ratio*. dan pada *aspect ratio* 5 memiliki CoP paling tinggi dibandingkan yang lain, pada kecepatan angina optimum 10 m/s.

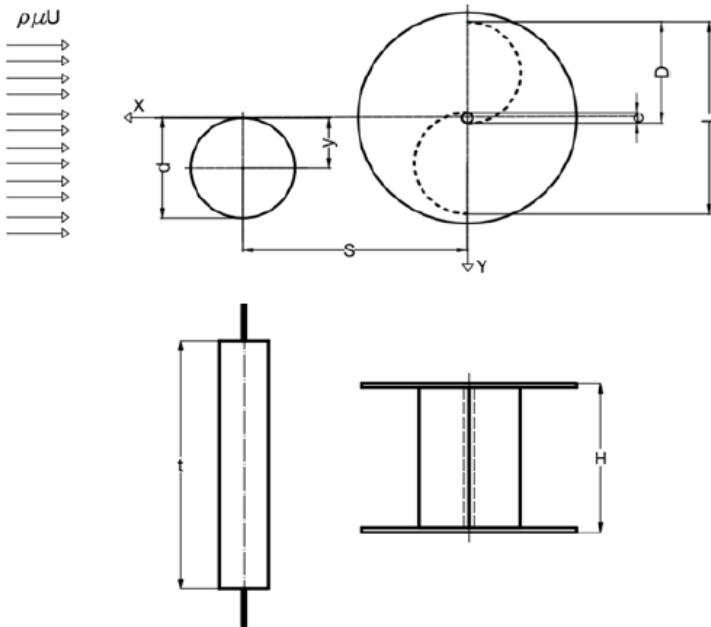


Gambar 2.19 Grafik Hubungan antara *Power* terhadap Kecepatan Angin Turbin Savonius dengan Keberadaan *End Plate* (Mahmoud, 2010)

Gambar 2.19 merupakan grafik hubungan antara *power* terhadap kecepatan angin pada turbin dengan *aspect ratio* 5; *overlap ratio* 0; *single stage*; turbin dua sudu (2b) dan variasi pada penggunaan *end plate* atau tanpa *end plate*. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan *endplate* menghasilkan *power* 50% lebih besar dibandingkan dengan turbin yang tidak menggunakannya

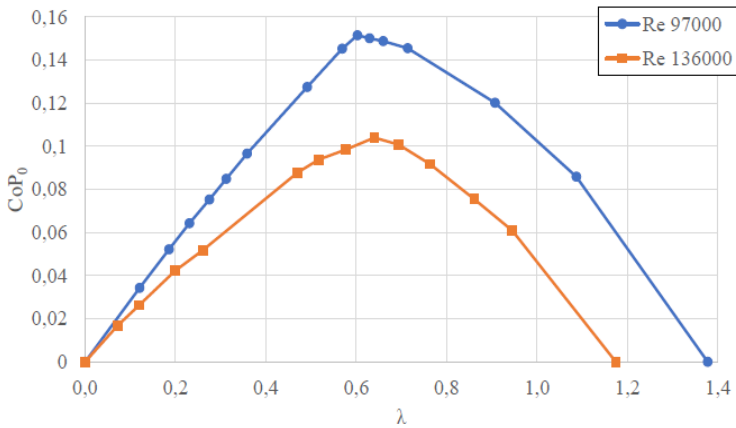
#### **2.11.4 Penelitian untuk Meningkatkan Performa Turbin Savonius dengan Pemasangan Silinder Pengganggu**

Penelitian ini dilakukan oleh **Prabasworo Drestanto (2019)**, dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin Savonius. Turbin Savonius memiliki diameter (D) sebesar 165,2 mm, tinggi turbin (H) sebesar 294,4 mm, diameter poros (e) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* (D0) sebesar 320 mm dan silinder pengganggu berdiameter (d) sebesar 88,8 mm dan tinggi (h) sebesar 500 mm. Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan Bilangan Reynolds yang bervariasi  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ . Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $d/D$ ) = 0,1 - 1,0 dan dengan rasio jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 2,4; dan variasi rasio posisi silinder pengganggu yang tegak lurus arah datangnya angin terhadap diameter turbin angin ( $y/D$ ) = 0,5. Skema geometri turbin dapat dilihat pada gambar 2.20 berikut:



Gambar 2.20 Skema penelitian (Drestanto,2019)

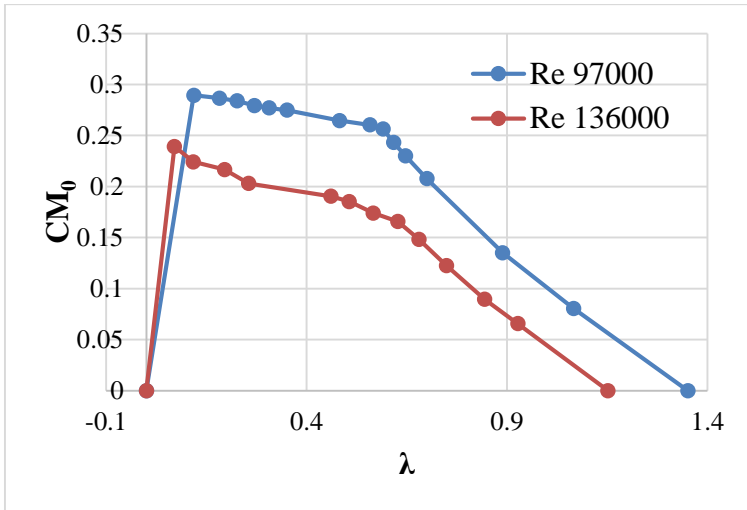
Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah bahwa grafik *Coefficient of Performance* turbin tanpa silinder penghalang ( $CoP_0$ ) terhadap fungsi *Tip Speed Ratio* berbentuk parabolic dengan nilai  $CoP_0$  pada Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  lebih besar daripada Bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.21 berikut ini :



Gambar 2.21 Grafik Coefficient of Power ( $CoP_0$ ) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (*Drestanto, 2019*)

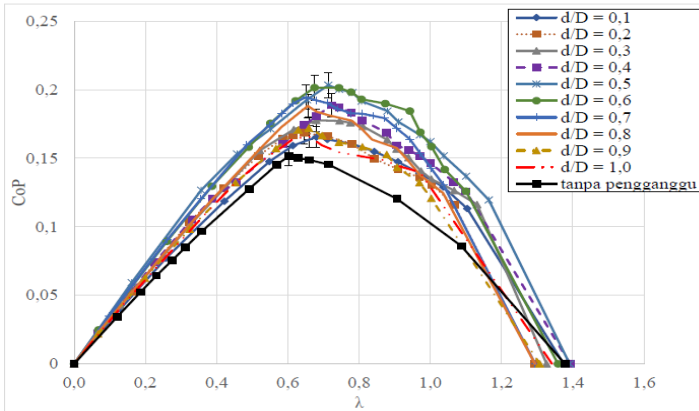
Pada Bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  didapatkan nilai  $CoP_0$  maksimum sebesar 0,152 atau 15,2% pada  $TSR = 0,603$ . Sedangkan pada Bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  didapatkan nilai  $CoP_0$  maksimum sebesar 0,104 atau 10,4% pada  $TSR = 0,64$ . Dapat dilihat dari kedua grafik tersebut bahwa nilai  $CoP_0$  maksimum tertinggi terjadi pada  $Re 9,7 \times 10^4$ .



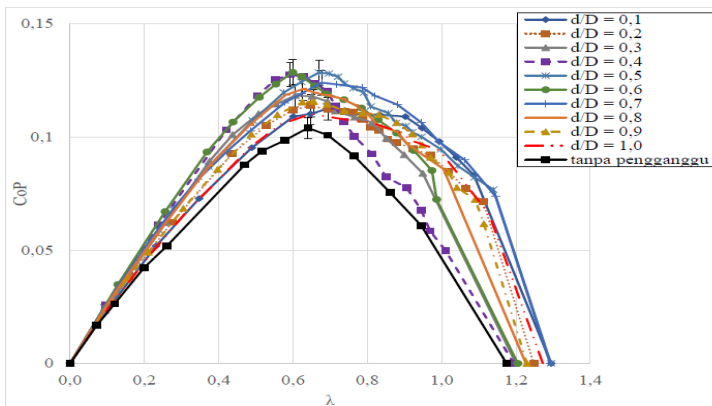


Gambar 2.22 Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (Drestanto,2019)

Berdasarkan gambar 2.22 di atas, dapat dilihat bahwa grafik *Coefficient of Moment* turbin tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap *Tip Speed Ratio* (TSR) memiliki trendline yang cenderung turun seiring meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (TSR). *Trendline* grafik  $C_{M0}$  pada bilangan Reynolds  $9,7 \times 10^4$  dengan nilai  $C_{M0}$  maksimum sebesar 0,284 pada TSR 0,12, lebih tinggi daripada grafik  $C_{M0}$  pada bilangan Reynolds  $13,6 \times 10^4$  dimana  $C_{M0}$  maksimum sebesar 0,234 pada TSR 0,07. Kemudian dilakukan penelitian dengan penambahan silinder pengganggu, yang hasilnya dapat dilihat pada gambar 2.23 berikut ini.



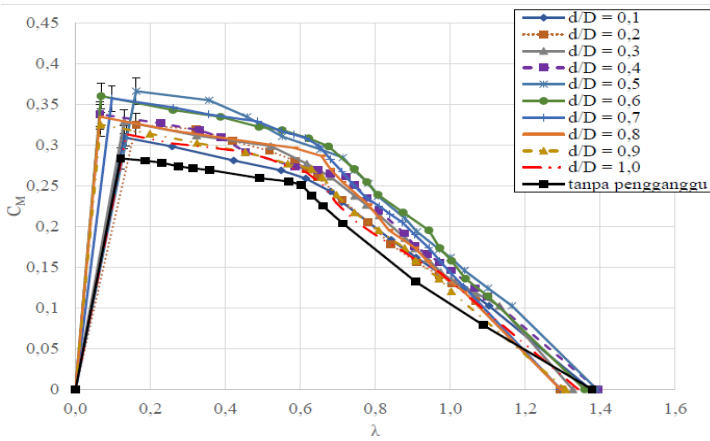
(a)



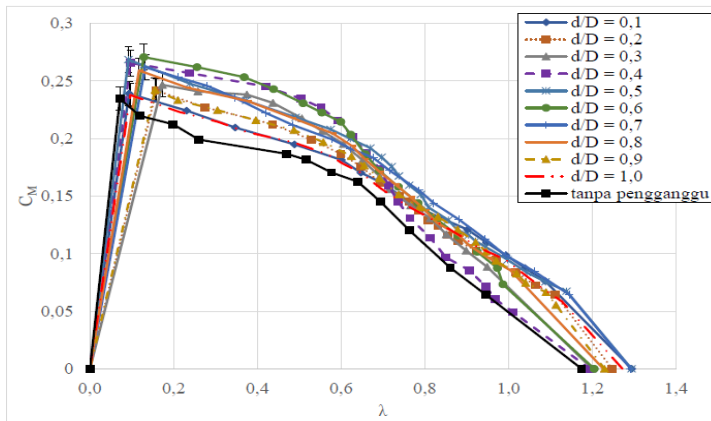
(b)

Gambar 2.23 Grafik Perbandingan *Coefficient of Performance* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $CoP$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $CoP_0$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) dengan  $S/D = 2,4$  dan variasi  $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$ ; dan  $1,0$  pada (a)  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan (b)  $Re = 13,6 \times 10^4$ . (Drestanto, 2019)

Berdasarkan gambar 2.23, dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada turbin Savonius untuk kedua bilangan Reynolds menghasilkan nilai CoP yang lebih tinggi daripada turbin tanpa silinder pengganggu sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu pada jarak  $S/D = 2,4$  efektif meningkatkan CoP turbin. Dari seluruh variasi  $d/D$ , nilai CoP maksimum dihasilkan pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dengan variasi  $d/D = 0,5$  sebesar 0,203 atau 20,3% pada TSR 0,69 dengan kenaikan sebesar 34,14% dari sebelum diberi penghalang (15,2%). Lalu pada  $Re = 13,6 \times 10^4$  nilai CoP maksimum tertinggi terjadi di  $d/D = 0,6$  yaitu sebesar 0,129 atau 12,9% pada TSR 0,6 dengan kenaikan sebesar 23,57% dari sebelum diberi penghalang (10,4%). Disimpulkan bahwa pada kecepatan angin yang lebih tinggi, CoP akan turun dan posisi  $d/D$  optimum akan berpindah dari posisi  $d/D = 0,5$  menuju 0,6.



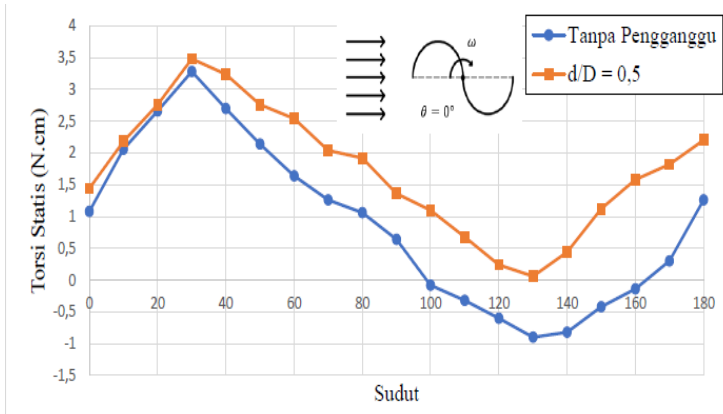
(a)



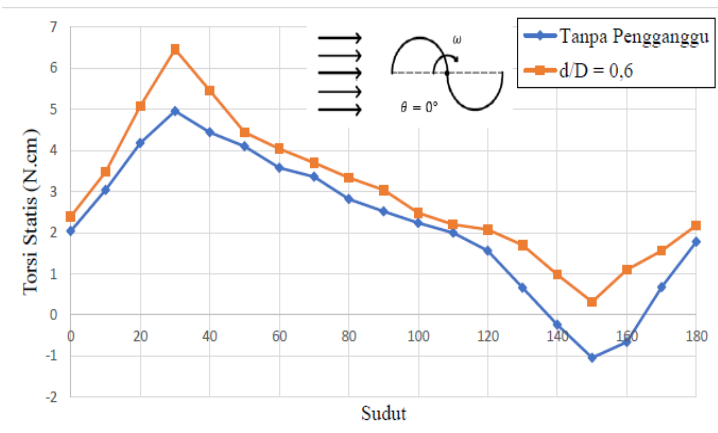
(b)

Gambar 2.24 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M_0}$ ) terhadap *Fungsi Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) 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)  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan (b)  $13,6 \times 10^4$  (Drestanto,2019)

Berdasarkan gambar 2.24 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* maksimum 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 0,366 di  $TSR = 0,162$  dengan kenaikan sebesar 29,1% dari sebelum diberi penghalang (0,284). Lalu untuk  $Re = 13,6 \times 10^4$  nilai  $C_M$  maksimum tertinggi terdapat pada  $d/D = 0,6$  yaitu sebesar 0,271 di  $TSR = 0,129$  dengan kenaikan sebesar 15,49% dari sebelum diberi pengganggu (0,235).



(a)



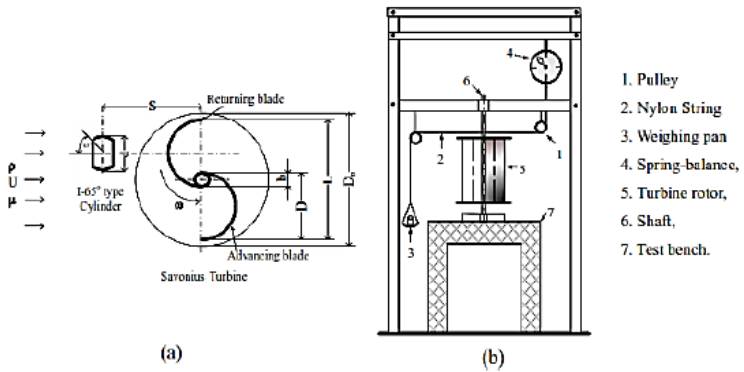
(b)

Gambar 2.25 Grafik Perbandingan Torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu ( $T_s$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $T_{s_0}$ ) terhadap *Fungsi Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada (a)  $Re = 9,7 \times 10^4$ ,  $d/D = 0,5$  dan (b)  $13,6 \times 10^4$ ,  $d/D = 0,6$  (Drestanto,2019)

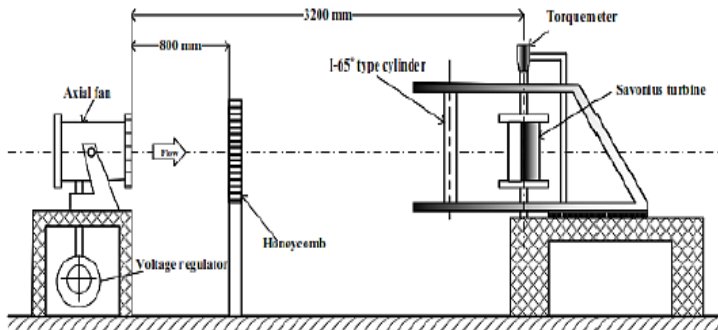
Berdasarkan gambar 2.25 dapat dilihat bahwa nilai bentuk grafik Torsi statis turbin setelah diberi penghalang, untuk kedua nilai Bilangan Reynold  $Re = 9,7 \times 10^4$  pada  $d/D = 0,5$  dan  $Re = 13,6 \times 10^4$  pada  $d/D = 0,6$  mengalami kenaikan dimana torsi statis tertinggi turbin terjadi di sudut  $30^\circ$  dan terendah pada sudut  $130^\circ$ , seperti torsi statis sebelum diberi penghalang. Selain itu juga terlihat bahwa tidak ada torsi turbin yang bernilai negative pada semua sudut setelah diberi penghalang. Hal ini menunjukkan bahwa pemberian silinder penghalang pada turbin efektif mampu untuk meningkatkan kemampuan *self starting* turbin.

### **2.11.5 Studi Ekperimental dan Numerik untuk Meningkatkan Performa Turbin Savonius dengan Pemasangan Silinder Pengganggu Tipe I-65°**

Penelitian ini dilakukan oleh **Gunawan Sakti et al. (2019)**, dengan menggunakan silinder pengganggu Tipe I-65° yang diletakkan di depan *returning blade* turbin Savonius. Turbin Savonius memiliki diameter (D) sebesar 165,2 mm, tinggi turbin (H) sebesar 294,4 mm, diameter poros (e) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* (D0) sebesar 333,7 mm dan silinder pengganggu berdiameter (d) sebesar 88,5 mm dan tinggi (h) sebesar 500 mm. Penelitian dilakukan pada *open circuit wind tunnel* dengan Bilangan Reynolds yang bervariasi  $Re = 9,9 \times 10^4$ . Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $d/D$ ) = 0,54 dan dengan rasio jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 1,4. Skema geometri turbin dapat dilihat pada gambar 2.26 dan 2.27.



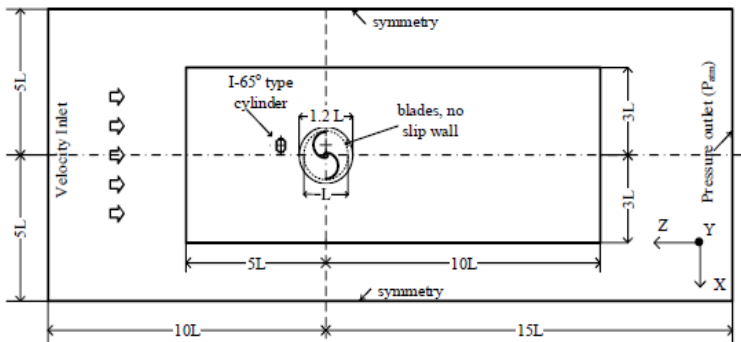
Gambar 2.26 Konfigurasi turbin Savonius dan silinder penghalang (a) dan *brake dynamometer* (b) (Gunawan,2019)



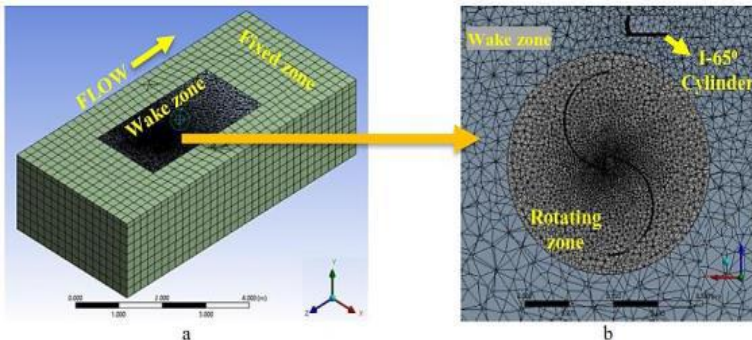
Gambar 2.27 Skema eksperimen Turbin Savonius (Gunawan,2019)

Selain metode eksperimen, dilakukan juga studi dengan metode simulasi numerik menggunakan *software* CFD ANSYS Fluent 19.1. Sebelumnya telah dibuat dulu konstruksi 3D Geometri dari turbin Savonius, kemudian mengkonfigurasi simulasi yang ditunjukkan oleh gambar berikut :





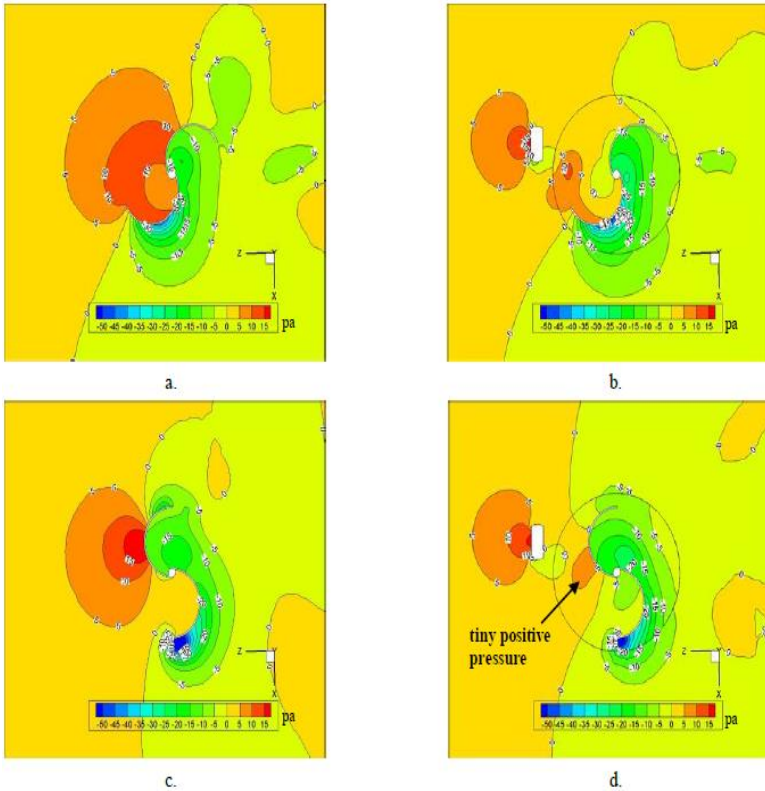
Gambar 2.28 Deskripsi Skema Simulasi 3D dan *Boundary Condition* pada *y-axis* (Gunawan,2019)



Gambar 2.29 Konfigurasi *mesh* untuk Simulasi CFD Turbin (a) *wake zone* dan *fixed zone* secara isometric (b) Silinder tipe I-65° diplot pada *y-axis* (Gunawan,2019)

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah bahwa pemberian silinder pengganggu tipe I-65° menyebabkan penurunan tekanan di daerah depan *returning blade* turbin, sehingga

menyebabkan *pressure drag*nya turun. Kontur distribusi tekanan pada Turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 2.30 berikut :

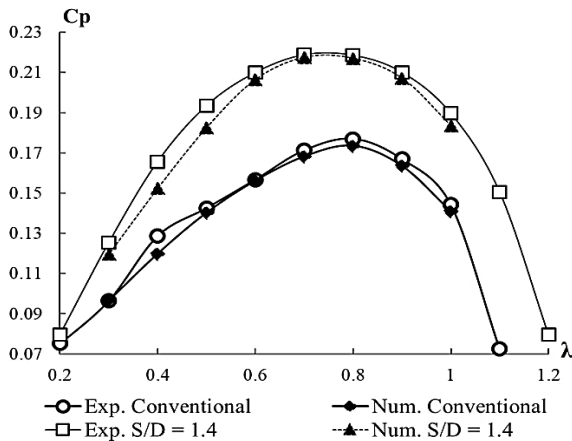


Gambar 2.30 Perbandingan distribusi tekanan hasil Simulasi CFD

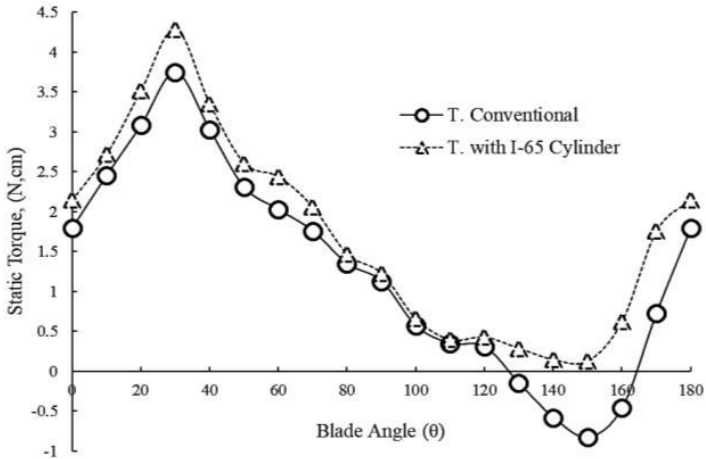
Turbin sebelum (konvensional) dan sesudah diberi silinder penghalang tipe I-65° pada  $TSR = 0,7$ ;  $Re = 9,9 \times 10^4$ ; dan  $S/D = 1,4$ ; (a) 30° sudut turbin konvensional, (b) 30° sudut turbin dengan silinder penghalang I-65°, (c) 90° sudut turbin konvensional, dan (d) 90° sudut turbin dengan silinder I-65° (Gunawan,2019)

Karena *pressure drag* pada *returning blade* turbin yang lebih kecil maka selisih torsi turbin bertambah sehingga daya yang dihasilkan bertambah dan performanya naik, hal ini ditegaskan dengan gambar grafik berikut yang menunjukkan hasil performa turbin sebelum dan setelah diberi penghalang secara eksperimen dan numerik.

Berdasarkan gambar 2.31, dapat dilihat bahwa pemberian silinder penghalang tipe I-65° pada  $S/D = 1,4$  terbukti efektif dalam menaikkan performa turbin, dimana  $C_p$  turbin mengalami kenaikan dari 0,177 (17,7%) secara eksperimen dan 0,173(17,3%) secara simulasi numerik pada  $TSR = 0,8$ ; menjadi 0,218 (21,8%) dan 0,217 (21,7%). Selain itu torsi statis turbin juga mengalami kenaikan setelah diberi silinder penghalang yang grafiknya dapat dilihat pada gambar 2.31.



Gambar 2.31 Perbandingan *Power Coefficient* ( $C_p$ ) secara Eksperimen dan Numerik Turbin Savonius sebelum dan sesudah diberi silinder penghalang (Gunawan,2019)

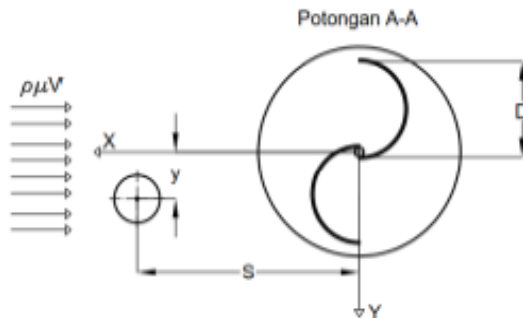


Gambar 2.32 Perbandingan Torsi statis turbin sebelum dan sesudah diberi silinder penghalang (Gunawan,2019)

Berdasarkan gambar 2.32 di atas dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian silinder penghalang turut menaikkan nilai torsi statis turbin Savonius dimana torsi statis tertinggi terjadi di sudut bilah turbin  $30^\circ$  sebesar 4,3 Ncm dari sebelumnya tanpa silinder penghalang sebesar 3,75 Ncm; dan torsi terendah terjadi pada sudut bilah  $150^\circ$  sebesar 0,13 Ncm dari sebelumnya sebesar -0,8 Ncm. Selain itu dapat dilihat bahwa setelah diberi silinder pengganggu, torsi statis turbin Savonius memiliki nilai positif untuk semua sudut bilah. Hal ini menunjukkan bahwa turbin memiliki kemampuan *self starting* yang meningkat dibanding sebelum diberi silinder penghalang.

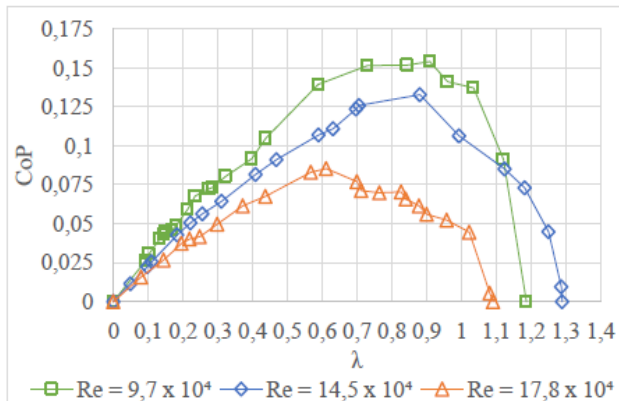
### 2.11.6 Studi Eksperimen Turbin Savonius dengan Penghalang Silinder

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Jasmi Aprilia Rustam (2018), untuk meneliti pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius terhadap performa turbin tersebut. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin ( $d/D$ ) = 0,5 ; dan nilai  $y/D$  = 0,0; 0,25; 0,5. dan dengan rasio jarak posisi pengganggu terhadap diameter turbin ( $S/D$ ) = 2,0. Penelitian dilakukan *pada open circuit wind tunnel* dengan variasi Bilangan Reynolds  $Re = 9,7 \times 10^4$ ;  $14,5 \times 10^4$ ;  $17,8 \times 10^4$ . Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.33 berikut.



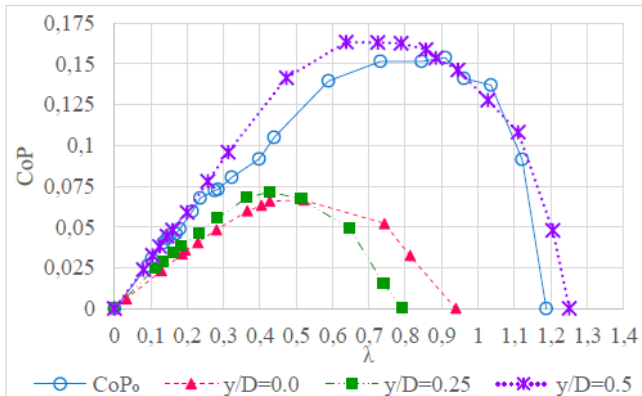
Gambar 2. 33 Skema turbin Savonius (Rustam,2018)

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemberian pengganggu efektif meningkatkan performa turbin, dimana performa terbaiknya didapatkan pada  $(y/D) = 0,5$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  , dengan *Coefficient of Power* (CoP) yang meningkat 1,062 kali dan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) meningkat 1,041 kali dibandingkan dari tanpa silinder pengganggu.



Gambar 2.34 Grafik *Coefficient of Power* Turbin tanpa Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) (Rustam, 2018)

Gambar 2.34 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ). Berdasarkan grafik tersebut dapat dilihat bahwa *Trendline* grafik tersebut berbentuk parabolic dimana nilai nilai CoP akan naik seiring dengan peningkatan nilai TSR hingga titik optimumnya dan kemudian turun. Dapat dilihat bahwa nilai CoPmax tertingginya adalah pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  sebesar 0,1539 pada  $\lambda = 0,91$  dan nilai CoPmax terendahnya adalah pada  $Re = 17,8 \times 10^4$  sebesar 0,0853 pada  $\lambda = 0,612$ .



Gambar 2.35 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu ( $CoP/CoP_0$ ) sebagai Fungsi Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  (Rustam, 2018)

Berdasarkan gambar 2.35 di atas dapat dilihat bahwa setelah diberi pengganggu dengan variasi jarak  $y/D$  pada  $Re = 9,7 \times 10^4$ , maka nilai  $CoP_{max}$  tertinggi turbin dengan silinder pengganggu yang didapatkan hanya pada posisi  $y/D = 0,5$  memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan  $CoP_{max}$  turbin tanpa pengganggu, sedangkan  $y/D$  yang lainnya berada dibawah nilai turbin angin tanpa pengganggu. Hal itu menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut pemberian pengganggu efektif mengganggu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran dari laminar menjadi turbulen, sehingga menyebabkan titik separasi dan wake yang timbul mengecil dan nilai ( $CoP$ ) turbin meningkat.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

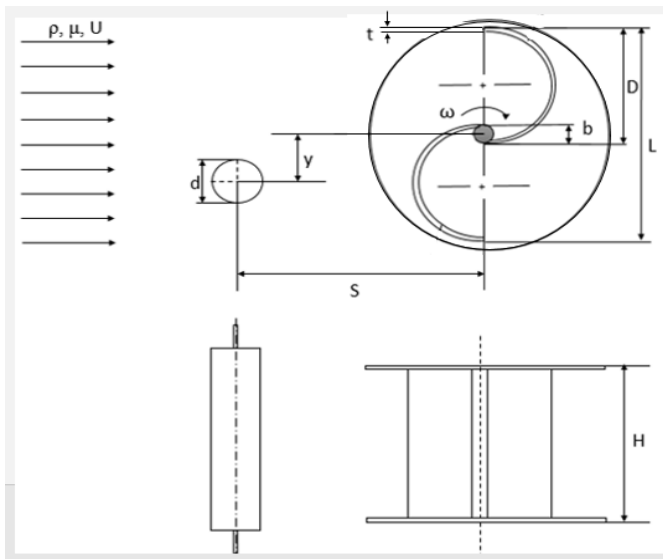


## BAB III

### METODOLOGI PERCOBAAN

#### 3.1. Parameter yang Diukur

Beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini antara lain : kecepatan aliran udara ( $U$ ), densitas udara ( $\rho$ ), viskositas udara ( $\mu$ ), diameter silinder pengganggu ( $d$ ), diameter Turbin Savonius ( $D$ ), diameter poros ( $b$ ), kecepatan putar sudu Turbin Savonius ( $\omega$ ), jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat Turbin Savonius ( $y$ ), dan jarak titik pusat silinder penghalang terhadap sisi tengah *returning blade* turbin Savonius ( $S$ ). Parameter-parameter pengujian dan skema penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius Tampak Atas dan Samping

Pengukuran dilakukan pada posisi :

$$(d/D) = 0.5$$

$$(S/D) = 2,4$$

$U = 3,8 ; 4,4 ; 5; 6; 7; 8; \text{ dan } 9 \text{ m/s}$

Dimana :

$U$  = kecepatan aliran udara (m/s)

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  = viskositas udara ( $\text{Ns/m}^2$ )

$D$  = diameter sudu turbin Savonius (m)

$d$  = diameter silinder penghalang (m)

$b$  = diameter poros (m)

$S$  = jarak titik pusat silinder penghalang terhadap titik pusat turbin turbin Savonius (m)

$\omega$  = kecepatan putar sudu Turbin Savonius (rad/s)

### 3.2. Analisa Dimensi

Metode analisa dimensi yang digunakan adalah Teorema Phi Buckingham, untuk mengetahui factor yang mempengaruhi karakteristik aliran angin yang melewati turbin dengan pengganggu silinder sirkular.

#### 3.2.1. Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Metodologi penentuan analisa dimensi untuk *Coefficient of Power* yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

Jumlah parameter ( $n$ ) = 11 parameter, yang terdiri dari :

$P$  = Power (J/s)

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

$\mu$  = Viskositas udara ( $\text{Ns/m}^2$ )

$U$  = Kecepatan aliran udara ( $\text{m/s}$ )

$D$  = Diameter sudu turbin Savonius ( $\text{m}$ )

$d$  = Diameter silinder pengganggu ( $\text{m}$ )

$S$  = Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan titik pusat turbin Savonius ( $\text{m}$ )

$H$  = Tinggi turbin Savonius ( $\text{m}$ )

$b$  = Diameter poros ( $\text{m}$ )

$\omega$  = Putaran sudu turbin angin Savonius ( $\text{rad/s}$ )

$y$  : jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius ( $\text{m}$ )

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis. Dipilih  $M$ ,  $L$ ,  $t$ .

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih

Tabel 3. 1 Dimensi Primer Parameter COP

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

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya ( $m$ ) sama dengan jumlah dimensi primer ( $r$ ) yang digunakan yaitu :  $\rho, U, D$ .

Jumlah parameter berulang ( $m$ ) = ( $r$ ) = 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

$\pi_1$  : *Coefficient of Power*

$\pi_2$  : Bilangan Reynolds

$\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

$\pi_4$  : Rasio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

$\pi_5$  : Rasio diameter poros dengan diameter turbin Savonius

$\pi_6$  : Tip Speed Ratio

$\pi_7$  : Rasio jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin dengan diameter sudu turbin angin Savonius.

$\pi_8$  : Rasio tinggi dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

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

Pada penelitian ini didapatkan variabel  $\frac{d}{D}, \frac{y}{D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}$  sebagai variabel tetap, sedangkan variabel  $\frac{S}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{\mu}{\rho U D}$  divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga didapatkan:

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

Berdasarkan persamaan 2.2, dengan nilai b konstan maka nilai D sebanding dengan nilai L, sehingga didapatkan:

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

Atau

$$COP = f_4\left(\frac{S}{D}, TSR, Re\right)$$

Karena, S/D pada penelitian ini konstan maka analisa dimensi untuk CoP menjadi :

$$COP = f_5(TSR, Re)$$

### 3.2.2. Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Metodologi penentuan analisa dimensi yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*  
 $Moment = f(\rho, V, D, d, S, b, \omega, y, H)$

Jumlah parameter (n) = 11 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah:

$M = \text{Moment (J)}$

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

$\mu = \text{Viskositas udara (Ns/m}^2\text{)}$

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

$D = \text{Diameter sudu turbin Savonius (m)}$

$d = \text{Diameter silinder pengganggu (m)}$

$S = \text{Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin (m)}$

$b = \text{Diameter poros turbin (m)}$

$\omega = \text{Putaran sudu turbin angin Savonius (rad/s)}$

$y = \text{Jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (m)}$

$H = \text{Tinggi turbin Savonius (m)}$

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis.

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Tabel 3.2 Dimensi Primer Parameter  $C_M$

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

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu :  $\rho, U, D$ .

Jumlah parameter berulang (m) = (r) = 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dari analisis dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

$\pi_1$  : *Coefficient of Moment*

$\pi_2$  : Bilangan Reynolds

$\pi_3$  : Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin Savonius

$\pi_4$  : Rasio jarak antara pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu

$\pi_5$  : Rasio diameter poros dengan diameter turbin Savonius

$\pi_6$  : Tip Speed Ratio

$\pi_7$  : Rasio jarak titik pusat silinder sirkular penghalang terhadap proyeksi titik pusat dengan diameter sudu turbin Savonius.

$\pi_8$  : Rasio tinggi dengan diameter sudu turbin Savonius

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

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

Pada penelitian ini didapatkan variable  $\frac{d}{D}, \frac{y}{D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}$  sebagai variabel tetap, sedangkan variable  $\frac{S}{D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{\mu}{\rho UD}$  divariasikan agar diketahui pengaruhnya terhadap *Coefficient of Moment* sehingga :

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

Berdasarkan persamaan 2.2, dengan nilai b konstan maka nilai D sebanding dengan nilai L, sehingga didapatkan:

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

Atau

$$Cm = f_4\left(\frac{S}{D}, TSR, Re\right)$$

Karena nilai S/D konstan pada penelitian ini, maka analisa dimensi untuk  $C_M$  menjadi :

$$Cm = f_5(TSR, Re)$$

### 3.3. Peralatan

Beberapa peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

### 3.3.1. Axial Fan

*Axial fan* digunakan sebagai sumber aliran angin. Kecepatan angin yang dihasilkan akan digunakan untuk pengujian performa turbin Savonius. *Axial fan* yang digunakan adalah tipe **CKE SPV-18**, dengan spesifikasi pada tabel 3.3



Gambar 3.2 *Axial fan* **CKE SPV-18**

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

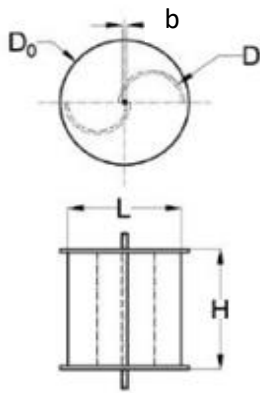
<b>Spesifikasi</b>	
<i>Diameter</i>	18 inch / 450 mm
<i>Speed</i>	2850 RPM
<i>Air Flow</i>	4413 CFM
<i>Power</i>	1700 Watt
<i>Static Press</i>	520 Pa
<i>Phase</i>	1
<i>Voltage</i>	220–240V



### 3.3.2. Benda Uji

Penelitian ini menggunakan turbin Savonius dan pengganggu berupa silinder sirkular dengan ukuran sebagai berikut :

Diameter sudu turbin (D)	: 167,1 mm
Tinggi turbin (H)	: 298 mm
Diameter poros (b)	: 19 mm
Diameter <i>endplate</i> (D <sub>0</sub> )	: 320 mm
Tebal sudu (x)	: 2,95 mm
Tebal <i>endplate</i>	: 1,8 mm
Material sudu turbin	: Pipa PVC
Material <i>endplate</i>	: Aluminium cladding 2024



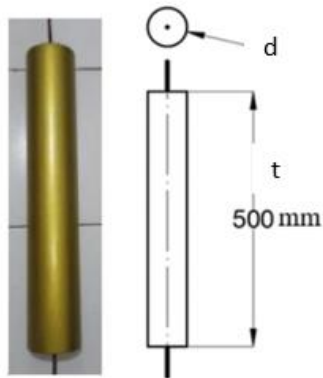
Gambar 3.3 Skema Turbin Angin Savonius

Berikut merupakan spesifikasi silinder pengganggu yang akan digunakan pada penelitian ini:

- Diameter (d) : 88,8 mm
- Tinggi (H) : 500 mm

Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius ( $d/D$ ) : 0,5

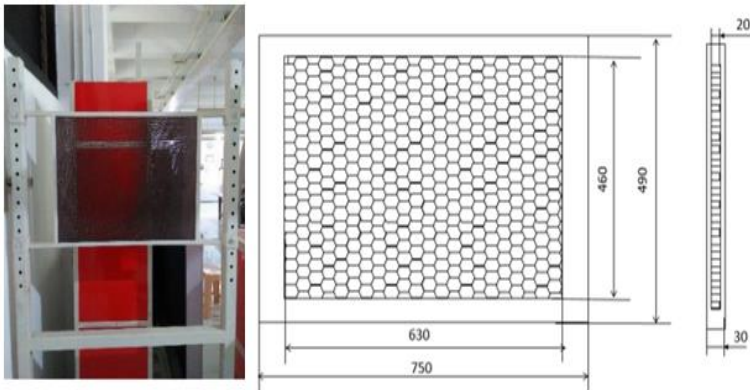
Rasio jarak antara pusat turbin dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius ( $S/D$ ) : 2,4



Gambar 3.4 Skema Silinder Pengganggu

### 3.3.3. Honeycomb

Penggunaan *Honeycomb* pada penelitian ini ditujukan untuk membuat aliran angin dari *Axial fan* menuju turbin menjadi *uniform*. Ukuran *Honeycomb* yang digunakan didasarkan oleh penelitian yang dilakukan **Bradshaw et al (1979)**.



Gambar 3.5 *Honeycomb* (mm)

Spesifikasi *honeycomb* yang digunakan adalah sebagai berikut :

Panjang sisi <i>frame</i>	: 750 mm
Panjang sisi <i>honeycomb</i>	: 630 mm
Tinggi <i>honeycomb</i>	: 460 mm
Tinggi <i>frame</i>	: 490 mm
Tebal <i>frame</i>	: 30 mm
Tebal <i>honeycomb</i>	: 20 mm
<i>Meshing size</i>	: 0,0248 lubang/mm <sup>2</sup>

#### **3.3.4. Instalasi Peralatan**

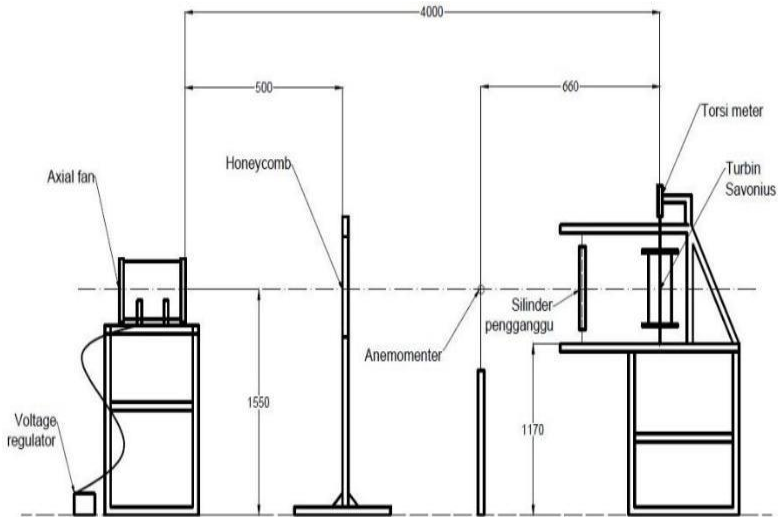
Instalasi peralatan pengujian penelitian beserta penjelasannya adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.6 dan 3.7 berikut ini :



Gambar 3.6 Instalasi Susunan Peralatan Penelitian

Keterangan :

1. *Axial fan*
2. *Honeycomb*
3. Silinder penghalang
4. Turbin Savonius



Gambar 3.7 Skema Susunan Peralatan Penelitian dan Dimensinya (mm)

### 3.3.5. Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (Nm) yang dihasilkan oleh turbin Savonius.

#### a. *Tachometer*

*Tachometer* adalah alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan putaran sudu turbin Savonius. Tipe yang digunakan adalah ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12*** dengan spesifikasi pada tabel 3.4



Gambar 3.8 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3. 4 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

<b>Spesifikasi</b>	
<b>Range</b>	5 - 999.99 rpm
<b>Accuracy</b>	0,01 % of reading or $\pm 1$ digit
<b>Resolution</b>	0,001 - 1,0 rpm
<b>Display</b>	5-digit alphanumeric LCD
<b>Memory</b>	Max, min and last
<b>Power</b>	2 "AA" 1,5 V dc Batteries
<b>Environmental</b>	5 to 40° C

b. Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin (*airflow velocity*), tipe yang digunakan pada penelitian ini adalah **Omega HHF141 Digital Anemometer**. Pengukuran dilakukan dengan satuan pengukuran m/s. Selain itu alat ini dapat mengukur suhu udara dalam satuan °F dan °C.



Gambar 3.9 Anemometer

Tabel 3.5 Spesifikasi OMEGA HHF141 Digital Anemometer

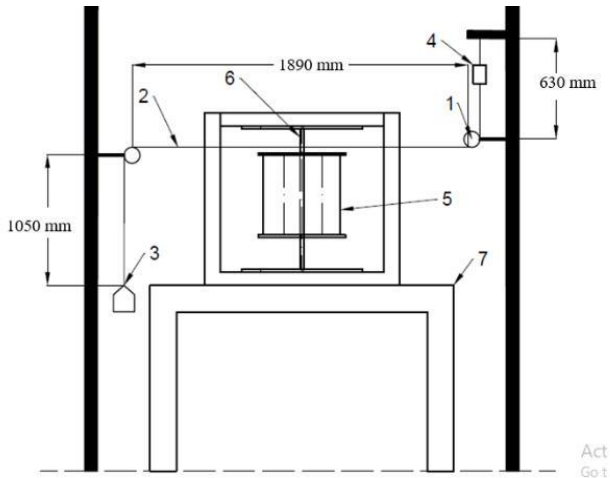
<b>Spesifikasi</b>	
<b>Accuracy</b>	AP275: +/- 1.0% of reading +/- 1 digit AP100: +/- 0.5% of F.S. +0.75% of reading + 1 digit
<b>Resolution</b>	0.01 m/sec
<b>Display</b>	0.5 inch LCD, 4 digits
<b>Air Flow</b>	



<b>Range</b>	<b>Resolution</b>
AP100	1,5 to 35,00 m/s
2,75 inch	0,2 to 40,00 m/s
<b>Temperature</b>	
<b>Operating Type</b>	<b>Temperature</b>
Instrument	0 to 500°C
Probes	-20 to 1000°C

c. *Brake dynamometer*

*Brake dynamometer* merupakan alat ukur manual pada penelitian yang berfungsi untuk mengukur torsi dinamis turbin; dimana nilainya tidak didapatkan secara langsung, namun melalui perhitungan mutlak selisih nilai yang dibaca oleh neraca pegas dengan nilai massa pemberat. *Free body diagram* dari *brake dynamometer* penelitian ditunjukkan gambar 3.10 berikut:



Gambar 3.10 Susunan *brake dynamometer*

Keterangan

1. Pulley
2. Benang nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin
7. Meja penyangga

d. *Torque Meter*

*Torque meter* ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari poros turbin yang mengindikasikan bahwa turbin memiliki *self starting*. Tipe *Torque meter* yang digunakan yaitu ***Torque meter LUTRON model : TQ-8800*** dengan *high resolution* 0,1 Ncm.



Gambar 3. 11 *Torque meter* LUTRON model TQ-8800

Tabel 3. 6 Spesifikasi *Torque meter* LUTRON mode TQ-8800

<b>Display Unit/ Resolution</b>				
<b>Unit</b>	<b>Max. Range</b>	<b>High resolution</b>	<b>Low resolution</b>	<b>Overload protection range</b>
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

e. Voltage Regulator

*Voltage regulator* digunakan pada penelitian ini untuk mengatur besar keluaran tegangan yang dibutuhkan saat

penelitian. *Voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah ***Voltage Regulator Model TDGC 2J-3***



Gambar 3.12 *Voltage Regulator*

Spesifikasi *voltage regulator* yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.7 Spesifikasi *Voltage Regulator* Model TDGC 2J-3

<b>Spesifikasi</b>	
<b>Model</b>	TDGC 2J-3
<b>Input</b>	110/220 V
<b>Output</b>	0-250 V
<b>Frequency</b>	50-60 Hz
<b>I max.</b>	4,8/12 A
<b>Capcaity</b>	2 KVA

## f. Neraca pegas

Neraca pegas digunakan untuk mengukur nilai  $s$  (gr) yang digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake dynamometer*.



Gambar 3.13 Neraca Pegas

Tabel 3. 8 Spesifikasi Neraca Pegas

Merk	Nagata
Kapasitas maksimal	3 kg
Ketelitian	10 gram

## g. Massa Pemberat

Pemberat digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake dynamometer*. Nilai massa pemberat bervariasi dari 3-20 gram.



Gambar 3.14 Massa pemberat

### 3.4. Langkah Pengukuran

#### 3.4.1. Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Dinamis

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

1. Menyiapkan peralatan-peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji yaitu turbin Savonius tanpa pengganggu pada *test section* didepan *axial fan*
3. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan Termometer
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang dibutuhkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan Anemometer
6. Setelah mendapatkan kecepatan angin yang *steady*, kemudian mengukur putaran poros turbin angin tanpa beban dan tanpa pengganggu dengan menggunakan Tachometer.

7. Mengukur torsi dinamis tanpa massa beban dan tanpa pengganggu dengan menggunakan *brake dynamometer*.
8. Menambahkan massa pemberat awal 19 gram lalu menambahkan lagi massa pemberat.
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan tachometer.
10. Mengukur nilai massa yang terbaca di neraca pegas untuk mendapatkan nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 sampai 10 hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.
12. Mengulangi langkah 5 sampai 11 dengan mengubah variasi kecepatan angin sebesar : 3,8 ; 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8 ; dan 9 m/s.
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius ( $d/D$ ) : 0,5.
14. Mengulangi langkah 4 sampai 12 dengan variasi Rasio jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonius ( $S/D$ ) : 2,4
15. Mematikan *axial fan*.
16. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran ( $n$ ) sebagai fungsi *tip speed ratio* dan fungsi bilangan Reynolds, grafik *Coefficient of Power* (COP) dan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*.

### 3.4.2. Prosedur Penelitian Pengukuran Torsi Statis

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

1. Menyiapkan peralatan-peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji yaitu turbin Savonius tanpa pengganggu pada *test section* didepan *axial fan*

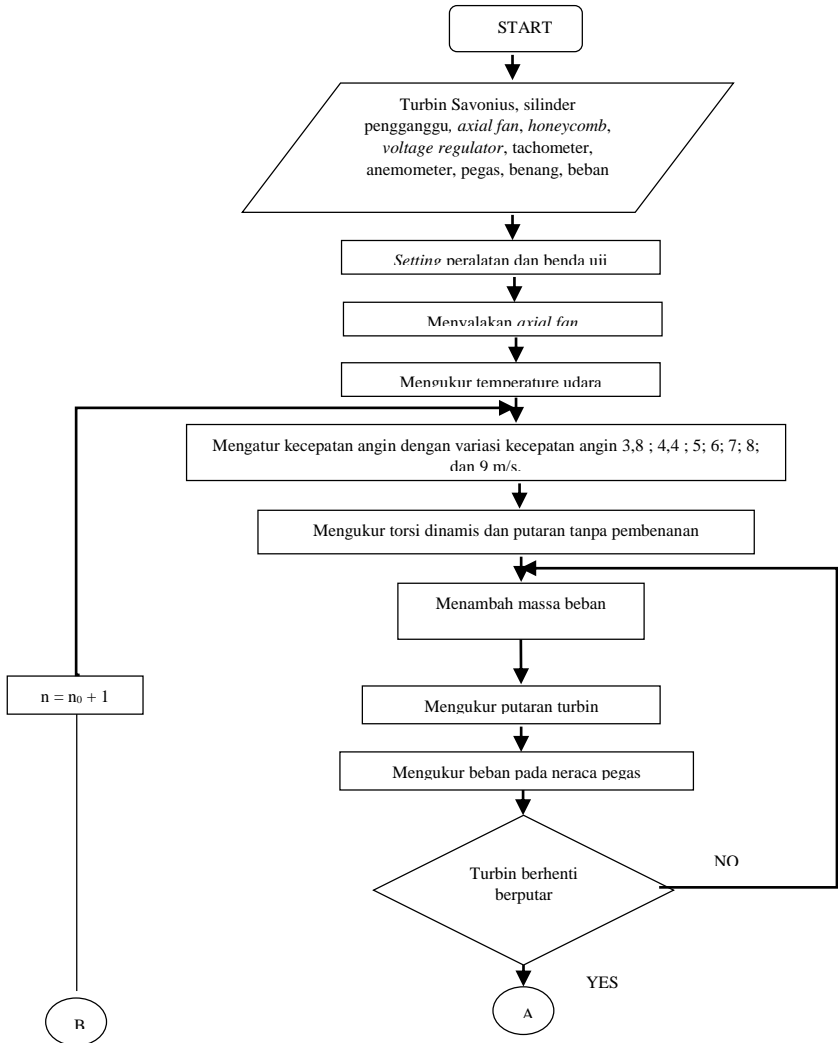
3. Menentukan variasi sudut turbin angin Savonius ( $\theta$ ) sebesar  $0^\circ$
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang dibutuhkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan Anemometer
6. Melakukan pengukuran torsi statis tanpa silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.
7. Mematikan *axial fan*.
8. Mengulangi langkah 3 sampai 7 dengan mengubah variasi sudut turbin angin Savonius ( $\theta$ )  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  dengan kenaikan  $10^\circ$  setiap pengamatan.
9. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan mengubah variasi kecepatan angin sebesar : 3,8 ; 4,4 ; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio diameter silinder pengganggu terhadap sudu turbin Savonius ( $d/D$ ) = 0,5 , dan jarak antara pusat Turbin angin Savonius dan pusat silinder pengganggu dengan rasio ( $S/D$ ) = 2,4.
11. Menentukan variasi sudut turbin angin Savonius ( $\theta$ ) sebesar  $0^\circ$ .
12. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai yang dibutuhkan.
13. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan Anemometer
14. Melakukan pengukuran torsi statis dengan silinder pengganggu menggunakan *torque meter*.
15. Mematikan *axial fan*.

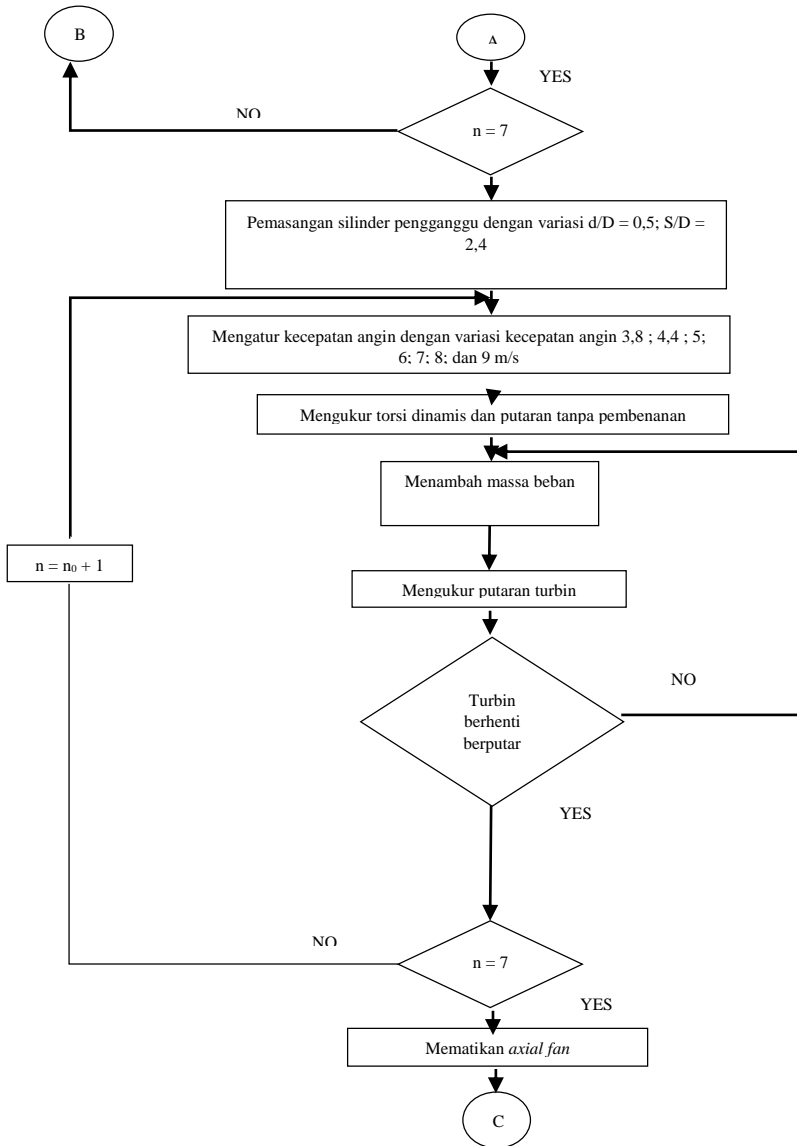


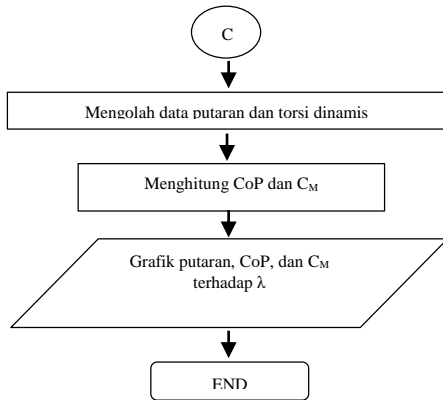
16. Mengulangi langkah 11 sampai 15 dengan mengubah variasi sudut turbin angin Savonius ( $\theta$ )  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  dengan kenaikan  $10^\circ$  setiap pengamatan.
17. Mengulangi langkah 11 sampai 16 dengan mengubah variasi kecepatan angin sebesar : 3,8; 4,4; 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.
18. Mengolah data yang diperoleh (torsi statis) dan melakukan *plotting* grafik torsi statis (TS) dan torsi statis tanpa silinder pengganggu (TS<sub>0</sub>) sebagai fungsi sudut ( $\theta$ ).

### 3.5. Flowchart Percobaan

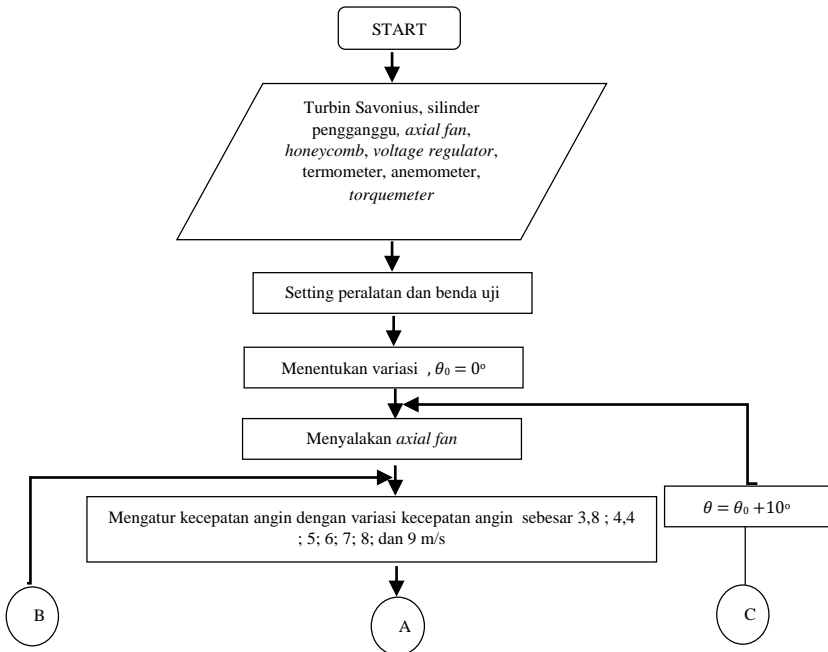
#### 3.5.1. Flowchart Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Dinamis

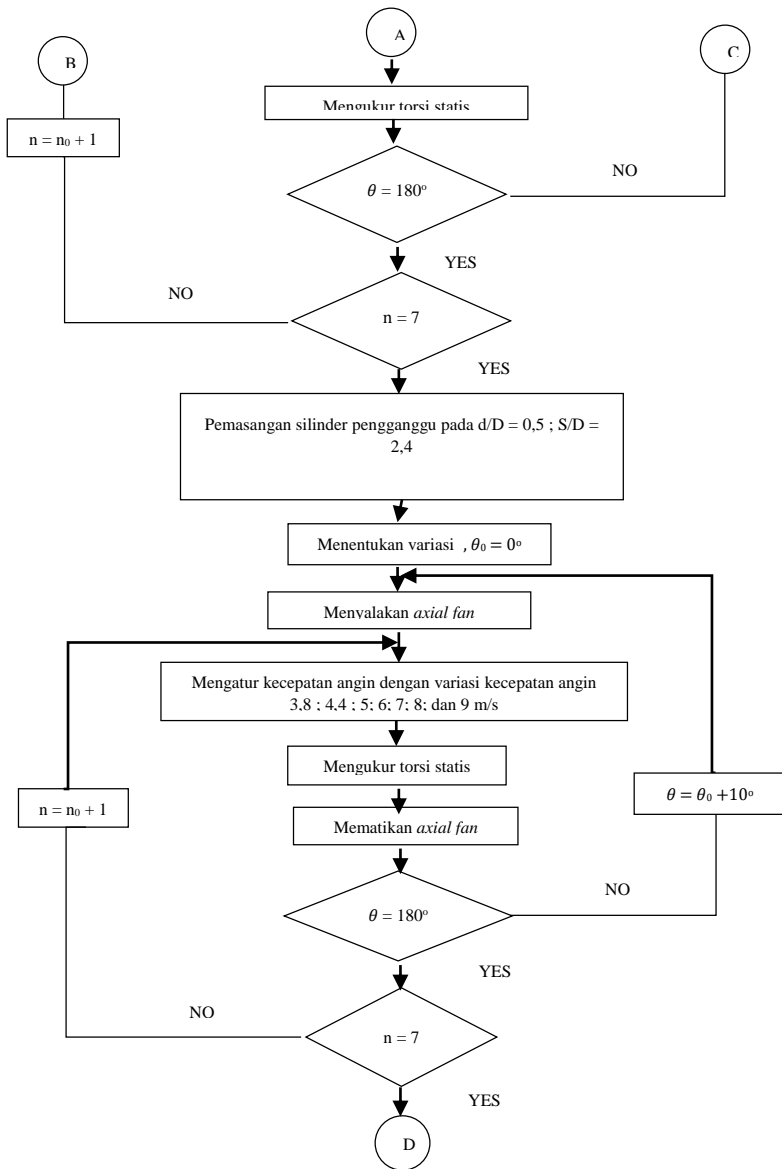


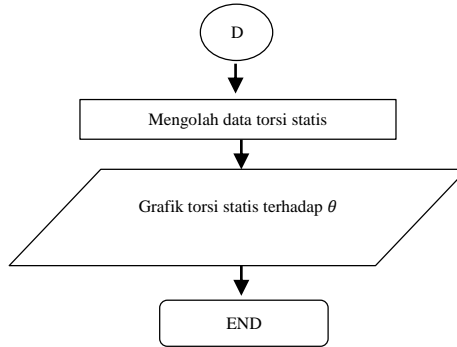




### 3.5.2. Flowchart Prosedur Penelitian Pengukuran Putaran dan Torsi Statis







### 3.6. Perhitungan Uncertainty

Saat melakukan penelitian, alat ukur memiliki ketelitian sehingga hasil yang ditunjukkan memiliki ketidakpastian (uncertainty). Perhitungan uncertainty bertujuan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan uncertainty, diambil dari data di CoP maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s.

Uncertainty pada pembacaan putaran ( $\omega$ )

$$u_{\omega} = \pm \{[u_n]^2\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{188} = \pm 5,3 \times 10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{1}{154,5} = \pm 6,48 \times 10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan angin (U)

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

Uncertainty Luas (A)

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

$$U_A = \pm \{[3,23 \times 10^{-3}]^2 + [3,35 \times 10^{-3}]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_A = \pm 0,00466$$

$$U_A = \pm 0,47\%$$

Uncertainty pada pembacaan *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ )

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{\lambda} = \pm \{(5,3 \times 10^{-3})^2 + (6,48 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\lambda} = \pm 6,8 \times 10^{-3}$$

$$u_{\lambda} = \pm 0,68\%$$

Uncertainty Torsi Dinamis ( $T_D$ )

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

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

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

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

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

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

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

Maka:

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

$\triangleright$  Uncertainty pada pembacaan neraca pegas (s-m)

$$u_{(s-m)} = \pm \frac{10}{181,4} = \pm 0,055$$

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

$$u_{(r)} = \pm \frac{0.01}{12.7} = \pm 0,00078$$

$$U_{T_D} = \pm \left\{ [0,055]^2 + [0,00078]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{T_D} = \pm 0,05513$$

$$U_{T_D} = \pm 5,513\%$$

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

$$u_{C_M} = \pm \left\{ u_{T_d}^2 + u_{\rho}^2 + u_U^2 + u_A^2 + u_R^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm \left\{ (0,05513)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 \right. \\ \left. + (4,66 \times 10^{-3})^2 + (6,48 \times 10^{-3})^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,0553 = 5,53\%$$



Uncertainty pada pembacaan *Coefficient of Power* (CoP)

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,0553)^2 + (6,8 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0557 = 5,57\%$$

Uncertainty pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

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

Mencari uncertainty mu ( $\mu$ )

$$T = 28,5^{\circ}\text{C}$$

$$u_{\mu} = \pm \frac{\partial \mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \partial T)$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = \frac{\mu(29^{\circ}) - \mu(27^{\circ})}{(29^{\circ} - 27^{\circ})\text{C}} = \frac{(1,86 \times 10^{-5} - 1,85 \times 10^{-5})\text{Ns/m}^2}{2^{\circ}\text{C}} = 5 \times 10^{-8} \text{Ns/m}^2\text{C}$$

$$U_{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \partial T) = \frac{1}{\frac{(1,86 \times 10^{-5})\text{Ns}}{\text{m}^2}} \cdot \frac{5 \times 10^{-8} \text{Ns}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot (\pm 0,5^{\circ}\text{C})$$

$$= 1,34 \times 10^{-2}$$

$$= 0,0134$$

Sehingga didapatkan,

$$u_{RE} = \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (3,23 \times 10^{-3})^2 + (-0,0134)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 0,01436 = 1,436\%$$

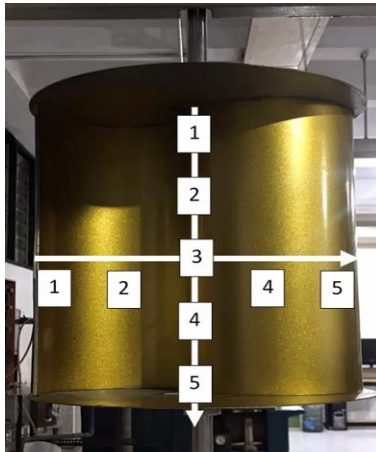
Berikut nilai dari uncertainty yang didapatkan pada CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan kecepatan angin 5 m/s :

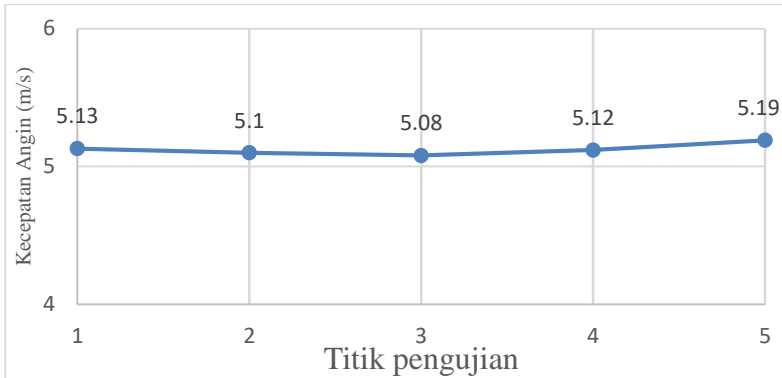
Tabel 3.9 Hasil Perhitungan *Uncertainty* Pengukuran

Parameter	Uncertainty (%)
Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )	0,68%
Coefficient of Moment ( $C_M$ )	5,53%
Coefficient of Power (CoP)	5,57%
Reynolds Number (Re)	1,436%

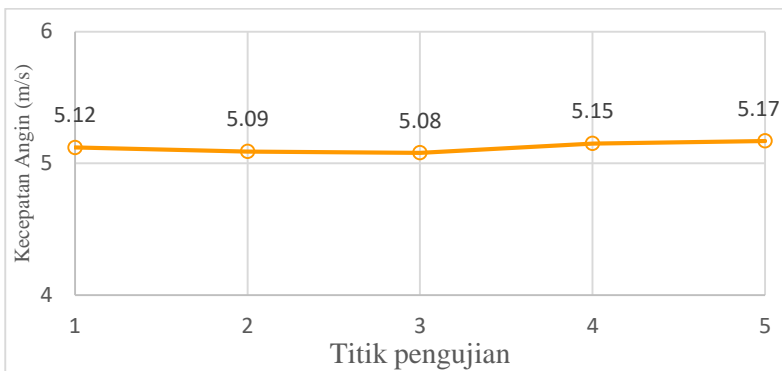
### 3.7. Pengujian Uniformity

Salah satu batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah aliran angin dari *axial fan* diasumsikan sebagai *uniform flow*. Dalam mendapatkan aliran yang *uniform* digunakan alat yaitu *honeycomb* yang diletakkan di depan *axial fan*. Pengukuran kecepatan *uniform flow* dilakukan pada 5 titik vertikal dan 5 titik horizontal, serta jarak alat ukur dari turbin angin Savonius adalah 4D atau 660 mm. Berikut merupakan hasil pengujian *uniformity* yang telah dilakukan pada kecepatan angin 5 m/s.

Gambar 3.15 Posisi pengukuran *uniformity test*



(a)



(b)

Gambar 3.16 Grafik Distribusi Kecepatan (a) Horizontal (b) Vertikal



## 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 ( $P_{\text{std}}$ ) =  $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ .
2. Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_{\text{std}}$ ) = 288,2 K.
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_{\text{std}}$ ) = 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 Densitas Udara ( $\rho$ )

Dalam mencari densitas udara, digunakan persamaan Hukum Boyle – Gay Lussac mengenai pemuaian 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 4.1 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 diasumsikan 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 4.2 menjadi:

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

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

$$\rho_2 = 1,171 \text{ kg/m}^3$$

#### 4.1.2. Perhitungan Reynolds Number

- **Langkah pertama : mencari Densitas Udara**  
Didapatkan densitas udara sebesar  $1,171 \text{ kg/m}^3$  dari perhitungan pada subbab 4.1.1.
- **Langkah 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:

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

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

- **Perhitungan Reynolds Number**  
Berdasarkan persamaan 2.2, maka bilangan Reynolds pada kecepatan angin  $5 \text{ m/s}$  adalah sebagai berikut:

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

$$= \frac{1,171 \text{ kg/m}^3 \times 5 \text{ m/s} \times (2 \times 0,1671 - 0,01956 - 2 \times 0,00295) \text{ m}}{\left(1,86 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right)}$$

$$= 97268 \approx 9,7 \times 10^4$$

#### 4.1.3. Perhitungan *Tip Speed Ratio*

Berdasarkan persamaan 2.18, rumus untuk mendapatkan nilai *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

Contoh perhitungan data *Tip Speed Ratio* diambil pada data pada kecepatan angin 5 m/s sebagai berikut :

Dimana:

$n$  = jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi (298)}{60} = 31,19 \text{ rad/s}$$

$R$  = jari-jari turbin angin Savonius

$$= \frac{L}{2} = \frac{2D - b - 2t}{2} = \frac{(2 \times 167,1) - 19,56 - (2 \times 2,95)}{2} = 154,5 \text{ mm} =$$

$$0,1545 \text{ m}$$

$$U = 5 \text{ m/s}$$

Sehingga didapatkan nilai:

$$\lambda = \frac{31,19 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1545 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,964$$

#### 4.1.4. Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*

Berdasarkan persamaan 2.17 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power (CoP)* pada kecepatan angin ( $U$ ) = 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

Dimana :

$A$  = Luas penampang pada turbin angin Savonius yang dilewati oleh angin

$$\begin{aligned} &= L \times H = (2D - b - 2t) \cdot H \\ &= (2 \times 0,1671 - 0,01956 - 2 \times 0,00295) \text{ m} \times 0,298 \text{ m} = 0,092 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

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

$\omega$  = Kecepatan sudut turbin angin Savonius = 211 rpm = 22,085 rad/s

$m$  = massa pembebanan (kg) = 0,148 kg

$s$  = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 0,32 kg

Sehingga didapatkan nilai CoP :

$$CoP = \frac{|0,148 - 0,32| \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,0125 \text{ m} \cdot 22,085 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,092 \text{ m}^2 \cdot (5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3} = 0,0703 = 7,03\%$$

#### 4.1.5. Perhitungan *Coefficient of Moment* ( $C_M$ )

Berdasarkan persamaan 2.21, untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) pada kecepatan angin 5 m/s adalah sebagai berikut :

$$C_M = \frac{CoP}{\lambda} = \frac{|m - s|g r}{\frac{1}{2} \rho A U^2 (\frac{1}{2}L)}$$

Sehingga didapatkan nilai  $C_M$  :

$$C_M = \frac{|0,148 - 0,32| \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,0125 \text{ m}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,092 \text{ m}^2 \cdot (5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,309 \text{ m}} = 0,103$$

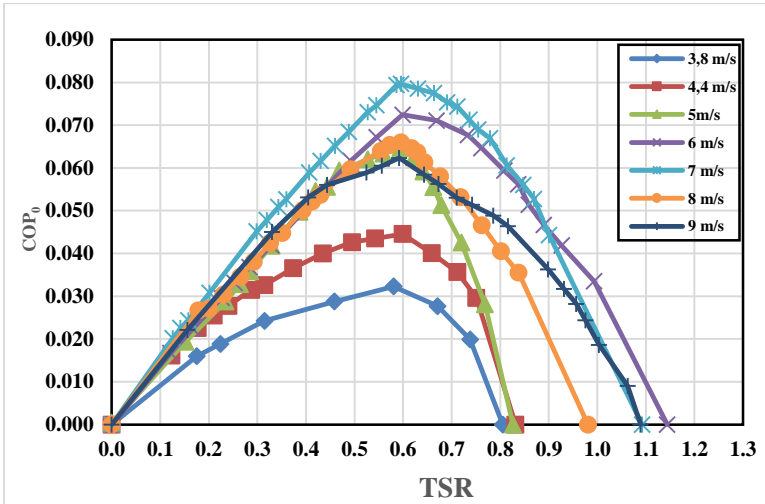


## **4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu**

Analisa performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ini dilakukan untuk meninjau kondisi awal dari performa turbin angin Savonius sebelum diberi pengganggu yang nantinya akan dibandingkan performanya dengan menggunakan pengganggu. Analisa performa ini dilakukan pada seluruh *range* kecepatan angin dari 3,8 m/s hingga 9 m/s. Analisa yang dilakukan meliputi *Coefficient of Power* terhadap TSR, *Coefficient of Moment* terhadap TSR dan torsi statis yang dihasilkan turbin terhadap sudut bukaan turbin.

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

Pada awal penelitian ini didapatkan nilai CoP turbin tanpa pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap TSR turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada seluruh *range* kecepatan angin dari 3,8 m/s hingga 9 m/s. Pengukuran dilakukan menggunakan skema *brake dynamometer* dan *tachometer*. 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* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

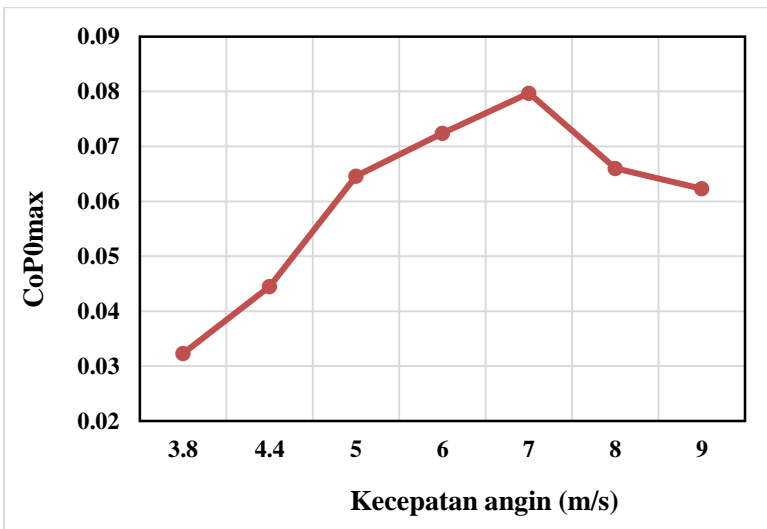
Gambar 4.1 menunjukkan bahwa grafik  $CoP_0$  terhadap TSR turbin memiliki *trendline* parabolik dimana nilai  $CoP_0$  akan naik hingga mencapai puncaknya pada nilai TSR tertentu, kemudian turun. *Trendline* grafik untuk kecepatan 3,8 m/s adalah yang paling rendah dan kecepatan 7 m/s adalah yang paling tinggi. Nilai  $CoP_0$  maksimum untuk kecepatan angin 3,8 m/s adalah 0,0323 (3,23%) pada TSR 0,581; kemudian pada kecepatan 4,4 m/s sebesar 0,0445 pada TSR 0,599; kecepatan 5 m/s sebesar 0,0661 pada TSR 0,608; kecepatan 6 m/s sebesar 0,0724 pada TSR 0,599; kecepatan 7 m/s sebesar 0,0797 pada TSR 0,596; kecepatan 8 m/s sebesar 0,066 pada TSR 0,596; dan pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,0623 pada TSR 0,592. Disimpulkan bahwa performa didapatkan pada kecepatan angin 7 m/s yakni 0,0797 atau 7,97% pada TSR = 0,596. Sedangkan  $CoP_0$  terendah didapatkan pada kecepatan 3,8 m/s sebesar 0,0323 atau 3,23% pada TSR = 0,581.

Jika melihat *trendline* grafik, maka nilai  $CoP_0$  turbin Savonius tanpa pengganggu berbanding lurus terhadap peningkatan kecepatan angin dari kecepatan awal 3,8 m/s hingga puncaknya pada kecepatan optimumnya sebesar 7 m/s dimana  $CoP_0$  nya naik; lalu kemudian menjadi berbanding terbalik dimana performanya mengalami penurunan pada kecepatan 8 m/s hingga 9 m/s.. Hal ini terjadi karena secara matematis nilai  $CoP$  berbanding lurus terhadap peningkatan torsi dinamis dan berbanding terbalik dengan kecepatan angin fungsi pangkat tiga, sehingga ketika kecepatan rendah perubahan nilai torsi dinamis masih lebih dominan, namun setelah mencapai titik  $CoP$  maksimum pada kecepatan angina optimumnya, maka perubahan nilai kecepatan angin lebih signifikan maka  $CoP_{maks}$  nya akan turun. Selain itu dengan meningkatnya kecepatan angin maka *losses* pada komponen turbin seperti bearing, dsb. akan turun hingga pada titik minimumnya dimana  $CoP$  berada pada titik maksimumnya, lalu kemudian pada kecepatan angin yang sangat tinggi *losses* yang sebelumnya turun akan mulai naik sehingga  $CoP$  yang dihasilkan justru akan menjadi lebih rendah; atau bisa dikatakan grafik *losses* merupakan kebalikan dari grafik  $CoP$ .

Selain itu, serupa dengan perubahan nilai  $CoP$ , dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) maksimum turbin mengalami kenaikan dari kecepatan angin awal 3,8 m/s sebesar 0,805 hingga mencapai puncaknya pada kecepatan 6 m/s sebesar 1,144; sebelum kemudian turun pada kecepatan selanjutnya. Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga ketika kecepatan angin semakin besar maka kecepatan putar turbin semakin besar pula. Namun pada kecepatan angin yang sangat tinggi setelah TSR maksimum mencapai titik maksimumnya, maka TSR maksimum akan turun karena pada kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio*

maksimumnya turun. Hal ini juga yang berdampak pada turunnya performa turbin dimana  $CoP_{nya}$  turun ketika kecepatan angin sangat tinggi dan telah melewati titik optimum.

#### 4.2.2. Analisa Nilai *Coefficient of Power* maksimum ( $CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin ( $U$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



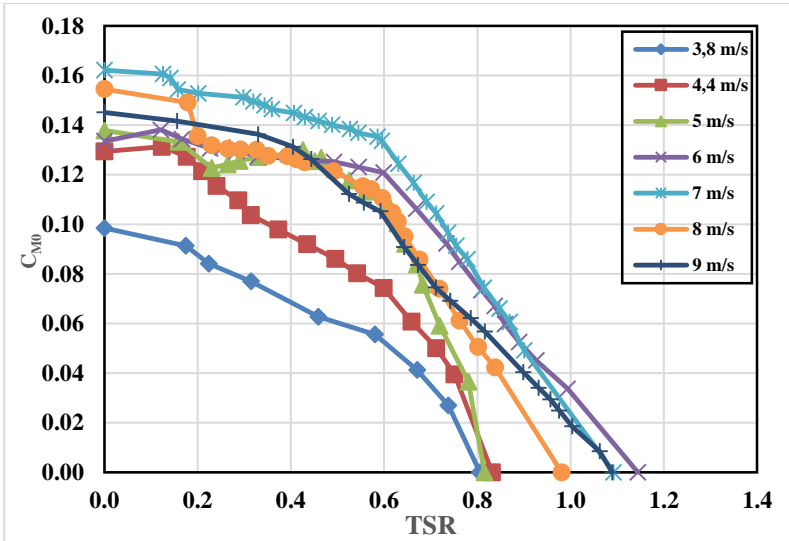
Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* maksimum ( $CoP_{0max}$ ) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin ( $U$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Setelah mendapatkan grafik *Coefficient of Power* turbin terhadap fungsi *Tip Speed Ratio*, maka didapatkan nilai *Coefficient of Power* maksimum untuk setiap kecepatan angin yang digunakan sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 4.2. Berdasarkan gambar 4.2. diatas, grafik  $CoP_{0max}$  optimum turbin Savonius tanpa pengganggu memiliki *trendline* parabolic dimana pada

kecepatan angin awal 3,8 m/s,  $C_{p0max}$  nya sebesar 0,0323 dan mengalami kenaikan hingga sebesar 0,0797 pada kecepatan angin optimumnya 7 m/s, lalu kemudian turun pada kecepatan angin berikutnya. Hal ini terjadi karena dengan meningkatnya kecepatan angin yang semakin tinggi menyebabkan *losses* pada komponen turbin seperti bearing, dsb. akan bertambah sehingga daya yang dihasilkan justru akan menjadi lebih rendah, serta kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan performanya turun.

#### **4.2.3. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu**

Pada awal penelitian ini didapatkan nilai  $C_M$  turbin tanpa pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap TSR turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada seluruh *range* kecepatan angin dari 3,8 m/s hingga 9 m/s. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada gambar 4.3 dalam bentuk grafik.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu

Berdasarkan gambar 4.3 dapat dilihat bahwa grafik *Coefficient of Moment* ( $C_{M0}$ ) turbin tanpa pengganggu memiliki *trendline* yang cenderung menurun seiring meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (TSR). Nilai  $C_{M0}$  maksimum untuk kecepatan angin 3,8 m/s adalah 0,0985 pada TSR 0; kemudian pada kecepatan 4,4 m/s sebesar 0,1313 pada TSR 0,123; kecepatan 5 m/s sebesar 0,1379 pada TSR 0; kecepatan 6 m/s sebesar 0,1381 pada TSR 0,121; kecepatan 7 m/s sebesar 0,1622 pada TSR 0; kecepatan 8 m/s sebesar 0,1546 pada TSR 0; dan pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,1452 pada TSR 0. Disimpulkan bahwa  $C_{M0}$  maksimum turbin didapatkan pada kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,1622, sedangkan yang terendah didapat pada kecepatan angin 3,8 m/s.

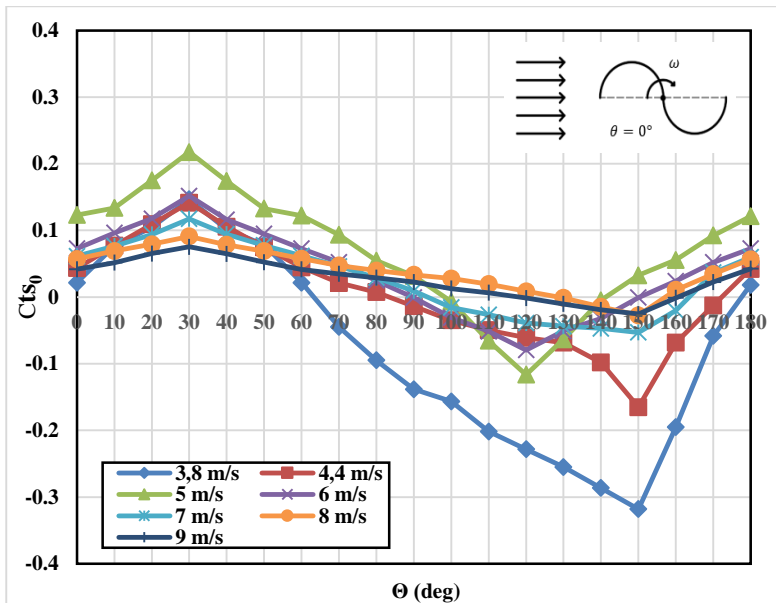
Bila ditinjau dari nilai maksimumnya, maka  $C_M$  maksimum turbin akan naik seiring kecepatan angin sampai pada nilai maksimumnya pada kecepatan angin optimumnya, dalam kasus ini

pada 7 m/s, dan kemudian akan turun. Secara matematis sesuai persamaan 2.20, nilai  $C_M$  berbanding lurus terhadap peningkatan torsi dinamis turbin dan berbanding terbalik dengan nilai kecepatan angin pangkat dua, sehingga ketika kecepatan angin semakin tinggi maka akan menyebabkan rasio perbandingan torsi dinamis dan kecepatan angin kuadrat ( $C_M$ ) naik hingga pada titik optimumnya dimana kenaikan kecepatan angin kuadrat lebih dominan daripada peningkatan torsi dinamis sehingga akan menyebabkan semakin rendahnya nilai  $C_M$  turbin angin Savonius. Pada eksperimen ini didapatkan bahwa nilai  $C_M$  turbin naik dari kecepatan awal 3,8 m/s hingga pada titik maksimum pada kecepatan optimumnya yakni 7 m/s sebelum kemudian turun setelah kecepatan optimumnya (8 m/s hingga 9 m/s).

Selain itu, serupa dengan perubahan nilai  $C_M$  maksimumnya, dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) maksimum turbin mengalami kenaikan dari kecepatan angin awal 3,8 m/s sebesar 0,805 hingga mencapai puncaknya pada kecepatan 6 m/s sebesar 1,144; sebelum kemudian turun pada kecepatan selanjutnya. Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga ketika kecepatan angin semakin besar maka kecepatan putar turbin semakin besar pula. Namun pada kecepatan angin yang sangat tinggi setelah TSR maksimum mencapai titik maksimumnya, maka TSR maksimum akan turun karena pada kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio* maksimumnya turun.

#### 4.2.4. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts_0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada awal penelitian ini didapatkan nilai torsi statis terhadap fungsi sudut bukaan turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada seluruh *range* kecepatan angin dari 3,8 m/s hingga 9 m/s; yang dilakukan menggunakan *torquemeter*. Torsi statis ini kemudian diolah menjadi *Coefficient of Static Torque* ( $C_{ts}$ ) sesuai rumus 2.24. Data  $C_{ts}$  dapat dilihat pada gambar 4.4 berikut dalam bentuk grafik.



Gambar 4.4 Grafik *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts_0}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) bukaan turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu



Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa grafik  $C_{ts0}$  turbin berbentuk sinusoidal pada seluruh kecepatan angin; dan didapatkan bahwa nilai  $C_{ts0}$  mengalami peningkatan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ . Kemudian nilai  $C_{ts0}$  tersebut mengalami penurunan hingga sudut  $130^\circ$  untuk kecepatan angin 5 dan 6 m/s dan sudut  $150^\circ$  untuk kecepatan angin lainnya; kemudian naik hingga sudut akhir  $180^\circ$ . Pada kecepatan angin 3,8 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,1466 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,3181 pada sudut  $130^\circ$ . Pada kecepatan angin 4,4 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,1416 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,1652 pada sudut  $150^\circ$ , kemudian pada kecepatan angin 5 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,2174 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,1164 pada sudut  $120^\circ$ . Pada kecepatan angin 6 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,1516 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar 0,0795 pada sudut  $120^\circ$ . Pada kecepatan angin 7 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,1173 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,053 pada sudut  $150^\circ$ ; lalu pada kecepatan angin 8 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,091 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,0274 pada sudut  $150^\circ$ , dan terakhir pada kecepatan angin 9 m/s didapatkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum sebesar 0,0754 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts0}$  minimum sebesar -0,0255 pada sudut  $150^\circ$ . Dapat disimpulkan nilai  $C_{ts0}$  maksimum terbesar dihasilkan pada kecepatan angin 5 m/s dan  $C_{ts0}$  minimum terbesar dihasilkan pada kecepatan angin 9 m/s. Secara teori sudah benar bahwa ketika kecepatan angin semakin tinggi maka nilai torsi statis yang dihasilkan juga akan semakin besar, namun peningkatan nilai torsi statis yang dihasilkan tidak sebanding dengan peningkatan kecepatan angin kuadrat sesuai persamaan 2.24, sehingga menyebabkan nilai  $C_{ts0}$  turbin yang dihasilkan justru akan mengalami penurunan.

Pada penelitian ini, peningkatan nilai torsi statis turbin terjadi pada sudut  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ , sudut  $120^\circ$  sampai  $180^\circ$  dan pada sudut  $150^\circ$  sampai  $180^\circ$  dikarenakan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* lebih besar daripada sisi *returning blade*, sehingga menyebabkan

selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat dan torsi statis yang terjadi akan meningkat juga sehingga meningkatkan nilai  $C_{ts0}$ ; sedangkan sebaliknya pada sudut  $30^\circ$  sampai dengan sudut  $120^\circ$  dan  $150^\circ$  terjadi penurunan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* turun, sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* meningkat; sehingga hasil ini menyebabkan selisih gaya drag pada kedua sudu akan turun dan torsi statis akan menurun pula sehingga nilai  $C_{ts0}$  nya turun. Didapatkan pula bahwa torsi statis maksimum turbin diperoleh pada sudut  $30^\circ$  untuk semua kecepatan angin, yang disebabkan pada sudut tersebut gaya *drag* pada sisi *advancing blade* yang dihasilkan paling besar sehingga torsi statis dan  $C_{ts0}$  yang dihasilkan pada sudut tersebut paling besar pula. Selain itu dapat dicermati bahwa grafik  $C_{ts0}$  turbin tanpa pengganggu pada kecepatan angin 5 dan 6 m/s memiliki bentuk yang berbeda dibandingkan grafik  $C_{ts0}$  pada kecepatan angin lainnya dimana torsi statis terendah pada dua kecepatan tersebut didapatkan pada sudut turbin  $120^\circ$ , sedangkan pada kecepatan lainnya didapatkan pada sudut  $150^\circ$ .

Berdasarkan grafik dapat dilihat pula bahwa terdapat pula nilai  $C_{ts0}$  yang negatif yang berarti pada sudut tertentu turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga pada sudut tertentu turbin membutuhkan torsi awal untuk dapat berputar. Pada setiap kecepatan angin, turbin memiliki nilai torsi statis dan  $C_{ts0}$  negatif pada *range* sudut bukaan turbin ( $\theta$ ) yang berbeda-beda. Dapat disimpulkan juga bahwa pada seluruh kecepatan angin,  $C_{ts0}$  turbin berharga negatif pada rentang sudut  $130^\circ$  hingga  $140^\circ$  yang menandakan bahwa pada rentang sudut tersebut entah ketika turbin Savonius dialiri angin dengan kecepatan angin paling rendah sebesar 3,8 m/s maupun paling tinggi sebesar 9 m/s, turbin Savonius tersebut tidak memiliki kemampuan untuk mulai berputar sendiri memerlukan bantuan torsi awal untuk dapat berputar.

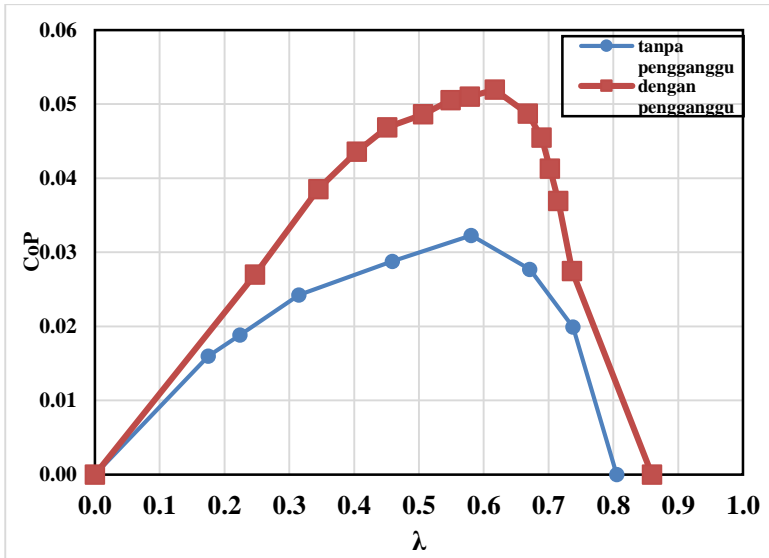
### **4.3. Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Menggunakan Silinder Pengganggu**

Setelah melakukan analisa turbin tanpa pengganggu, maka dilakukan analisa ini yang bertujuan untuk mengetahui kondisi performa turbin angin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu dan mengetahui perbandingan performa keduanya. Analisa yang dilakukan meliputi *Coefficient of Power* terhadap TSR, *Coefficient of Moment* terhadap TSR, dan torsi statis terhadap sudut bukaan turbin.

#### **4.3.1. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s s.d. 9 m/s**

##### **4.3.1.1. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 3,8 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.5 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 3,8$  m/s

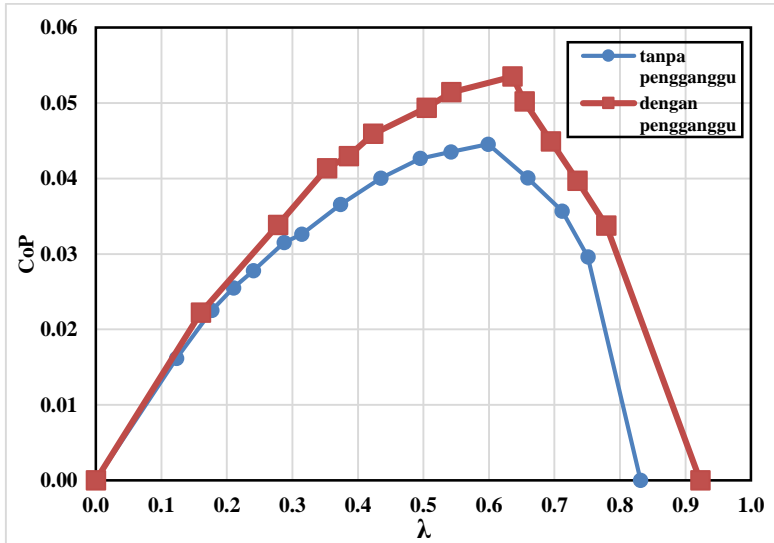
Berdasarkan gambar 4.5 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 3,8 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0323 pada TSR= 0,581; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami kenaikan sebesar 60,8% menjadi 0,0519 pada TSR = 0,617. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi S/D = 2,4 pada kecepatan angin 3,8 m/s ini efektif untuk meningkatkan performa turbin karena

keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga meningkatkan performanya. Fenomena lain yang mendukung adalah yang pertama bahwa silinder pengganggu dapat mengarahkan aliran angin ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin menjadi naik ; dan yang kedua bahwa silinder pengganggu menyebabkan *boundary layer* aliran angin pada *returning blade* turbin akan lebih cepat bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen sehingga menyebabkan titik separasi mundur dan *wake* mengecil. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* pada *returning blade* turun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga nilai torsi naik dan dapat meningkatkan performa turbin. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin juga naik dari 0,805 saat tanpa pengganggu menjadi 0,86 setelah diberi pengganggu. Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga ketika kecepatan angin semakin meningkat dan turbin diberi pengganggu maka kecepatan putar turbin semakin besar pula karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat pemberian pengganggu.

#### **4.3.1.2. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 4,4 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of*

*Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.6 berikut yang berupa grafik.



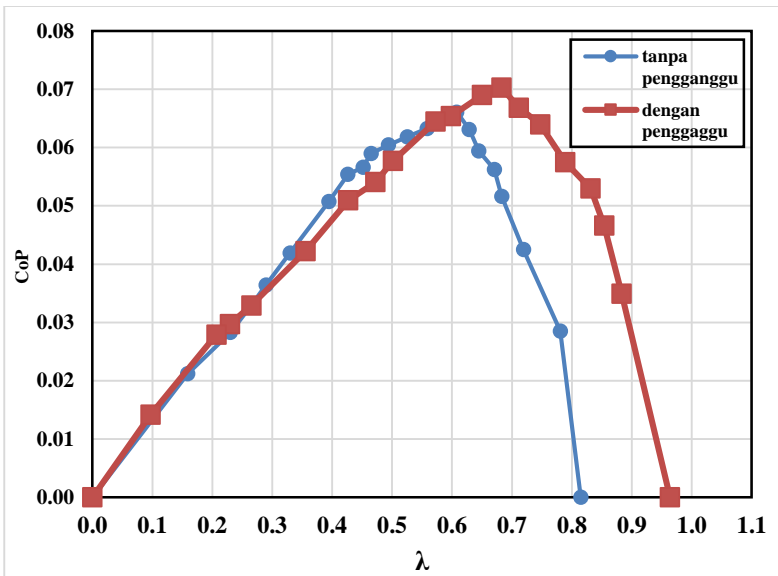
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 4,4$  m/s

Berdasarkan gambar 4.6 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 4,4 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0445 pada TSR= 0,599; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami

kenaikan sebesar 20,2% menjadi 0,0535 pada  $TSR = 0,636$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 4,4 m/s ini cukup efektif untuk meningkatkan performa turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga meningkatkan performanya. Fenomena lain yang mendukung adalah yang pertama bahwa silinder pengganggu dapat mengarahkan aliran ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin menjadi naik ; dan yang kedua bahwa silinder pengganggu menyebabkan *boundary layer* aliran angin pada *returning blade* turbin akan lebih cepat bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen sehingga menyebabkan titik separasi mundur dan *wake* mengecil. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* pada *returning blade* turun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga nilai torsi naik dan dapat meningkatkan performa turbin. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin juga naik dari 0,831 saat tanpa pengganggu menjadi 0,922 setelah diberi pengganggu. Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga ketika kecepatan angin semakin meningkat dan turbin diberi pengganggu maka kecepatan putar turbin semakin besar pula karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat pemberian pengganggu.

#### 4.3.1.3. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5$ m/s

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 5 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 5$  m/s

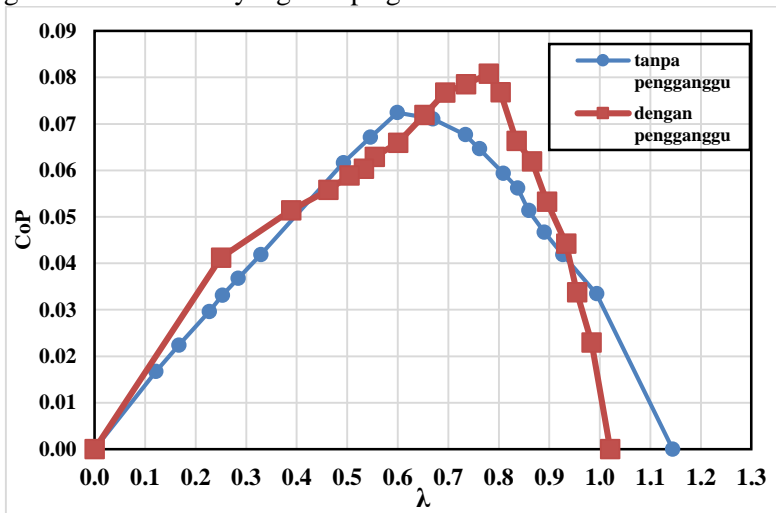


Berdasarkan gambar 4.7 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0661 pada TSR= 0,608; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami kenaikan sebesar 6,4% menjadi 0,0703 pada TSR = 0,68. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 5 m/s ini cukup efektif untuk meningkatkan performa turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga meningkatkan performanya. Fenomena lain yang mendukung adalah yang pertama bahwa silinder pengganggu dapat mengarahkan aliran ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin menjadi naik ; dan yang kedua bahwa silinder pengganggu menyebabkan *boundary layer* aliran angin pada *returning blade* turbin akan lebih cepat bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen sehingga menyebabkan titik separasi mundur dan *wake* mengecil. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* pada *returning blade* turun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga nilai torsi naik dan dapat meningkatkan performa turbin. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin juga naik dari 0,815 saat tanpa pengganggu menjadi 0,962 setelah diberi pengganggu. Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga ketika

kecepatan angin semakin meningkat dan turbin diberi pengganggu maka kecepatan putar turbin semakin besar pula karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat pemberian pengganggu.

#### 4.3.1.4. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 6 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut yang berupa grafik.



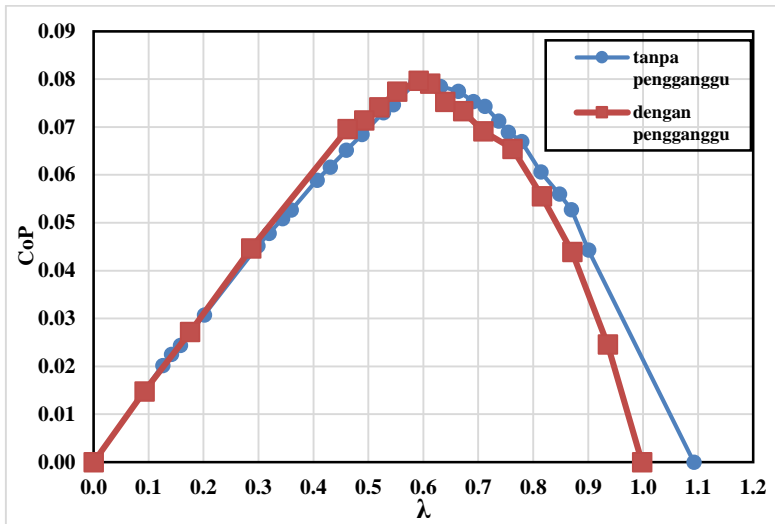
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 6$  m/s

Berdasarkan gambar 4.8 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 6 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0724 pada TSR= 0,599; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami kenaikan sebesar 11,6% menjadi 0,0808 pada TSR = 0,781. Kecepatan angin 6 m/s ini pula yang menjadi kecepatan optimum dalam eksperimen turbin Savonius dengan jarak silinder pengganggu  $S/D = 2,4$  ini dimana didapatkan CoP maksimumnya yang paling tinggi. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 6 m/s ini efektif untuk meningkatkan performa turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga meningkatkan performanya. Fenomena lain yang mendukung adalah yang pertama bahwa silinder pengganggu dapat mengarahkan aliran ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin menjadi naik ; dan yang kedua bahwa silinder pengganggu menyebabkan *boundary layer* aliran angin pada *returning blade* turbin akan lebih cepat bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen sehingga menyebabkan titik separasi mundur dan *wake* mengecil. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* pada *returning blade* turun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat, sehingga nilai torsi naik dan dapat meningkatkan performa turbin. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin mengalami

penurunan dari 1,144 saat tanpa pengganggu menjadi 1,02 setelah diberi pengganggu, walaupun masih lebih tinggi daripada TSR turbin dengan pengganggu pada kecepatan 5 m/s ( $TSR = 0,964$ ). Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga seharusnya ketika kecepatan angin semakin meningkat dan turbin diberi pengganggu maka kecepatan putar turbin semakin besar pula karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat pemberian pengganggu. Namun pada kasus kecepatan 6 m/s ini, ada kemungkinan bahwa pada kecepatan angin yang relatif tinggi menyebabkan TSR maksimum akan turun karena pada kecepatan angin yang tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai seperti *solid wall* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna serta keberadaan silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  sendiri terhadap turbin dianggap relative sudah jauh sehingga pengganggu dan turbin dianggap sebagai dua silinder yang tidak berhubungan pada kecepatan angin yang terlalu tinggi. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio* maksimumnya turun sedikit lebih rendah daripada tanpa diberi pengganggu.

#### **4.3.1.5. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 7 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.9 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 7$  m/s

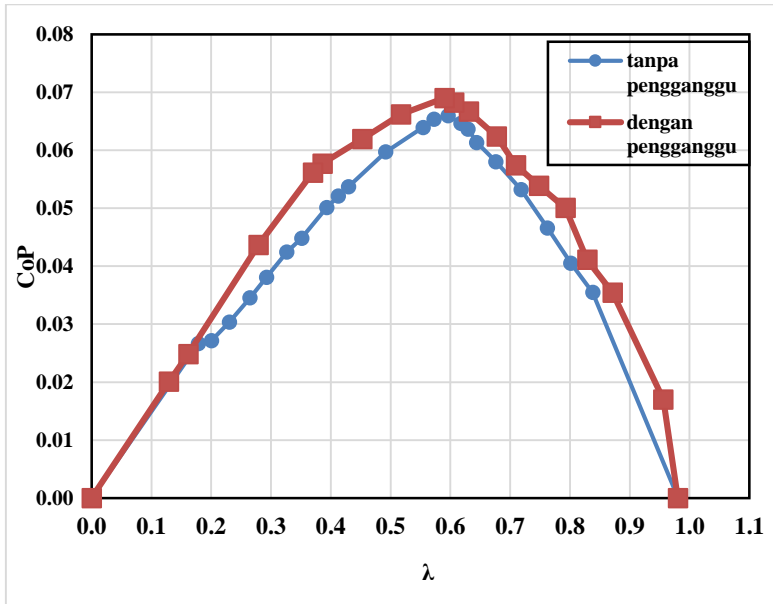
Berdasarkan gambar 4.9 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 7 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0797 pada TSR= 0,596; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya sedikit saja mengalami kenaikan sebesar 0,1% menjadi 0,0798 pada TSR = 0,59. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 7 m/s ini tidak berdampak signifikan terhadap

performa turbin, dan CoP turbin pada kecepatan ini mengalami penurunan setelah mencapai titik kecepatan angin optimumnya yaitu pada 6 m/s. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin mengalami penurunan dari 1,092 saat tanpa pengganggu menjadi 0,998 setelah diberi pengganggu dan juga TSR maksimumnya turun dibandingkan TSR turbin dengan pengganggu pada kecepatan 6 m/s (1,02 menjadi 0,998). Hal ini dikarenakan *Tip Speed Ratio* maksimum turbin terjadi ketika turbin berputar tanpa beban, sehingga seharusnya ketika kecepatan angin semakin meningkat dan turbin diberi pengganggu maka kecepatan putar turbin semakin besar pula karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat akibat pemberian pengganggu. Namun pada kasus kecepatan 7 m/s ini, ada kemungkinan bahwa pada kecepatan angin yang relatif tinggi menyebabkan TSR maksimum akan turun karena pada kecepatan angin yang tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai seperti *solid wall*, serta keberadaan silinder pengganggu pada posisi S/D = 2,4 sendiri terhadap turbin dianggap relative sudah jauh sehingga pengganggu dan turbin dianggap sebagai dua silinder yang tidak berhubungan pada kecepatan angin yang terlalu tinggi. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio* maksimumnya turun sedikit lebih rendah daripada tanpa diberi pengganggu, dan hal ini juga yang menyebabkan performa turbin stagnan dimana CoP nya mengalami perubahan sedikit sekali.

#### **4.3.1.6. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak S/D = 2,4 dan pada kecepatan 8 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa

silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.10 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.10 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 8$  m/s

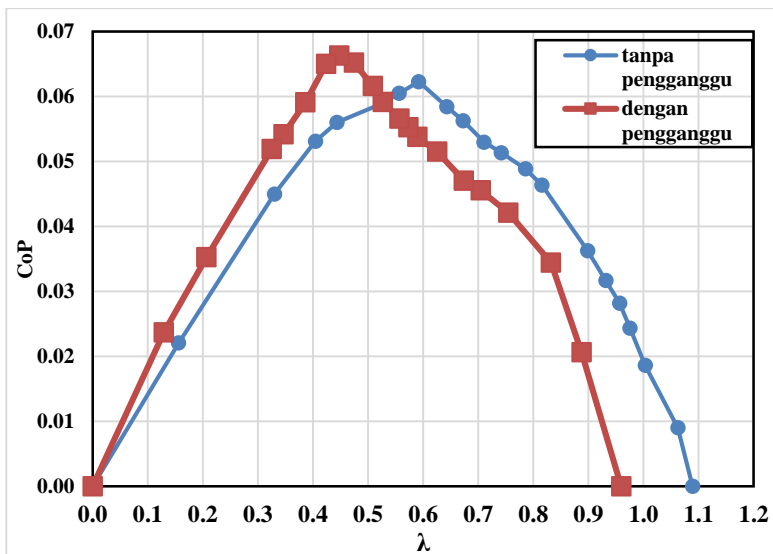
Berdasarkan gambar 4.10 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 8 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,066 pada TSR= 0,596; dan setelah diberi

silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami kenaikan sebesar 4,8% menjadi 0,0692 pada  $TSR = 0,591$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 8 m/s ini cukup berdampak terhadap peningkatan performa turbin meskipun CoP maksimum yang dihasilkan semakin turun dibanding kecepatan sebelumnya. Pada kecepatan angin ini, dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin relatif tidak mengalami perubahan atau bisa dianggap stabil yakni dari 0,981 saat tanpa pengganggu menjadi 0,980 setelah diberi pengganggu; dan juga TSR maksimumnya turun dibandingkan TSR turbin dengan pengganggu pada kecepatan 7 m/s (0,998 menjadi 0,980). Hal ini dikarenakan pada kecepatan angin yang tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai seperti *solid wall*, serta keberadaan silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  sendiri terhadap turbin dianggap relative sudah jauh sehingga pengganggu dan turbin dianggap sebagai dua silinder yang tidak berhubungan pada kecepatan angin yang terlalu tinggi. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio* maksimumnya turun sedikit lebih rendah, dan hal ini juga yang menyebabkan performa turbin mengalami penurunan dibanding pada kecepatan angin sebelumnya.

#### **4.3.1.7. Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 9 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.11 berikut yang berupa grafik.





Gambar 4.11 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP<sub>0</sub>) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 9$  m/s

Berdasarkan gambar 4.11 yang merupakan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu pada kecepatan angin 9 m/s; dapat dilihat bahwa grafik yang dihasilkan mempunyai *trendline* parabolik dimana CoP naik hingga nilai maksimum pada TSR tertentu kemudian turun setelah melewati titik maksimumnya. Didapatkan nilai CoP maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,023 pada TSR= 0,592; dan setelah diberi silinder pengganggu maka CoP maksimumnya mengalami kenaikan sebesar 6,6% menjadi 0,0664 pada TSR = 0,448. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 9 m/s ini cukup berdampak terhadap peningkatan performa turbin

meskipun CoP maksimum yang dihasilkan semakin turun dibanding kecepatan sebelumnya. Pada kecepatan angin ini, dapat dilihat bahwa *Tip Speed Ratio* turbin dengan pengganggu pada saat mencapai CoP maksimum turun cukup signifikan yang menandakan bahwa kecepatan tangensial turbin lebih rendah saat mencapai performa maksimum dibandingkan pada keadaan yang sama pada turbin tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat juga bahwa *Tip Speed Ratio* maksimum turbin mengalami penurunan dari 1,089 saat tanpa pengganggu menjadi 0,959 setelah diberi pengganggu dan juga TSR maksimumnya turun dibandingkan TSR turbin dengan pengganggu pada kecepatan 8 m/s (0,980 menjadi 0,959). Hal ini dikarenakan pada kecepatan 9 m/s ini, ada kemungkinan bahwa pada kecepatan angin yang relative sudah sangat tinggi sehingga menyebabkan TSR maksimum akan turun karena pada kecepatan angin yang tinggi akan membuat turbin berputar sangat cepat sehingga turbin akan menyerupai seperti *solid wall*, serta keberadaan silinder pengganggu pada posisi S/D = 2,4 sendiri terhadap turbin dianggap relative sudah jauh sehingga pengganggu dan turbin dianggap sebagai dua silinder yang tidak berhubungan pada kecepatan angin yang terlalu tinggi. Akibatnya kecepatan putar turbin menurun seiring bertambahnya kecepatan angin sehingga menyebabkan *Tip Speed Ratio* maksimumnya turun dibandingkan tanpa diberi pengganggu.

#### **4.3.1.8. Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s**

Berdasarkan analisa-analisa grafik *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada  $U = 3,8$  s.d.  $9$  m/s pada subbab sebelumnya maka dapat disimpulkan perubahan nilai CoPnya sebagaimana ditunjukkan dalam table berikut.

Tabel 4. 1 Perbandingan nilai CoPmax dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

U	tanpa pengganggu		dengan pengganggu S/D = 2,4		$\Delta$ COP	% kenaikan CoP
	COP <sub>0</sub> max	TSR	COPmax	TSR		
3,8	0.0323	0.581	0.0519	0.617	0.0196	60.7
4,4	0.0445	0.599	0.0535	0.636	0.009	20.2
5	0.0661	0.608	0.0703	0.682	0.0042	6.4
6	0.0724	0.599	0.0808	0.78	0.0084	11.6
7	0.0797	0.596	0.0798	0.59	0.0001	0.1
8	0.066	0.596	0.0692	0.591	0.0032	4.8
9	0.0623	0.592	0.0664	0.448	0.0041	6.6

Tabel 4. 2 Uncertainty CoPmax Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu S/D = 2,4; pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

U	tanpa pengganggu			dengan pengganggu S/D = 2,4		
	COP <sub>0</sub> max	uncertainty (%)	range	COP max	uncertainty (%)	range
3.8	0.0323	18.67	0.026- 0.038	0.0519	12.34	0.045- 0.058
4.4	0.0445	10.43	0.04- 0.049	0.0535	9.23	0.049- 0.058
5	0.0661	5.57	0.062- 0.07	0.0703	5.87	0.066- 0.074
6	0.0724	3.54	0.07- 0.075	0.0808	3.15	0.078- 0.083

7	0.0797	2.44	0.078- 0.082	0.0798	2.42	0.077- 0.082
8	0.066	2.28	0.064- 0.068	0.0692	2.17	0.068- 0.071
9	0.0623	1.95	0.061- 0.064	0.0664	1.51	0.065- 0.067

Berdasarkan table 4.1 di atas, disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu menghasilkan peningkatan CoP. Kenaikan CoP maksimum yang terbesar terjadi pada kecepatan terendah yaitu 3,8 m/s sebesar 0,0196 atau 60,7% setelah diberi pengganggu, sedangkan kenaikan CoP maksimum terendah terjadi di kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,0001 atau hanya 0,1% setelah diberi pengganggu. Meskipun menghasilkan kenaikan CoP maksimum yang paling tertinggi, namun pada penelitian di jarak pengganggu  $S/D = 2,4$  ini, disimpulkan bahwa kecepatan angin 3,8 m/s bukan merupakan kecepatan optimum turbin Savonius, melainkan kecepatan angin 6 m/s dimana setelah diberi pengganggu menghasilkan CoP paling tinggi sebesar 0,0808 pada  $TSR = 0,78$  dengan kenaikan CoP sebesar 0,0084 atau 11,6%. Tabel 4.2 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai CoP maksimum turbin dengan yang tanpa pengganggu pada semua variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa besar nilai *uncertainty* CoPmax turbin mengalami penurunan seiring bertambahnya kecepatan aliran angin baik pada turbin dengan pengganggu dan tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan.

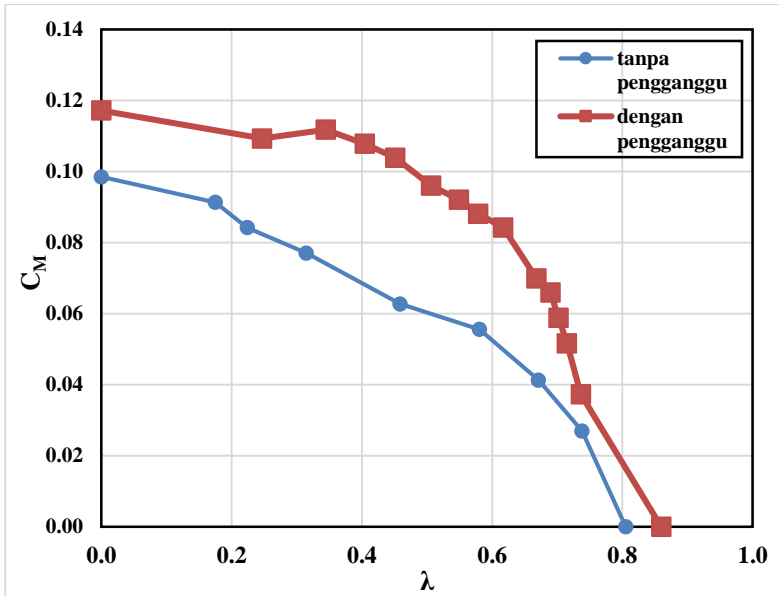
Dengan meningkatkannya CoP maksimum turbin setelah diberi pengganggu maka dapat disimpulkan bahwa ketika turbin diberi silinder pengganggu maka secara teori akan mempengaruhi bentuk *boundary layer* aliran angin pada permukaan *returning blade*, dimana lebih cepat terbentuk *turbulent boundary layer* pada

*returning blade* sehingga titik separasi mundur dan menyebabkan *wake* yang terbentuk menyempit. Hal ini menyebabkan penurunan tekanan di depan *returning blade* yang mengakibatkan turunnya *pressure drag* pada *returning blade* turbin sehingga selisih gaya *drag* membesar, serta pada posisi  $S/D = 2,4$  tersebut relatif akan dapat mengarahkan aliran ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat pula, sehingga meningkatkan performa turbin Savonius pada akhirnya.

#### **4.3.2. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s**

##### **4.3.2.1. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan  $3,8$  m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.12 berikut yang berupa grafik.



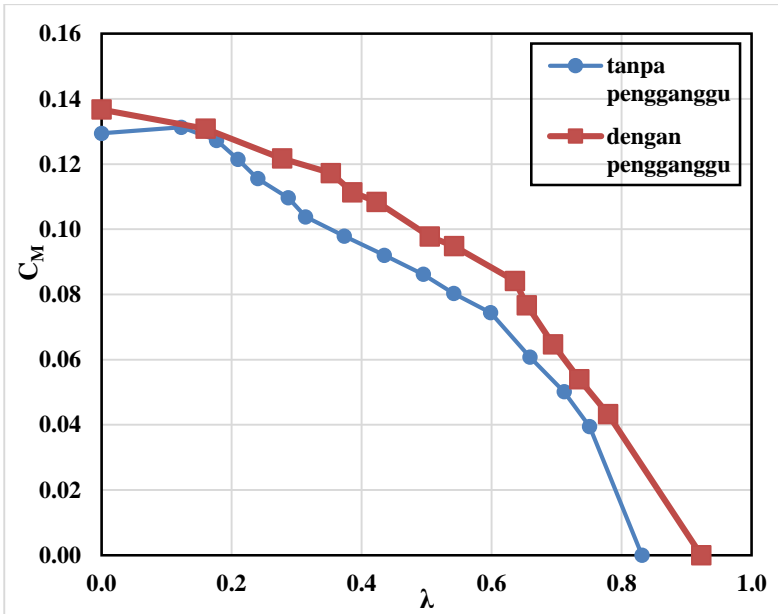
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 3,8$  m/s

Berdasarkan gambar 4.12 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,0985 pada  $TSR = 0$ ; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1172 pada  $TSR = 0$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 3,8 m/s ini efektif untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi tekanan di

depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.2. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan  $4,4$  m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.13 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 4,4$  m/s

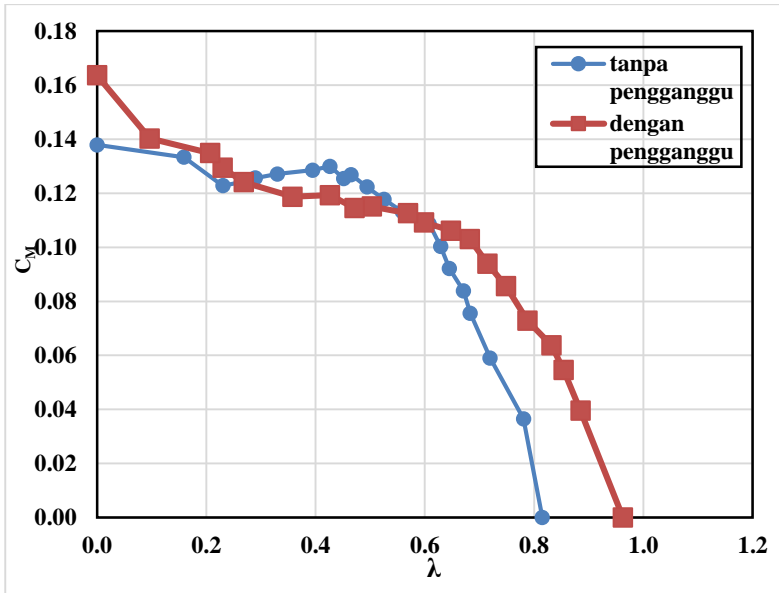
Berdasarkan gambar 4.13 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1313 pada  $TSR = 0,123$ ; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1367 pada  $TSR = 0$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 4,4 m/s ini cukup berdampak untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi



tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.3. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 5 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.14 berikut yang berupa grafik.



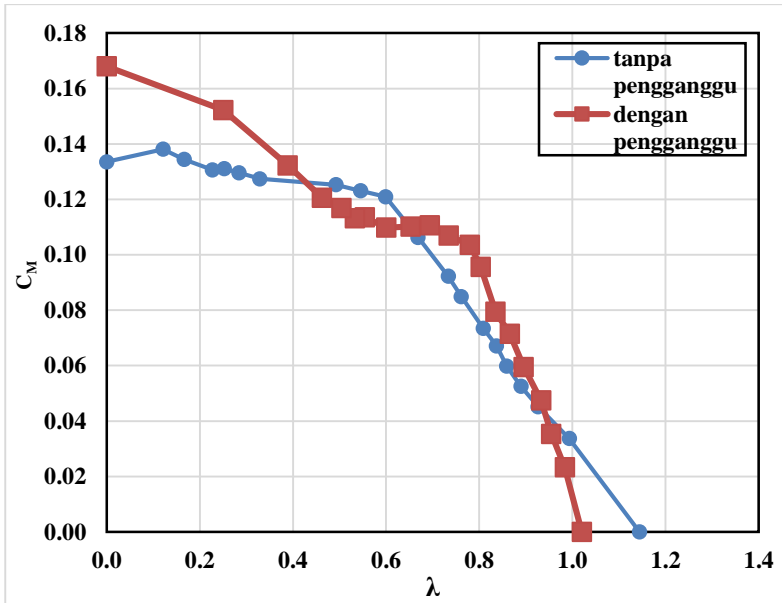
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 5 \text{ m/s}$

Berdasarkan gambar 4.14 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1379 pada  $TSR = 0$ ; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1636 pada  $TSR = 0$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 5 m/s ini berdampak untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang

*returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.4. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 6 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.15 berikut yang berupa grafik.



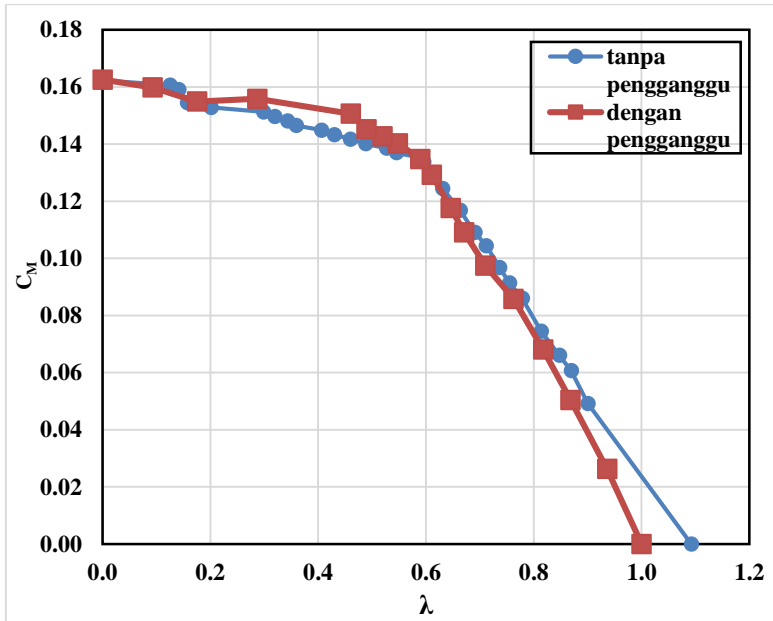
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 6$  m/s

Berdasarkan gambar 4.15 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1381 pada TSR = 0,121; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,168 pada TSR = 0. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 6 m/s ini berdampak signifikan untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi

tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.5. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 7 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.16 berikut yang berupa grafik.



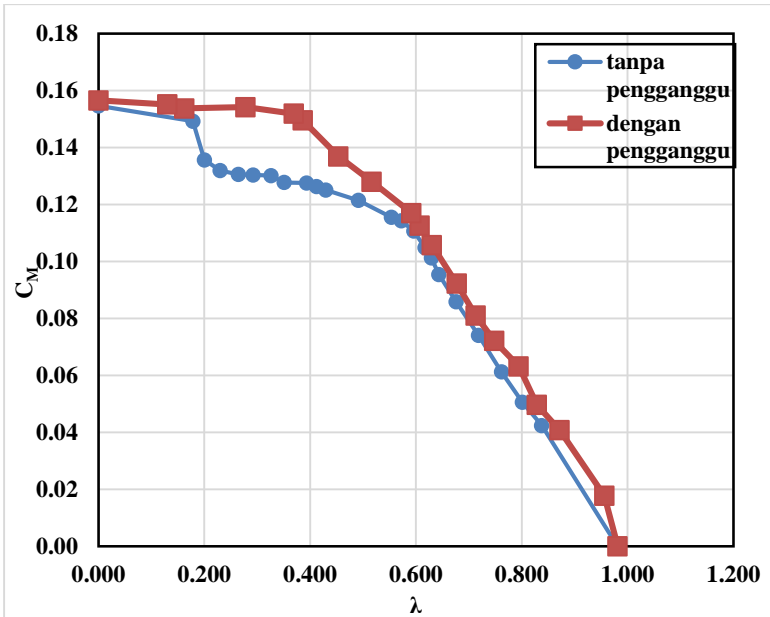
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 7$  m/s

Berdasarkan gambar 4.16 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1622 pada  $TSR = 0$ ; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1625 pada  $TSR = 0$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 7 m/s ini tidak begitu signifikan berdampak untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta

mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.6. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 8 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.17 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.17 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 8$  m/s

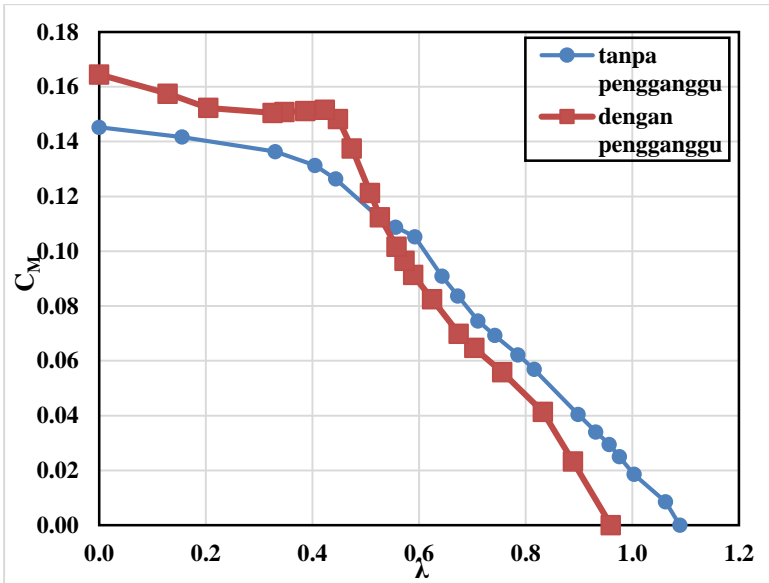
Berdasarkan gambar 4.17 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1546 pada  $TSR = 0$ ; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1565 pada  $TSR = 0$ . Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 8 m/s ini cukup berdampak untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi



tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang *returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.7. Analisa Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9$ m/s**

Penelitian ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan 9 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (TSR), yang selanjutnya dibandingkan dengan  $C_M$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.18 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4.18 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_M$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{M0}$ ) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) pada kecepatan angin  $U = 9$  m/s

Berdasarkan gambar 4.18 di atas; nilai  $C_M$  naik hingga puncaknya pada TSR tertentu kemudian *trendline* grafik menjadi cenderung turun seiring bertambahnya TSR. Didapatkan nilai  $C_M$  maksimum turbin Savonius tanpa pengganggu sebesar 0,1452 pada TSR = 0; dan setelah diberi silinder pengganggu maka  $C_M$  maksimumnya mengalami kenaikan menjadi 0,1645 pada TSR = 0. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  pada kecepatan angin 9 m/s ini berdampak untuk meningkatkan nilai  $C_M$  turbin karena keberadaan pengganggu tersebut secara teori dapat mengalirkan aliran angin ke *advancing blade*, serta mengurangi tekanan di depan *returning blade* dan menaikkan tekanan di belakang

*returning blade* turbin, sehingga selisih tekanan di depan dan di belakang *returning blade* turbin akan menurun dan menyebabkan *pressure drag* dari *returning blade* menurun dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu turbin meningkat. Kenaikan selisih *drag* sudu turbin ini meningkatkan nilai torsi dinamis turbin. *Coefficient of Moment* maksimum turbin didapatkan pada waktu turbin akan mendekati berhenti berputar, dimana pada saat tersebut nilai torsi dinamisnya paling besar.  $C_M$  sendiri secara rumus berbanding lurus terhadap torsi dinamis sehingga ketika torsi dinamis turbin naik akibat pemberian pengganggu maka seharusnya  $C_M$  nya juga akan naik.

#### **4.3.2.8. Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ s.d. $9$ m/s**

Berdasarkan analisa-analisa grafik *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada  $U = 3,8$  s.d.  $9$  m/s pada subbab sebelumnya maka dapat disimpulkan perubahan nilai  $C_M$  nya sebagaimana ditunjukkan dalam table berikut.

Tabel 4. 3 Perbandingan nilai  $C_{Mmax}$  dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu  $S/D = 2,4$  pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

U	tanpa pengganggu		dengan pengganggu $S/D = 2,4$		$\Delta CM$	% kenaikan
	$C_{M0max}$	TSR	$C_{Mmax}$	TSR		
3.8	0.0985	0.175	0.1172	0	0.0187	19.0
4.4	0.1313	0.123	0.1367	0	0.0073	5.6
5	0.1379	0	0.1636	0	0.0303	22.7
6	0.1381	0.121	0.168	0	0.0299	21.7
7	0.1622	0	0.1625	0	0.0018	1.1
8	0.1546	0	0.1565	0	0.0073	4.9
9	0.1452	0	0.1645	0	0.0228	16.1

Tabel 4. 4 *Uncertainty*  $C_{Mmax}$  Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu  $S/D = 2,4$  pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

U	tanpa pengganggu			dengan pengganggu $S/D = 2,4$		
	$C_{M0max}$	uncertainty (%)	range	$C_{Mmax}$	uncertainty (%)	range
3.8	0.0985	18.66	0.08-0.117	0.1172	12.32	0.103-0.131
4.4	0.1313	10.4	0.118-0.145	0.1367	9.2	0.124-0.149
5	0.1379	5.53	0.13-0.146	0.1636	5.83	0.154-0.173
6	0.1381	3.48	0.133-0.143	0.168	3.05	0.163-0.173

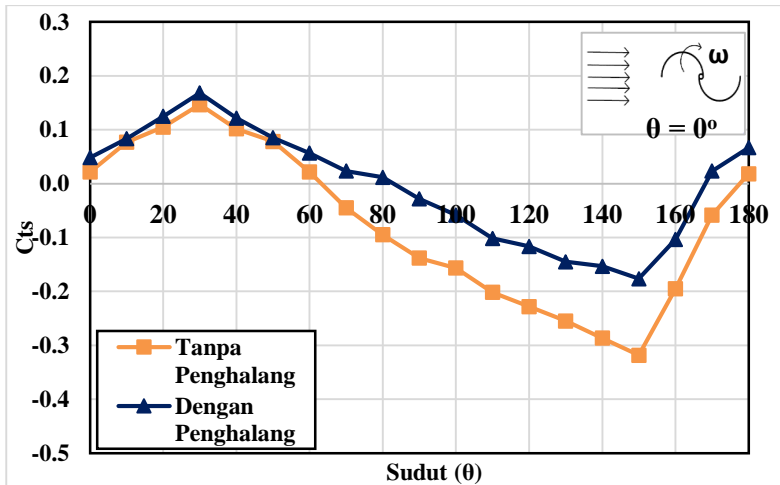
7	0.1622	2.34	0.158- 0.166	0.1625	2.33	0.158- 0.166
8	0.1546	2.18	0.151- 0.158	0.1565	2.07	0.153- 0.16
9	0.1452	1.84	0.143- 0.148	0.1645	1.36	0.162- 0.167

Berdasarkan tabel di atas, disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu menghasilkan peningkatan  $C_M$  turbin Savonius. Kenaikan  $C_M$  maksimum yang terkecil terjadi pada kecepatan terendah yaitu 7 m/s sebesar 1,1% setelah diberi pengganggu, sedangkan kenaikan  $C_M$  maksimum terbesar terjadi di kecepatan angin 5 m/s sebesar 22,7% setelah diberi pengganggu. Dapat disimpulkan bahwa pada penelitian di jarak pengganggu  $S/D = 2,4$  ini, bahwa nilai  $C_M$  maksimum turbin mengalami kenaikan dari kecepatan awal 3,8 m/s sebesar 0,1172 hingga pada puncaknya pada kecepatan angin 6 m/s dengan  $C_M$  maksimum sebesar 0,168. Nilai  $C_M$  maksimum berbanding lurus terhadap peningkatan torsi dinamis turbin dan berbanding terbalik dengan nilai kecepatan angin pangkat dua, sehingga ketika kecepatan angin semakin tinggi maka akan menyebabkan rasio perbandingan torsi dinamis dan kecepatan angin kuadrat ( $C_M$ ) naik hingga pada titik optimumnya dimana kenaikan kecepatan angin kuadrat lebih dominan daripada peningkatan torsi dinamis sehingga kan menyebabkan semakin rendahnya nilai  $C_M$  turbin angin Savonius. Tabel 4.4 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai  $C_M$  maksimum turbin dengan yang tanpa pengganggu pada semua variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa besar nilai *uncertainty*  $C_{Mmax}$  turbin mengalami penurunan seiring bertambahnya kecepatan aliran angin baik pada turbin dengan pengganggu dan tanpa pengganggu. Nilai *uncertainty* sendiri didapat karena setiap alat ukur memiliki batas nilai ketelitian, sehingga hasil akhir yang didapat memiliki *range* tertentu yang merupakan nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan.

### 4.3.3. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s s.d. 9 m/s

#### 4.3.3.1. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_t$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 3,8$ m/s

Ekspirimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin 3,8 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* ( $C_t$ ) lalu kemudian dibandingkan dengan  $C_t$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{t0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.19 berikut yang berupa grafik.

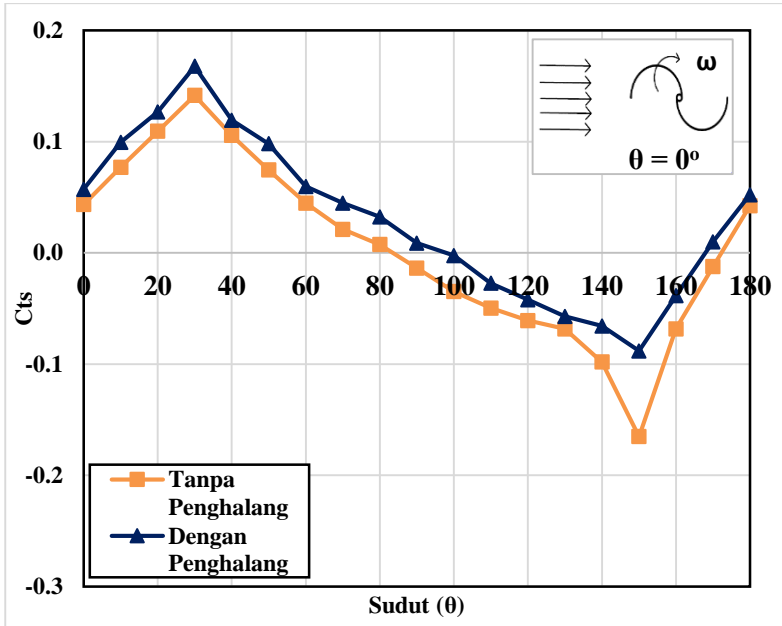


Gambar 4. 19 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_t$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_t$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{t0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 3,8$  m/s

Berdasarkan gambar 4.19, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identic untuk kedua grafik dimana nilai Cts turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan 3,8 m/s mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai Cts maksimum turbin adalah sebesar 0,1466 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai Cts minimumnya -0,318 pada sudut  $150^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai Cts maksimumnya menjadi 0,1682 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai Cts minimumnya menjadi -0,1766 pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat pula nilai Cts turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $70^\circ$  hingga  $170^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $90^\circ$  hingga  $160^\circ$ , yang mengakitbakakan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai Cts turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai Cts yang negatif.

#### **4.3.3.2. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* (Cts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 4,4$ m/s**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin 4,4 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis (Ts) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* (Cts) lalu kemudian dibandingkan dengan Cts turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $Cts_0$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.20 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4. 20 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 4,4 \text{ m/s}$

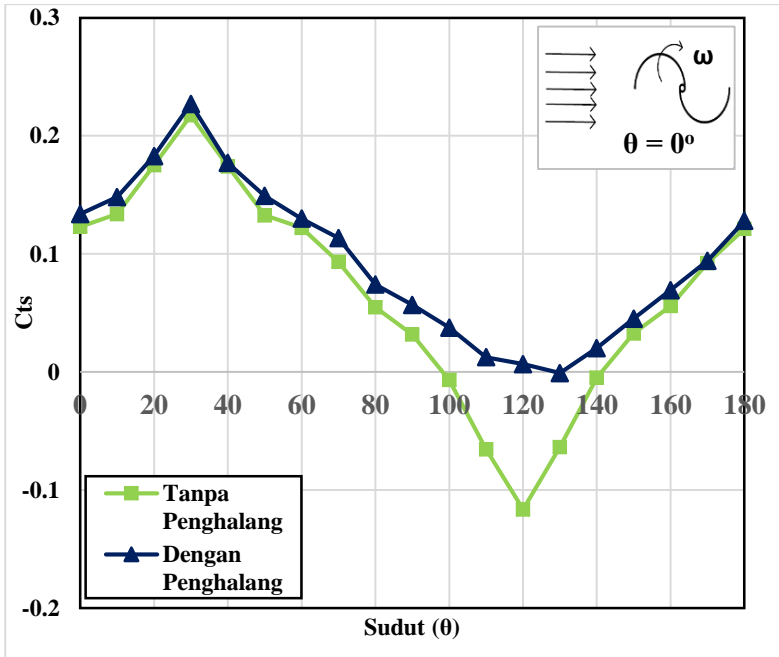
Berdasarkan gambar 4.20, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identic untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan  $4,4 \text{ m/s}$  mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar  $0,1416$  pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya  $-0,165$  pada sudut  $150^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai  $C_{ts}$  maksimumnya menjadi  $0,1677$  pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya menjadi  $-0,088$  pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat pula nilai  $C_{ts}$  turbin yang bernilai



negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $90^\circ$  hingga  $170^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $100^\circ$  hingga  $160^\circ$ , yang mengakibatkan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai  $C_{ts}$  turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai  $C_{ts}$  yang negatif.

#### **4.3.3.3. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 5 \text{ m/s}$**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin  $5 \text{ m/s}$ . Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) lalu kemudian dibandingkan dengan  $C_{ts}$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.21 berikut yang berupa grafik.



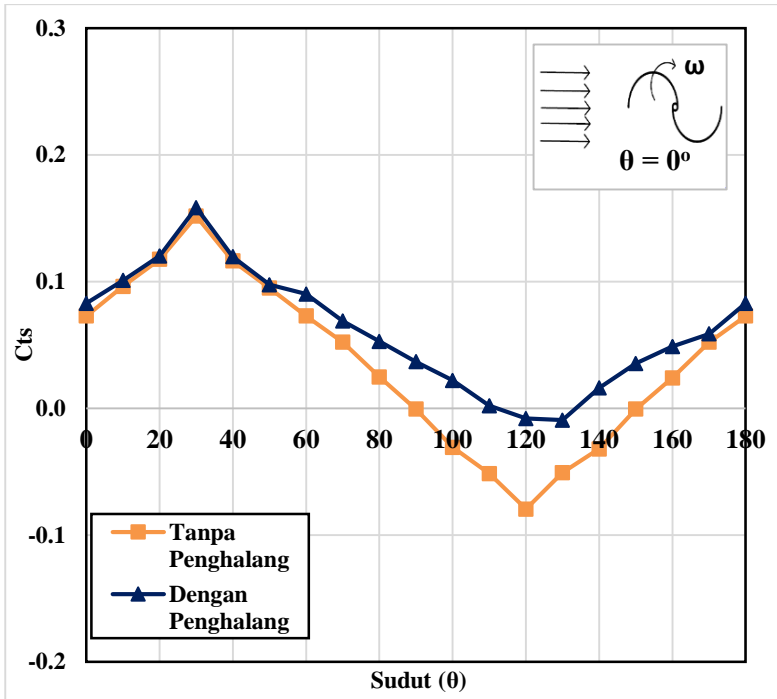
Gambar 4. 21 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 5 \text{ m/s}$

Berdasarkan gambar 4.21, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identic untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan 5 m/s mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $120^\circ$  untuk turbin tanpa pengganggu dan  $130^\circ$  untuk turbin dengan pengganggu, dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar 0,217 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya -0,116 pada sudut  $120^\circ$ ,

sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai Cts maksimumnya menjadi 0,227 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai Cts minimumnya menjadi -0,00096 pada sudut  $130^\circ$ . Terdapat pula nilai Cts turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $100^\circ$  hingga  $140^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $130^\circ$ , yang mengakibatkan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai Cts turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai Cts yang negative tetapi nilainya sangat kecil.

#### **4.3.3.4. Analisa *Static Torque Coefficient* (Cts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 6$ m/s**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin 6 m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* (Cts) lalu kemudian dibandingkan dengan Cts turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $Cts_0$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.22 berikut yang berupa grafik.



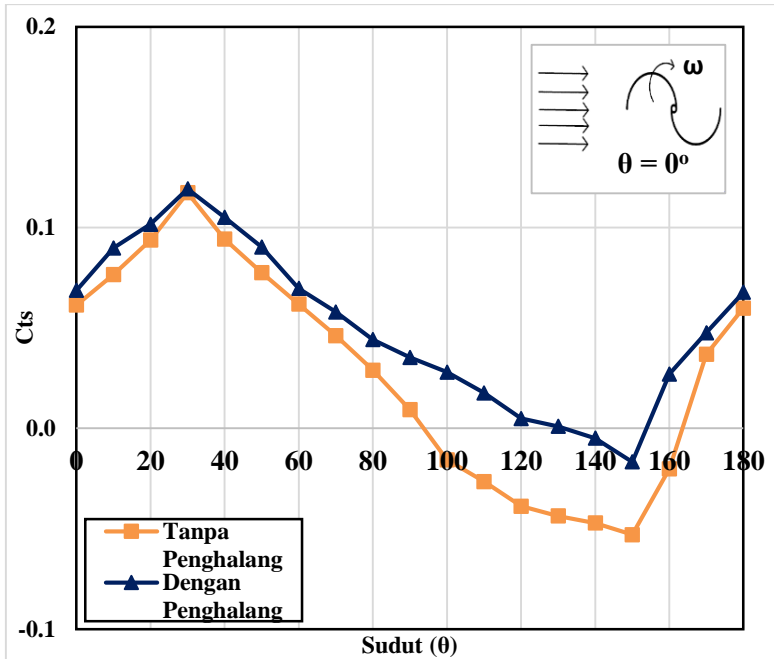
Gambar 4. 22 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 6$  m/s

Berdasarkan gambar 4.22, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identic untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan 6 m/s mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $120^\circ$  untuk turbin tanpa pengganggu dan  $130^\circ$  untuk turbin dengan pengganggu, dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar 0,1516

pada sudut  $30^\circ$  dan nilai Cts minimumnya  $-0,0795$  pada sudut  $120^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai Cts maksimumnya menjadi  $0,1583$  pada sudut  $30^\circ$  dan nilai Cts minimumnya menjadi  $-0,00935$  pada sudut  $130^\circ$ . Terdapat pula nilai Cts turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $90^\circ$  hingga  $150^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $120^\circ$  hingga  $130^\circ$ , yang mengakitbakan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai Cts turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai Cts yang negatif.

#### **4.3.3.5. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* (Cts) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 7$ m/s**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan  $7$  m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* (Cts) lalu kemudian dibandingkan dengan Cts turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $Cts_0$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.23 berikut yang berupa grafik.



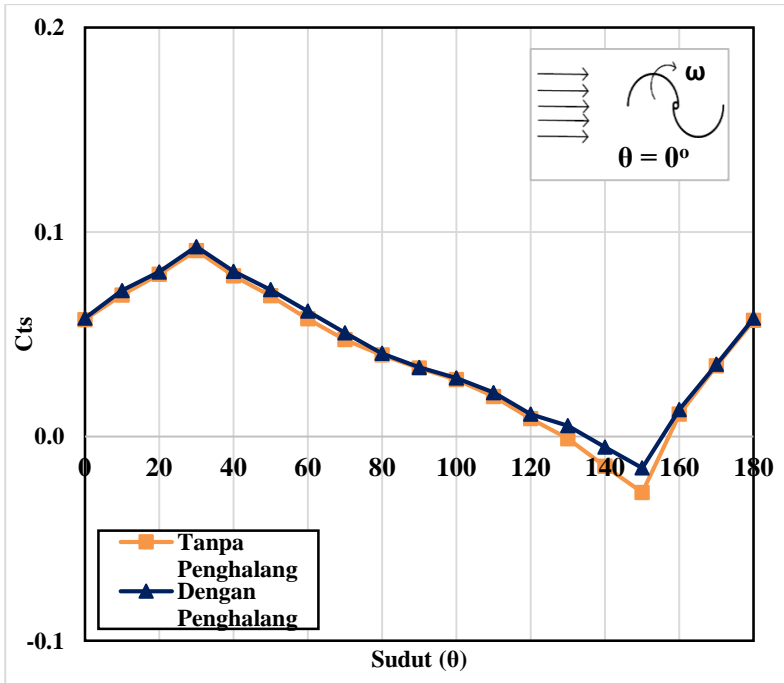
Gambar 4. 23 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 7 \text{ m/s}$

Berdasarkan gambar 4.23, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identic untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan  $7 \text{ m/s}$  mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar  $0,1173$  pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya  $-0,053$  pada sudut  $150^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai  $C_{ts}$  maksimumnya menjadi

0,1193 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya menjadi  $-0,0167$  pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat pula nilai  $C_{ts}$  turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $100^\circ$  hingga  $160^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $130^\circ$  hingga  $150^\circ$ , yang mengakitbakan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai  $C_{ts}$  turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai  $C_{ts}$  yang negatif.

#### **4.3.3.6. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 8$ m/s**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin  $8$  m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) lalu kemudian dibandingkan dengan  $C_{ts}$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.24 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4. 24 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 8 \text{ m/s}$

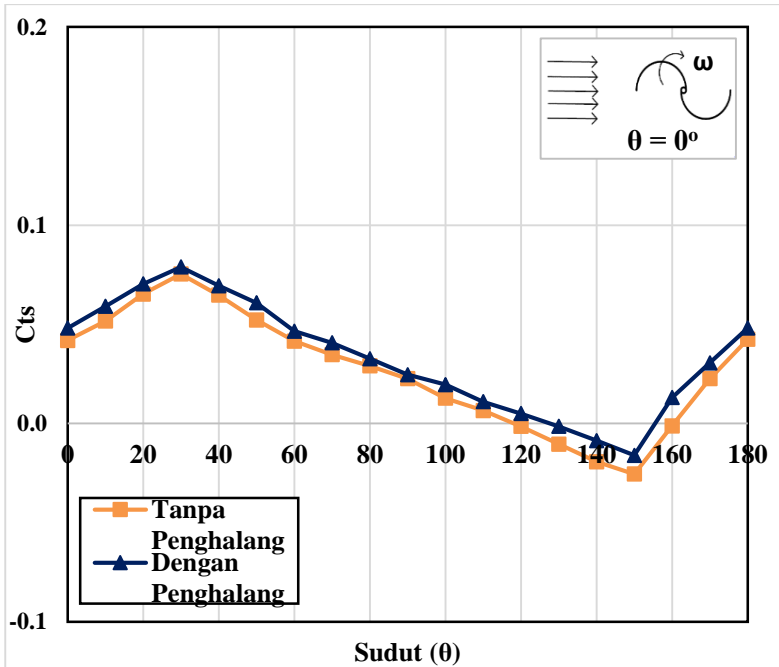
Berdasarkan gambar 4.24, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identik untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan 8 m/s mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar 0,091 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya -0,0274 pada sudut  $150^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai  $C_{ts}$  maksimumnya menjadi



0,0928 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya menjadi  $-0,0154$  pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat pula nilai  $C_{ts}$  turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $130^\circ$  hingga  $150^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $140^\circ$  hingga  $150^\circ$ , yang mengakitbakan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai  $C_{ts}$  turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai  $C_{ts}$  yang negatif.

#### **4.3.3.7. Analisa Nilai *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu pada $U = 9$ m/s**

Eksperimen pengukuran torsi statis ini dilakukan dengan silinder pengganggu dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan pada kecepatan angin  $9$  m/s. Dari eksperimen tersebut, didapatkan data berupa nilai Torsi Statis ( $T_s$ ) sebagai fungsi sudut turbin ( $\theta$ ), yang selanjutnya diolah menjadi *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) lalu kemudian dibandingkan dengan  $C_{ts}$  turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ), dimana hasil perbandingan dapat dilihat pada gambar 4.25 berikut yang berupa grafik.



Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan *Static Torque Coefficient* ( $C_{ts}$ ) Torsi Statis Turbin Savonius dengan silinder pengganggu ( $C_{ts}$ ) dan tanpa silinder pengganggu ( $C_{ts_0}$ ) terhadap Fungsi Sudut ( $\theta$ ) pada kecepatan angin  $U = 9$  m/s

Berdasarkan gambar 4.25, dapat dilihat bahwa bentuk grafik sinusoidal dengan *trendline* yang identik untuk kedua grafik dimana nilai  $C_{ts}$  turbin tanpa dan dengan pengganggu pada kecepatan 9 m/s mengalami kenaikan dari sudut  $0^\circ$  hingga  $30^\circ$ , kemudian turun hingga sudut  $150^\circ$ , dan kemudian naik kembali hingga sudut  $180^\circ$ . Pada turbin Savonius tanpa pengganggu, nilai  $C_{ts}$  maksimum turbin adalah sebesar 0,0754 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya -0,0255 pada sudut  $150^\circ$ , sedangkan setelah turbin diberi pengganggu maka nilai  $C_{ts}$  maksimumnya menjadi

0,079 pada sudut  $30^\circ$  dan nilai  $C_{ts}$  minimumnya menjadi  $-0,01603$  pada sudut  $150^\circ$ . Terdapat pula nilai  $C_{ts}$  turbin yang bernilai negative yaitu pada turbin tanpa pengganggu terdapat pada sudut  $120^\circ$  hingga  $160^\circ$  dan pada turbin dengan pengganggu pada sudut  $130^\circ$  hingga  $150^\circ$ , yang mengakitbakan turbin tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga turbin membutuhkan torsi awal agar turbin Savonius dapat mulai berputar. Selain itu dapat disimpulkan juga bahwa nilai  $C_{ts}$  turbin mengalami kenaikan di setiap sudut turbin setelah diberi pengganggu yang menunjukkan bahwa pemberian silinder pengganggu dapat meningkatkan performa *self starting* turbin walaupun masih terdapat nilai  $C_{ts}$  yang negatif.

Berdasarkan analisa-analisa di atas, dapat disimpulkan bahwa peningkatan *Static Torque Coefficient* turbin dengan jarak pengganggu  $S/D = 2,4$ ; mampu menghasilkan peningkatan performa turbin namun tidak signifikan. Hal ini disebabkan karena jarak pengganggu pada  $S/D = 2,4$  sudah dianggap terlalu jauh sehingga turbin dan pengganggu dianggap sebagai 2 silinder berbeda sehingga ketika dialiri angin maka efek turbulensi yang diciptakan pengganggu tidak berdampak begitu berarti kepada turbin Savonius tersebut.

#### **4.4. Analisa Perbandingan Eksperimen Turbin Savonius dengan Silinder Pengganggu yang Dilakukan Michael (2020) terhadap Penelitian Prabasworo Drestanto (2019)**

Sebelumnya pada tahun 2019 telah dilakukan penelitian studi eksperimen peningkatan performa turbin Savonius dengan silinder pengganggu yang dilakukan oleh Prabasworo Drestanto. Penelitian tersebut menggunakan spesifikasi turbin dan jarak pengganggu  $S/D = 2,4$  yang sama dengan yang digunakan pada penelitian saya ini. Perbedaan penelitian yang dilakukan oleh saya dan Prabasworo terletak pada variasi, dimana Prabasworo menggunakan variasi rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin

(d/D) sebesar 0,1 – 1,0 dan variasi kecepatan angin yang digunakan adalah Re 97000 dan 136000 (5 dan 7 m/s). Sedangkan pada penelitian saya kali ini, variasi yang digunakan adalah hanya pada variasi kecepatan angin yang lebih luas yaitu dari kecepatan angin 3,8 m/s hingga 9 m/s (74000 hingga 175000); sehingga pada subbab ini akan dibahas perbandingan penelitian yang dilakukan oleh Prabasworo dan saya hanya pada variasi kecepatan angin 5 dan 7 m/s atau Re 97000 dan 136000 saja. Perbandingan hasil penelitian saya dan Prabasworo dapat dilihat pada table berikut.

Tabel 4. 5 Perbandingan Eksperimen Turbin dengan dan tanpa Pengaanggu antara Penelitian Prabasworo (2019) dan Michael Lawrence (2020)

U	Prabasworo (2019)				Michael Lawrence (2020)			
	CoP <sub>0</sub> max	CoP max	CoP <sub>max</sub> / CoP <sub>0max</sub> x	%Δ	CoP <sub>0</sub> max	CoP max	CoP <sub>max</sub> / CoP <sub>0max</sub>	%Δ
5	0.152	0.203	1.336	33.55	0.0661	0.0703	1.064	6.35
7	0.104	0.128	1.231	23.08	0.0797	0.0798	1.001	0.13

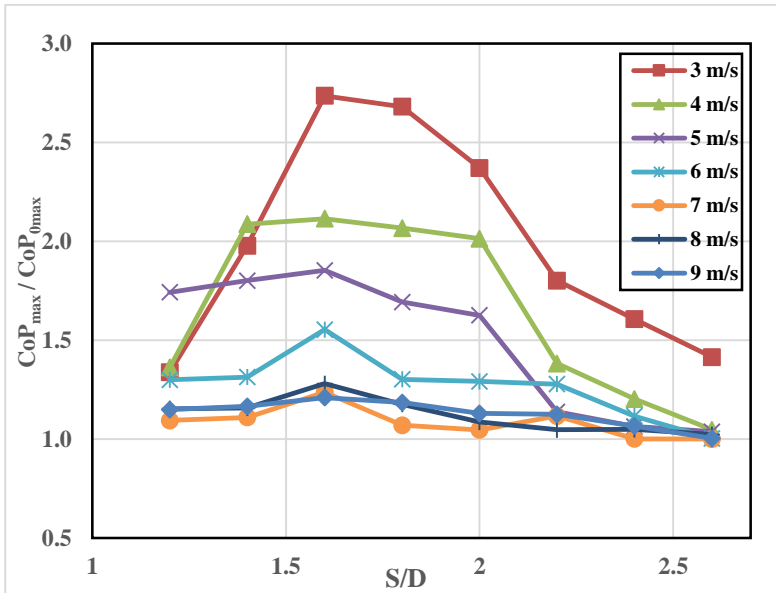
Berdasarkan table 4.5 dapat dilihat pada masing-masing penelitian bahwa CoP max turbin mengalami peningkatan setelah diberi silinder pengganggu. Lalu kemudian nilai perbandingan CoPmax/CoP0max turbin mengalami penurunan seiring bertambahnya Bilangan Reynolds atau kecepatan angin; dan nilai CoPmax/CoP0max pada penelitian Prabasworo (2019) lebih tinggi daripada penelitian saya. Pada kecepatan 5 m/s atau Re 97000, nilai CoPmax/ CoP0 max pada penelitian Prabasworo sebesar 1.336 dan pada penelitian Michael sebesar 1.064; sedangkan pada kecepatan 7 m/s atau Re 136000, nilai CoPmax/ CoP0 max pada penelitian Prabasworo sebesar 1.231 dan pada penelitian Michael sebesar 1.001. Hal ini menunjukkan bahwa turbin pada penelitian Prabasworo menghasilkan kenaikan CoP maksimum yang lebih

besar yaitu 33,55% dan 23,08 % dibandingkan pada penelitian saya (6,35% dan 0,13%). Selain itu dapat dilihat pula bahwa meskipun turbin yang digunakan sama, CoP maksimum yang dihasilkan pada penelitian saya lebih rendah dibandingkan pada penelitian Prabasworo serta terjadi perbedaan *trendline* perubahan nilai CoP terhadap kenaikan Bilangan Reynolds atau kecepatan angin pada masing-masing penelitian. Pada penelitian Prabasworo, CoP maksimum turbin mengalami penurunan dari 0,152 menjadi 0,104 seiring bertambahnya Bilangan Reynolds dari 97000 menuju 136000, sedangkan pada penelitian saya CoP maksimum turbin mengalami kenaikan dari 0,0703 menjadi 0,0798 seiring bertambahnya Bilangan Reynolds sekalipun nilainya masih lebih rendah dari nilai CoP maksimum pada penelitian Prabasworo. Hal-hal yang terjadi di atas yang mempengaruhi performa turbin disebabkan karena perbedaan karakteristik turbin pada masing-masing penelitian yang kemungkinan disebabkan *losses* yang lebih besar dari komponen mekanikal seperti *bearing*, yang pada penelitian saya tidak diganti dengan yang berkualitas lebih baik sehingga terjadi gesekan yang cukup besar antara poros turbin dan *bearing* tersebut yang menyebabkan performa turbin lebih rendah daripada pada saat penelitian Prabasworo.

#### **4.5. Analisa Grafik CoP<sub>max</sub>/CoP<sub>0max</sub> Turbin Savonius dengan Pengganggu Terhadap Fungsi S/D untuk Tujuh Variasi Kecepatan**

Setelah melakukan analisa performa turbin Savonius dengan jarak silinder pengganggu  $S/D = 2,4$ ; maka pada subbab ini akan dibahas perbandingan kenaikan CoP maksimum turbin dengan dan tanpa pengganggu (CoP<sub>max</sub>/CoP<sub>0max</sub>) terhadap variasi nilai S/D dengan variasi kecepatan angin yang sama pada penelitian-penelitian lainnya. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan oleh Bagas Ramadhan ( $S/D = 1,2$ ); Suksmataya Paramesti ( $S/D = 1,4$ ); Festy Merbasari ( $S/D = 1,6$ ); Elza Lisdarina ( $S/D = 1,8$ ); Vega

Nabila ( $S/D = 2,0$ ); Dionisius Jeremia ( $S/D = 2,2$ ); Afiyah Shuhufam ( $S/D = 2,6$ ); dan saya sendiri. Perbandingan hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada gambar 4.26 berikut dalam bentuk grafik.



Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  Turbin Savonius dengan pengganggu terhadap Fungsi  $S/D$  untuk Tujuh Variasi Kecepatan (3,8 m/s – 9 m/s)

Berdasarkan gambar 4.26 di atas, dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada turbin dengan seluruh variasi  $S/D$  dan kecepatan angin meningkatkan performa turbin. Hal ini ditunjukkan dengan rasio perbandingan performa turbin dengan dan tanpa pengganggu ( $CoP_{max}/CoP_{0max}$ ) yang bernilai lebih dari 1 yang menandakan bahwa performa turbin dengan pengganggu lebih besar daripada tanpa pengganggu. *Trendline* grafik yang dihasilkan cenderung naik dari  $S/D = 1,2$  hingga

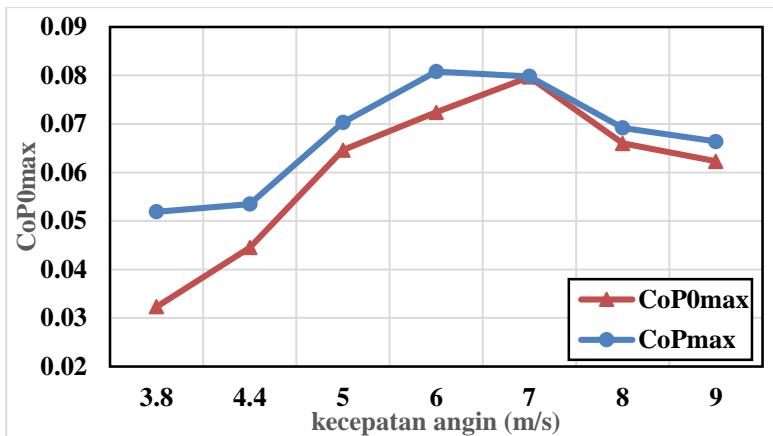
mencapai jarak  $S/D$  optimumnya yaitu 1,6; dan kemudian cenderung turun pada  $S/D$  setelahnya.

Selain itu dapat dilihat pula bahwa semakin rendah kecepatan angin maka peningkatan  $CoP$  maksimum turbin semakin besar, dapat dilihat bahwa kecepatan angin 3,8 m/s menghasilkan kenaikan  $CoP$  maksimum terbesar pada  $S/D = 1,6$  dengan  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  sebesar 2,73 atau kenaikan 173,7%. Sedangkan pada kecepatan angin tertinggi 9 m/s nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  yang dihasilkan paling kecil sebesar 1,21 juga pada  $S/D = 1,6$ . Hal ini diakibatkan oleh karena naiknya kecepatan angin akan menyebabkan kecepatan putar turbin meningkat, dan ketika kecepatan angin sangat tinggi maka putaran turbin semakin tinggi sehingga turbin akan menjadi seperti *solid wall* bagi aliran fluida angin dimana angin tidak bisa mencapai sudu turbin dengan sempurna, ditambah lagi dengan meningkatnya *losses* pada turbin akibat gesekan pada komponen mekanikal seperti *bearing*, dsb., sehingga sekalipun telah diberi silinder pengganggu, tidak menjamin kenaikan performa turbin yang lebih baik pada kecepatan angin yang tinggi.

Disamping kenaikan kecepatan angin, dapat dilihat pula bahwa ketika semakin besar jarak  $S/D$ , terutama pada jarak  $S/D$  setelah nilai 2,0; maka kenaikan  $CoP$  maksimum turbin untuk setiap kecepatan secara signifikan semakin turun, hal ini dibuktikan dengan nilai  $CoP_{max}/CoP_{0max}$  turbin yang semakin cenderung mendekati nilai 1 seiring bertambahnya nilai  $S/D$ . Berdasarkan data tersebut, maka pada kecepatan 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; dan 6 m/s dapat dinyatakan bahwa pemberian silinder pengganggu paling efektif pada jarak  $S/D = 1,2 - 2,2$ ; sedangkan pada kecepatan 7 m/s ; 8 m/s; dan 9 m/s pemberian silinder pengganggu kurang efektif meningkatkan performa turbin pada semua posisi jarak  $S/D$ . Nilai  $S/D$  yang semakin besar menunjukkan bahwa jarak silinder pengganggu terhadap turbin semakin jauh dan dalam hal ini ketika pengganggu yang diletakkan terlalu jauh dari turbin maka keduanya akan seolah menjadi dua silinder yang saling tidak berhubungan, atau dalam kata lain pemberian silinder

pengganggu pada jarak yang terlalu jauh tidak memberikan dampak yang tidak signifikan pada turbin, apalagi bila ditambah dengan kecepatan angin yang terlalu tinggi seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa pada kecepatan angin yang terlalu tinggi maka putaran turbin akan seolah menjadi *solid wall* bagi fluida sehingga angin tidak bisa memberi gaya *drag* lebih pada *advancing blade* begitu pula dengan pengganggu yang seakan tidak membantu sehingga kecepatan putar turbin menjadi turun dan tidak menghasilkan kenaikan CoP yang signifikan bagi turbin.

#### 4.6. Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* maksimum Turbin Savonius tanpa pengganggu ( $CoP_0max$ ) dengan Turbin dengan pengganggu ( $CoPmax$ )



Gambar 4. 27 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* maksimum Turbin Savonius tanpa pengganggu ( $CoP_0max$ ) dengan Turbin dengan pengganggu ( $CoPmax$ ) pada tujuh variasi kecepatan (3,8 m/s – 9 m/s)

Berdasarkan gambar 4.27 di atas dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu pada posisi  $S/D = 2,4$  mampu



meningkatkan performa turbin yang dibuktikan dengan naiknya *Coefficient of Power* maksimum turbin. Grafik yang dihasilkan juga memiliki *trendline* parabolic dimana pada turbin tanpa pengganggu memiliki CoP maksimum tertinggi pada kecepatan 7 m/s sebesar 0,0797; namun setelah diberi pengganggu, CoP maksimum tertinggi turbin didapatkan pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,0808. Kenaikan CoP maksimum yang terbesar terjadi pada kecepatan terendah yaitu 3,8 m/s sebesar 0,0196 atau 60,7% setelah diberi pengganggu, sedangkan kenaikan CoP maksimum terendah terjadi di kecepatan angin 7 m/s sebesar 0,0001 atau hanya 0,1% setelah diberi pengganggu. Meskipun menghasilkan kenaikan CoP maksimum yang paling tertinggi, namun pada penelitian di jarak pengganggu  $S/D = 2,4$  ini, disimpulkan bahwa kecepatan angin 3,8 m/s bukan merupakan kecepatan optimum turbin Savonius, melainkan kecepatan angin 6 m/s dimana setelah diberi pengganggu menghasilkan CoP maksimum paling tinggi sebesar 0,0808 pada  $TSR = 0,78$  dengan kenaikan CoP sebesar 0,0084 atau 11,6%. Hal ini terjadi karena CoP turbin sebelum diberi pengganggu pada kecepatan 6 m/s sudah relatif merupakan salah satu yang tertinggi sehingga ketika diberi pengganggu maka secara teori silinder pengganggu menyebabkan *boundary layer* aliran angin pada *returning blade* turbin akan lebih cepat bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen sehingga menyebabkan titik separasi mundur dan *wake* mengecil; sehingga terjadi penurunan tekanan di depan *returning blade* yang mengakibatkan turunnya *pressure drag* pada *returning blade* turbin sehingga selisih gaya *drag* membesar, serta pada posisi  $S/D = 2,4$  tersebut relatif akan dapat mengarahkan aliran ke sisi *advancing blade* sehingga menyebabkan gaya *drag* pada sisi *advancing* lebih meningkat dan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat pula, sehingga meningkatkan performa turbin Savonius pada akhirnya.

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius dengan jarak  $S/D = 2,4$  dan dengan ukuran  $d/D = 0,5$ ; pada variasi kecepatan angin 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s; didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius dengan jarak  $S/D = 2,4$  mampu meningkatkan nilai CoP maksimum turbin pada seluruh variasi kecepatan angin. CoP maksimum tertinggi turbin dengan pengganggu didapatkan pada kecepatan angin 6 m/s sebesar 0,0808 (8,08%) pada  $TSR = 0,78$ .
2. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius dengan jarak  $S/D = 2,4$  mampu meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* ( $C_M$ ) maksimum turbin pada seluruh variasi kecepatan angin.  $C_M$  maksimum tertinggi turbin dengan pengganggu didapatkan pada kecepatan angin 6 m/s sebesar 0,168 pada  $TSR = 0$ .
3. Pemberian silinder pengganggu di depan *returning blade* Turbin Savonius dengan jarak  $S/D = 2,4$  mampu meningkatkan torsi statis turbin dan *Static Torque Coefficient* turbin pada semua variasi kecepatan angin meskipun masih terdapat nilai torsi dan  $C_{ts}$  yang negatif pada *range* sudut tertentu.
4. Terjadi penurunan performa turbin dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dengan menggunakan spesifikasi turbin yang sama yang kemungkinan besar diakibatkan oleh *losses* yang besar dari komponen mekanikal seperti

*bearing*, yang pada penelitian ini tidak diganti dengan yang kualitasnya lebih baik.

5. Setelah dilakukan analisa perbandingan hasil penelitian-penelitian yang dilakukan oleh delapan mahasiswa dengan spesifikasi turbin yang sama dan menggunakan variasi S/D antara 1,2 sampai dengan 2,6 ; maka pada kecepatan 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; dan 6 m/s dapat dinyatakan bahwa pemberian silinder pengganggu paling efektif pada jarak S/D = 1,2 – 2,2; sedangkan pada kecepatan 7 m/s ; 8 m/s; dan 9 m/s pemberian silinder pengganggu kurang efektif meningkatkan performa turbin pada semua posisi jarak S/D, serta didapatkan S/D paling optimum terletak pada jarak S/D = 1,6 karena menghasilkan kenaikan CoP maksimum turbin yang paling besar dibandingkan variasi jarak S/D lainnya.

## 5.2. Saran

Setelah melakukan penelitian tentang Turbin Savonius dengan silinder pengganggu, penulis memiliki saran-saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Menggunakan neraca pegas yang lebih teliti agar pembacaan beban lebih akurat.
2. Menggunakan komponen *bearing* yang berkualitas tinggi agar dapat mengurangi *losses* yang terjadi pada turbin; serta rutin melumasi *bearing* secara berkala.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Arinaldo, Deon. 2018. **Indonesia Clean Energy Outlook: Reviewing 2018 & Outlooking 2019**. Institute for Essential Service Reform. Jakarta.
2. Drestanto, Prabasworo. 2019. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Silinder Pengganggu di depan Sisi Returning Blade Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius**“Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu  $S/D = 2,4$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $d/D = 0,1;0,2;0,3;0,4;0,5;0,6;0,7;0,8;0,9$  dan  $1,0$ ; pada  $Re = 9,7 \times 10^4$  dan  $13,6 \times 10^4$ ”. ITS. Surabaya.
3. Fox.R.W, McDonald, Pritchard, A.T, Leylegian. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics 8<sup>th</sup> Edition**. John Wiley & Sons.Inc . USA.
4. Hemami, Ahmad, 2012. **Wind Turbine Technology**. Cengage Learning. USA.
5. Mudjahidin, Fikri Amrul A. 2019. **Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder Sirkular di pepan Returning Blade Turbin** “Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu  $d/D = 0,5$ ;  $y/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,0;2,2;2,4;2,6$ ; dan  $2,8$ ; Bilangan Reynolds =  $96000,134000$ , dan  $173000$ . ITS. Surabaya.
6. N.H. Mahmoud, EL-Haroun, A.A, Wahba, Nasef, M.H. 2010. **An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance**. Alexandria University. Egypt.
7. Ramadhan, M.Rizky. 2019. **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  $13,6 \times 10^4$ . ITS. Surabaya.

8. Rustam, Jasmi. A.. 2018. **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius “Studi Kasus  $d/D = 0,5$ ;  $S/D = 2,0$ ; dengan Bilangan Reynolds =  $9,7 \times 10^4$ ;  $14,5 \times 10^4$ ;  $17,8 \times 10^4$ ;  $y/D = 0,0$ ;  $0,25$ ;  $0,5$ .** ITS. Surabaya.
9. Sakti, Gunawan, Tri Yogi Yuwono, Wawan Aries W. 2019. **Experimental and Numerical Investigation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance.**ITS.Surabaya.
10. Sunderland, Keith M., Gerald Mills. 2013. **Estimating the Wind Resource in Urban Area : A Case Study of Micro Wind Generation in Dublin.** Dublin Institute of Technology. Ireland.
11. Tsutsui,T. , Igarashi,T. 2002. **Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air Stream.** National Defense Academy. Yokosuka-Japan.
12. Wang, J.J., 2006. **Drag Reduction of a Circular Cylinder Using an Upstream Rod.** Beihang University of Aeronautics and Astronautics. Beijing.

## LAMPIRAN

### A. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

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

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	C <sub>M</sub>
28.5	3.8	189.2	19.803	0	0	0.0127	0.092	1.17	0.805	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	3.8	173.4	18.148	24	50	0.0127	0.092	1.17	0.738	0.0032	0.0199	0.0270
28.5	3.8	157.7	16.503	30.2	70	0.0127	0.092	1.17	0.671	0.0050	0.0277	0.0413
28.5	3.8	136.4	14.278	36.4	90	0.0127	0.092	1.17	0.581	0.0067	0.0323	0.0556
28.5	3.8	107.8	11.284	39.5	100	0.0127	0.092	1.17	0.459	0.0075	0.0288	0.0627
28.5	3.8	74.0	7.741	45.7	120	0.0127	0.092	1.17	0.315	0.0092	0.0242	0.0770
28.5	3.8	52.6	5.505	48.8	130	0.0127	0.092	1.17	0.224	0.0101	0.0188	0.0842
28.5	3.8	41.1	4.303	51.9	140	0.0127	0.092	1.17	0.175	0.0110	0.0160	0.0913
28.5	3.8	0.0	0.000	55	150	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0106	0.0000	0.0985

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

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r</b> (m)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	4.4	226.2	23.673	0	0	0.0127	0.092	1.17	0.831	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	4.4	204.3	21.385	19	70	0.0127	0.092	1.17	0.751	0.0063	0.0296	0.0394
28.5	4.4	193.6	20.267	25.2	90	0.0127	0.092	1.17	0.712	0.0081	0.0357	0.0501
28.5	4.4	179.3	18.770	31.4	110	0.0127	0.092	1.17	0.659	0.0098	0.0401	0.0608
28.5	4.4	162.9	17.051	43.8	140	0.0127	0.092	1.17	0.599	0.0120	0.0445	0.0744
28.5	4.4	147.5	15.438	56.2	160	0.0127	0.092	1.17	0.542	0.0129	0.0435	0.0803
28.5	4.4	134.7	14.099	68.6	180	0.0127	0.092	1.17	0.495	0.0139	0.0426	0.0861
28.5	4.4	118.4	12.391	81	200	0.0127	0.092	1.17	0.435	0.0148	0.0400	0.0920
28.5	4.4	101.6	10.630	93.4	220	0.0127	0.092	1.17	0.373	0.0158	0.0365	0.0979
28.5	4.4	85.4	8.943	105.8	240	0.0127	0.092	1.17	0.314	0.0167	0.0326	0.1038
28.5	4.4	78.2	8.184	118.2	260	0.0127	0.092	1.17	0.287	0.0177	0.0315	0.1097
28.5	4.4	65.4	6.845	130.6	280	0.0127	0.092	1.17	0.240	0.0186	0.0278	0.1155



28.5	4.4	57.1	5.980	143	300	0.0127	0.092	1.17	0.210	0.0195	0.0255	0.1214
28.5	4.4	48.2	5.041	155.4	320	0.0127	0.092	1.17	0.177	0.0205	0.0225	0.1273
28.5	4.4	33.5	3.502	180.2	350	0.0127	0.092	1.17	0.123	0.0211	0.0161	0.1313
28.5	4.4	0.0	0.000	192.6	360	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0208	0.0000	0.1295

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

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r (m)</b>	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	5	252.0	26.376	0	0	0.0127	0.092	1.17	0.815	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	5	241.4	25.267	19	80	0.0127	0.092	1.17	0.781	0.0076	0.0285	0.0365
28.5	5	222.4	23.278	31.4	130	0.0127	0.092	1.17	0.719	0.0123	0.0425	0.0590
28.5	5	211.2	22.106	43.8	170	0.0127	0.092	1.17	0.683	0.0157	0.0516	0.0756
28.5	5	207.4	21.708	50	190	0.0127	0.092	1.17	0.671	0.0174	0.0562	0.0838
28.5	5	199.4	20.871	56.2	210	0.0127	0.092	1.17	0.645	0.0191	0.0594	0.0921
28.5	5	194.4	20.347	62.4	230	0.0127	0.092	1.17	0.629	0.0209	0.0631	0.1004

28.5	5	188.0	19.677	68.6	250	0.0127	0.092	1.17	0.608	0.0226	0.0661	0.1086
28.5	5	172.8	18.086	81	270	0.0127	0.092	1.17	0.559	0.0235	0.0633	0.1132
28.5	5	162.4	16.998	93.4	290	0.0127	0.092	1.17	0.525	0.0245	0.0618	0.1177
28.5	5	152.8	15.993	105.8	310	0.0127	0.092	1.17	0.494	0.0254	0.0604	0.1223
28.5	5	143.8	15.051	118.2	330	0.0127	0.092	1.17	0.465	0.0264	0.0590	0.1268
28.5	5	139.6	14.611	130.6	340	0.0127	0.092	1.17	0.451	0.0261	0.0566	0.1254
28.5	5	131.8	13.795	143	360	0.0127	0.092	1.17	0.426	0.0270	0.0554	0.1300
28.5	5	122.1	12.769	155.4	370	0.0127	0.092	1.17	0.395	0.0267	0.0507	0.1285
28.5	5	102.0	10.676	167.8	380	0.0127	0.092	1.17	0.330	0.0264	0.0419	0.1271
28.5	5	89.6	9.378	180.2	390	0.0127	0.092	1.17	0.290	0.0261	0.0364	0.1256
28.5	5	81.8	8.562	192.6	400	0.0127	0.092	1.17	0.265	0.0258	0.0329	0.1242
28.5	5	71.2	7.452	205	410	0.0127	0.092	1.17	0.230	0.0255	0.0283	0.1228
28.5	5	49.2	5.150	217.4	440	0.0127	0.092	1.17	0.159	0.0277	0.0212	0.1333
28.5	5	0	0.000	229.8	460	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0287	0.0000	0.1379

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

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	C <sub>M</sub>
28.5	6	424.4	44.424	0	0	0.0127	0.092	1.17	1.144	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	6	368.6	38.582	19	100	0.0127	0.092	1.17	0.993	0.0101	0.0335	0.0337
28.5	6	343.7	35.978	31.4	140	0.0127	0.092	1.17	0.926	0.0135	0.0418	0.0452
28.5	6	330.1	34.554	43.8	170	0.0127	0.092	1.17	0.890	0.0157	0.0467	0.0525
28.5	6	318.8	33.363	56.2	200	0.0127	0.092	1.17	0.859	0.0179	0.0514	0.0598
28.5	6	310.6	32.509	68.6	230	0.0127	0.092	1.17	0.837	0.0201	0.0562	0.0671
28.5	6	300.0	31.402	93.4	270	0.0127	0.092	1.17	0.809	0.0220	0.0594	0.0734
28.5	6	282.5	29.567	105.8	310	0.0127	0.092	1.17	0.761	0.0254	0.0647	0.0849
28.5	6	272.2	28.492	118.2	340	0.0127	0.092	1.17	0.734	0.0276	0.0677	0.0922
28.5	6	248.1	25.972	124.4	380	0.0127	0.092	1.17	0.669	0.0318	0.0711	0.1063
28.5	6	222.2	23.262	149.2	440	0.0127	0.092	1.17	0.599	0.0362	0.0724	0.1209
28.5	6	202.4	21.185	174	470	0.0127	0.092	1.17	0.546	0.0368	0.0671	0.1231
28.5	6	182.7	19.118	198.8	500	0.0127	0.092	1.17	0.492	0.0375	0.0617	0.1253
28.5	6	122.0	12.770	223.6	530	0.0127	0.092	1.17	0.329	0.0381	0.0419	0.1274

28.5	6	105.3	11.020	248.4	560	0.0127	0.092	1.17	0.284	0.0388	0.0368	0.1296
28.5	6	93.8	9.818	294.9	610	0.0127	0.092	1.17	0.253	0.0392	0.0331	0.1310
28.5	6	84.1	8.806	325.9	640	0.0127	0.092	1.17	0.227	0.0391	0.0296	0.1306
28.5	6	61.9	6.475	356.9	680	0.0127	0.092	1.17	0.167	0.0402	0.0224	0.1344
28.5	6	44.9	4.704	387.9	720	0.0127	0.092	1.17	0.121	0.0413	0.0167	0.1381
28.5	6	0.0	0.000	418.9	740	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0400	0.0000	0.1335

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

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r</b> (m)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	7	472.8	49.485	0	0	0.0127	0.092	1.17	1.092	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	7	389.8	40.797	19	180	0.0127	0.092	1.17	0.900	0.0200	0.0443	0.0492
28.5	7	376.4	39.394	31.4	230	0.0127	0.092	1.17	0.869	0.0247	0.0528	0.0607
28.5	7	366.9	38.403	43.8	260	0.0127	0.092	1.17	0.848	0.0269	0.0560	0.0661
28.5	7	352.2	36.864	56.2	300	0.0127	0.092	1.17	0.814	0.0304	0.0606	0.0745
28.5	7	337.1	35.282	68.6	350	0.0127	0.092	1.17	0.779	0.0350	0.0670	0.0860
28.5	7	326.7	34.196	81	380	0.0127	0.092	1.17	0.755	0.0372	0.0690	0.0914
28.5	7	319.0	33.384	93.4	410	0.0127	0.092	1.17	0.737	0.0394	0.0713	0.0967
28.5	7	308.2	32.256	118.2	460	0.0127	0.092	1.17	0.712	0.0426	0.0743	0.1044
28.5	7	299.0	31.296	143	500	0.0127	0.092	1.17	0.691	0.0444	0.0753	0.1091
28.5	7	287.2	30.063	167.8	550	0.0127	0.092	1.17	0.664	0.0476	0.0775	0.1168
28.5	7	273.0	28.576	192.6	600	0.0127	0.092	1.17	0.631	0.0507	0.0785	0.1245

28.5	7	257.8	26.984	242.2	680	0.0127	0.092	1.17	0.596	0.0545	0.0797	0.1338
28.5	7	253.8	26.562	267	710	0.0127	0.092	1.17	0.586	0.0551	0.0794	0.1354
28.5	7	235.9	24.696	291.8	740	0.0127	0.092	1.17	0.545	0.0558	0.0746	0.1369
28.5	7	228.2	23.884	316.6	770	0.0127	0.092	1.17	0.527	0.0564	0.0730	0.1385
28.5	7	211.5	22.133	341.4	800	0.0127	0.092	1.17	0.489	0.0571	0.0685	0.1401
28.5	7	199.1	20.837	366.2	830	0.0127	0.092	1.17	0.460	0.0577	0.0652	0.1417
28.5	7	186.3	19.497	391	860	0.0127	0.092	1.17	0.430	0.0584	0.0617	0.1433
28.5	7	176.0	18.422	415.8	890	0.0127	0.092	1.17	0.407	0.0590	0.0589	0.1449
28.5	7	155.7	16.292	440.6	920	0.0127	0.092	1.17	0.360	0.0597	0.0527	0.1465
28.5	7	148.7	15.564	465.4	950	0.0127	0.092	1.17	0.344	0.0603	0.0509	0.1481
28.5	7	138.3	14.478	490.2	980	0.0127	0.092	1.17	0.320	0.0610	0.0478	0.1497
28.5	7	129.3	13.529	515	1010	0.0127	0.092	1.17	0.299	0.0616	0.0452	0.1512
28.5	7	87.2	9.122	539.8	1040	0.0127	0.092	1.17	0.201	0.0623	0.0308	0.1528
28.5	7	68.3	7.150	564.6	1070	0.0127	0.092	1.17	0.158	0.0629	0.0244	0.1544
28.5	7	61.4	6.423	589.4	1110	0.0127	0.092	1.17	0.142	0.0648	0.0225	0.1591
28.5	7	54.4	5.695	614.2	1140	0.0127	0.092	1.17	0.126	0.0655	0.0202	0.1607
28.5	7	0.0	0.000	639	1170	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0661	0.0000	0.1622

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

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	C <sub>M</sub>
28.5	8	485.2	50.782	0	0	0.0127	0.092	1.17	0.981	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	8	414.6	43.390	19	200	0.0127	0.092	1.17	0.838	0.0225	0.0355	0.0423
28.5	8	396.4	41.492	43.8	260	0.0127	0.092	1.17	0.801	0.0269	0.0405	0.0506
28.5	8	377.0	39.457	68.6	330	0.0127	0.092	1.17	0.762	0.0325	0.0466	0.0611
28.5	8	355.3	37.190	93.4	410	0.0127	0.092	1.17	0.718	0.0394	0.0532	0.0741
28.5	8	334.4	34.997	143	510	0.0127	0.092	1.17	0.676	0.0457	0.0580	0.0859
28.5	8	318.5	33.331	192.6	600	0.0127	0.092	1.17	0.644	0.0507	0.0613	0.0953
28.5	8	311.3	32.583	217.4	650	0.0127	0.092	1.17	0.629	0.0539	0.0637	0.1012
28.5	8	305.4	31.961	242.2	690	0.0127	0.092	1.17	0.617	0.0557	0.0647	0.1048
28.5	8	294.9	30.864	267	740	0.0127	0.092	1.17	0.596	0.0589	0.0660	0.1106
28.5	8	283.2	29.641	291.8	780	0.0127	0.092	1.17	0.572	0.0608	0.0654	0.1142
28.5	8	274.1	28.692	316.6	810	0.0127	0.092	1.17	0.554	0.0614	0.0640	0.1154
28.5	8	243.3	25.465	391	910	0.0127	0.092	1.17	0.492	0.0646	0.0597	0.1214
28.5	8	212.6	22.249	465.4	1000	0.0127	0.092	1.17	0.430	0.0666	0.0537	0.1251

28.5	8	204.1	21.364	490.2	1030	0.0127	0.092	1.17	0.413	0.0672	0.0521	0.1263
28.5	8	194.5	20.362	515	1060	0.0127	0.092	1.17	0.393	0.0678	0.0501	0.1275
28.5	8	173.7	18.179	614.2	1160	0.0127	0.092	1.17	0.351	0.0679	0.0448	0.1277
28.5	8	161.4	16.893	663.8	1220	0.0127	0.092	1.17	0.326	0.0692	0.0424	0.1301
28.5	8	144.6	15.132	763	1320	0.0127	0.092	1.17	0.292	0.0693	0.0381	0.1303
28.5	8	131.0	13.709	862.2	1420	0.0127	0.092	1.17	0.265	0.0694	0.0345	0.1305
28.5	8	113.8	11.916	986.2	1550	0.0127	0.092	1.17	0.230	0.0702	0.0304	0.1319
28.5	8	99.0	10.366	1110	1680	0.0127	0.092	1.17	0.200	0.0709	0.0267	0.1333
28.5	8	88.4	9.249	1172	1810	0.0127	0.092	1.17	0.179	0.0794	0.0266	0.1492
28.5	8	0.0	0.000	1239	1900	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0823	0.0000	0.1546



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

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r</b> (m)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	9	606.2	63.445	0	0	0.0127	0.092	1.17	1.089	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	9	591.3	61.885	24	70	0.0127	0.092	1.17	1.062	0.0057	0.0090	0.0085
28.5	9	558.4	58.447	39.5	140	0.0127	0.092	1.17	1.003	0.0125	0.0186	0.0186
28.5	9	543.0	56.834	55	190	0.0127	0.092	1.17	0.976	0.0168	0.0243	0.0250
28.5	9	532.4	55.727	70.5	230	0.0127	0.092	1.17	0.957	0.0199	0.0282	0.0295
28.5	9	518.5	54.272	86	270	0.0127	0.092	1.17	0.932	0.0229	0.0317	0.0340
28.5	9	500.1	52.342	101.5	320	0.0127	0.092	1.17	0.899	0.0272	0.0363	0.0404
28.5	9	454.0	47.524	132.5	440	0.0127	0.092	1.17	0.816	0.0383	0.0464	0.0568
28.5	9	437.3	45.773	163.5	500	0.0127	0.092	1.17	0.786	0.0419	0.0489	0.0622
28.5	9	412.9	43.222	225.5	600	0.0127	0.092	1.17	0.742	0.0466	0.0514	0.0692
28.5	9	395.5	41.398	256.5	660	0.0127	0.092	1.17	0.711	0.0502	0.0530	0.0746
28.5	9	374.4	39.183	287.5	740	0.0127	0.092	1.17	0.673	0.0563	0.0563	0.0836

28.5	9	357.9	37.465	318.5	810	0.0127	0.092	1.17	0.643	0.0612	0.0584	0.0908
28.5	9	329.4	34.481	380.5	950	0.0127	0.092	1.17	0.592	0.0709	0.0623	0.1053
28.5	9	309.6	32.403	411.5	1000	0.0127	0.092	1.17	0.556	0.0733	0.0605	0.1088
28.5	9	292.1	30.569	442.5	1050	0.0127	0.092	1.17	0.525	0.0756	0.0589	0.1123
28.5	9	246.9	25.845	566.5	1250	0.0127	0.092	1.17	0.444	0.0851	0.0560	0.1263
28.5	9	225.2	23.567	659.5	1370	0.0127	0.092	1.17	0.405	0.0884	0.0531	0.1313
28.5	9	183.8	19.234	752.5	1490	0.0127	0.092	1.17	0.330	0.0918	0.0450	0.1363
28.5	9	86.8	9.080	783.5	1550	0.0127	0.092	1.17	0.156	0.0954	0.0221	0.1417
28.5	9	0.0	0.000	814.5	1600	0.0127	0.092	1.17	0.000	0.0978	0.0000	0.1452

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

Sudut	T <sub>s0</sub> (N.cm)						
	U = 3.8 m/s	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0.26	0.7	2.56	2.18	2.5	3.04	2.82
10	0.92	1.24	2.78	2.88	3.12	3.68	3.48
20	1.26	1.76	3.64	3.52	3.82	4.22	4.4
30	1.76	2.28	4.52	4.54	4.78	4.84	5.08
40	1.22	1.7	3.62	3.48	3.84	4.18	4.36
50	0.94	1.2	2.76	2.84	3.16	3.66	3.52
60	0.26	0.72	2.54	2.18	2.52	3.06	2.8
70	-0.54	0.34	1.94	1.56	1.88	2.52	2.34
80	-1.14	0.12	1.14	0.74	1.18	2.12	1.96
90	-1.66	-0.22	0.66	-0.02	0.38	1.78	1.52
100	-1.88	-0.56	-0.14	-0.92	-0.64	1.48	0.86
110	-2.42	-0.8	-1.36	-1.54	-1.08	1.04	0.44
120	-2.74	-0.98	-2.42	-2.38	-1.58	0.46	-0.1
130	-3.06	-1.1	-1.32	-1.52	-1.78	-0.06	-0.7
140	-3.44	-1.58	-0.1	-0.96	-1.92	-0.78	-1.3
150	-3.82	-2.66	0.68	-0.02	-2.16	-1.46	-1.72
160	-2.34	-1.1	1.16	0.72	-0.82	0.58	-0.08
170	-0.7	-0.2	1.92	1.56	1.5	1.84	1.52
180	0.22	0.68	2.52	2.18	2.44	3.02	2.86

Tabel A. 9 Data *Static Torque Coefficient* (Cts) Turbin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Sudut	Cts <sub>0</sub>						
	U = 3.8	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0.02165	0.04348	0.12315	0.07283	0.06136	0.05712	0.04187
10	0.07662	0.07703	0.13373	0.09621	0.07657	0.06915	0.05167
20	0.10494	0.10933	0.1751	0.11759	0.09376	0.0793	0.06533
30	0.14658	0.14163	0.21743	0.15166	0.11732	0.09095	0.07542
40	0.10161	0.1056	0.17414	0.11625	0.09425	0.07855	0.06473
50	0.07829	0.07454	0.13277	0.09487	0.07756	0.06877	0.05226
60	0.02165	0.04473	0.12219	0.07283	0.06185	0.0575	0.04157
70	-0.045	0.02112	0.09332	0.05211	0.04614	0.04735	0.03474
80	-0.0949	0.00745	0.05484	0.02472	0.02896	0.03984	0.0291
90	-0.1383	-0.0137	0.03175	-0.0007	0.00933	0.03345	0.02257

100	-0.1566	-0.0348	-0.0067	-0.0307	-0.0157	0.02781	0.01277
110	-0.2015	-0.0497	-0.0654	-0.0514	-0.0265	0.01954	0.00653
120	-0.2282	-0.0609	-0.1164	-0.0795	-0.0388	0.00864	-0.0015
130	-0.2548	-0.0683	-0.0635	-0.0508	-0.0437	-0.0011	-0.0104
140	-0.2865	-0.0981	-0.0048	-0.0321	-0.0471	-0.0147	-0.0193
150	-0.3181	-0.1652	0.03271	-0.0007	-0.053	-0.0274	-0.0255
160	-0.1949	-0.0683	0.0558	0.02405	-0.0201	0.0109	-0.0012
170	-0.0583	-0.0124	0.09236	0.05211	0.03681	0.03458	0.02257
180	0.01832	0.04224	0.12122	0.07283	0.05989	0.05675	0.04246

## B. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

Tabel B. 1 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	C <sub>M</sub>
28.5	3.8	202.2	21.164	0	0	0.01269	0.092	1.17	0.860	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	3.8	173.6	18.174	24	60	0.01269	0.092	1.17	0.739	0.0045	0.0276	0.0373
28.5	3.8	167.6	17.542	30.2	80	0.01269	0.092	1.17	0.713	0.0062	0.0368	0.0516
28.5	3.8	164.4	17.207	33.3	90	0.01269	0.092	1.17	0.700	0.0071	0.0411	0.0588
28.5	3.8	160.4	16.789	36.4	100	0.01269	0.092	1.17	0.683	0.0079	0.0450	0.0659
28.5	3.8	157.0	16.433	42.6	110	0.01269	0.092	1.17	0.668	0.0084	0.0487	0.0729
28.5	3.8	145.0	15.177	48.8	130	0.01269	0.092	1.17	0.617	0.0101	0.0519	0.0842
28.5	3.8	136.2	14.256	55	140	0.01269	0.092	1.17	0.580	0.0106	0.0511	0.0881
28.5	3.8	128.6	13.460	61.2	150	0.01269	0.092	1.17	0.547	0.0111	0.0504	0.0921
28.5	3.8	119.0	12.455	67.4	160	0.01269	0.092	1.17	0.506	0.0115	0.0486	0.0960
28.5	3.8	106.2	11.116	79.8	180	0.01269	0.092	1.17	0.452	0.0125	0.0470	0.1039
28.5	3.8	95.2	9.964	86	190	0.01269	0.092	1.17	0.405	0.0129	0.0437	0.1078

28.5	3.8	81.0	8.478	92.2	200	0.01269	0.092	1.17	0.345	0.0134	0.0385	0.1118
28.5	3.8	58.4	6.113	104.6	210	0.01269	0.092	1.17	0.249	0.0131	0.0272	0.1093
28.5	3.8	0.0	0.000	117	230	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0141	0.0000	0.1172

Tabel B. 2 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r</b> (m)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	4.4	250.8	26.250	0	0	0.01269	0.092	1.17	0.922	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	4.4	212.6	22.252	24	80	0.01269	0.092	1.17	0.781	0.0070	0.0338	0.0433
28.5	4.4	200.4	20.975	30.2	100	0.01269	0.092	1.17	0.737	0.0087	0.0398	0.0540
28.5	4.4	189.0	19.782	36.4	120	0.01269	0.092	1.17	0.695	0.0104	0.0449	0.0646
28.5	4.4	177.6	18.589	48.8	150	0.01269	0.092	1.17	0.653	0.0123	0.0501	0.0767
28.5	4.4	173.0	18.107	61.2	170	0.01269	0.092	1.17	0.636	0.0135	0.0535	0.0841
28.5	4.4	147.6	15.449	67.4	190	0.01269	0.092	1.17	0.542	0.0153	0.0514	0.0948
28.5	4.4	137.4	14.381	73.6	200	0.01269	0.092	1.17	0.505	0.0157	0.0494	0.0977
28.5	4.4	115.2	12.058	79.8	220	0.01269	0.092	1.17	0.423	0.0175	0.0459	0.1084

28.5	4.4	105.0	10.990	86	230	0.01269	0.092	1.17	0.386	0.0179	0.0430	0.1114
28.5	4.4	96.0	10.048	98.4	250	0.01269	0.092	1.17	0.353	0.0189	0.0414	0.1172
28.5	4.4	75.6	7.913	105	260	0.01269	0.092	1.17	0.278	0.0193	0.0334	0.1217
28.5	4.4	43.6	4.563	111	280	0.01269	0.092	1.17	0.160	0.0211	0.0210	0.1308
28.5	4.4	0.0	0.000	123	300	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0220	0.0000	0.1367

Tabel B. 3 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r</b> (m)	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	5	297.6	31.149	0	0	0.01269	0.092	1.17	0.962	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	5	273.6	28.637	24	90	0.01269	0.092	1.17	0.885	0.0082	0.0350	0.0395
28.5	5	264.0	27.632	48.8	140	0.01269	0.092	1.17	0.854	0.0114	0.0466	0.0546
28.5	5	257.2	26.920	73.6	180	0.01269	0.092	1.17	0.832	0.0132	0.0530	0.0637
28.5	5	243.6	25.497	98.4	220	0.01269	0.092	1.17	0.788	0.0151	0.0574	0.0728
28.5	5	231.4	24.220	117	260	0.01269	0.092	1.17	0.748	0.0178	0.0641	0.0856
28.5	5	221.0	23.131	123.2	280	0.01269	0.092	1.17	0.715	0.0195	0.0671	0.0939
28.5	5	211.0	22.085	148	320	0.01269	0.092	1.17	0.682	0.0214	0.0703	0.1030



28.5	5	200.2	20.954	172.8	350	0.01269	0.092	1.17	0.647	0.0221	0.0687	0.1061
28.5	5	185.0	19.363	197.6	380	0.01269	0.092	1.17	0.598	0.0227	0.0654	0.1092
28.5	5	176.0	18.421	272	460	0.01269	0.092	1.17	0.569	0.0234	0.0641	0.1126
28.5	5	155.6	16.286	327.8	520	0.01269	0.092	1.17	0.503	0.0239	0.0579	0.1151
28.5	5	145.8	15.260	358.8	550	0.01269	0.092	1.17	0.472	0.0238	0.0540	0.1145
28.5	5	131.8	13.795	420.8	620	0.01269	0.092	1.17	0.426	0.0248	0.0508	0.1193
28.5	5	110.6	11.576	451.8	650	0.01269	0.092	1.17	0.358	0.0247	0.0425	0.1187
28.5	5	83.0	8.687	482.8	690	0.01269	0.092	1.17	0.268	0.0258	0.0333	0.1241
28.5	5	71.0	7.431	513.8	730	0.01269	0.092	1.17	0.230	0.0269	0.0297	0.1295
28.5	5	64.0	6.699	544.8	770	0.01269	0.092	1.17	0.207	0.0280	0.0279	0.1349
28.5	5	29.8	3.119	575.8	810	0.01269	0.092	1.17	0.096	0.0292	0.0135	0.1403
28.5	5	0.0	0.000	606.8	880	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0340	0.0000	0.1636

Tabel B. 4 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

T (°C)	U (m/s)	n (rpm)	$\omega$ (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m <sup>2</sup> )	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\lambda$	Td (Nm)	CoP	C <sub>M</sub>
28.5	6	378.6	39.627	0	0	0.01269	0.092	1.17	1.020	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	6	365.0	38.203	24	80	0.01269	0.092	1.17	0.984	0.0070	0.0229	0.0233
28.5	6	354.2	37.073	55	140	0.01269	0.092	1.17	0.955	0.0106	0.0337	0.0353
28.5	6	346.2	36.236	86	200	0.01269	0.092	1.17	0.933	0.0142	0.0442	0.0474
28.5	6	332.2	34.770	117	260	0.01269	0.092	1.17	0.895	0.0178	0.0532	0.0595
28.5	6	321.2	33.619	148	320	0.01269	0.092	1.17	0.866	0.0214	0.0619	0.0715
28.5	6	309.8	32.426	179	370	0.01269	0.092	1.17	0.835	0.0238	0.0663	0.0794
28.5	6	298.0	31.191	210	440	0.01269	0.092	1.17	0.803	0.0286	0.0768	0.0956
28.5	6	289.4	30.291	241	490	0.01269	0.092	1.17	0.780	0.0310	0.0808	0.1036
28.5	6	272.6	28.532	303	560	0.01269	0.092	1.17	0.735	0.0320	0.0785	0.1069
28.5	6	257.4	26.941	334	600	0.01269	0.092	1.17	0.694	0.0331	0.0767	0.1106
28.5	6	242.2	25.350	365	630	0.01269	0.092	1.17	0.653	0.0330	0.0719	0.1102
28.5	6	222.8	23.320	396	660	0.01269	0.092	1.17	0.600	0.0329	0.0659	0.1098

28.5	6	205.6	21.519	427	700	0.01269	0.092	1.17	0.554	0.0340	0.0629	0.1135
28.5	6	197.8	20.703	458	730	0.01269	0.092	1.17	0.533	0.0339	0.0603	0.1131
28.5	6	187.0	19.573	489	770	0.01269	0.092	1.17	0.504	0.0350	0.0589	0.1169
28.5	6	171.6	17.961	520	810	0.01269	0.092	1.17	0.462	0.0361	0.0558	0.1206
28.5	6	144.2	15.093	582	900	0.01269	0.092	1.17	0.389	0.0396	0.0514	0.1322
28.5	6	92.8	9.713	644	1010	0.01269	0.092	1.17	0.250	0.0456	0.0381	0.1522
28.5	6	0.0	0.000	706	1100	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0503	0.0000	0.1680

Tabel B. 5 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r (m)</b>	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	7	432.8	45.300	0	0	0.01269	0.092	1.17	1.000	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	7	405.2	42.411	24	110	0.01269	0.092	1.17	0.936	0.0107	0.0246	0.0263
28.5	7	375.8	39.334	55	220	0.01269	0.092	1.17	0.868	0.0205	0.0438	0.0504
28.5	7	353.8	37.031	117	340	0.01269	0.092	1.17	0.817	0.0278	0.0557	0.0681
28.5	7	330.0	34.540	179	460	0.01269	0.092	1.17	0.762	0.0350	0.0655	0.0859

28.5	7	307.4	32.175	241	560	0.01269	0.092	1.17	0.710	0.0397	0.0692	0.0975
28.5	7	290.4	30.395	303	660	0.01269	0.092	1.17	0.671	0.0444	0.0732	0.1091
28.5	7	279.6	29.265	365	750	0.01269	0.092	1.17	0.646	0.0479	0.0760	0.1176
28.5	7	264.4	27.674	427	850	0.01269	0.092	1.17	0.611	0.0527	0.0789	0.1292
28.5	7	255.2	26.711	489	930	0.01269	0.092	1.17	0.590	0.0549	0.0798	0.1354
28.5	7	237.0	24.806	551	1010	0.01269	0.092	1.17	0.548	0.0571	0.0768	0.1402
28.5	7	224.8	23.529	613	1080	0.01269	0.092	1.17	0.519	0.0581	0.0741	0.1427
28.5	7	212.0	22.189	675	1150	0.01269	0.092	1.17	0.490	0.0591	0.0711	0.1451
28.5	7	199.4	20.871	737	1230	0.01269	0.092	1.17	0.461	0.0614	0.0694	0.1506
28.5	7	124.2	13.000	830	1340	0.01269	0.092	1.17	0.287	0.0635	0.0447	0.1558
28.5	7	75.8	7.934	923	1430	0.01269	0.092	1.17	0.175	0.0631	0.0271	0.1549
28.5	7	40.2	4.208	1047	1570	0.01269	0.092	1.17	0.093	0.0651	0.0148	0.1598
28.5	7	0.0	0.000	1078	1610	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0662	0.0000	0.1625

Tabel B. 6 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r (m)</b>	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>C<sub>M</sub></b>
28.5	8	485.4	50.805	0	0	0.01269	0.092	1.17	0.981	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	8	473.0	49.507	24	100	0.01269	0.092	1.17	0.956	0.0095	0.0170	0.0178
28.5	8	431.2	45.132	86	260	0.01269	0.092	1.17	0.872	0.0217	0.0355	0.0407
28.5	8	410.0	42.913	148	360	0.01269	0.092	1.17	0.829	0.0264	0.0411	0.0496
28.5	8	393.0	41.134	210	480	0.01269	0.092	1.17	0.794	0.0336	0.0502	0.0632
28.5	8	370.2	38.748	272	580	0.01269	0.092	1.17	0.748	0.0383	0.0539	0.0720
28.5	8	352.8	36.926	334	680	0.01269	0.092	1.17	0.713	0.0431	0.0577	0.0809
28.5	8	335.0	35.063	396	790	0.01269	0.092	1.17	0.677	0.0490	0.0624	0.0922
28.5	8	311.8	32.635	458	910	0.01269	0.092	1.17	0.630	0.0563	0.0666	0.1057
28.5	8	300.4	31.442	489	970	0.01269	0.092	1.17	0.607	0.0599	0.0683	0.1125
28.5	8	292.6	30.625	520	1020	0.01269	0.092	1.17	0.591	0.0622	0.0692	0.1170
28.5	8	255.6	26.753	613	1160	0.01269	0.092	1.17	0.517	0.0681	0.0661	0.1280
28.5	8	224.4	23.487	675	1260	0.01269	0.092	1.17	0.454	0.0728	0.0621	0.1368

28.5	8	191.2	20.012	861	1500	0.01269	0.092	1.17	0.386	0.0795	0.0578	0.1495
28.5	8	182.8	19.133	971	1620	0.01269	0.092	1.17	0.370	0.0808	0.0561	0.1518
28.5	8	137.6	14.402	1131	1800	0.01269	0.092	1.17	0.278	0.0833	0.0435	0.1565
28.5	8	80.2	8.394	1303	1960	0.01269	0.092	1.17	0.162	0.0818	0.0249	0.1537
28.5	8	64.4	6.741	1617	2280	0.01269	0.092	1.17	0.130	0.0825	0.0202	0.1551
28.5	8	0.0	0.000	1741	2410	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.0833	0.0000	0.1565

Tabel B. 7 Data Penelitian Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s

<b>T</b> (°C)	<b>U</b> (m/s)	<b>n</b> (rpm)	<b><math>\omega</math></b> (rad/s)	<b>m</b> (gr)	<b>s</b> (gr)	<b>r (m)</b>	<b>A</b> (m <sup>2</sup> )	<b><math>\rho</math></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b><math>\lambda</math></b>	<b>Td</b> (Nm)	<b>CoP</b>	<b>CM</b>
28.5	9	534.2	55.913	0	0	0.01269	0.092	1.17	0.960	0.0000	0.0000	0.0000
28.5	9	494.6	51.768	24	150	0.01269	0.092	1.17	0.889	0.0157	0.0207	0.0233
28.5	9	463.2	48.482	86	310	0.01269	0.092	1.17	0.832	0.0279	0.0345	0.0414
28.5	9	420.8	44.044	148	450	0.01269	0.092	1.17	0.756	0.0376	0.0422	0.0558
28.5	9	391.6	40.987	210	560	0.01269	0.092	1.17	0.704	0.0436	0.0455	0.0647
28.5	9	375.4	39.292	272	650	0.01269	0.092	1.17	0.675	0.0471	0.0471	0.0699

28.5	9	347.6	36.382	334	780	0.01269	0.092	1.17	0.625	0.0555	0.0515	0.0824
28.5	9	327.8	34.310	396	890	0.01269	0.092	1.17	0.589	0.0615	0.0538	0.0913
28.5	9	318.8	33.368	458	980	0.01269	0.092	1.17	0.573	0.0650	0.0553	0.0965
28.5	9	310.4	32.489	520	1070	0.01269	0.092	1.17	0.558	0.0685	0.0567	0.1017
28.5	9	293.2	30.688	582	1190	0.01269	0.092	1.17	0.527	0.0757	0.0592	0.1124
28.5	9	282.8	29.600	644	1300	0.01269	0.092	1.17	0.508	0.0817	0.0616	0.1212
28.5	9	263.8	27.611	706	1450	0.01269	0.092	1.17	0.474	0.0926	0.0652	0.1375
28.5	9	249.4	26.104	768	1570	0.01269	0.092	1.17	0.448	0.0998	0.0664	0.1482
28.5	9	235.6	24.659	830	1650	0.01269	0.092	1.17	0.423	0.1021	0.0642	0.1516
28.5	9	215.2	22.524	892	1710	0.01269	0.092	1.17	0.387	0.1018	0.0585	0.1512
28.5	9	193.4	20.243	1064	1880	0.01269	0.092	1.17	0.347	0.1016	0.0524	0.1508
28.5	9	181.2	18.966	1236	2050	0.01269	0.092	1.17	0.326	0.1013	0.0490	0.1505
28.5	9	114.0	11.932	1396	2220	0.01269	0.092	1.17	0.205	0.1026	0.0312	0.1523
28.5	9	71.6	7.494	1458	2310	0.01269	0.092	1.17	0.129	0.1061	0.0203	0.1575
28.5	9	0.0	0.000	1520	2410	0.01269	0.092	1.17	0.000	0.1108	0.0000	0.1645

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

Sudut	Ts (N.cm)						
	U = 3.8	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0.58	0.92	2.78	2.48	2.8	3.08	3.24
10	1	1.6	3.08	3.02	3.66	3.8	3.98
20	1.5	2.04	3.8	3.6	4.14	4.28	4.74
30	2.02	2.7	4.72	4.74	4.86	4.94	5.32
40	1.46	1.92	3.68	3.58	4.28	4.3	4.68
50	1.02	1.58	3.1	2.92	3.68	3.82	4.1
60	0.68	0.96	2.7	2.7	2.84	3.26	3.14
70	0.28	0.72	2.36	2.06	2.36	2.7	2.74
80	0.14	0.52	1.54	1.58	1.8	2.16	2.2
90	-0.34	0.14	1.18	1.1	1.44	1.8	1.66
100	-0.7	-0.04	0.78	0.66	1.14	1.52	1.32
110	-1.22	-0.44	0.26	0	0.72	1.14	0.74
120	-1.4	-0.68	0.14	-0.46	0.2	0.58	0.34
130	-1.74	-0.92	-0.02	0.04	0.04	0.28	-0.1
140	-1.84	-1.06	0.42	0.46	-0.2	-0.3	-0.58
150	-2.12	-1.42	0.94	1.12	-0.68	-0.8	-1.08
160	-1.24	-0.62	1.48	1.46	1.1	0.7	0.88
170	0.28	0.16	1.96	1.76	1.94	1.9	2.06
180	0.8	0.84	2.68	2.48	2.76	3.1	3.24



Tabel B. 9 Data *Static Torque Coefficient* Turbin Savonius Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s

Sudut	Cts						
	U = 3.8	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0.0483	0.05715	0.13373	0.08285	0.06872	0.05788	0.0481
10	0.08328	0.09939	0.14816	0.10089	0.08983	0.07141	0.05909
20	0.12493	0.12672	0.1828	0.12026	0.10161	0.08043	0.07038
30	0.16823	0.16772	0.22705	0.15834	0.11928	0.09283	0.07899
40	0.12159	0.11927	0.17703	0.11959	0.10505	0.0808	0.06948
50	0.08495	0.09815	0.14912	0.09755	0.09032	0.07178	0.06087
60	0.05663	0.05963	0.12988	0.0902	0.0697	0.06126	0.04662
70	0.02332	0.04473	0.11353	0.06882	0.05792	0.05074	0.04068
80	0.01166	0.0323	0.07408	0.05278	0.04418	0.04059	0.03266
90	-0.0283	0.0087	0.05676	0.03675	0.03534	0.03382	0.02465

100	-0.0583	-0.0025	0.03752	0.02205	0.02798	0.02856	0.0196
110	-0.1016	-0.0273	0.01251	0.002	0.01767	0.02142	0.01099
120	-0.1166	-0.0422	0.00673	-0.008	0.00491	0.0109	0.00505
130	-0.1449	-0.0571	-0.001	-0.0094	0.00098	0.00526	-0.0015
140	-0.1532	-0.0658	0.0202	0.01603	-0.0049	-0.0053	-0.0086
150	-0.1766	-0.0882	0.04522	0.03541	-0.0167	-0.0154	-0.016
160	-0.1033	-0.0385	0.06927	0.04877	0.027	0.01315	0.01307
170	0.02332	0.00994	0.09429	0.05879	0.04761	0.03533	0.03059
180	0.06663	0.05218	0.12796	0.08285	0.06774	0.05788	0.0481



### C. Perhitungan Uncertainty

Perhitungan uncertainty ini menggunakan data *Coefficient of Power* maksimum turbin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s.

- Uncertainty pada pembacaan *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ )

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Uncertainty pada pembacaan putaran ( $\omega$ )

$$u_{\omega} = \pm \{ [u_n]^2 \}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{188} = \pm 5,3 \times 10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

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

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (U)

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



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

$$u_{(r)} = \pm \frac{0.01}{12.7} = \pm 0,00078$$

$$U_{T_D} = \pm \{[0,055]^2 + [0.00078]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{T_D} = \pm 0,05513$$

$$U_{T_D} = \pm 5,513\%$$

- Uncertainty Massa Jenis ( $\rho$ )

$$\rho \times T = C$$

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

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

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

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

$$u_{\rho} = u_T = \frac{0.1}{28,5}$$

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

- Uncertainty Luas ( $A$ )

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

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

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

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

$$U_A = \pm \{ [3,23 \times 10^{-3}]^2 + [3,35 \times 10^{-3}]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_A = \pm 0,00466$$

$$U_A = \pm 0,47\%$$

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

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

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

$$dC_m = \frac{\partial C_m}{\partial T_D} + \frac{\partial C_m}{\partial \rho} + \frac{\partial C_m}{\partial A} + \frac{\partial C_m}{\partial v} + \frac{\partial C_m}{\partial R}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{C_m, v} = \frac{\delta C_m, v}{C_m} = \frac{v}{C_m} \frac{\delta C_m}{\delta v} u_{\rho} = -2u_v$$

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

$$u_{C_M} = \pm \{ (0,05513)^2 + (3,5 \times 10^{-3})^2 + (-2 \times 0,002)^2 + (4,66 \times 10^{-3})^2 + (6,48 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,0553 = 5,53\%$$

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

$$\text{CoP} = \text{Cm} \cdot \lambda$$

$$d\text{CoP} = \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \text{Cm}} + \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \lambda}$$

$$\triangleright \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \text{Cm}} = (\lambda)$$

$$\triangleright \frac{\partial \text{CoP}}{\partial \lambda} = (\text{Cm})$$

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

$$u_{\text{CoP}, \lambda} = \frac{\delta \text{CoP}, \lambda}{\text{CoP}} = \frac{\lambda}{\text{CoP}} \frac{\delta \text{CoP}}{\delta \lambda} u_{\lambda} = u_{\lambda}$$

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

Maka:

$$u_{\text{CoP}} = \pm \{ (0,553)^2 + (6,8 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\text{CoP}} = \pm 0,557 = 5,57\%$$

- Uncertainty pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

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

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

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

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

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

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

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



$$\begin{aligned}
u_{Re,\rho} &= \frac{\delta Re,\rho}{Re} = \frac{\rho}{Re} \frac{\delta Re}{\delta \rho} u_\rho = \frac{\rho}{Re} (VL\mu^{-1}) u_\rho = u_\rho \\
u_{Re,V} &= \frac{\delta Re,V}{Re} = \frac{V}{Re} \frac{\delta Re}{\delta V} u_\rho = \frac{V}{Re} (\rho L\mu^{-1}) u_V = u_V \\
u_{Re,L} &= \frac{\delta Re,L}{Re} = \frac{L}{Re} \frac{\delta Re}{\delta L} u_L = \frac{L}{Re} (\rho V\mu^{-1}) u_L = u_L \\
u_{Re,\mu} &= \frac{\delta Re,\mu}{Re} = \frac{\mu}{Re} \frac{\delta Re}{\delta \mu} u_L = \frac{\mu}{Re} (-\mu^{-2} \rho VL) u_\mu = -u_\mu \\
u_{RE} &= \pm \{u_\rho^2 + u_V^2 + u_L^2 + (-u_\mu)^2\}^{\frac{1}{2}}
\end{aligned}$$

Uncertainty miu ( $\mu$ )

$$T = 28,5^\circ\text{C}$$

$$u_\mu = \pm \frac{\partial \mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \partial T)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu}{\partial T} &= \frac{\mu(29^\circ) - \mu(27^\circ)}{(29^\circ - 27^\circ)\text{C}} = \frac{(1,86 \times 10^{-5} - 1,85 \times 10^{-5}) \text{Ns/m}^2}{2^\circ\text{C}} = 5 \times 10^{-8} \text{Ns}/ \\
&\text{m}^2\text{oC}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
U_\mu &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \partial T) = \frac{1}{\frac{(1,86 \times 10^{-5}) \text{Ns}}{\text{m}^2}} \cdot \frac{5 \times 10^{-8} \text{Ns}}{\text{m}^2\text{C}} \cdot (\pm 0,5^\circ\text{C}) \\
&= 1,34 \times 10^{-2} \\
&= 0,0134
\end{aligned}$$

Maka:

$$\begin{aligned}
u_{RE} &= \pm \{ (3,5 \times 10^{-3})^2 + (0,002)^2 + (3,23 \times 10^{-3})^2 + \\
&(0,0134)^2 \}^{\frac{1}{2}} \\
u_{RE} &= \pm 0,01436 = 1,436\%
\end{aligned}$$



## BIODATA PENULIS



Penulis, Michael Lawrence Budihartono merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, yang lahir di Semarang, 20 Juni 1998 dari Bapak Suhartojo Budihartono dan Ibu Yenny Widjaja.

Jenjang pendidikan penulis meliputi SDK Tri Tunggal Semarang (2004-2010), SMP PL Domenico Savio Semarang (2010-2013), SMA Kolese Loyola Semarang (2013-2016). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi di S1 Teknik Mesin ITS (2016-2020) melalui SBMPTN.

Semasa kuliah, Penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non akademik seperti kuliah tamu, pelatihan sertifikasi ISO, pelatihan software CFD, UKT Sepakbola, dan menjadi asisten mata kuliah Mekanika Getaran dan Mekanika Fluida, serta asisten praktikum Mekanika Fluida I dan II. Penulis dapat dihubungi melalui email [michlawrence20@gmail.com](mailto:michlawrence20@gmail.com).