TUGAS AKHIR - TM184835

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

"Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu d/D = 0,5; y/D = 0,5; S/D = 1,2 dengan Kecepatan Angin 3,8;4,4;5;6;7; 8; dan 9 m/s"

BAGAS RAMADHAN ANANTO
NRP 02111640000003

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 PENGGANGGU DI DEPAN *RETURNING BLADE* TURBIN

"Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu d/D = 0,5; y/D = 0,5; S/D = 1,2 dengan Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5; 6; 7; 8; dan 9 m/s"

Bagas Ramadhan Ananto
02111640000003

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

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

FINAL PROJECT – TM184835

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVING PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE BY PLACING A CYLINDER AS A BLUFF BODY IN FRONT OF RETURNING BLADE TURBINE

“Case Study for d/D = 0.5; y/D = 0.5; S/D = 1.2 with Wind Speed Variations 3,8; 4,4 ;5;6;7;8 and 9 m/s”

Bagas Ramadhan Ananto
02111640000003

Advisory Lecturer
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

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

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

"Studi Kasus untuk ukuran Silinder Pengganggu d/D = 0,5; diletakkan pada posisi S/D = 1,2 ; 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 :

Bagas Ramadhan Ananto

NRP. 02111640000003

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

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

"Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu d/D = 0,5; y/D = 0,5; S/D = 1,2 dengan Kecepatan Angin 3,8;4,4;5;6;7;8 dan 9 m/s"

Nama Mahasiswa : Bagas Ramadhan Ananto
NRP : 02111640000003
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di kawasan Asia Tenggara dan menempati urutan kelima di Asia Pasifik. Konsumsi energi di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil, seperti minyak bumi. Mengingat pembentukan energi fosil membutuhkan waktu yang lama, maka perlu adanya sumber energi alternatif. Salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan di Indonesia adalah energi angin. Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi listrik dengan cara mengubah energi kinetik yang dimiliki oleh angin menjadi energi mekanik pada turbin angin. Turbin angin yang optimal diterapkan sesuai kecepatan angin di Indonesia adalah turbin Savonius. Turbin Savonius memiliki kelemahan yaitu memiliki efisiensi paling rendah dibandingkan dengan turbin angin tipe lainnya, sehingga penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius.

Pada Studi Eksperimen ini dilakukan menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua buah sudu dengan diameter sudu turbin (D) sebesar 167 mm, diameter *end plate* (Do) sebesar 320 mm, tinggi (H) sebesar 298 mm, dan diameter poros (b) sebesar

19 mm. Pada penelitian ini digunakan silinder pengganggu berbentuk silinder dengan diameter (d) sebesar 83 mm. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perbandingan d/D = 0,5, y/D = 0,5 dengan variasi kecepatan angin 3,8;4,4;5;6;7;8 dan 9 m/s , dan variasi S/D = 1,2. Penelitian dilakukan dengan menggunakan sumber angin yang dihembuskan oleh *axial fan* yang dibantu dengan *Honeycomb* di depannya agar aliran udara yang mengalir seragam. *Axial fan* yang digunakan tidak memiliki pengaturan kecepatan aliran udara sehingga digunakan *voltage regulator* untuk mengatur kecepatan aliran udara. Pengukuran kecepatan aliran udara menggunakan *anemometer*. Pengukuran putaran turbin menggunakan *tachometer*. Kemudian pengukuran torsi statis dengan *torquemeter* dan torsi dinamis dengan *brake dynamometer*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat meningkatkan kinerja turbin angin Savonius. Hal ini berdasarkan peningkatan torsi statis turbin, *Coefficient of Power*, dan *Coefficient of Moment* dengan penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan variasi jarak (S/D) dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Peningkatan nilai tertinggi diperoleh pada kecepatan angin 5 m/s dengan penggunaan silinderpengganggu pada jarak S/D = 1,2, d/D = 0,5 dan posisi y/D = 0,5 diperoleh peningkatan CoP maksimum dan Cm maksimum sebesar 74,28% dan 73,24%. Namun penggunaan silinder pengganggu dengan ukuran d/D = 0,5, posisi y/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 untuk semua variasi kecepatan belum mampu menyebabkan turbin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

Kata kunci: Turbin angin Savonius, Silinder Pengganggu, Putaran Turbin, Torsi Statis, Coefficient of Power, Coefficient of Moment.

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVING PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE BY PLACING A CYLINDER AS A BLUFF BODY IN FRONT OF *RETURNING BLADE* TURBINE

"Case Study for d/D = 0.5; y/D = 0.5; S/D = 1.2 with wind speed variations 3,8;4,4;5;6;7;8
and 9 m/s"

Name of Student : Bagas Ramadhan Ananto
NRP : 02111640000003
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Indonesia is the country with the largest energy consumption in the Southeast Asia Region and fifth in the Asia Pacific in primary energy consumption. Energy consumption is still dominated by fossil energy, such as petroleum. Considering fossil energy that takes a long time in its formation, it is necessary to have renewable energy or alternative energy sources. One alternative energy that can be developed is wind energy. Wind energy can be converted into electrical energy by changing kinetic energy from wind to mechanical energy in wind turbine. One of the optimal wind turbines applied in Indonesia is the Savonius type. Savonius turbine has the disadvantage of having the lowest efficiency compared to other types of wind turbines, so this research was conducted to improve the Savonius turbine performance by placing a cylinder as a bluff body in front of the returning blade.

This study uses Savonius wind turbine which have two blades with turbine blade diameter (D) of 167 mm,(D_0) of 320 mm, height (H) of 298 mm, shaft diameter (b) of 19 mm and a cylinder diameter (d) of 132. This study was conducted using a d/D = 0.5 distance (y/D) of 0.5, with wind speed variations 3.8;4.4;5,6,7,8 and 9 m/s, and distance (S/D) of 1.2. The study was conducted in

*an open area with a source of windblown by an axial fan. Anemometer for measuring wind speed, tachometer for measuring shaft rotation, torque meter for measuring static torque and brake dynamometer for measuring dynamic torque. From the angular velocity and dynamic torque, the actual power of the Savonius wind turbine will b*e obtained.

The results showed that installing the disturbance cylinder in front of the returning blade could improve the performance of the Savonius wind turbine. This is based on an increase in the value of turbine rotation speed, turbine static torque, Coefficient of Power, and Coefficient of Moment.The maximum increase in Coefficient of Power and Coefficient of Moment was obtained at velocity of wind5 m/s with the addition of disturbance cylinder at a distance of S/D = 1.2 and position y/D = 0.5 which obtained maximum increase in CoP and Cm of 74.28% dan 73.24 %. But, the addition of a disturbance cylinder in front of the returning blade turbine with a position of y/D = 0.5 and the distance of S/D = 1.2 for all variations of wind speeddoes not cause the Savonius wind turbine has self starting in all angular positions of the blade.

Keywords:Savonius wind turbine, cylinder as a bluff body, coefficient of power, coefficient of moment,turbine rotation speed, turbine static torque

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS.

Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Orang tua dan keluarga penulis, yang selalu memberikan dukungan, dan doa yang selalu dipanjatkan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu meluangkan waktu, mencurahkan ilmu, dan memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Para dosen penguji, Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT., Prof. Ir. Sutardi, M.Eng.,Ph.D, Nur Ikhwan, S.T., M.Eng dan Vivien Suphandani, ST., ME., PhD., yang telah banyak memberikan saran dan kritik pada Tugas Akhir ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, M.Sc selaku dosen wali yang telah banyak memberikan perhatian dan motivasi kepada penulis.
5. Teman seperjuangan Tugas Akhir kelompok 7 (Anak Pak Yogi), terima kasih atas bantuan dan semangatnya selama mengerjakan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman Teknik Mesin ITS Angkatan 2016
7. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan perkuliahan S1 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, penulis sangat mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Penulis

berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2020

Bagas Ramadhan Ananto

DAFTAR ISI

ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR TABEL xix
DAFTAR SIMBOL xxiii
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 6
1.3 Batasan Masalah 8
1.4 Tujuan Penelitian 9
1.5 Manfaat Penelitian 9
BAB II 10
DASAR TEORI 11
2.1 Turbin Angin 11
2.2 Turbin Angin Savonius 13
2.3 Gaya *Drag* 14
2.4 Bilangan *Reynolds* 17
2.5 Aliran Melintasi Silinder Sirkular 18
2.6 Perhitungan Torsi 19
2.7 Perhitungan Daya 20
2.7.1 Perhitungan Daya Teoritis Turbin 20
2.7.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin 21
2.8 *Coefficient of Power* (CoP) 23
2.9 Tip Speed Ratio 23
2.10 Penelitian Terdahulu 26
2.10.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu 26
2.10.2 Penelitian Peningkatan Performa Turbin ..... Angin Savonius dengan Variasi Geometri 29

2.10.3 Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Berupa Plat Datar 37
2.10.4 Penelitian Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius ... 42
2.10.5 Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Pemasangan Silinder Pengganggu Tipe I-65° Terhadap Performa Turbin Angon Savonius 48
2.10.6 Penelitian Eksperimental Pengaruh Variasi Jarak Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius 53
2.11 Perbandingan Penelitian 57
BAB III 58
METODE PENELITIAN 59
3.1 Parameter yang Diukur 59
3.2 Analisa Dimensi 60
3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power* 60
3.2.2 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment* 63
3.3 Peralatan 66
3.3.1 Axial Fan dan Voltage Regulator 66
3.3.2 Turbin Angin Savonius 68
3.3.3 Silinder Pengganggu 69
3.3.4 Penyangga Turbin Angin Savonius 70
3.3.5 *Honeycomb* 71
3.3.6 Alat Ukur 72
3.4 Prosedur Penelitian 80
3.4.1 Prosedur Penelitian Menentukan Putaran dan ... Torsi Dinamis 80
3.4.2 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis 82
3.5 *Flowchart* Penelitian 83
3.5.1 *Flowchart* Putaran dan Torsi Dinamis 83
3.5.2 *Flowchart* Torsi Statis 86
3.6 Jadwal Penelitian 88
3.7 Perhitungan *Uncertainty* 88
3.8 Uji *Uniformity* 91

BAB IV 93
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 93
4.1 Contoh Perhitungan.....93
4.1.1 Perhitungan Reynolds Number.....93
4.1.2 Perhitungan Tip Speed Ratio 95
4.1.3 Perhitungan Coefficient of Power(CoP).....96
4.1.4 Perhitungan Coefficient of Moment (CM) 97
4.2 Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dengan Variasi Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s 97
4.2.1 Analisa Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 98
4.2.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) .....Terhadap Fungsi Kecepatan Angin Tanpa Silinder Pengganggu 99
4.2.3 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) .....Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....101
4.2.4 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (CM_0) ...Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.....104
4.2.5 Analisa *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 105
4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s 109
4.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power*(CoP) .....Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu 109
4.3.2 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (CM) ....Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu 126
4.3.3 Analisa *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu.....138

4.4 Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* (CoP*max*) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP0*max*) Terhadap Variasi Kecepatan Angin 5 m/sdan 7 m/s. 156
4.5 Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* (CoP*max*) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP_0*max*) Terhadap Variasi Kecepatan Angin 5 m/sdan 7 m/s 158
BAB V 161
KESIMPULAN DAN SARAN 161
5.1 Kesimpulan 161
5.2 Saran 162
LAMPIRAN 165
BIODATA PENULIS 197

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis turbin angin 13
Gambar 2.2 Desain sederhana turbin angin Savonius 13
Gambar 2.3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang 15
benda 2 dimensi (a) *Pressure Force*. (b) *Viscous Force*.... 15
(c) *Resultant Force* **(Munson et al, 2013)**..... 15
Gambar 2.4 Skema Turbin Angin Savonius 17
Gambar 2.5 Kualitatif aliran pada suatu silinder 18
Gambar 2.6 *Free body diagram* (FBD) 22
brake dynamometer 22
Gambar 2.7 Grafik hubungan antara *Coefficient of Power*dengan 25
Tip speed ratio berbagai jenis turbin angin 25
Gambar 2.8 Skema Percobaan 27
(Tsustsui dan Igarashi, 2002) 27
Gambar 2.10 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkular utama. 28
Gambar 2.11 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan Single *Stage* 30
Gambar 2.12 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power*terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius denganDua, Tiga, dan Empat Sudu. 31
Gambar 2.13 Grafik Pengaruh Jumlah *Blade*terhadap Daya Aktual 32
Turbin Angin Savonius. 32

Gambar 2.14 Grafik Hubungan *Spesific Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Satu*Stage* dan Dua *Stage*..... 33
Gambar 2.15 Grafik Hubungan *Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Overlap Ratio* 34
Gambar 2.16 Grafik Hubungan *Coefficient of Power*terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Aspect Ratio*..... 35
Gambar 2.17 Grafik Hubungan antara *Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan *End Plate* dan *Without End Plate.* 36
Gambar 2.18 Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin Savonius 38
Gambar 2.19 Geometri Penelitian Turbin Angin Savonius 38
Gambar 2.20 Grafik Pengaruh Variasi Panjang Plat terhadap Nilai *Coefficient of Power* 39
Gambar 2.21 Grafik Pengaruh Putaran Turbin terhadap Besar Sudut (α dan β) pada *Curtain* 1 40
Gambar 2.22 Grafik Pengaruh Torsi yang dihasilkan 41
terhadap Putaran Turbin 41
Gambar 2.23 Grafik Pengaruh Panjang *Curtain* terhadap nilai *Coefficient of Power* dengan *Tip speed ratio* (α = 45º dan β = 15º) 42
Gambar 2.24 Skema penelitian silinder pengganggu (kiri) dan turbin angin Savonius (kanan)..... 43

Gambar 2.25 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 9,7 x 10^4 44
Gambar 2.26 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 14,5 x 10^4 44
Gambar 2.27 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 17,8 x 10^4 45
Gambar 2.28 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 9.7 x 10^4 46
Gambar 2.29 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 14.5 x 10^4 46
Gambar 2.30 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 17.8 x 10^4 47
Gambar 2.31 Skema penelitian..... 48
Gambar 2.32 (a) Konfigurasi Turbin Savonus dan Silinder Pengganggu, (b) Skema dari Brake Dynamometer..... 49
Gambar 2.33 Konfigurasi *Mesh* untuk Simulasi CFD Turbin Savonius 49
(a) Tampilan *Isometric* untu *wake zone* dan *fixed zone*, ... 49
(b) Posisi Penempatan Silinder Type I-65° pada Sumbu Y 49
Gambar 2.34 Perbandingan *Coefficient of Power* secara Eksperimen dan Numerik dengan dan tanpa Silinder Pengganggu Type I-65°..... 50

Gambar 2.35 Perbandingan Nilai Torsi Statis dengan dan tanpa Silinder Pengganggu 51
Gambar 2.36 Perbandingan kontur tekanan antara turbin konvensional dan sesudah diberi silinder pengganggu Tipe I-65° pada TSR =0,8; Re = 9,9 x 104 dan S/D = 1,4; (a) Turbin Konvensional pada sudut bilah 30°, (b) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (c) Turbin Konvensional pada sudut bilah 90°, ... 52
(d) Turbin pada sudut bilah 90° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (e) Turbin Konvensional pada sudut bilah 150^o(f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder pengganggu Tipe I-65° 52
Gambar 2.37 Skema penelitian 54
Gambar 2.39 Grafik Torsi StatisTurbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada Re = 6x10^4; 7,5x10^4; dan 9x10^4 55
Gambar 3.1 Skema Penelitian 59
Gambar 3.2 *Axial Fan* CKE SF-45H 67
Gambar 3.3 *Voltage regulator* 68
Gambar 3.4 Skema turbin angin Savonius 69
Gambar 3.5 Skema silinder pengganggu 70
Gambar 3.7 Susunan Instalasi Penelitian 71
Gambar 3.8 Skema *Honeycomb* 72
Gambar 3.9 *Anemometer* Omega HHF-141A 73
Gambar 3.10 *Tachometer* OMEGA seri HHT12 75
Gambar 3.11 *Torquemeter* LUTRON TQ-8800 76
Gambar 3.12 Skema pengukuran *brake dynamometer* 77

Gambar 3.13 Massa pemberat: anak timbangan NHK tipe M1 78
Gambar 3.14 Timbangan SF-400 79
Gambar 3.15 Neraca Pegas NAGATA tipe C-5..... 80
Gambar 3.16 *Flowchart* putaran dan torsi dinamis 85
Gambar 3.17 *Flowchart* torsi statis 87
Gambar 3.18 Posisi titik *sample* pengambilan kecepatan angin 91
Gambar 3.19 Grafik Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal 92
Gambar 3.20 Grafik Distribusi Kecepatan Posisi Vertikal92
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi Kecepatan Angin 98
Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi Kecepatan Angin 99
Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s 102
Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CM_0) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada pada Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s 104
Gambar 4.5 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CTS_0) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ) 106

Gambar 4.6 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 3,8 m/s 110
Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 112
4,4 m/s 112
Gambar 4.8 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 5 m/s 114
Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 6 m/s 116
Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s 118
Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Power*turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 8 m/s 120
Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 9 m/s 122
Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) 126
pada kecepatan angin 3,8 m/s..... 126

Gambar 4.14 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 4,4 m/s 128
Gambar 4.15 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) 129
pada kecepatan angin 5 m/s..... 129
Gambar 4.16 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) 131
pada kecepatan angin 6 m/s..... 131
Gambar 4.17 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 7 m/s 132
Gambar 4.18 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) 134
pada kecepatan angin 8 m/s..... 134
Gambar 4.19 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) 135
pada kecepatan angin 9 m/s..... 135
Gambar 4.20 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 3,8 m/s 138

Gambar 4.21 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 4,4 m/s 141
Gambar 4.22 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 5 m/s 143
Gambar 4.23 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 6 m/s 146
Gambar 4.24 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 7 m/s 148
Gambar 4.25 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 8 m/s 151
Gambar 4.26 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 9 m/s 153
Gambar 4.27 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi S/D di kecepatan = 3,8 s.d 9 pada d/D = 0,5 159

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai C_D daribeberapa bentuk penampangpada Re > 10^3 16
Tabel 2.2 Variasi Panjang Plat Pengganggu dan Pengarah 38
Tabel 2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu..... 57
Tabel 3.1 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter..... 61
Tabel 3.2 Spesifikasi *Axial Fan* CKE SF-45H 67
Tabel 3.3 Spesifikasi *Voltage Regulator* Model TDGC2.. 68
Tabel 3.4 Spesifikasi *Anemometer* Omega HHF-141A..... 73
Tabel 3.5 Spesifikasi *Tachometer* OMEGA seri HHT12.. 75
Tabel 3.6 Spesifikasi *Torquemeter* LUTRON TQ-8800... 76
Tabel 3.7 Spesifikasi Anak Timbangan..... 79
NHK tipe M-1 79
Tabel 3.8 Spesifikasi Timbangan Digital SF-400 79
Tabel 3.9 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA tipe C-5... 80
Tabel 3.10 Jadwal Penelitian 88
Tabel 3.11 Hasil *Uncertainty*..... 90
Tabel 4.1 Bilangan *Reynolds* Pada 7 Variasi Kecepatan Aliran Udara 95
Tabel 4.2 Perbandingan nilai CoP dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s..... 124
Tabel 4.3 *Uncertainity* CoP_{max} Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 124
3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s..... 124

Tabel 4.4 Perbandingan nilai CM dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s..... 136
Tabel 4.5 *Uncertainity* CM_{max} Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 137
3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s..... 137
Tabel 4.6 Tabel perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP*max*/CoP*max*) pada kecepatan 5 dan 7 m/s 156
Tabel 4.7 Tabel selisih nilai *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan 156
dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 5 dan 7 m/s 156
Tabel A.1 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada..... 165
Kecepatan Angin 3,8 m/s 165
Tabel A.2 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s 166
Tabel A.3 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada..... 167
Kecepatan Angin 5 m/s 167
Tabel A.4 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s 169

Tabel A.5 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s 170
Tabel A.6 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s 172
Tabel A.7 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada..... 174
Kecepatan Angin 9 m/s 174
Tabel A.8 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu 176
pada kecepatan 3,8 – 9 m/s..... 176
Tabel B.1 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s 177
Tabel B.2 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s 178
Tabel B.3 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s 179
Tabel B.4 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s 180
Tabel B.5 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s 182

Tabel B.6 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s 184
Tabel B.7 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s 186
Tabel B.8 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu 187
pada kecepatan 3,8 – 9 m/s..... 187

DAFTAR SIMBOL

A	*Cross sectional area* (m^2)
b	Diameter poros (m)
C_D	Koefisien *drag*
Cm	*Coefficient of Moment*dengan silinder pengganggu
Cm_0	*Coefficient of Moment* turbin tanpa silinder pengganggu
CoP	*Coefficient of Power* dengan silinder pengganggu
CoP_0	*Coefficient of Power* turbin tanpa silinder pengganggu
C_P	Koefisien *pressure*
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
d	Diameter silinder sirkular pengganggu (m)
D_0	Diameter *end plates* (m)
E_k	Energi kinetik (Joule)
F_D	Gaya *drag* (N)
g	Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
h	Tinggi silinder sirkular pengganggu (m)
L	Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)
m	Massa pemberat (kg)
$\dot{m}$	*Mass flow rate* (kg/s)
n	Putaran turbindengan silinder penggangu (rpm)
n_0	Putaran turbin tanpa silinder pengganggu (rpm)
P_W	Daya angin (Watt)
P_T	Daya aktual turbin (Watt)
P	Tekanan udara saat penelitian dilakukan (N/m^2)
R	Jari-jari turbin angin Savonius (m)
r	Jari-jari poros turbin yang menerima beban (m)
Re	Bilangan *Reynolds* (Re)
S	Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
s	Gaya yang terbaca pada neraca pegas (kgf)

T	Temperatur udara saat penelitian dilakukan (ºK)
T_d	Torsi Dinamis yang dihasilkan turbin (N-m)
Ts	Torsi statis turbin dengan silinder pengganggu (N.cm)
Ts_0	Torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (N.cm)
t	Tebal *end plates* (m)
V	Kecepatan aliran udara (m/s)
x	Tebal sudu turbin Savonius (m)
y	Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
ρ	Massa jenis udara (kg/m^3)
μ	Viskositas dinamis udara (Ns/m^2)
τ	Tegangan geser (N/m^2)
ω	Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
λ	*Tip Speed Ratio*
θ	Posisi angular sudu turbinangin Savonius (°)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan konsumsi energi terbesar di kawasan Asia Tenggara dan menempati urutan kelima di Asia Pasifik, setelah negara China, India, Jepang dan Korea Selatan **(BPPT,2018)**. Berdasarkan hasil proyeksi jumlah penduduk Indonesia oleh Badan Pusat Statistika menunjukkan bahwa jumlah penduduk Indonesia akan terus meningkat yaitu dari 255,6 juta pada tahun 2015 menjadi 318,9 juta pada tahun 2045 **(BPS,2015).** Semakin bertambahnya jumlah penduduk menyebabkan meningkatnya kebutuhan energi. Konsumsi energi Indonesia selama tahun 2010-2015 meningkat sekitar 1,3% per tahun. Konsumsi energi masih didominasi oleh energi fosil, seperti minyak bumi **(BPPT,2017)**. Cadangan minyak bumi Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada tahun 2015 **(BPPT,2017)**. Begitu pula dengan produksi minyak bumi yang terus mengalami penurunan. Penurunan produksi ini disebabkan oleh sumur-sumur produksi utama minyak bumi yang umumnya sudah tua, sementara produksi sumur baru relatif masih terbatasdan dengan mempertimbangkan cadangan terbukti minyak yang ada, maka diperkirakan cadangan minyak akan habis dalam waktu 9 tahun lagi **(BPPT,2018)**. Oleh karena itu, diperlukan adanya upaya pencarian sumber energi alternatif atau biasa disebut energi baru dan terbarukan (EBT) untuk mengatasi krisis energi di masa yang akan datang.

Potensi energi baru dan terbarukan (EBT) di Indonesia cukup besar, dengan sumber energi yang beragam. Salah satu sumber energi terbarukan yang dapat di kembangkan adalah energi potensial udara (angin). Indonesia memiliki potensi untuk memanfaatkan sumber daya energi angin sebesar 970 MW,akan tetapi kapasitas yang telah terpasang hanya sebesar 1.96 MW **(BPPT,2018)**. Kurangnya pemanfaatan energi angin ini

dikarenakan Indonesia memiliki rentang kecepatan angin sebesar 3-7 m/s **(BPPT,2014)**. Dimana pada rentang kecepatan angin tersebut tergolong kecepatan angin yang rendah. Energi angin dapat dikonversikan menjadi energi listrik dengan bantuan turbin angin. Energi angin tersebut nantinya akan memutar poros turbin yang kemudian putaran poros turbin tersebut akan ditransmisikan pada generator listrik. Salah satu jenis turbin angin yang cocok dengan kondisi angin di wilayah Indonesia adalah turbin angin Savonius.

Turbin Savonius adalah turbin angin dengan tipe *Vertical Axis Wind-Turbine* (VAWT). Turbin angin ini diciptakan oleh Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1920. Desain dasar dari turbin angin Savonius adalah plat tabung yang dibelah dua dan saling disatukan sehingga berbentuk huruf S dengan dua sudu setengah silinder yaitu *advancing blade*dan *returning blade*. Turbin angin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag*yang timbul pada *advancing blade* dan *returning blade* sehingga menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Apabila selisih gaya *drag*semakin besar,maka daya yang akan dihasilkan oleh turbin akan semakin besar. Turbin angin Savonius ini memiliki kelemahan yakni memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan jenis turbin angin lainnya. Berangkat dari kelemahan tersebut, terdapat beberapa penelitian yang berupaya untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius.

Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius adalah dengan memperbesar selisih gaya *drag* dengan cara mengurangi gaya *drag* pada *returning blade*. Terdapat beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait dengan reduksi gaya *drag* dan pemberian pengganggu pada turbin angin Savonius. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** mengenai aliran fluida pada silinder sirkular yang diberi pengganggu berupa silinder disisi *upstream.* Pada penelitian ini memvariasikan diameter silinder pengganggu (d/D) pada rentan 1 hingga 10 mm, jarak antara kedua pusat silinder (L/D), dan bilangan *Reynolds* pada rentan $1{,}5 \times 10^4$ hingga 6,2 ×

10^4. Dari penelitian ini diperoleh hasil penurunan harga koefisien *drag* (C_D) yang disebabkan oleh peningkatan bilangan *Reynolds*, peningkatan d/D, dan penurunan harga L/D dengan peningkatan bilangan *Reynolds* diatas 3×10^4, maka titik separasi akan mundur kebelakang dan daerah *wake* akan menyempit sehingga koefisien *drag* menurun. Hubungan bilangan *Reynolds* terhadap C_D yaitu dengan meningkatnya nilai bilangan *Reynolds* maka nilai koefisien *drag* akan menurun dengan dan tanpa silinder pengganggu.

Penelitian untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius telah banyak dilakukan. Salah satunya adalah penelitian dengan menggunakan yang dilakukan oleh **Altan et al (2008)**. Penelitian ini menggunakan dua buah plat, yaitu plat pengganggu di depan *returning blade* dan plat pengarah di samping *advancing blade* serta melakukan variasi pada variabel panjang plat (l_1 dan l_2)dan besar sudut plat (α dan β). Pada penelitian ini digunakan tiga tipe plat dengan perbedaan panjang plat pengganggu dan pengarah (l_1 dan l_2). Percobaan dilakukan pada kecepatan angin sebesar 7 m/s dan bilangan *Reynolds* 1,5 x 10^5. Dari penelitian ini didapatkan nilai optimum sudut plat pengganggu pada α sebesar 45º dan β sebesar 15º dengan hasil nilai *coefficient of power* (CoP) yang tertinggi terdapat pada penggunaan plat tipe satu dengan panjang plat pengganggu (l_1) sebesar 45 cm dan panjang plat pengarah (l_2) sebesar 52 cm. Penggunaan plat tipe satu ini dapat meningkatkan *coefficient of power* turbin angin Savonius sebesar 38.5%.

Penelitian selanjutnya yaitu meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan pengaruh jumlah *blade*, jumlah *stage* turbin, *overlap ratio*, *aspect ratio*, dan keberadaan *end plates* pada turbin angin Savonius oleh **Mahmoud et al (2010)**. Pada penelitian ini terdapat beberapa parameter yang digunakan yaitu jumlah *blade*dengan dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b), dan empat *blade* (4b); jumlah *stage* turbin dengan satu *stage* dan dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0.2; 0,25; 0,3; dan 0,35, dan *aspect ratio* sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada dan tidak adanya *end plates* pada turbin angin Savonius. Hasil dari penelitian ini

didapatkan bahwa jumlah *blade* turbin angin Savonius dengan dua *blade* lebih efisien dari pada tiga atau empat *blade*. Turbin dengan dua *stage* memiliki *specific power* yang lebih besar dari pada satu *stage*, sehingga performa turbin dengan dua *stage* lebih optimum. Pengoperasian turbin angin Savonius tanpa *overlap ratio* lebih baik dibandingkan dengan turbin dengan *overlap ratio*. *Coefficient of Power* dari turbin akan meningkat dengan kenaikan *aspect ratio* (α). Penggunaan *end plates* pada turbin akan memberikan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan turbin tanpa menggunakan *end plates*.

Adapun studi eksperimen mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius dengan penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* yang dilakukan oleh **Syafardinah, Sri Gandari Putri (2018)**. Studi eksperimen dianalisa pada turbin angin Savonius dengan diameter (D) sebesar 165 mm dengan tinggi sudu yaitu 500 mm dan menggunakan silinder pengganggu dengan diameter (d) sebesar 165 mm atau dengan nilai d/D = 1 dan S/D 1,6. Variasi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0; 0,25; 0,5 dan bilangan *Reynolds* (Re)sebesar $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$. Dari studi eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa turbin angin Savonius ini ditandai dengan meningkatnya nilai torsi statis (T_s), kecepatan putar turbin (n), dan *Coefficient of Power* (*CoP*) dengan silinder pengganggu di depan *returning blade* dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di depan *returning blade*. Performa optimal turbin angin Savonius didapatkan pada jarak y/D = 0,5 pada bilangan *Reynolds* $9,7 \times 10^4$, $14,5 \times 10^4$, dan $17,8 \times 10^4$.

Studi eksperimen dan studi simulasi numerik mengenai pengaruh silinder pengganggu tipe I-65° terhadap performa turbin

angin Savonius juga dilakukan oleh **Gunawan Sakti et al (2019)**. Pada penelitian ini silinder pengganggu Tipe I-65° diletakkan di depan *returning blade* dari turbin. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa pemberian silinder pengganggu Tipe I-65° pada S/D = 1,4 memiliki hasil yang lebih efektif dalam meningkatkan performa dari turbin Savonius, dimana *Coefficient of Power* dari S/D = 1,4 mengalami kenaikan dari 17,7% secara eksperimen dan 17,3% melalui simulasi numerik pada *Tip speed ratio* 0,8, menjadi 21,8% dan 21,7 %. Begitu juga dengan nilai torsi statis turbin yang mengalami kenaikan setelah diberikan silinder pengganggu Type I-65°. Dimana nilai torsi statis tertinggi pada sudut bilah turbin 30°, dari 3,75 Ncm tanpa pengganggu menjadi 4,3 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150°, dari -0,8 Ncm tanpa pengganggu menjadi 0,13 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Melalui simulasi numerik didapatkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu Tipe I-65° pada keadaan Turbin pada sudut bilah 30°, memiliki dampak paling efektif dalam meningkatkan torsi turbin dibandingkan dengan keadaan Turbin pada sudut bilah 90° dan 150°.

Selanjutnya studi eksperimen mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius dengan variasi jarak silinder pengganggu di depan *returning blade* yang dilakukan oleh **Putro, Adhi Hertamto (2017)**. Pada penelitian ini plat pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 60 mm dan tinggi (H) = 80 mm, dengan *overlap* (b) = 14 mm. Silinder pengganggu memiliki diamter (d) = 12 mm dan panjang = 280 mm. Variasi perbandingan S/D = 1,2; 1.3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,00 dan 2,1. Pada penelitian ini dilakukan variasi bilangan *Reynolds* yaitu 60000, 75000 dan 90000. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada penelitian ini didapatkan dengan menggunakan Re= 60000. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada setiap *Reynolds Number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning*

blade. Pada konfigurasi S/D = 1,4 dengan Re= $6x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 1,059 %; dengan Re = $7,5x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,827%; dengan Re = $9x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,690%. Pada masing – masing *Reynolds Number* yang digunakan nilai *Coefficient of Power* selalu naik dari S/D= 1,2 sampai dengan S/D =1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D= 2,1 nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan mengalami penurunan.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang sesuai untuk digunakan di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini menggunakan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0,5. Penambahan silinder pengganggu dilakukan dengan variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) sebesar 1,2 dengan variasi kecepatan angin masuk yaitu 3,8 - 9 m/s.

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonius merupakan turbin tipe *vertikal axis wind turbin* yang memiliki konstruksi tegak lurus dengan sumbu vertikal. Pada penelitiaan ini, turbin Savonius memiliki 2 jenis sudu yang berbeda yaitu *returning blade* dan *advancing blade.* Turbin angin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag* yang timbul pada *advancing blade* dan *returning blade*. Gaya *drag* yang dihasilkan pada sisi *returning blade* lebih kecil daripada sisi *advancing blade,*sehingga torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* lebih kecil jika dibandingkan dengan *advancing blade.* Adanya perbedaan gaya *drag* pada kedua *blade* perlu dimaksimalkan agar mampu untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius. Salah satu upaya yang dapat

dilakukan guna meningkatkan efisiensi dari turbin Savonius adalah dengan menambahkan silinder pengganggu didepan sisi *returning blade* pada jarak tertentu. Pada penelitian ini, pengganggu yang digunakan berbentuk silinder sirkular. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah :

1. Pemberian silinder pengganggu ini diduga dapat menurunkan tekanan pada sisi depan *returning blade* dan dapat meningkatkan tekanan di sisi belakang *returning blade*. Adanya perbedaan tekanan pada sisi depan dan belakang dari *returning blade* tersebut akan menghasilkan *pressure drag* yang kecil, *pressure drag* yang kecil akan menghasilkan gaya *drag* pada sisi *returning blade* akan kecil juga. Dengan mengecilnya gaya *drag* pada *returning blade*, maka torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* mengecil. Kecilnya nilai torsi pada *returning blade* mengakibatkan selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* menjadi lebih besar, sehingga daya dari turbin Savonius akansemakin besar.
2. *Shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan jatuh pada permukaan *returning blade*. Jatuhnya *shear layer* pada permukaan *returning blade* dapat mengganggu *boundary layer*,sehingga dapat mempercepat transisi *boundary layer* dari *laminar* menjadi *turbulent*. Hal ini menyebabkan titik separasi mundur dan menyebabkan *wake* yang terbentuk menyempit. Sehingga akan menghasilkan gaya *drag* pada bagian *returning blade* akan lebih kecil. Dengan mengecilnya gaya *drag* pada *returning blade*,maka torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* mengecil. Kecilnya nilai torsi pada *returning blade* mengakibatkan selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* menjadi lebih besar, sehingga daya dari turbin Savonius akansemakin besar.
3. Variasi kecepatan angin yang digunakan adalah 3,4,5,6,7,8 dan 9 m/s. Dalam hal ini peningkatan kecepatan angin diduga dapat meningkatkan gaya *drag*

angin dan kecepatan putaran poros turbin. Sehingga nilai *Coefficient of Power* dari turbin Savonius akan meningkat hingga mencapai titik maksimum. Setelah mencapai titik maksimum, nilai *Coefficient of Power* dari turbin Savonius akan menurun karena adanya kerugian-kerugian yang terjadi. Oleh karena itu variasi kecepatan angin yang dilakukan pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui kecepatan optimum dari turbin angin Savonius untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power* yang paling besar.

Untuk membuktikan hipotesa diatas, maka akan dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 167 mm serta silinder pengganggu dengan perbandingan d/D = 0,5 (d = 83 mm) yang diletakkan di depan *returning blade*. Variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) sebesar 1,2 pada kecepatan angin 3,8,4,4,5,6,7,8 dan 9 m/s.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan beberapa batasan masalah agar hasil yang didapatkan sesuai dengan yang diharapkan dan tidak menyimpang dari tujuan yang ada. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Analisa aliran adalah *external flow*.
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *steady flow*, *incompressible flow*, dan *uniform flow* pada sisi *upstream*
3. Analisa dilakukan pada turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 167 mm, pengganggu berupa silinder sirkular dengan perbandingan d/D = 0,5 (d = 83 mm).
4. Variasi jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) yang digunakan sebesar 1,2 serta variasi kecepatan angin masuk 3,8,4,4,5,6,7,8 dan 9 m/s

5. *Aspect ratio* (H/L) yang digunakan sebesar 1.
6. Analisa arah aliran udara yaitu pada aliran satu arah.
7. Perpindahan panas yang terjadi dapat diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui peningkatan performa turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu berukuran d/D = 0,5 yang ditempatkan di depan *returning blade* dengan jarak (S/D) yaitu 1,2 pada variasi kecepatan angin 3,8,4,4,5,6,7,8 dan 9 m/s. Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan cara:

1. Mengukur kecepatan putaran dari turbin angin Savonius.
2. Mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius.
3. Mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius.
4. Menghitung *Coefficient of Moment* (Cm) *Power* (CoP) dari turbin Savonius.
5. Menghitung *Coefficient of Power* (CoP) dari turbin angin Savonius.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mampu memberikan alternatif pembangkit tenaga angin sebagai upaya memenuhi kebutuhan energi nasional
2. Memberikan referensi perancangan turbin angin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* yang berpengaruh pada performa turbin.
3. Mampu menjelaskan pengaruh penambahan silinder pengganggu di depan turbin angin tipe Savonius terhadap *Rotation per Minute* (RPM), torsi, dan daya mekanik turbin Savonius pada berbagai kecepatan angin.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II
DASAR TEORI

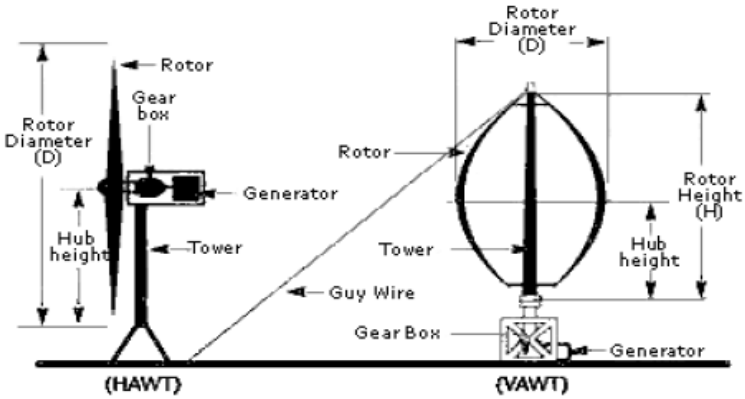
2.1 Turbin Angin

Penggunaan turbin angin untuk memanfaatkan energi angin sudah dilakukan beberapa abad yang lalu. Turbin angin pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya yang lebih dikenal dengan sebutan *windmill*. Saat ini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin.

Komponen utama dari turbin angin terdiri dari rotor, baling-baling yang melekat pada rotor, generator dan struktur menara. Rotor adalah elemen dari turbin angin yang mengumpulkan energi dari angin. Baling-baling dari turbin angin melekat pada pusat rotor. Tingkat putaran baling-baling tergantung pada kecepatan angin dan bentuk baling-balinganya. Adapun kerja dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik berupa putaran poros. Putaran poros tersebut kemudian digunakan untuk memutar generator agar menghasilkan listrik. Dalam turbin angin komersial terdapat *gearbox* yang ditempatkan di antara rotor dan generator, untuk mengubah kecepatan putaran rendah baling-baling ke rotasi kecepatan tinggi yang diperlukan untuk memproduksi listrik. Prinsip kerja dari turbin angin dengan memanfaatkan gaya *drag*atau gaya *lift* yang timbul ketika terjadi kontak antara aliran angin dengan sudu-sudu pada turbin yang menyebabkan putaran pada poros turbin. Putaran pada poros tersebut kemudian dapat digunakan untuk memutar generator yang terhubung poros turbin untuk menghasilkan energi listrik. Turbin-turbin tersebut dapat dikelompokkan ke dalam 2 jenis sesuai dengan arah sumbu pada poros yang bekerja, yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) ialah jenis turbin angin yang paling banyak digunakan. *Horizontal Axis Wind Turbine* merupakan turbin angin dengan sumbu putar terletak sejajar dengan permukaan tanah. Turbin ini terdiri dari sebuah menara yang diatasnya terdapat baling-baling yang berfungsi sebagai rotor yang menghadap atau membelakangi arah angin. Kebanyakan *Horizontal Axis Wind Turbine* mempunyai dua atau tiga bilah baling-baling walaupun terdapat pula HAWTyang memiliki bilah baling-baling kurang atau lebih dari itu. Kelebihan dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) ialah dengan *tower* yang tinggi memungkinkan untuk memperoleh kecepatan angin yang besar dan efisiensi yang dihasilkan oleh turbin lebih tinggi sebab sudu turbin selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin dan menerima daya sepanjang putaran. *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) juga memiliki kekurangan yaitu dibutuhkannya konstruksi *tower* yang besar untuk beban *blade*, *gearbox*, dan generator serta diperlukannya sebuah kontrol untuk mengarahkan *blade* menghadap arah angin.

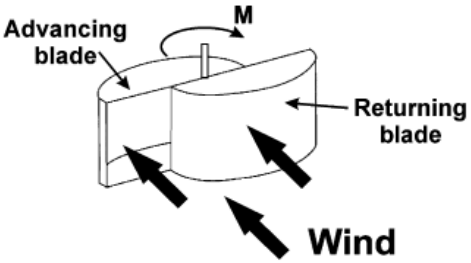
Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) merupakan turbin angin yang memiliki poros yang berada tegak lurus terhadap arah aliran angin. *Vertical Axis Wind Turbine* memiliki beberapa jenis tipe turbin, *Darrieus* dan H-Rotor merupakan turbin angin yang memanfaatkan gaya *lift* pada *blade*, serta Savonius yang memanfaatkan gaya *drag* pada *blade.* Kelebihan dari tipe turbin ini yaitu memiliki nilai torsi yang tinggi sehingga turbin lebih mudah dalam berputar pada kecepatan angin yang rendah, biaya konstruksi yang lebih ekonomis dan *maintenance* yang lebih mudah. Kekurangan dari tipe turbin ini yaitu turbin ini hanya menghasilkan daya yang rendah dan memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis turbin HAWT. Perbedaan konstruksi turbin angin jenis HAWTdan VAWT dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jenis turbin angin
(Al-Shemmeri, 2010)

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin Savonius adalah turbin angin dengan tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yang bekerja berdasarkan gaya *drag* yang diterima oleh sudu turbin. Turbin angin ini diciptakan oleh Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1920. Desain dasar dari turbin angin Savonius adalah plat tabung yang dibelah dua dan saling disatukan sehingga berbentuk huruf "S" seperti gambar dibawah ini.

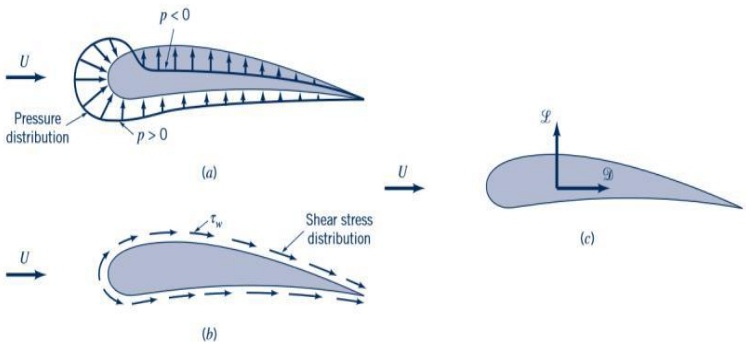


Gambar 2.2 Desain sederhana turbin angin Savonius
(Mohamed et al, 2010)

Turbin Savonius memiliki 2 bagian sudu yaitu sudu bersisi cekung atau *advancing blade*dan sudu bersisi cembung atau *returning blade*. Koefisien hambat permukaan cekung (*advancing blade*) lebih besar dari pada permukaan cembung (*returning blade*). Turbin angin Savonius bekerja dengan memnafaatkan gaya hambat (*drag force).* Oleh karena itu, gaya *drag* yang diterima pada bagian *advancing blade* akan lebih besar dibandingkan dengan yang diterima pada bagian *returning blade* dan akan menyebabkan turbin berputar. Kelebihan dari turbin angin Savonius yaitu desain turbin yang sederhana, biaya pembuatan yang murah, dapat berputar tanpa memperdulikan arah angin, dan dapat berputar dengan laju angin yang relatif rendah. Namun, turbin angin Savonius memiliki kekurangan yakni efisiensi yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan turbin angin jenis lainnya.

2.3 Gaya *Drag*

Setiap benda yang bergerak melewati fluida akan menimbulkan interaksi antara benda dan fluida itu sendiri. Interaksi ini dapatdilihat dalam bentuk gaya pada permukaan bertemunya fluida dan benda. Terdapat 2 buah gaya yang terjadi dalam interaksi tersebutyaitu gaya gesek yang diakibatkan efek viskos serta gaya kearahnormal yang diakibatkan tekanan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. Gaya gaya ini kemudian diproyeksi kan ke sumbu horisontal dan sumbu vertikal. Resultan gaya kearah sumbu horisontal yang sejajar dengan arah kecepatan inilah yang disebutsebagai gaya hambat (*Drag*). Sehingga dapat disimpulkan bahwa *drag* adalah gaya yang menghambat pergerakan sebuah bendapadat melalui sebuah fluida (cairan atau gas) dimana gaya tersebut mempunyai arah yang sejajar dengan sumbu kecepatan aliran terhadap luas penampang dari suatu benda yang berlawanan dengan arah aliran tersebut.



Gambar 2.3 Gaya-gaya disekeliling fluida dalam penampang benda 2 dimensi (a) *Pressure Force*. (b) *Viscous Force.* (c) *Resultant Force* **(Munson et al, 2013)**

Gaya hambat (*drag*) seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag* (C_D) yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui gaya hambat. Secara umum, gaya hambat (F_D) dapat dituliskan seperti pada persamaan berikut:

$$F_D = C_D . {}^1/_2 . \rho . V^2 . A \ldots\ldots\ldots\ldots(2.1)$$

Dimana:

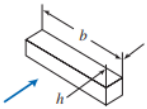
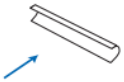
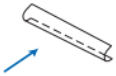
F_D : gaya *drag* (N)
ρ : massa jenisudara (kg/m^3)
V : kecepatan aliran udara (m/s)
A : luas proyeksi benda yang terkena aliran fluida (m^2)
C_D : Koefisien *drag* yang nilainya bergantung pada bentuk geometri suatu benda

Sementara koefisien *drag* (C_D) merupakan bilangan tak berdimensi yang nilainya diperoleh dari hasil eksperimen. Koefisien *drag* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_D = \frac{F_D}{{}^1/_2 \rho V^2 A} \ldots\ldots\ldots\ldots(2.2)$$

Koefisien *drag* (C_D) memiliki nilai yang berbeda-beda,yang bergantung dari geometri yang dimiliki oleh benda tersebut. Nilai koefisien *drag* dari masing-masing geometri dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Nilai C_D daribeberapa bentuk penampangpada Re > 10^3 **(Pritchard et al,2011)**

Object	Diagram		$C_D(Re \gtrsim 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ $b/h = 1$	2.05 1.05
Disk			1.17
Ring			1.20[b]
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

Berbagai faktor menyebabkan suatu benda memiliki nilai gaya *drag* yang berbeda. Mulai dari dimensi, hingga profil dari suatu benda menyebabkan adanya perbedaan gaya *drag* yang timbul. Pada penelitian ini, sudu turbin yang digunakan memiliki 2 bentuk profil yang berbeda yang terdiri atas *advancing blade*dan *returning blade*. Secara teoritis, nilai C_D pada

advancing blade memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan nilai C_D*padareturning blade.*

2.4 Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* (Re) merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dan digunakan dalam mekanika fluida untuk mengkarakteristikan sebuah aliran apakah aliran tersebut *laminar* atau *turbulent.*Secara umum bilangan *Reynolds* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Re = \frac{\rho \,.V\,.L}{\mu} \quad \text{.....(2.3)}$$

Dimana :

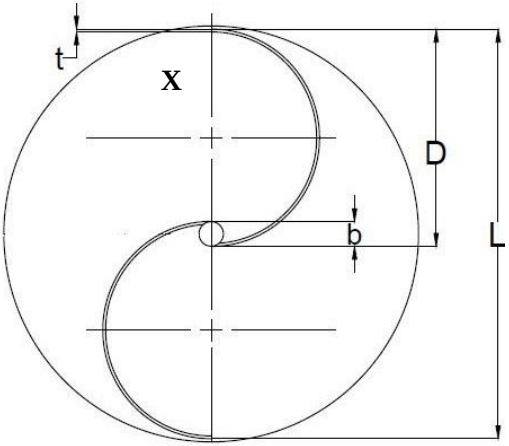
Re : bilangan *Reynolds*

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

V : kecepatan aliran udara (m/s)

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

L : panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)



Gambar 2.4 Skema Turbin Angin Savonius

Dimana dalam penelitian ini, panjang karakteristik (L) sama dengan diameter turbin, yaitu dua kali diameter sudu turbin (D)

dikurangi diameter poros turbin (b) dan dua kali tebal sudu turbin (x), atau dapat dituliskan:

$$L = 2D - b - 2x \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.4)$$

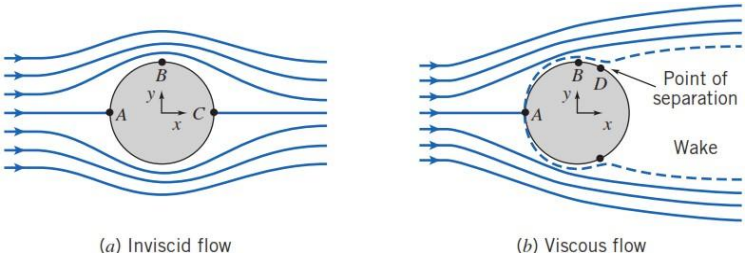
sehingga,

$$Re = \frac{\rho \,.V\,.(2D-b-2x)}{\mu} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.5)$$

keterangan:

D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)
b : diameter poros (m)
x : tebal sudu turbin Savonius (m)

2.5 Aliran Melintasi Silinder Sirkular



Gambar 2.5 Kualitatif aliran pada suatu silinder **(Pritchard et al, 2011)**

Pada gambar 2.5 (a) merupakan aliran *inviscid* pada suatu silinder. Aliran ini memiliki karakteristik bentuk yang simetris terhadap titik tengah silinder. Selain itu pola *streamline* pada bagian depan dan belakang juga memiliki bentuk yang sama. Pada aliran *inviscid* tidak timbul *boundary layer edge* sehingga tidak menimbulkan *wake*. Gambar 2.5 (b) merupakan aliran *viscous* pada suatu silinder, melalui gambar 2.5 (b) tersebut, dapat dilihat bahwa terdapat beberapa titik. Titik A merupakan titik stagnasi. Pada titik ini aliran menabrak benda secara langsung sehingga menyebabkan kecepatan aliran menjadi nol dan tekanan aliran menjadi maksimum. Dari titik A ini timbul *boundary layer edge*, yaitu garis yang memisahkan antara daerah *viscous* dan *inviscid*. Kemudian, dari titik A ke titik B terjadi kenaikan

kecepatan yang berakibat penurunan tekanan, selanjutnya dari titik B menuju titik D terjadi penurunan kecepatan yang berarti terjadi kenaikan tekanan dimana nilai $P_D > P_B$. Di titik D momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga terjadi *back flow* atau aliran balik. Titik D merupakan titik separasi. Akibat dari adanya titik separasi ini maka muncul daerah yang dinamakan daerah *wake*. Daerah *wake* ini merupakan daerah yang memiliki tekanan yang rendah. Untuk menunda titik separasi dan terjadinya *wake* bisa digunakan aliran dengan bilangan *Reynolds* yang lebih besar atau dengan mengubah geometri menjadi lebih aerodinamis.

2.6 Perhitungan Torsi

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari sebuah gaya untuk menyebabkan suatu benda bergerak dengan cara berotasi. Pada turbin, besar dari nilai torsi bergantung pada gaya hambat dan sudu turbin sehingga dapat dirumuskan seperti berikut:

$$T = F_D \times R \quad \text{.....(2.6)}$$

Apabila rumus F_D pada persamaan 2.1 disubtitusi kedalam persamaan 2.6 maka diperoleh perumusan torsi seperti berikut ini :

$$T = C_D \,.\, {}^{1}/_{2} \,.\, \rho \,.\, V^2 . A \,.\, R \quad \text{.....(2.7)}$$

dimana:

T : torsi yang dihasilkan putaran poros (N.m)

F_D : gaya *drag* (N)

R : jari – jari turbin angin Savonius (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D - b - 2x}{2}$

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

V : kecepatan aliran udara (m/s)

A : luas penampang turbin yang ditumbuk oleh angin (m^2)

C_D : Koefisien *drag* yang nilainya bergantung pada bentuk geometri suatu benda

2.7 Perhitungan Daya

Prinsip utama dari turbin angin adalah mengoversikan laju energi angin menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang didapatkan akan dikonversikan menjadi hitungan daya yang menjadi suatu indikator performa dari turbin angin Savonius.

2.7.1 Perhitungan Daya Teoritis Turbin

Secara teoritis, energi kinetik yang dihasilkan oleh udara serta laju aliran massa dari udara memengaruhi besarnya laju energi angin yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin angin. Besarnya energi kinetik yang dimiliki oleh udara dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$E_K = \frac{1}{2}.m.V^2 \quad \text{.....(2.8)}$$

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

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

$$\dot{m} = \rho.V.A \quad \text{.....(2.9)}$$

Daya yang dapat dihasilkan oleh angin merupakan besarnya energi kinetik yang dihembuskan dalam satuan waktu. Sehingga daya yang dihasilkan oleh angin adalah :

$$P_w = \frac{E_K}{t} \quad \text{.....(2.10)}$$

Maka,

$$P_w = \frac{1}{2}.\dot{m}.V^2 \quad \text{.....(2.11)}$$

Kemudian persamaan 2.9 disubtitusi kedalam persamaan 2.11. Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$P_w = \frac{1}{2}.\rho.A.V^3 \quad \text{.....(2.12)}$$

Nilai A pada penelitian ini adalah luasan permukaan turbin yang tegak lurus dengan arah

datangnya angin. Dimana nilai A dapat dihitung melauli persamaan berikut:

$$A = L.H = (2D - b - 2x).H \quad \text{.....(2.13)}$$

dimana:

P_w : daya kinetis angin (Watt)
Ek : energi kinetik (Joule)
t : waktu (s)
$\dot{m}$: *mass flow rate* (kg/s)
ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
V : kecepatan aliran udara (m/s)
A : luas penampang turbin yang ditumbuk oleh angin (m^2)
H : tinggi turbin angin Savonius (m)
x : tebal sudu turbin Savonius (m)

Besar daya di atas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin.

2.7.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin

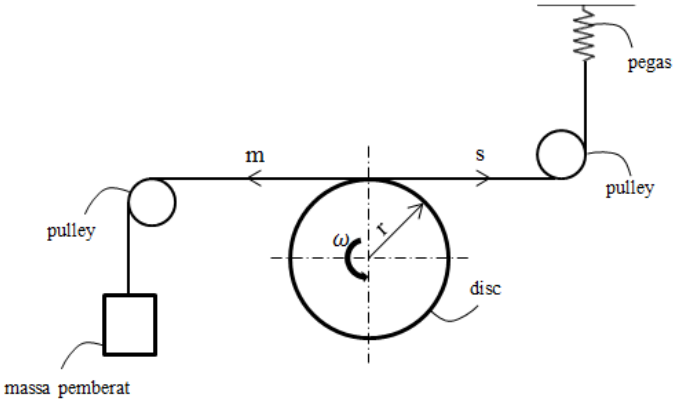
Daya aktual turbin (P_T) dihitung berdasarkan torsi dinamis yang diukur dengan menggunakan *Brake Dynamometer* dan putaran turbin yang diukur dengan menggunakan *Tachometer*. Perhitungan daya aktual turbin (P_T) dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$P_T = T_d.\omega \quad \text{.....(2.14)}$$

dimana:

P_T : daya aktual pada turbin (Watt)
T_d : torsi dinamis turbin yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan*brake dynamometer* (N-m)
ω : kecepatan sudut turbin angin Savonius yang dalam penelitian diukur dengan menggunakan *Tachometer*(rad/s)

Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis (T_D), maka digunakan mekanisme brake dynamometer yang diterapkan pada poros turbin angin Savonius. Namun, *brake dynamometer* tidak dapat menunjukkan nilai torsi dinamis secara langsung. Pengukuran yang dilakukan pada *brake dynamometer* adalah pengukuran massa pemberat yang diberikan serta pembacaan pada neraca pegas. Skema mekanisme *brake dynamometer* dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Free body diagram* (FBD) *brake dynamometer*

Nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_d = F.r \quad \text{.....(2.15)}$$

dimana :

F : gaya yang bekerja pada poros turbin (N)

r : Jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat diukur dengan menggunkan rumus berikut :

$$F = |m\text{-}s|\ g \quad \text{.....(2.16)}$$

dimana :

m : massa Pemberat (kg)

s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)

g : percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

Besarnya kecepatan putaran turbin angin Savonius diperoleh dengan rumus sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad \text{.....(2.17)}$$

dimana:

n : kecepatan putaran turbin angin Savonius (rpm)

Sehingga dengan menggunakan persamaan 2.15 dan 2.16, maka persamaan 2.17 menjadi:

$$P_T = (m - s)g.r.\frac{\pi n}{30} \quad \text{.....(2.18)}$$

2.8 *Coefficient of Power* (CoP)

Coefficient of Power (CoP) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik oleh turbin angin terhadap daya kinetik dari angin itu sendiri. Besarnya nilai *Coefficient of Power* (CoP) menunjukkan performa yang dimiliki oleh turbin angin. *Coefficient of Power* (CoP) dihubungkan dengan efisiensi turbin, semakin tinggi nilai *Coefficient of Power* (CoP) maka efisiensi yang semakin baik. Besarnya nilai *Coefficient of Power* (CoP) dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \quad \text{.....(2.19)}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.12 dan 2.18, maka persamaan 2.19 dapat dirubah menjadi :

$$CoP = \frac{(m - s)g.r.\frac{\pi n}{30}}{\frac{1}{2}.\rho.A.V^3}$$

$$CoP = \frac{(m-s)g.r.\pi.n}{15.\rho.A.V^3} \quad \text{.....(2.20)}$$

2.9 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio merupakan perbandingan antara kecepatan putar pada ujung sudu turbin angin terhadap kecepatan angin. *Tip*

speed ratio dilambangkan dengan λ. *Tip speed ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{kecepatan\ putar\ ujung\ sudu}{kecepatan\ angin}$$

$$\lambda = \frac{\omega.R}{V} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.21)$$

dimana:

λ : *Tip Speed Ratio*

ω : kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

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

V : kecepatan aliran udara (m/s)

Sementara itu, *Coefficient of Moment* merupakan rasio torsi dinamis dari turbin angin Savonius dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin pada turbin angin Savonius terhadap parameter geometri turbin angin Savonius. Nilai dari *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* dapat dihubungkan sebagai fungsi *Tip Speed Ratio*, sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{CoP}{Cm} = \lambda = \frac{\omega.R}{V} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.22)$$

Sehingga *Coefficient of Moment* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Cm = \frac{CoP}{\lambda} = \frac{\frac{T_d.\omega}{\frac{1}{2}.\rho.A.V^3}}{\frac{\omega.R}{V}} = \frac{T_d}{{}^1/_2.\rho.A.R.V^2} \ldots\ldots\ldots\ldots(2.23)$$

dimana:

λ : *Tip Speed Ratio*

T_d : torsi dinamis turbin yang diukur dengan *brake dynamometer* (N-m)

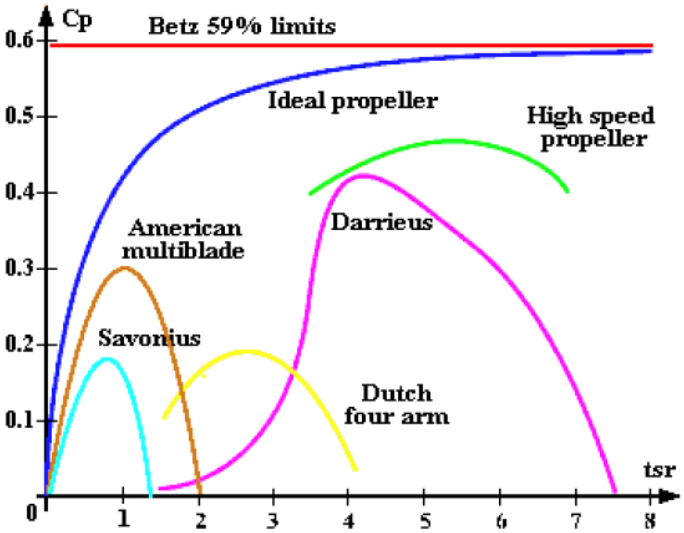
ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

V : kecepatan aliran udara (m/s)
A : luas penampang turbin yang ditumbuk oleh angin (m^2)
R : jari – jari turbin angin Savonius (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2x}{2}$

Selanjutnya, *Coefficient* Torsi Statis merupakan rasio nilai torsi statis terhadap torsi teoritis yang dihasilan angin yang melalui sudu-sudu pada turbin Savonius, sehingga diperoleh persamaan berikut:

$$CTS = \frac{T_s}{T_t} = \frac{\frac{T_S.\omega}{\frac{1}{2}.\rho.A.V^3}}{\frac{\omega.R}{V}} = \frac{T_s}{{}^1/_2.\rho.A.R.V^2} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2.24)$$

Setiap jenis turbin angin memiliki karakternya masing-masing mengenai hubungan antara *Coefficient of Power* dengan *tip speed ratio* yang dimiliki. Dimana pada gambar 2.7 dibawah ini, dapat terlihat berbagai macam turbin angin dan hubungannya antara *Coefficient of Power*denagn nilai *tip speed ratio.*



Gambar 2.7 Grafik hubungan antara *Coefficient of Power*dengan *Tip speed ratio* berbagai jenis turbin angin

(Al-Shemmeri, 2010)

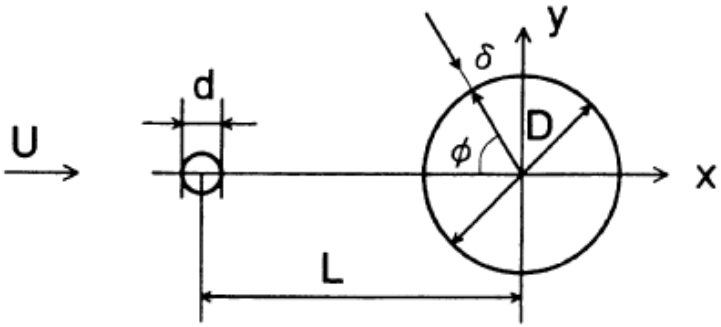
Berdasarkan gambar 2.7 di atas dapat dilihat bahwa setiap turbin memiliki titik kerja awal yang berbeda. Jika titik kerja awal suatu turbin terletak pada nilai *Tip speed ratio* yang rendah, artinya turbin tersebut dapat bekerja pada kecepatan angin yang rendah. Dari gambar 2.7 juga dapat dilihat bahwa semakin besar nilai dari *Tip Speed Ratio*, maka nilai *Coefficient of Power* akan meningkat hingga titik optimumnya, kemudian nilai *Coefficient of Power*akan menurun dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio*. Pada gambar 2.7 terdapat garis batas Betz (*Betz's Limit*). Batas Betz adalah batas yang mengindikasikan *Power maximum* yang dapat diperoleh turbin angin. Hukum Betz ini pertama kali dikemukakan oleh fisikawan Jerman yaitu, Albert Betz pada tahun 1919. Berdasarkan hukum Betz dinyatakan bahwa tidak ada turbin angin yang dapat menangkap lebih dari 59.30 % energi kinetik angin.

2.10 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini, terdapat beberapa referensi dari berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dan menunjang penelitian yang akan dilakukan. Berikut beberapa penelitian tersebut akan dijabarkan antara lain:

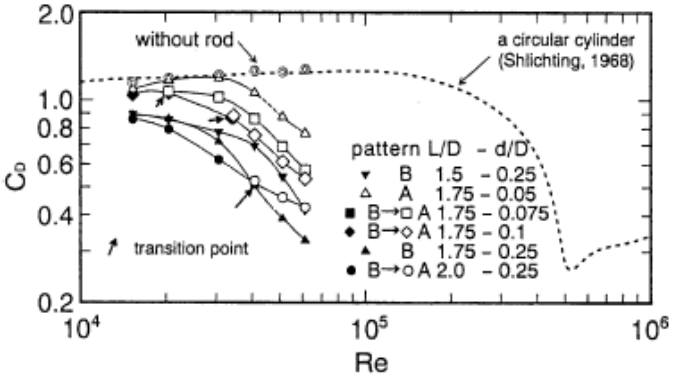
2.10.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu

Penelitian tentang aliran fluida yang melalui sebuah silinder dengan pengganggu berupa silinder lain yang berdiameter lebh kecil dilakukan oleh **Tsustsui dan Igarashi (2002)**. Penelitian tersebut memvariasikan diameter silinder pengganggu(d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan harga bilangan *Reynolds* pada rentang $1{,}5 \times 10^4 \leq \mathrm{Re} \leq 6{,}2 \times 10^4$. Skema penelitian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



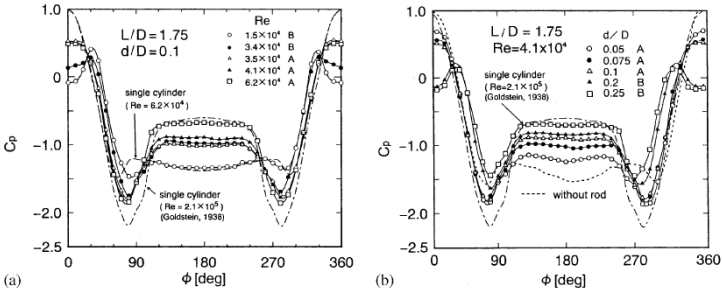
Gambar 2.8 Skema Percobaan
(Tsustsui dan Igarashi, 2002)

Geometri benda uji pada penelitian ini memiliki diameter sebesar 40 mm untuk silinder utama dan variasi diameter silinder pengganggu dari 1 hingga 10 mm, kemudian memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder dari rentang 50-120 mm.



Gambar 2.9 Grafik antara bilangan *Reynolds* terhadap koefisien *drag*
(Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Melalui gambar 2.9 diatas ini didapatkan bahwa penurunan nilai koefisien *drag* (C_D) disebabkan oleh peningkatan nilai bilangan *Reynolds* dan peningkatan d/D sertapenurunan nilai dari L/D. Pada saat bilangan *Reynold s*mengalami peningkatan diatas 3 x 10^4, maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, daerah *wake* menyempit (koefisien *drag* menurun).



(a) Dengan variasi Re (b) Dengan variasi d/D

Gambar 2.10 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkular utama.

(Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Gambar 2.10 diatas ini merupakan grafik distribusi tekanan pada silinder sirkular utama. Dari gambar 2.10 tersebut, dapat diketahui bagaimana pengaruh variasi bilangan *Reynolds*, diameter silinder pengganggu dan jarak antara pusat silinder pengganggu dengan silinder utama terhadap koefisien *drag* (C_D). Pada gambar 2.10 (a) percobaan dilakukan pada L/D = 1,75 dan d/D = 0,1 dengan variasi bilangan *Reynolds*, dimana terdapat dua pola aliran yang berbeda yakni pola aliran A dengan adanya *vortex shedding* pada bagian belakang dari silinder pengganggu dan pola aliran B yakni tanpa *vortex shedding* di bagian belang silinder pengganggu. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa, koefisien tekanan (C_p) pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami

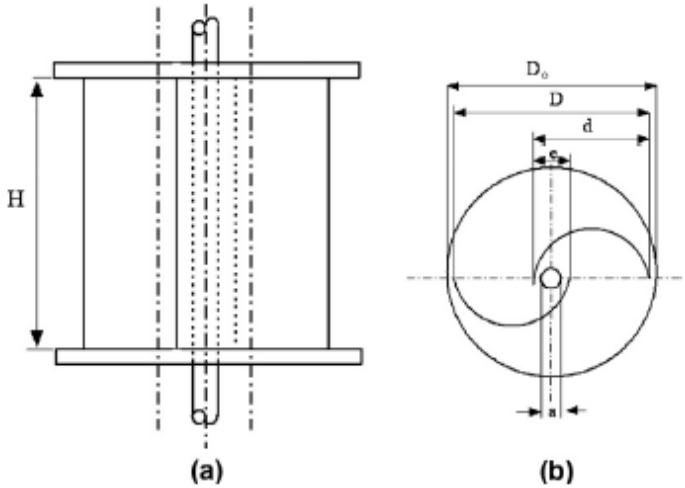
penurunan ketika dilakukan penambahan silinder pengganggu. Pada pola aliran A, nilai C_p menurun menjadi 0,5 dannilai C_p untuk pola aliran B menjadi negatif pada bagian depan dari silinder sirkular utama. Dari gambar 2.10 (a) dapat disimpulkan bahwa dengan melakukan penambahan silinder pengganggu dengan memvariasikan bilangan *Reynolds* yang semakin meningkat dapat menyebabkan lebar *wake* pada bagian belakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Kemudian,pada gambar 2.10 (b) percobaan dilakukan pada L/D = 1,75 dan Re = 4,1 x 10^4 serta dengan melakukan variasi pada diameter silinder sirkular utama (d/D). Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa nilai C_P pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya variasi diameter dari silinder pengganggu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

2.10.2 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Variasi Geometri

Penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan melakukan variasi pada geometri turbin angin dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**. Variasi geometri yang diubah seperti jumlah *blade*, yakni dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b), empat *blade* (4b); jumlah *stage*turbin yakni satu *stage* dan dua *stage*; *overlap ratio* (β) sebesar 0; 0.2; 0,25; 0,3; dan 0,35, dan *aspect ratio* (α) sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada dan tidak adanya *end plate* pada turbin angin Savonius. Penelitian ini dilakukan di wind tunnel yang memiliki diameter sebesar 49 cm dengan jarak antara keluaran *wind tunnel* dengan sampai turbin

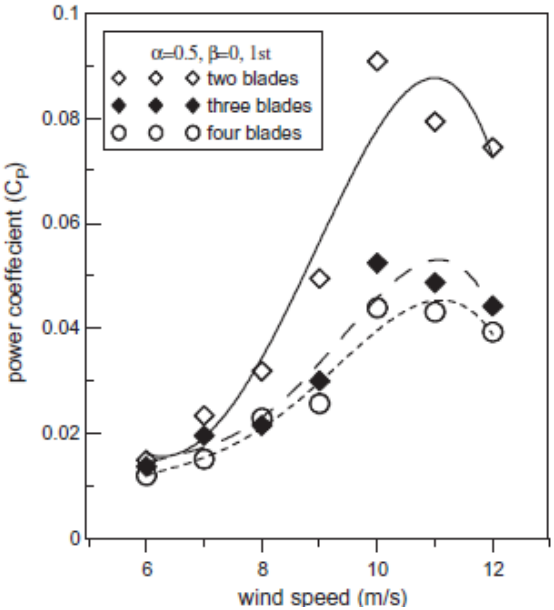
savonius sebesar 125 cm serta dilakukan variasi kecepatan angin dari 0-13 m/s pada sisi keluaran dari *wind tunnel*. Material yang digunakan untuk *blade* terbuat dari bahan pipa PVC dengan ukuran diameter yang bervariasi, yaitu 0,3;0,2;0,1; dan 0,08 m. Plat kayu dengan ketebalan 2,5 mm digunakan untuk mebuat *end plate*.*End plate* tersebut memiliki diameter yang lebih besar 10% dari diameter turbin. Poros turbin memiliki ukuran sebesar 14 mm dengan 62 cm yang terbuat dari bahan baja. Skema geomteri turbin Savonius pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.11.



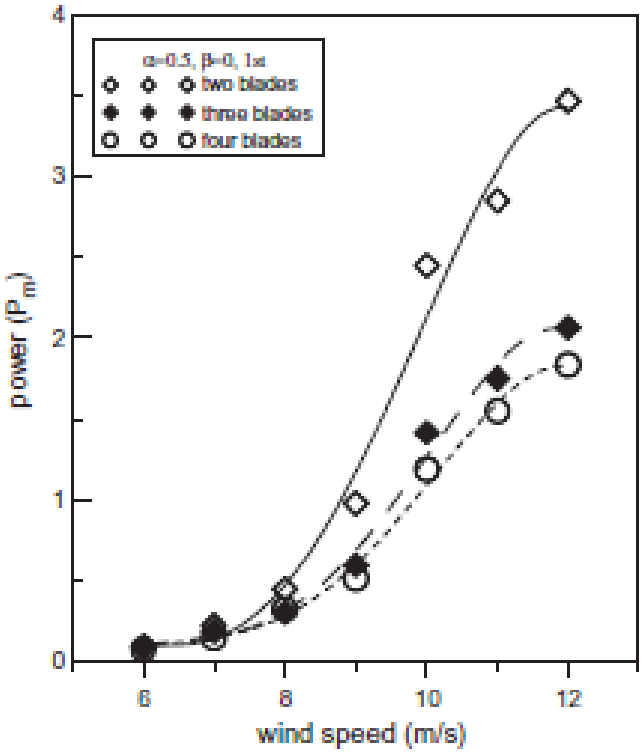
Gambar 2.11 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan Single *Stage;* (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas.
(Mahmoud et al, 2010)

Pengaruh jumlah *blade*terhadap performa turbin angin Savonius dapat diketahui melalui penelitian ini. Gambar 2.12 dibawah ini merupakan grafik hubungan antara *Coefficient of Power*terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap*

ratio 0*;* dan single *stage*. Melalui gambar 2.12 dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Power*turbin dengan dua *blade*lebih tinggi daripada turbin dengan tiga atau empat *blade*. Ini disebabkan karenapada turbin dengan dua *blade*memiliki selisih gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan turbin dengan tiga atau empat *blade*. Jumlah *blade*pada turbin angin Savonius juga berpengauh terhadap daya aktual yang dihasilkan oleh turbin, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.13



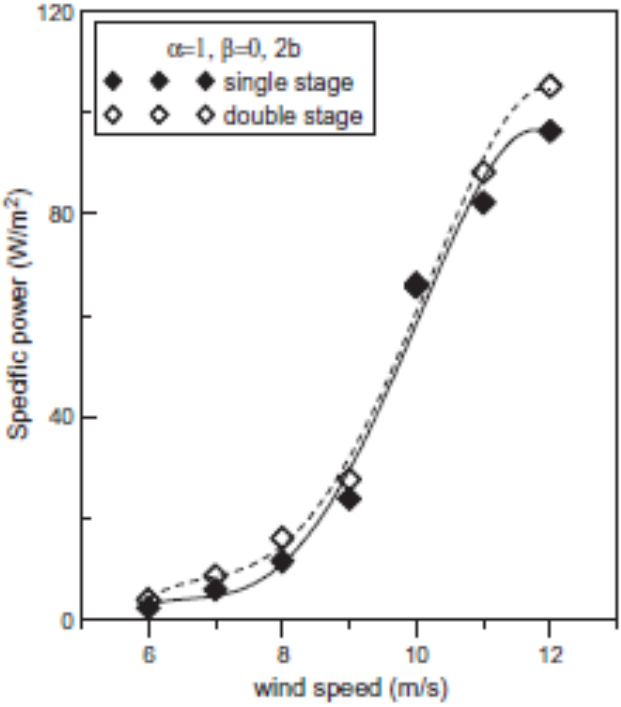
Gambar 2.12 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power*terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius denganDua, Tiga, dan Empat Sudu.
(Mahmoud et al, 2010)



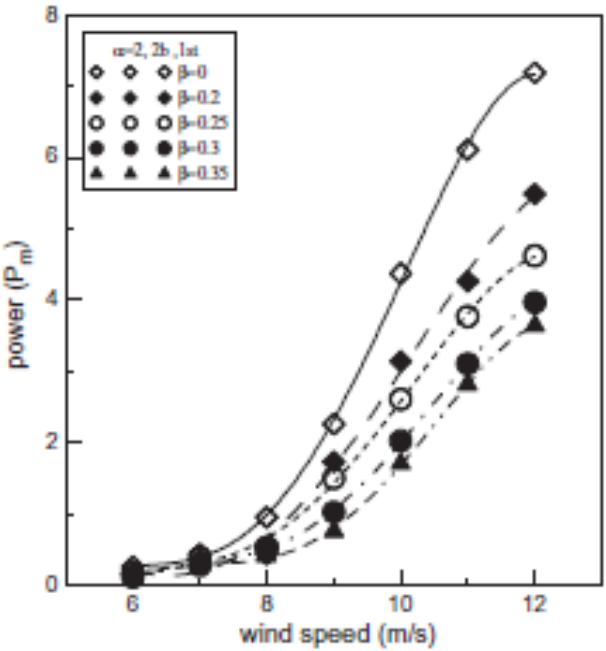
Gambar 2.13 Grafik Pengaruh Jumlah *Blade*terhadap Daya Aktual
Turbin Angin Savonius.
(Mahmoud et al, 2010)

Performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi oleh jumlah *stage*yang ada. Pada penelitian ini jumlah *stage*yang digunakan ada dua, yakni satu*stage*dan dua *stage*. Melalui grafik hubungan antara *spesific Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius satu *stage* dan dua *stage* dengan *aspect ratio* 0,5; *overlap ratio* 0; dan menggunakan turbin dengan dua *blade* (2b)

diperoleh bahwa turbin dengan dua *stage* memiliki nilai *spesific Power* yang lebih tinggi daripada turbin dengan satu *stage*, seperti yang ditujukkan pada gambar 2.14.

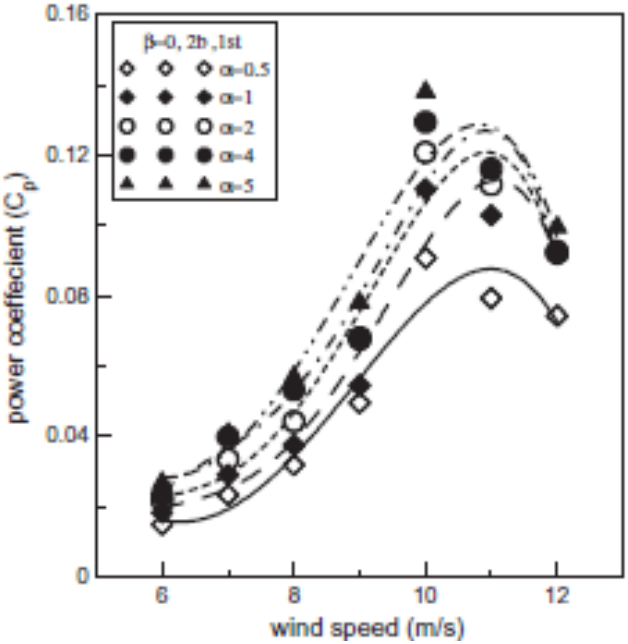


Gambar 2.14 Grafik Hubungan *Spesific Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Satu*Stage* dan Dua *Stage*.
(Mahmoud et al, 2010)



Gambar 2.15 Grafik Hubungan *Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Overlap Ratio.*
(Mahmoud et al, 2010)

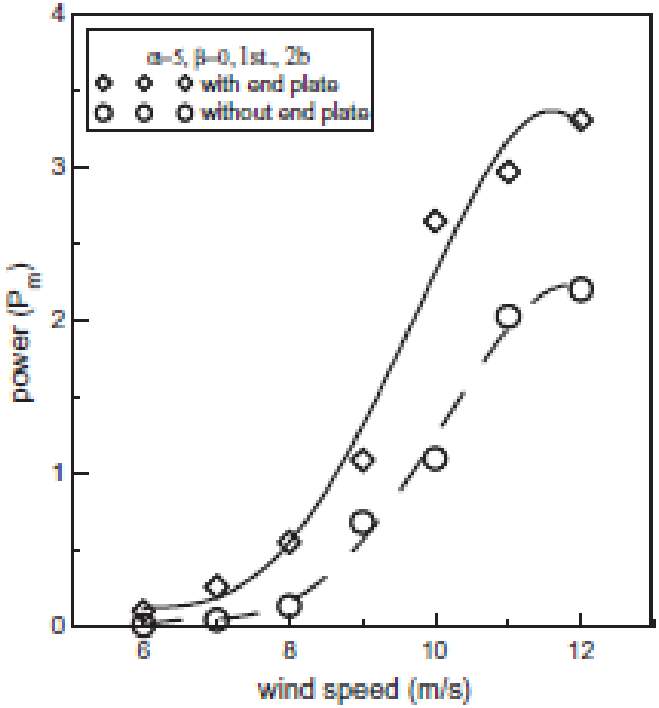
Gambar 2.15 diatas merupakan grafik hubungan *Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan menggunakan *aspect ratio* 2 dengan menggunakan dua *blade*; satu *stage*dan dilakukan variasi pada nilai *overlap ratio* dari nilai 0 hingga 0,35. Melalui gambar 2.15 dapat dilihat bahwa *overlap ratio* (β) juga berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Dimana turbin dengan *overlap ratio* 0 memili nilai *Power* yang lebih tinggi daripada turbin dengan *overlap ratio* 0,2;0,25;0,3; dan 0,35.



Gambar 2.16 Grafik Hubungan *Coefficient of Power*terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *Aspect Ratio*.
(Mahmoud et al, 2010)

Pada penelitian ini juga diperoleh bagaimana pengaruh *aspect ratio* terhadap performa turbin angin Savonius. Seperti yang bisa dilihat pada gambar 2.16 diatas, gambar 2.16 merupakan grafik hubungan antara *Coefficient of Power*terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan *overlap ratio* 0; dengan menggunakan turbin dua *blade;* satu *stage* dan dilakukan variasi pada nilai *aspect ratio* dari nilai 0,5 sampai 5. Hasil yang diperoleh dari grafik tersebut adalah nilai *Coefficient of Power*semakin naik dengan seiring naiknya

nilai *aspect ratio*, dimana pada *aspect ratio* 5 memiliki *Coefficient of Power* yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.



Gambar 2.17 Grafik Hubungan antara *Power* terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan *End Plate* dan *Without End Plate.*

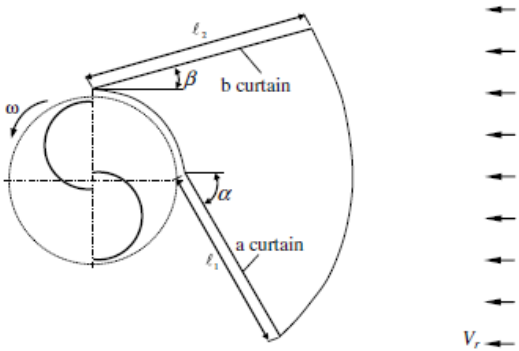
(Mahmoud et al, 2010)

Selain itu performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi dengan keberadaan *end plate.* Hasil yang didapat pada penelitian ini bahwa turbin angin Savonius dengan adanya *end plate* memiliki *Power* yang lebih tinggi daripada turbin tanpa menggunakan *end plate.*

Grafik hubungan antara *Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan penggunaan *end plate* atau tidak dapat dilihat pada gambar 2.17. Sehingga hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa turbin angin Savonius dengan dua *blade*lebih efisien daripada dengan menggunakan tiga atau empat *blade.* Turbin dengan menggunakan dua *stage*memiliki nilai *spesific Power* yang lebih tinggi daripada satu *stage.* Dengan *overlap ratio* 0, turbin angin savonius memiliki nilai *Power* yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan *overlap ratio* (β). Nilai dari *Coefficient of Power* juga akan meningkat dengan seiring kenaikan dari *aspect ratio* (α). Kemudian, penggunaan *end plate* pada turbin angin Savonius akan membuat efisiensi menjadi lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan *end plate.*

2.10.3 Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Berupa Plat Datar

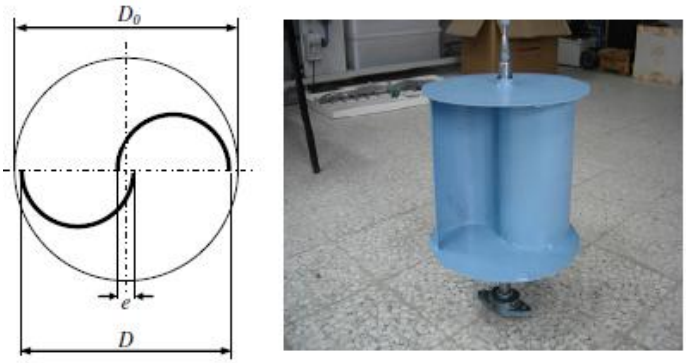
Penelitian mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius pernah dilakukan oleh **B.D. Altan et al (2008).** Pada penelitian ini digunakan dua buah plat pengganggu, yaitu berupa plat yang berfungsi sebagai pengarah yang diletakan di depan *advancing blade*dan plat pengganggu di depan *returning blade* yang berfungsi untuk mendefleksikan angin. Dimana dilakukan variasi pada panjang plat (l_1 dan l_2) dengan tiga macam *curtain* yang dapat dilihat pada tabel 2.2 dan variasi besar sudut dari plat (α dan β) yang disusun seperti pada gambar 2.18.Dimana pada studi eksperimen ini sudut α dan β divariasikan mulai dari nilai sudut α sebesar 30º hingga 60º dan sudut β sebesar 0º hingga 30º dengan kenaikan 5º .Penelitian dilakukan dengan kecepatan angin 7 m/s dan harga bilangan *Reynolds*1,5 x 10^5.



Gambar 2.18 Skema Susunan Pengganggu pada Turbin Angin Savonius
(Altan et al, 2008)

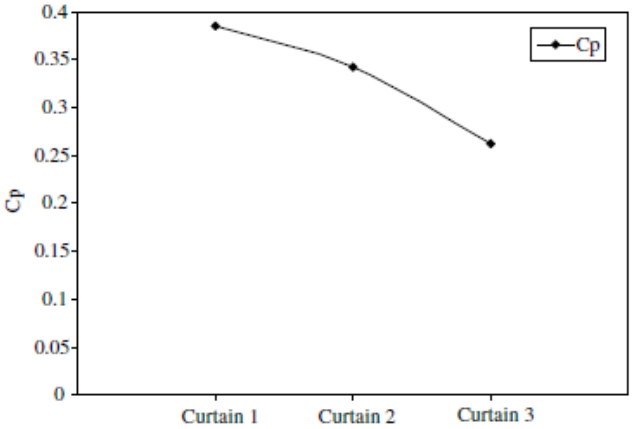
Tabel 2.2 Variasi Panjang Plat Pengganggu dan Pengarah
(Altan et al, 2008)

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



Gambar 2.19 Geometri Penelitian Turbin Angin Savonius
(Altan et al, 2008)

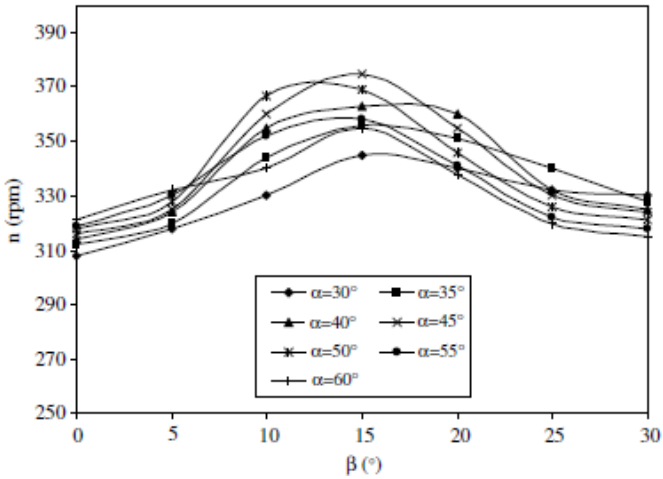
Gambar 2.19 ini merupakan geometri dari turbin angin Savonius pada penelitian ini. Geometri turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter (D) dan tinggi rotor (H) sebesar 32 cm, rasio e/d sebesar 0,15 dengan gap antar sudu (e) adalah sebesar 2,6 cm. Masing-masing sudu memilikiketebalan yang sama yakni sebesar 2 mm. Pada penelitian ini terdapat *end plate* pada masing-masing sisi dari turbin angin Savonius dengan ketebalan *end plate* sebesar 4 mm, dengan diameter *end plate* (D_0) sebesar 35,2 cm.



Gambar 2.20 Grafik Pengaruh Variasi Panjang Plat terhadap Nilai *Coefficient of Power*
(Altan et al, 2008)

Melalui gambar 2.20 diatas,dapat diperoleh bahwa *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius memiliki nilai paling tinggi pada saat menggunakan *curtain* 1 (l_1 = 4 5cm dan l_2 = 52 cm) yakni sebesar 0,38533. Pada saat menggunakan *curtain* 2 didapatkan nilai *Coefficient of Power*dari turbin angin Savonius

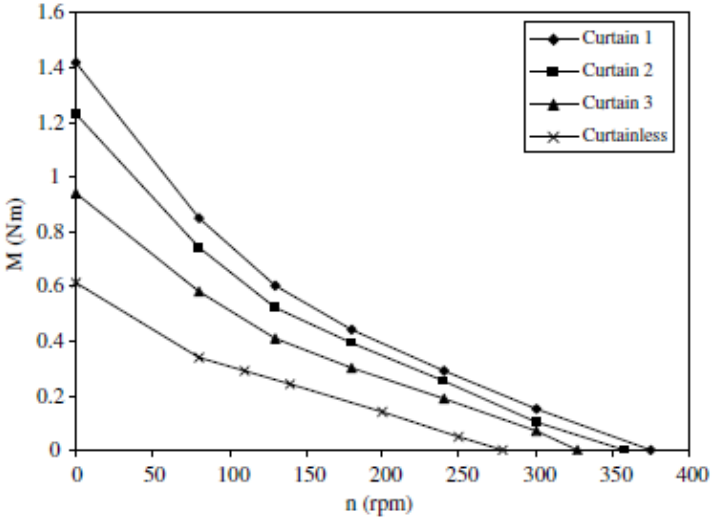
sebesar 0,34154 dan pada *curtain* 3 sebesar 0,26273. Karena pada *curtain* 1 memiliki *Coefficient of Power* yang bernilai maksimum, maka dilakukan analisa pengaruh variasi dari sudut plat. Karena pada awal penelitian nilai torsi negatif meningkat ketika aliran fluida menumbuk *returning blade* pada nilai α < 30º dan kecepatan rotasi (n) yang diperoleh nilainya cenderung lebih kecil sebagaimana separasi aliran meningkat pada nilai α > 60º, maka variasi kenaikan nilai sudut α dimulai dari 30º hingga 60º dengan kenaikan sebesar 5º.Sedangkan untuk nilai β, apabila nilai β < 15º maka tidak cukup aliran yang digunakan untuk menumbuk sisi *advancingblade* dan jika nilai β > 15º maka kecepatan rotasi (n) yang telah diukur bernilai rendah. Sehingga konfigurasi optimal terdapat pada sudut α = 45º dan β = 15º seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.21 dibawah ini.



.

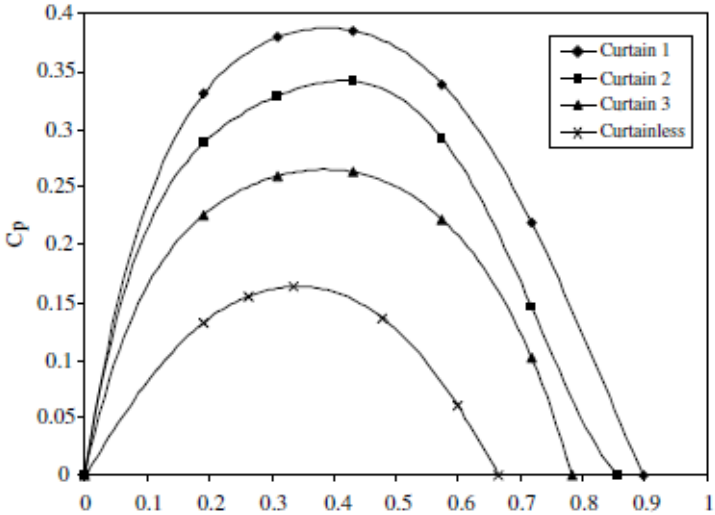
Gambar 2.21 Grafik Pengaruh Putaran Turbin terhadap Besar Sudut (α dan β) pada *Curtain* 1
(Altan et al, 2008)

Nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dipengaruhi oleh variasi panjang penggunaan plat pengganggu dan pengarah. Pengaruh nilai torsi yang dihasilkan terhadap kecepatan torsi pada variasi panjang penggunaan plat pengganggu dan pengarah dapat dilihat pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Grafik Pengaruh Torsi yang dihasilkan terhadap Putaran Turbin

(Altan et al, 2008)



Gambar 2.23 Grafik Pengaruh Panjang *Curtain* terhadap nilai *Coefficient of Power* dengan *Tip speed ratio* (α = 45º dan β = 15º)

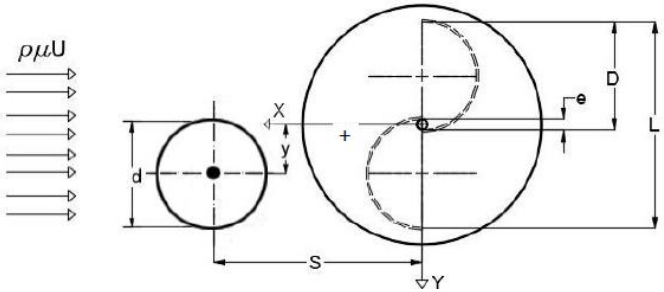
(Altan et al, 2008)

Gambar 2.23 adalah pengaruh panjang plat pengganggu dan pengarahterhadap nilai *Coefficient of Power* dengan variasi *Tip Speed Ratio.* Dapat dilihat pada grafik tersebut bahwa pada plat tipe satu dengan panjang l_1 sebesar 45 mm dan panjang $l_2$sebesar 52 mm memiliki nilai *Coefficient of Power* yang paling tinggi. Penggunaan plat tipe satu ini dapat meningkatkan *Coefficient of Power*dari turbin angin Savonius sebesar 38,5 %

2.10.4 Penelitian Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

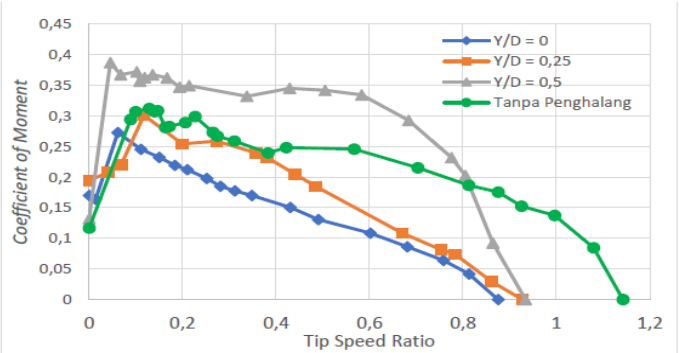
Pada penelitian ini dilakukan oleh Sri Gandari Putri Syafardinah (2018) tentang peningkatan performa

turbin Savonius dengan cara menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini memiliki beberapa variasi, yaitu: d/D = 1,0; S/D = 1,6; Bilangan *Reynolds* (Re) = 9,7 x 10^4; 14,5 x 10^4; 17,8 x 10^4; dengan y/D = 0; 0,25; 0,5. Hasil yang akan diamati dari penelitian ini adalah nilai torsi turbin, *Coefficient of Moment* dan *Coefficient of Power*ketika turbin angin Savonius diberi silinder pengganggu dengan turbin angin Savonius yang tidak diberi gangguan. Berikut adalah skema penelitian seperti yang ditunjukkan gambar 2.24 dibawah ini:

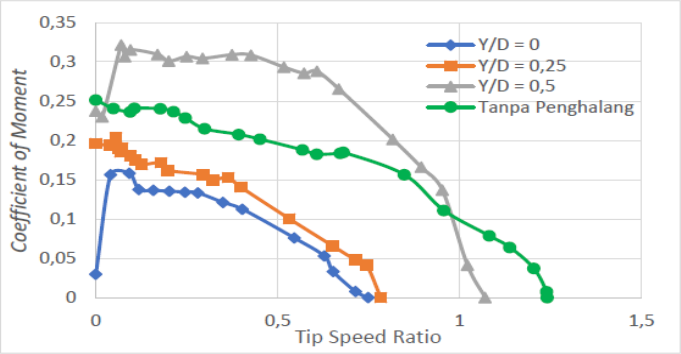


Gambar 2.24 Skema penelitian silinder pengganggu (kiri) dan turbin angin Savonius (kanan)
(Syafardinah, 2018)

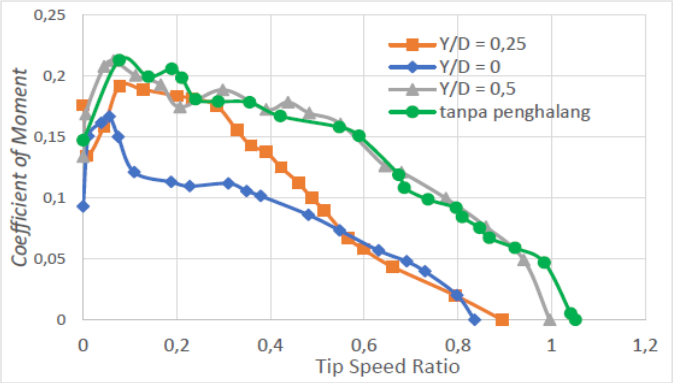
Pada penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki diameter (D) = 165,2 mm dan tinggi (H) = 294,4 mm, dan sebagai pengganggu digunakan silinder sirkular yang memiliki diameter (d) = 165,2 mm dan diletakkan di depan *returning blade* turbin. Berikut adalah hasil yang didapat dari penelitian ini:



Gambar 2.25 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 9,7 x 10^4
(Syafardinah, 2018)

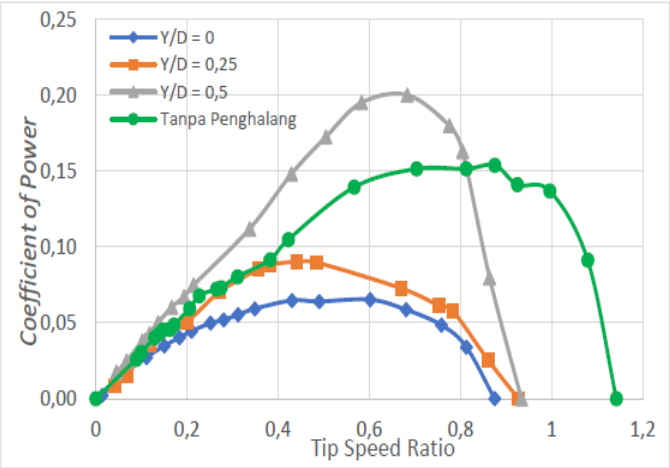


Gambar 2.26 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 14,5 x 10^4
(Syafardinah, 2018)



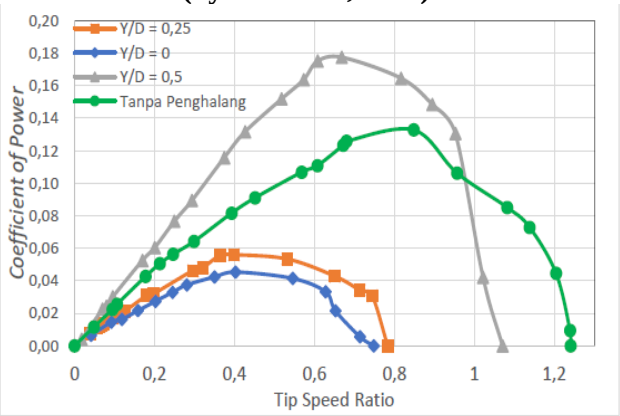
Gambar 2.27 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 17,8 x 10^4
(Syafardinah, 2018)

Dari gambar 2.25; 2.26 dan 2.27 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi *Reynolds Number* 9,7 x 10^4; 14,5 x 10^4;17,8 x 10^4. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa *Coefficient of Moment* maksimum untuk y/D = 0,5 lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa pengganggu, sehingga peletakan silinder pengganggu didepan turbin angin Savonius pada rasio jarak y/D = 0,5 pada ketiga nilai *Reynolds* diatas efektif dalam meningkatkan coefficient of moment. Peningkatan nilai *Coefficient of Moment* ini mengindikasikan peningkatan nilai torsi dinamis turbin angin Savonius.



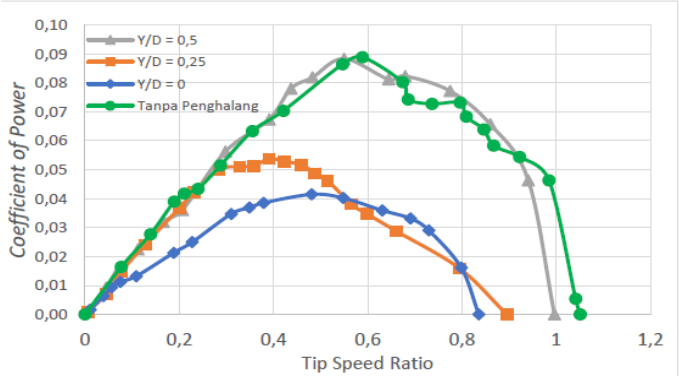
Gambar 2.28 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 9.7 x 10^4

(Syafardinah, 2018)



Gambar 2.29 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 14.5 x 10^4

(Syafardinah, 2018)

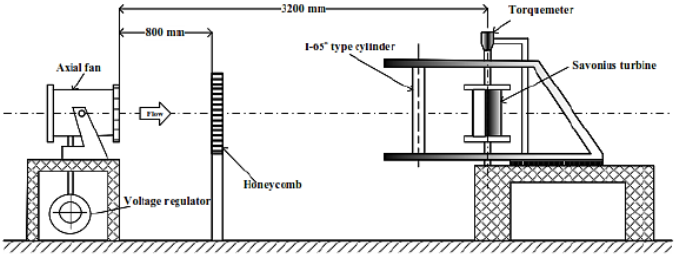


Gambar 2.30 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada Re = 17.8 x 10^4 **(Syafardinah, 2018)**

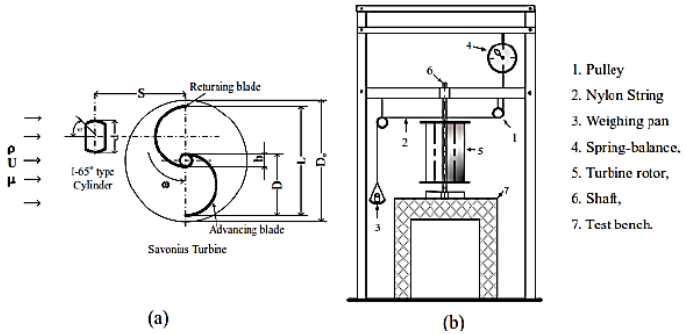
Dari gambar 2.28; 2.29 dan 2.30 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu sebagai fungsi *tip speed ratio* (TSR) pada variasi *Reynolds Number* 9.7 x 10^4, 14.5 x 10^4, 17.8 x 10^4. Dari ketiga grafik diatas dapat disimpulkan bahwa variasi rasio jarak y/D = 0,5 memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *Coefficient of Power* turbin Savonius tanpa pengganggu. Dimana terjadi peningkatan sebesar 1.3 kali. Sehingga dapat dikatakan pada variasi jarak y/D = 0,5 untuk ketiga variasi Re diatas efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius.

2.10.5 Studi Eksperimental dan Numerik Pengaruh Pemasangan Silinder Pengganggu Tipe I-65° Terhadap Performa Turbin Angon Savonius

Studi eksperimen dan studi simulasi numerik mengenai pengaruh silinder pengganggu tipe I-65° terhadap performa turbin angin Savonius juga dilakukan oleh **Gunawan Sakti et al (2019)**. Pada penelitian ini silinder pengganggu tipe I-65°diletakkan di depan *returning blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm, diameter *end plate* (D_o) = 333,7 mm dan tinggi (H) = 294,4 mm, dengan diameter poros (e) = 19 mm. Silinder pengganggu tipe I-65° ini memiliki diameter sebesar (d) 88,5 mm dan tinggi (h) = 500 mm. Pada penelitian ini dilakukan pada Re = 9,9 x 10^4 dengan rasio posisi jarak silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,4 dan rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) = 0,54. Turbin angin Savonius dengan *axial fan* berjarak 3200 mm, dan jarak antara *axial fan* dengan *Honeycomb* yaitu 800 mm. Skema penelitian dan geometri turbin dapat dilihat pada gambar 2.31 dan 2.32.



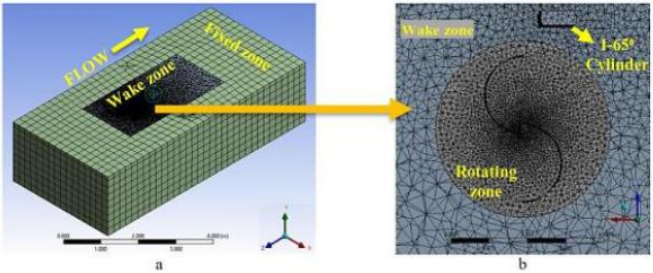
Gambar 2.31 Skema penelitian
(Gunawan et al, 2019)



Gambar 2.32 (a) Konfigurasi Turbin Savonus dan Silinder Pengganggu, (b) Skema dari Brake Dynamometer

(Gunawan et al, 2019)

Pada penelitian ini juga dilakukan dengan metode simulasi numerik, diawali dengan pembuatan geometri 3D dari turbin Savonius yang kemudian disimulasikan menggunakan *software* CFD *ANSYS Fluent 19.1*.

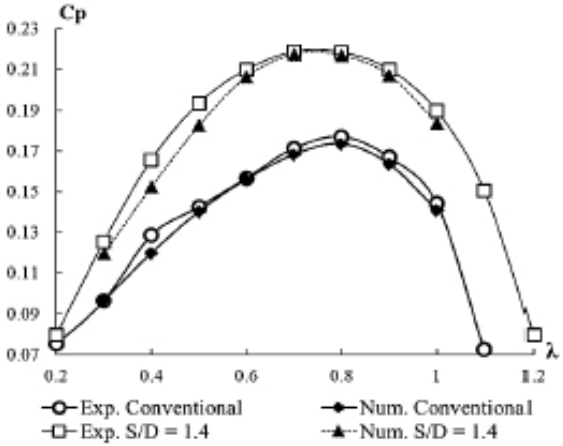


Gambar 2.33 Konfigurasi *Mesh* untuk Simulasi CFD Turbin Savonius

(a) Tampilan *Isometric* untu *wake zone* dan *fixed zone*,

(b) Posisi Penempatan Silinder Type I-65° pada Sumbu Y

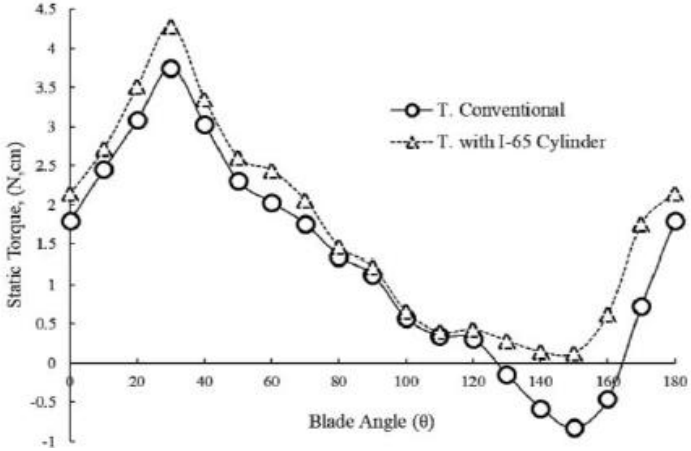
(Gunawan et al, 2019)



Gambar 2.34 Perbandingan *Coefficient of Power* secara Eksperimen dan Numerik dengan dan tanpa Silinder Pengganggu Type I-65°

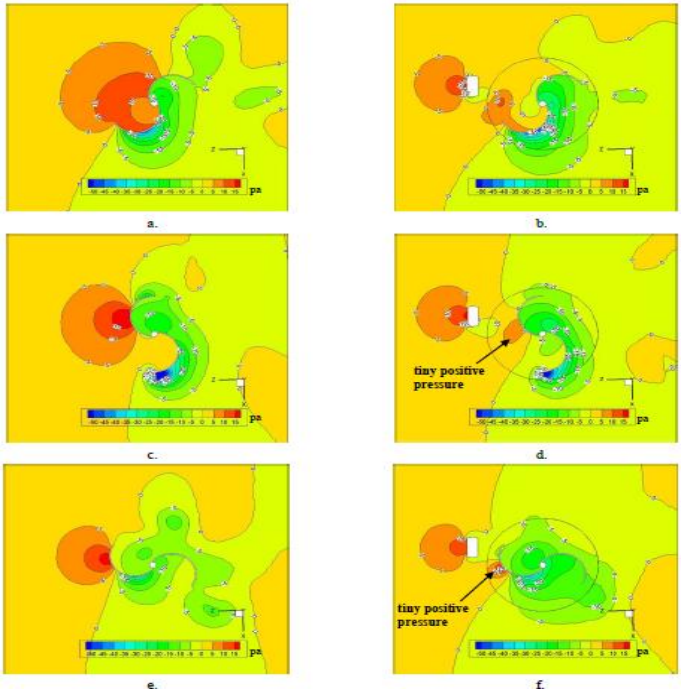
(Gunawan et al, 2019)

Melalui gambar 2.34 dapat dilihat bahwa pemberian silinder pengganggu Type I-65° pada S/D = 1,4 memiliki hasil yang lebih efektif dalam meningkatkan performa dari turbin Savonius, dimana *Coefficient of Power*dari S/D = 1,4 mengalami kenaikan dari 17,7% secara eksperimen dan 17,3% melalui simulasi numerik pada *Tip speed ratio* 0,8, menjadi 21,8% dan 21,7 %. Begitu juga dengan nilai torsi statis turbin yang mengalami kenaikan setelah diberikan silinder pengganggu Type I-65°, seperti yanga ada pada gambar 2.35 dibawah ini.



Gambar 2.35 Perbandingan Nilai Torsi Statis dengan dan tanpa Silinder Pengganggu
(Gunawan et al, 2019)

Dari gambar 2.35, dapat dilihat bahwa dengan pemberian silinder pengganggu dapat menaikkan nilai torsi statis turbin dengan nilai torsi statis tertinggi pada sudut bilah turbin 30°, dari 3,75 Ncm tanpa pengganggu menjadi 4,3 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150°, dari -0,8 Ncm tanpa pengganggu menjadi 0,13 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Dari gambar 2.35 dapat disimpulkan juga, bahwa dengan pemberian silinder pengganggu nilai torsi statis yang dihasilkan bernilai positif untuk semua sudut bilah. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu menyebabkan turbin memiliki kemampuan untuk melakukan *self starting.*



Gambar 2.36 Perbandingan kontur tekanan antara turbin konvensional dan sesudah diberi silinder pengganggu Tipe I-65° pada TSR =0,8; Re = 9,9 x 104 dan S/D = 1,4; (a) Turbin Konvensional pada sudut bilah 30°, (b) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (c) Turbin Konvensional pada sudut bilah 90°, (d) Turbin pada sudut bilah 90° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (e) Turbin Konvensional pada sudut bilah 150^o(f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°

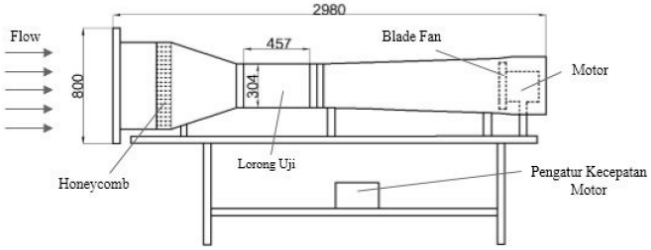
(Gunawan et al, 2019)

Dari simulasi seperti pada gambar 2.36 didapatkan bahwa terjadi penurunan tekanan di daerah depan dari sisi *returning blade* turbin Savonius setelah diberi silinder pengganggu Tipe I-65°,dengan menurunnya tekanan pada daerah depan dari sisi *returning blade* turbin Savonius menyebabkan pressure drag dari *returning blade* turun. *Pressure drag* pada *advancing blade* lebih tinggi dibandingkan *returning blade* sehingga selisih torsi turbin meningkat dan daya dan performa dari turbin Savonius turut meningkat.Melalui simulasi diatas dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu Tipe I-65° pada keadaan Turbin pada sudut bilah 30°, memiliki dampak paling efektif dalam meningkatkan torsi turbin dibandingkan dengan keadaan Turbin pada sudut bilah 90° dan 150°. Seperti pada gambar 2.35 pada posisi sudut bilah 30° ,merupakan sudut dimana nilai torsi statis mencapai titik puncaknya untuk konfigurasi turbin Savonius konvensional maupun dengan silinder pengganggu Tipe I-65°.

2.10.6 Penelitian Eksperimental Pengaruh Variasi Jarak Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

Studi eksperimen mengenai pengaruh variasi jarak silinder pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius dilakukan oleh **Putro (2017)**. Pada penlitian ini plat pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 60 mm dan tinggi (H) = 80 mm, dengan *overlap* (b) = 14 mm. Silinder pengganggu memilikidiamter (d) = 12 mm dan panjang = 280 mm. Variasi perbandingan S/D = 1,2; 1.3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,00 dan 2,1. Pada penelitian ini dilakukan variasi bilangan *Reynolds* yaitu 60000, 75000 dan 90000. Dan dilakukan pada *Wind Tunnel* dengan jenis *wind tunnel :Subsonic, open circuit wind tunnel.*

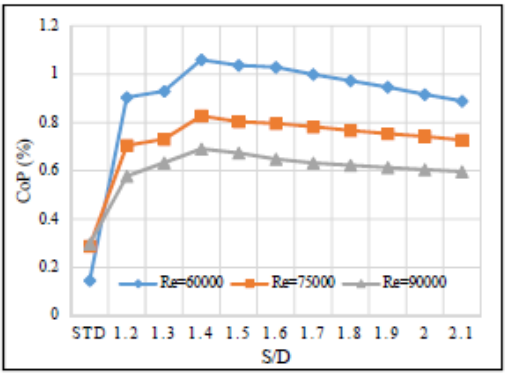
Dimana bentuk saluran uji yang digunakan penampang segi 8. Dengan panjang, tinggi dan lebar adalah 457 mm, 304 mm, dan 304 mm. Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.37 berikut



Gambar 2.37 Skema penelitian

(Putro, 2017)

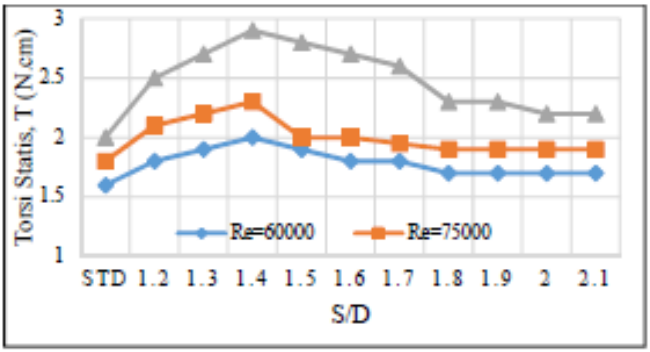
Analisa *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular dilakukan dengan plot grafik besar nilai *Coefficient of Power*(%) yang dihasilkan oleh turbin terhadap variasi S/D serta variasi *Reynolds Number* seperti terlihat pada gambar 2.38



Gambar 2.38 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada Re = $6x10^4$; $7,5x10^4$; dan $9x10^4$

(Putro, 2017)

Dari gambar 2.38 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan nilai *Coefficient of Power* turbin yang semakin menurun. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada penelitian ini didapatkan dengan menggunakan Re = 60000. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada setiap *Reynolds Number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi S/D= 1,4 dengan Re= $6x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 1,059 %; dengan Re= $7,5x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,827%; dengan Re= $9x10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,690%. Pada masing – masing *Reynolds Number* yang digunakan nilai *Coefficient of Power* selalu naik dari S/D = 1,2 sampai dengan S/D = 1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D = 2,1 nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan mengalami penurunan.



Gambar 2.39 Grafik Torsi StatisTurbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada Re = $6x10^4$; $7,5x10^4$; dan $9x10^4$

(Putro, 2017)

Selanjutnya adalah pengukuran torsi statis, ini dilakukan agar mengetahui pengaruh yang dihasilkan oleh penambahan pengganggu berupa silinder sirkular serta pemberian variasi S/D terhadap peforma yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Hasil pengukuran torsi statis dengan pengganggu dapat dilihat pada gambar 2.39.

Dari gambar 2.39 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan torsi statis turbin yang semakin besar pula. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan koefisien *drag* tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya *drag* yang menumbuk sisi blade turbin Savonius. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin Savonius maka gaya *drag* yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan selisih torsi antara advancing blade dan *returning blade* meningkat sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat. Nilai torsi statis tertinggi pada setiap *Reynolds Number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi S/D= 1,4 dengan Re= $6x10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2 N.cm; dengan Re= $7,5x10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,3 N.cm; dengan Re= $9x10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,9 N.cm. Pada masing – masing *Reynolds Number* yang digunakan nilai torsi statis selalu naik dari S/D= 1,2 sampai dengan S/D=1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D = 2,1 nilai torsi statis yang dihasilkan mengalami penurunan.

2.11 Perbandingan Penelitian

Berikut adalah perbandingan penelitian yang saya lakukan dengan penelitian-penelitian referensi terdahulu.

Tabel 2.3 Perbandingan Penelitian Terdahulu

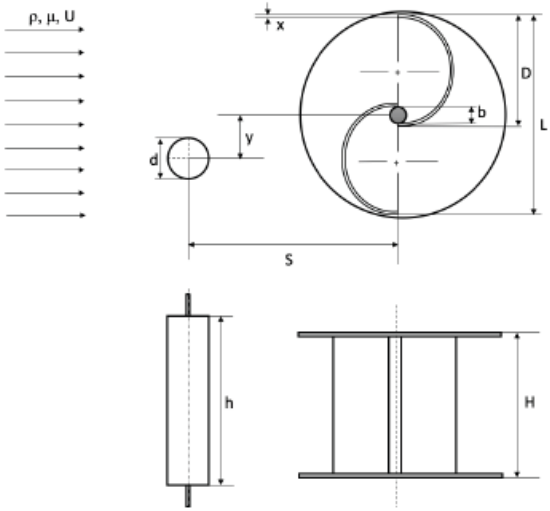
Pemband-ing	Altan et al (2008)	Mahmoud (2010)	Putro (2017)	Syafardinah (2018)	Bagas (2020)
Aliran	Eksternal	Eksternal	Internal	Eksternal	Eksternal
Variasi	Panjang dan sudut plat penghalang	Jumlah blade, stage, α, β, endplate	S/D, Kecepatan Angin	y/D, Kecepatan Angin	S/D, Kecepatan Angin
End Plate	Ya	Ya, tidak	Tidak	Ya	Ya
Torsi Dinamis	Torsi sensor	Brake dynamometer	Perhitungan Daya,*Volt & Kuat Arus*	Brake dynamometer	Brake dynamometer
Honey comb	Tidak	Tidak	Tidak	Ya	Ya
Aspect Ratio	1	0,5; 1; 2; 4; 5	0,75	1	1

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Parameter yang Diukur

Untuk mengetahui pengaruh parameter tertentu terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius maka diperlukan adanya analisis dimensi. Parameter-parameter yang terdapat pada penelitian ini antara lain, massa jenis fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan aliran fluida (U), tinggi turbin angin Savonius (H), diameter sudu turbin angin Savonius (D), diameter poros(b), diameter silinder sirkular pengganggu (d), panjang silinder sirkular pengganggu (h), jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dalam arah tegak lurus arah datang angin (y), kecepatan putaran sudu turbin angin Savonius (ω), jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (S). Pada gambar 3.1 dibawah ini merupakan skema penelitian dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini.



Gambar 3.1 Skema Penelitian

Dimana :

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
μ : viskositas fluida (Ns/m^2)
V : kecepatan aliran udara (m/s)
H : tinggi turbin angin Savonius (m)
h : panjang silinder sirkular pengganggu (m)
D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)
d : diameter silinder sirkular pengganggu (m)
b : diameter poros (m)
S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
y : jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
ω : kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi digunakan untuk mengetahui parameter apa saja yang dapat memengaruhi karakteristik aliran yan melewati turbin angin Savonius dengan silinder sirkular pengganggu yang memiliki diameter tertentu. Metode analisa yang digunakan untuk menganalisa nilai *Coefficient of Power*dan *Coefficient of Moment* adalah *Buckingham-Phi Theorem*.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan dalam penentuan analisa dimensi adalah :

1. Menetukan parameter-parameter yang memengaruhi *Power*

$$P = f(\rho, \mu, V, H, h, D, d, b, s, y, \omega)$$

Jumlah parameter (n) = 12

P : *Power*(J/s)
ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ : Viskositas fluida (Ns/m^2)
V : Kecepatan aliran udara (m/s)

H : Tinggi turbin angin Savonius (m)
h : Panjang silinder sirkular pengganggg(m)
D : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
d : Diameter silinder sirkular pengganggu (m)
b : Diameter poros (m)
S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
y : Jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
ω : Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

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

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih seperti yang ada pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter

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

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

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 12-3 = 9 grup tanpa dimensi.

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

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

$$\pi_3 = \frac{\mathrm{d}}{D}$$
$$\pi_4 = \frac{S}{D}$$
$$\pi_5 = \frac{y}{D}$$
$$\pi_6 = \frac{\mathrm{H}}{D}$$
$$\pi_7 = \frac{h}{D}$$
$$\pi_8 = \frac{b}{D}$$
$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

Dari analisa dimensi di atas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut:

π_1 =*Coefficient of Power*(CoP)

π_2 = bilangan *Reynolds*(Re)

π_3 = rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 = rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*

π_5 = rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 = rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 = rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 = rasio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius

π_9 =*Tip speed ratio* (λ)

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut:

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

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

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

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

Dalam hal ini D sebanding dengan L,
untuk L = 2D-b-2x, maka

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

atau

$$CoP = f_4(Re, \lambda)$$

3.2.2 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Adapun llangkah-llangkah yang harus dilakukan dalam penentuan analisa dimensi adalah :

1. Menetukan parameter-parameter yang memengaruhi *Power*

$$T = f(\rho, \mu, V, H, h, D, d, b, s, y, \omega)$$

Jumlah parameter (n) = 12

P : Torsi (N.m)
ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ : Viskositas fluida (Ns/m^2)
V : Kecepatan aliran udara (m/s)
H : Tinggi turbin angin Savonius (m)
h : Panjang silinder sirkular pengganggu (m)
D : Diameter sudu turbin angin Savonius (m)
d : Diameter silinder sirkular pengganggu (m)
b : Diameter poros (m)
S : Jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)

y : Jarak titik pusat silinder sirkular pengganggu terhadap proyeksi titik pusat turbin angin Savonius dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)

ω : Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

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

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih seperti yang ada pada tabel 3.2

Tabel 3.2 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter

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

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

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 12-3 = 9 grup tanpa dimensi.

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

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

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

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

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

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

$$\pi_7 = \frac{h}{D}$$
$$\pi_8 = \frac{b}{D}$$
$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

Dari analisa dimensi di atas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut:

π_1 =*Coefficient of Moment* (Cm)

π_2 = bilangan *Reynolds*(Re)

π_3 = rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_4 = rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade*

π_5 = rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius

π_6 = rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 = rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 = rasio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius

π_9 =*Tip speed ratio* (λ)

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9)$$
$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{V}\right)$$

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

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

Dalam hal ini D sebanding dengan L, untuk L = 2D-b-2x, maka

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

atau

$$Cm = f_4(Re, \lambda)$$

3.3 Peralatan

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan untuk menunjang pengambilan data eksperimen.

3.3.1 Axial Fan dan Voltage Regulator

Pada penelitian ini digunakan *axial fan* yang berfungsi untuk menghasilkan kecepatan angin yang dapat memutar sudu turbin angin Savonius. *Axial fan* yang digunakan tidak memiliki pengaturan kecepatan aliran udara sehingga digunakan *voltage regulator* untuk mengatur kecepatan aliran udara yakni dengan cara mengatur besar tegangan *output* yang dibutuhkan. *Axial fan* yang digunakan pada penelitian ini adalah **CKE SF-45 H** seperti pada gambar 3.2 dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2. Sedangkan untuk *voltage regulator* yang digunakan adalah **Model TDGC2 3KVA** seperti pada gambar 3.3 dengan spesifikasi seperti pada tabel 3.3

Gambar 3.2 *Axial Fan* CKE SF-45H

Tabel 3.2 Spesifikasi *Axial Fan* CKE SF-45H

Spesifikasi Axial Fan CKE SF-45H	
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2800 RPM
Air Flow	125 m^3/min
Power	1800 Watt
Phase	1
Voltage	220-240 V
Frequency	50 Hz

Gambar 3.3 *Voltage regulator*

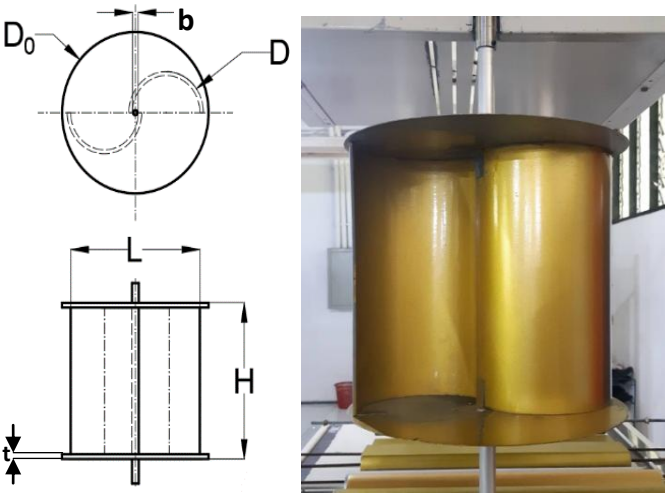
Tabel 3.3 Spesifikasi *Voltage Regulator* Model TDGC2

Voltage RegulatorModel TDGC2	
Input	110/220 V
Output	0 – 250 V
Frequency	50 – 60 Hz
I Max	4,8/12 A
Capacity	3 KVA
Phase	1
Power	3000 Watt

3.3.2 Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius seperti pada gambar 3.4, dengan spesfikasi sebagai berikut :

- Diameter sudu turbin (D) : 167 mm
- Tinggi (H) : 298 mm
- Diameter poros (b) : 19 mm
- Diameter turbin (L) : 309 mm
- Diameter *end plates* (D_0) : 320 mm
- Tebal *end plates* (t) : 1 mm
- Tebal sudu turbin : 3 mm
- Material sudu turbin : PVC
- Material *end plates* : *Aluminium cladding* 2024

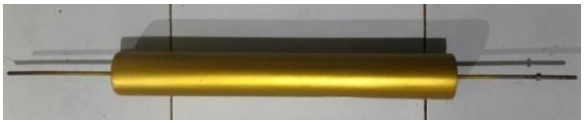


Gambar 3.4 Skema turbin angin Savonius

3.3.3 Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini digunakan pengganggu dengan berbentuk silinder seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Spesifikasi dari silinder pengganggu adalah :

- Diameter (d) : 83 mm
- Rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius (y/D): 0,5
- Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius (d/D) : 0,5
- Rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* : 1,2.

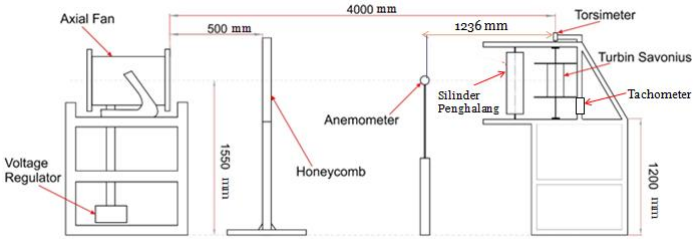


Gambar 3.5 Skema silinder pengganggu

3.3.4 Penyangga Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini digunakan penyangga yang digunakan untuk meletakkan turbin angin Savonius dan silinder pengganggu. Berikut adalah skema penyangga turbin angin Savonius dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Gambar 3.6 Skema Penyangga Turbin Angin Savonius



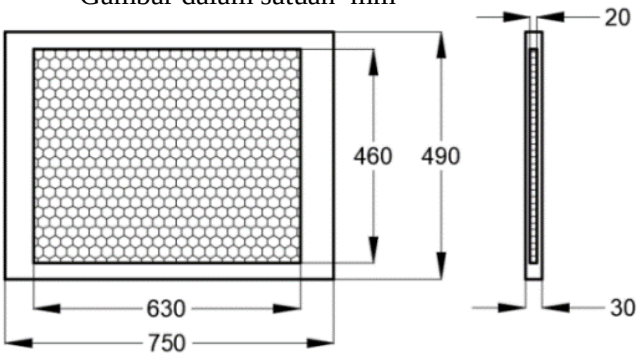
Gambar 3.7 Susunan Instalasi Penelitian

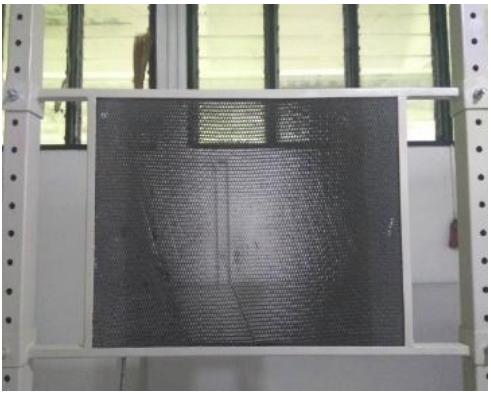
3.3.5 *Honeycomb*

Pada penelitian ini digunakan sebuah *Honeycomb*yang berfungsi untuk membuat aliran angin dari *axial fan* yang menuju turbin angin savonius menjadi *uniform*. *Honeycomb* ini ditempatkan diantara *axial fan* dan turbin angin Savonius. Spesifikasi dari *Honeycomb* yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Panjang sisi *Honeycomb* : 630 mm
- Panjang sisi *frame* : 750 mm
- Lebar sisi *Honeycomb* : 460 mm
- Lebar sisi *frame* : 490 mm
- Tebal *frame* : 30 mm
- Tebal *Honeycomb* : 20 mm
- *Meshing size* : 0,0248 lubang/mm^2

Gambar dalam satuan mm





Gambar 3.8 Skema *Honeycomb*

3.3.6 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk memperoleh nilai nilai putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

a. *Anemometer*

*Anemometer*merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. *Anemometer* yang digunakan pada

penelitian ini adalah anemometer digital dengan seri **OMEGA HHF141 Digital *Anemometer*** yang bisa dilihat pada gambar 3.9. Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, meter/s dan km/h serta memiliki *high resolution* 0,01 m/s. Spesifikasi dari *anemometer*ini dapat dilihat pada tabel 3.4

Gambar 3.9 *Anemometer* Omega HHF-141A

Tabel 3.4 Spesifikasi *Anemometer* Omega HHF-141A

***Anemometer* Omega HHF-141A**		
Measurement Range	2,75 inch Air Probe	40 – 7800 ft/min 0.2 – 40.00 m/sec
	Air Probe AP100	300 – 6800

		ft/min 1,5 – 35,00 m/s
Accuracy	Air Velocity	AP275 : ±1.0% *of reading* ± 1 digit
		AP100 : ±(0,5% FS + 0,75% *of reading* + 1 digit)
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/s	
Operating Temperature	Instrument	32ºF - 125ºF (0ºC-15ºC)
	Probe	-4ºF - 212º F (-20ºC-100ºC)
Display	0,5 inch LCD with LED backlight, 4 Digits	
***Power* Supply**	3 AA alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours, without backlight	
Battery Check	Automatic low battery display	

b. *Tachometer*

Tachometer merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek. Pada penelitian ini *tachometer* yang digunakan adalah *tachometer* **OMEGA seri HHT23** seperti yang bisa dilihat pada gambar 3.10. Spesifikasi dari *tachometer*ini dapat dilihat pada tabel 3.5

Gambar 3.10 *Tachometer* OMEGA seri HHT12

Tabel 3.5 Spesifikasi *Tachometer* OMEGA seri HHT12

Tachometer OMEGA seri HHT12	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0.01% of reading or ± 1 digit
Resolution	0.001 to 1.0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max. min and last
Power	2 “AA” 1.5 Vdc batteries
Enviromental	5 to 40 ºC

c. *Torquemeter*

Torquemeter adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dari suatu objek. *Torquemeter* yang digunakan pada penelitian ini adalah seri **LUTRON TQ-8800** seperti pada gambar 3.11 dengan memiliki *high resolution* 0,1 Newton-cm. Untuk spesifikasi dari *torquemeter*ini dapat dilihat pada tabel 3.6

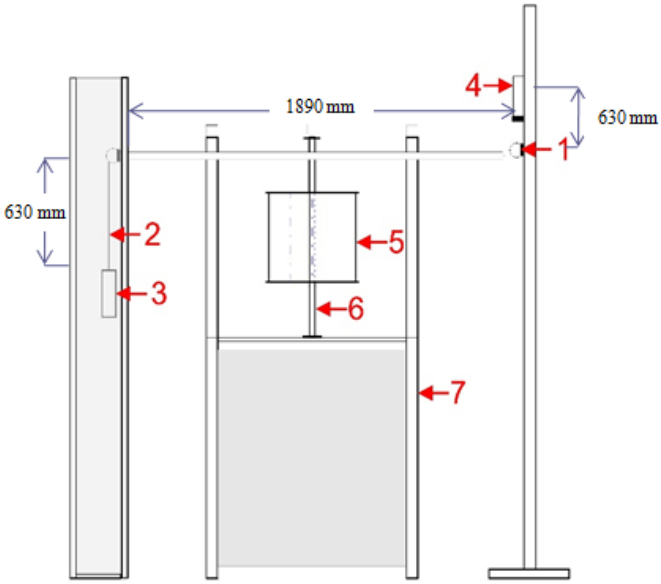
Gambar 3.11 *Torquemeter* LUTRON TQ-8800

Tabel 3.6 Spesifikasi *Torquemeter* LUTRON TQ-8800

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

d. *Brake Dynamometer*

Brake Dynamometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilan oleh putaran suatu objek.



Gambar 3.12 Skema pengukuran *brake dynamometer*

Keterangan Gambar 3.12:

1. Sistem *pulley*
2. Benang nylon
3. Massa pemberat (Gambar 3.13 dan Spesifikasi Tabel 3.7)
4. Neraca pegas (Gambar 3.14 dan Spesifikasi Tabel 3.8)
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

Pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan menggunakan *brake dynamometer* dilakukan dengan cara

menambahkan massa pemberat yang dihubungkan dengan neraca pegas secara bertahap pada saat turbin sedang berputar hingga turbin berhenti berputar. Setiap menambahkan massa pemberat, putaran dari turbin diukur dengan *tachometer*. Nilai torsi dinamis diperoleh dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan jari-jari poros turbin. Daya *output* turbin angin Savonius diperoleh dari nilai torsi dinamis pada pemberian massa pemberat tertentu dikalikan nilai putaran turbin yang dihasilkan pada kondisi yang sama. Massa pemberat yang digunakan adalah anak timbangan **NKH tipe M1** yaitu 1g, 2g, 5g, 10g, 20g, 50g, 100g, dan 200g seperti pada gambar 3.13 dengan spesifikasi pada tabel 3.7 yang telah dikalibrasi dengan timbangan **SF-400** seperti pada gambar 3.14 dengan spesifikasi timbangan pada tabel 3.8.

Gambar 3.13 Massa pemberat: anak timbangan NHK tipe M1

Tabel 3.7 Spesifikasi Anak Timbangan NHK tipe M-1

SPECIFICATIONS	
Range	1 g to 500 g ; 5 g to 20 g
Toleransi (+/- mg)	
1 g	1
2 g	1,2
5 g	1,5
10 g	2
20 g	2,5
50 g	3
100 g	5
200 g	10
500 g	25

Gambar 3.14 Timbangan SF-400

Tabel 3.8 Spesifikasi Timbangan Digital SF-400

Spesifikasi Timbangan Digital SF-400	
Kapasitas maksimal	10 kg
Ketelitian	1 gr
Mode	gram dan oz

Gambar 3.15 Neraca Pegas NAGATA tipe C-5

Tabel 3.9 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA tipe C-5

Specification NAGATA type C-5	
Capacity	3 kg
Graduation	10 gram

3.4 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa llangkah yang dilakukan dalam untuk pengambilan data yakni sebagai berikut :

3.4.1 Prosedur Penelitian Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

Adapun llangkah-llangkah yang dilakukan dalam pengambilan data putaran dan torsi dinamis pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan peralatan-peralatan dan benda uji yang digunakan dalam pengambilan data.
2. Mengatur peralatan dan benda uji yang akan digunakan sesuai dengan skema penelitian.
3. Menyalakan *axial fan* dengan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan yang sesuai kebutuhan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dengan menggunakan termometer
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh kecepatan angin sebesar 3,8 m/s
6. Setelah mendapatkan kecepatan angin yang *steady*, kemudian melakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros turbin angin Savonius tanpa massa pemberat dan tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan tachometer.
7. Selanjtnya melakukan pengukuran torsi dinamis dengan menggunakan *brake dynamometer* untuk mendapatkan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan llangkah sebagai berikut :
    a. Memberikan massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas ditambah dengan massa keranjang (m_k) sebesar 20 gram
    b. Mengukur massa yang terbaca pada neraca pegas
    c. Mengukur putaran turbin angin Savonius dengan tachometer
    d. Menghitung nilai dari torsi dinamis yang diperoleh dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang dihasilan pada neraca pegas

yang kemudian dikalikan dengan jari-jari poros turbin angin Savonius.

e. Mengulangi llangkah a - d dengan merubah pembebanan hingga turbin angin Savonius berhenti berputar.

8. Mematikan *axial fan*
9. Mengulangi llangkah 3 sampai 7 dengan melakukan variasi pada kecepatan angin 4,4,5,6,7,8 dan 9 m/s.
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius (y/D) = 0,5 dengan variasi rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (S/D) = 1,2
11. Mematikan *axial fan*
12. Mengolah semua data yang didapatkan (putaran dan torsi dinamis).

3.4.2 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis

Adapun llangkah-llangkah yang dilakukan dalam pengambilan data torsi statis pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan peralatan-peralatan dan benda uji yang digunakan dalam pengambilan data.
2. Mengatur peralatan dan benda uji yang akan digunakan sesuai dengan skema penelitian.
3. Mengaur posisi turbin Savonius pada variasi sudut sebesar 0°.
4. Menyalakan *axial fan* dengan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai dengan yang dibutuhkan.

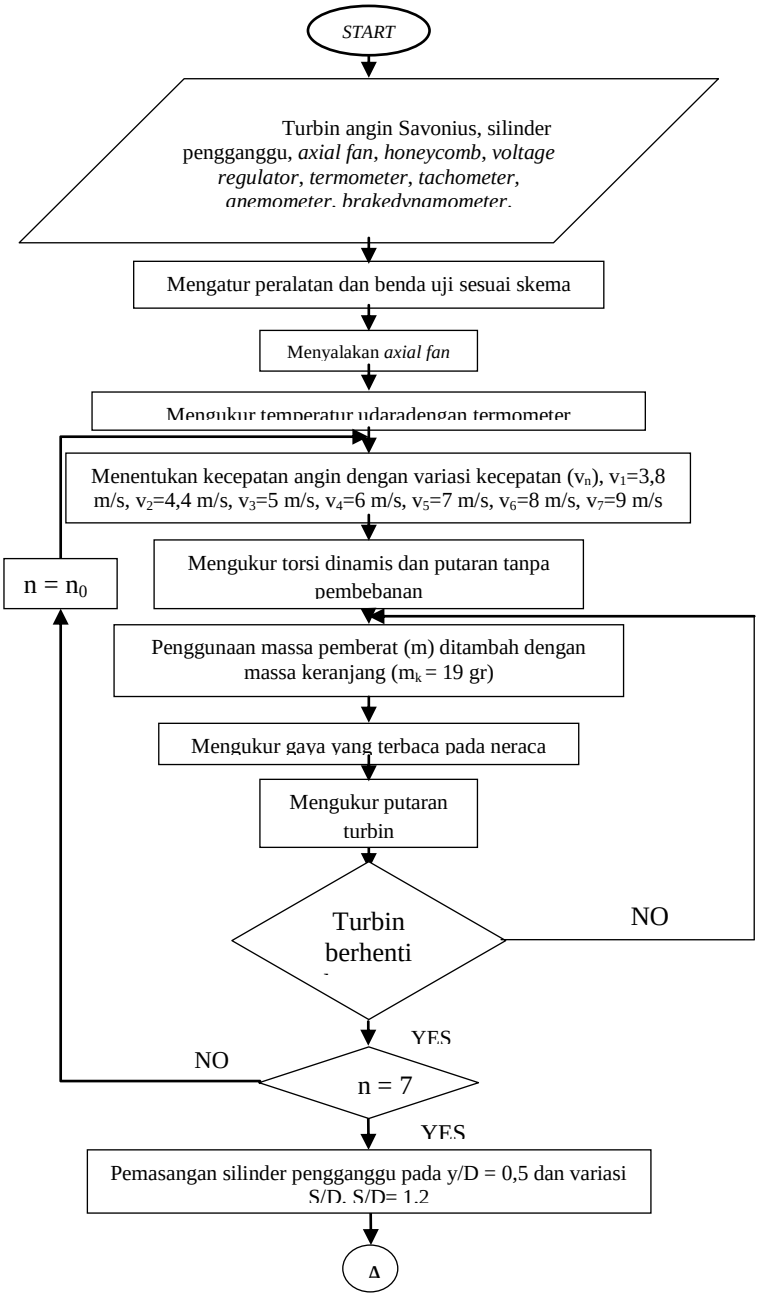
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk memperoleh kecepatan angin sebesar 3,8 m/s
6. Setelah mendapatkan kecepatan angin yang *steady*, kemudian melakukan pengukuran torsi statis menggunakan torque meter
7. Mematikan *axial fan*
8. Mengulangi llangkah 3 sampai 7 dengan mengubah variasi posisi sudut turbin angin Savonius sampai 180º dengan kenaikan 10º dalam setiap pengamatan.
9. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan mengubah variasi pada kecepatan angin 4,4,5,6,7,8 dan 9 m/s.
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio posisisilinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius (y/D) = 0,5 dengan variasi rasio jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (S/D) = 1,2
11. Mengolah data torsi statis yang diperoleh

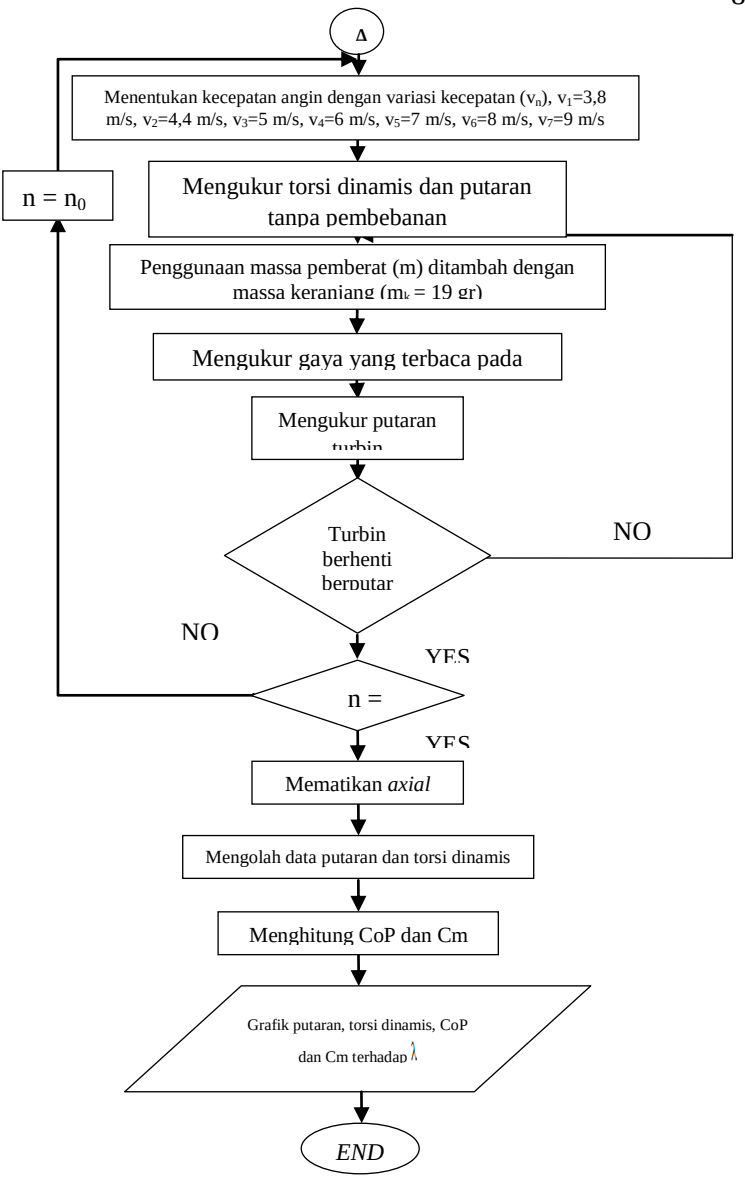
3.5 *Flowchart* Penelitian

Adapun llangkah-llangkahpengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :

3.5.1 *Flowchart* Putaran dan Torsi Dinamis

Diagram alir dalam menentukan putaran dan torsi dinamis dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut :

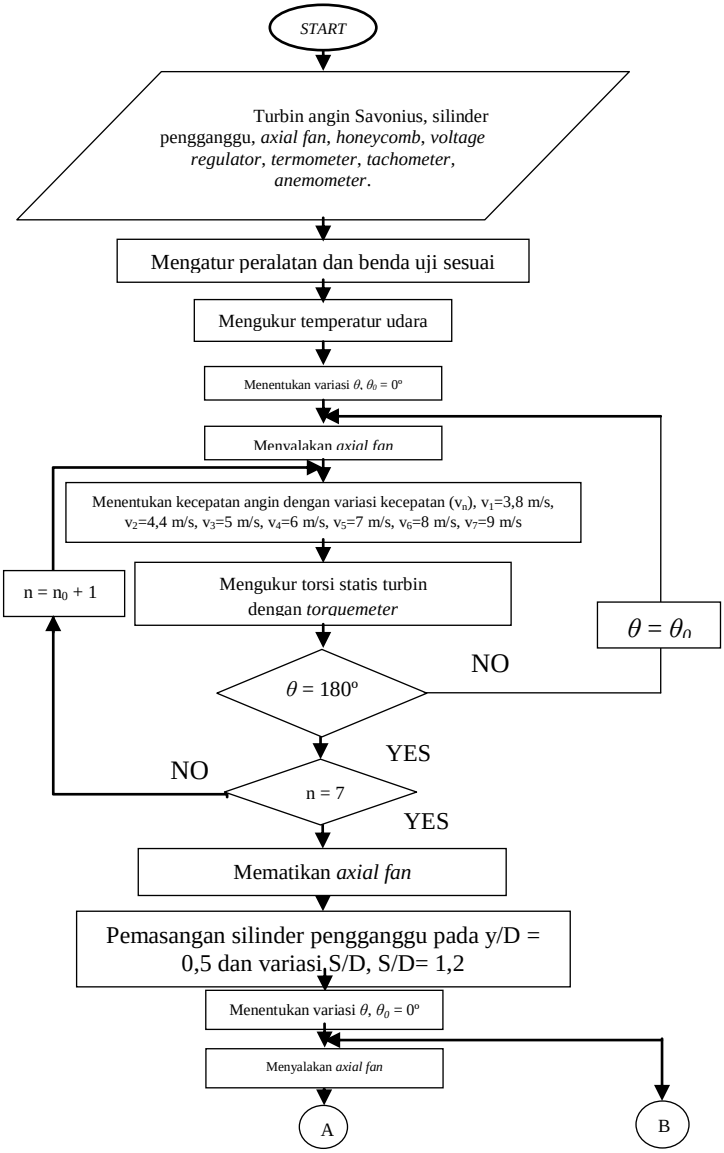

START
Turbin angin Savonius, silinder pengganggu, axial fan, honeycomb, voltage regulator, termometer, tachometer, anemometer, brakedynamometer,
Mengatur peralatan dan benda uji sesuai skema
Menyalakan axial fan
Mengukur temperatur udaradengan termometer
Menentukan kecepatan angin dengan variasi kecepatan (vn), v1=3,8 m/s, v2=4,4 m/s, v3=5 m/s, v4=6 m/s, v5=7 m/s, v6=8 m/s, v7=9 m/s
Mengukur torsi dinamis dan putaran tanpa pembebanan
n = n0
Penggunaan massa pemberat (m) ditambah dengan massa keranjang (mk = 19 gr)
Mengukur gaya yang terbaca pada neraca
Mengukur putaran turbin
Turbin berhenti
NO
YES
NO
n = 7
YES
Pemasangan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 dan variasi S/D, S/D= 1,2
A

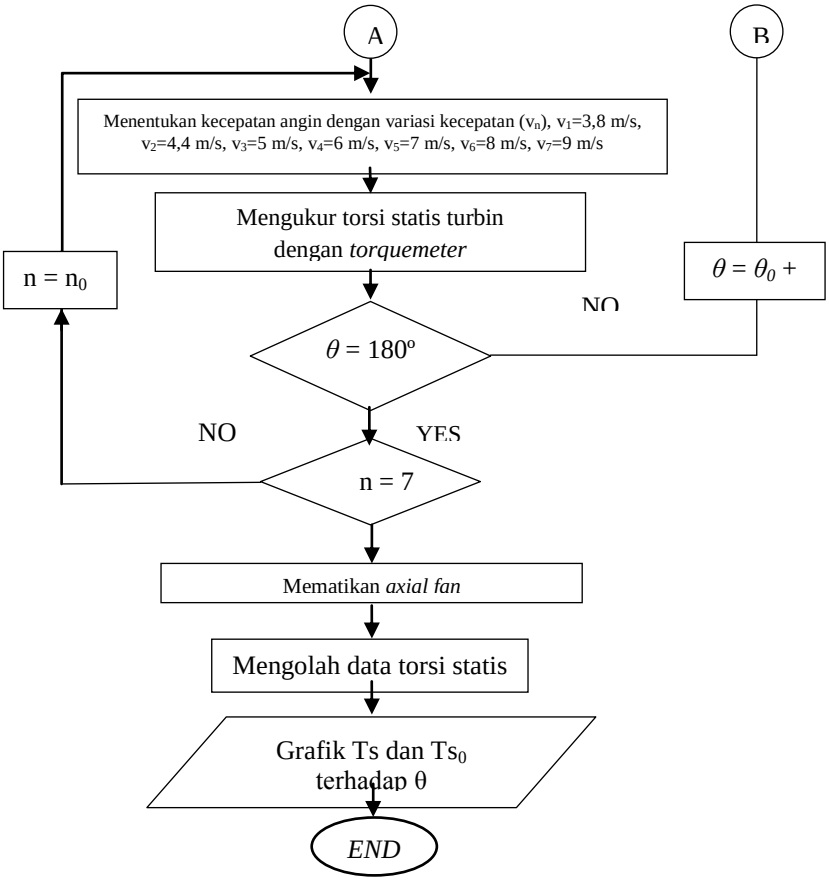


Gambar 3.16 *Flowchart* putaran dan torsi dinamis

3.5.2 *Flowchart* Torsi Statis

Diagram alir dalam menentukan torsi statis dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut :





Gambar 3.17 *Flowchart* torsi statis

3.6 Jadwal Penelitian

Tabel 3.10 Jadwal Penelitian

Jadwal Kegiatan	Februari '20				Maret '20				April '20				Mei '20				Juni '20				Juli '20				Agustus '20			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pembuatan Proposal																												
Ujian Proposal																												
Persiapan Eksperimen																												
Ekperimen																												
Pengolahan Data																												
Penulisan Tugas Akhir																												
Ujian Tugas Akhir																												

3.7 Perhitungan *Uncertainty*

Dilakukan perhitungan *Uncertainty* yang bertujuan untuk mengetahui ukuran ketidakpastian pada suatu pengukuran dalam eksperimen. Dalam penelitian ini, setiap parameter yang dilakukan analisis perhitungan *Uncertainty*, diambil dari data *Coefficient of Power* di titik maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 5 m/s. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *Uncertainty tip speed ratio (λ)* pada titik maksimum *Coefficient of Power*.

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

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

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

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

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

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

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

$$u\lambda, V = \frac{\delta\lambda V}{\lambda} = \frac{V}{\lambda}\frac{\partial\lambda}{\partial V}u_V = u_V$$

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

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

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_\omega = \pm\{[u_n]^2\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm\frac{0.1}{181} = \pm 5{,}3x10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm\frac{1}{154{,}5} = \pm 6{,}48\ x10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (V)

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

Selanjutnya substitusi hasil *Uncertainty*ω, R, dan V ke persamaan 3.1 sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

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

$$u_\lambda = \pm\{\ (5{,}39x10^{-4})^2 + (6{,}47\ x10^{-3})^2 + (0{,}002)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

- *Uncertainty* pada pembacaan kecepatan angin (RE)

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

$$u_{RE} = \pm\{\,(3{,}5\ x10^{-3})^2 + (0{,}002)^2 + (3{,}23\ \times 10^{-3})^2 + (-1{,}34 \times 10^{-2})^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm 14{,}37\ x10^{-3} = 1{,}437\%$$

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

$$u_{CM} = \pm\{[u_{Td}]^2 + [-u_\rho]^2 + [-2u_V]^2 + [\,{u_A}^2] + [\,{u_R}^2]\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm\,\{\,(0{,}05513)^2 + (3{,}5\ x10^{-3})^2 + (-2x0{,}002)^2 + (4{,}66 \times 10^{-3})^2 + (6{,}48 \times 10^{-3})^2\,\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 55{,}9x10^{-3} = 5{,}60\%$$

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

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

$$u_{CoP} = \pm\{\,(0{,}0553)^2 + (6{,}8x10^{-3})^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 56{,}37\ x10^{-3} = 5{,}64\%$$

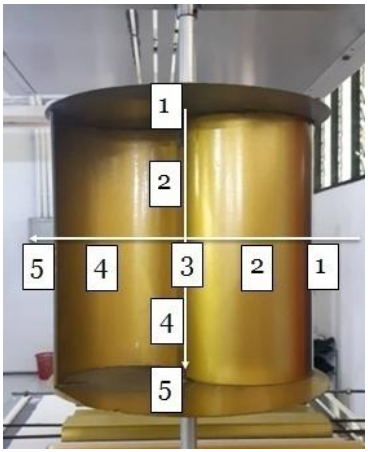
Berikut nilai dari *Uncertainty* yang didapatkan pada kecepatan angin 5 m/s pada CoP maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu :

Tabel 3.11 Hasil *Uncertainty*

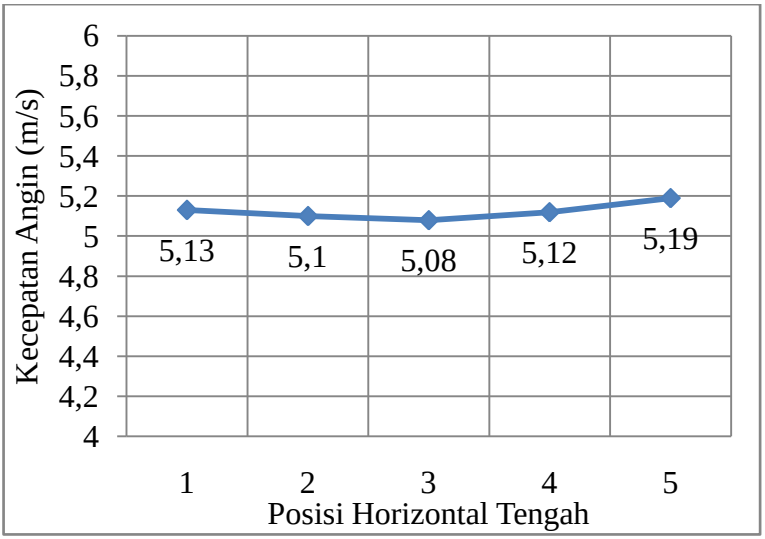
Parameter	*Uncertainty*
Tip speed ratio (λ)	0,68%
Bilangan *Reynolds* (Re)	1,437%
Coefficient of Moment (C_M)	5,60%
Coefficient of Power (CoP)	5,64%

3.8 Uji *Uniformity*

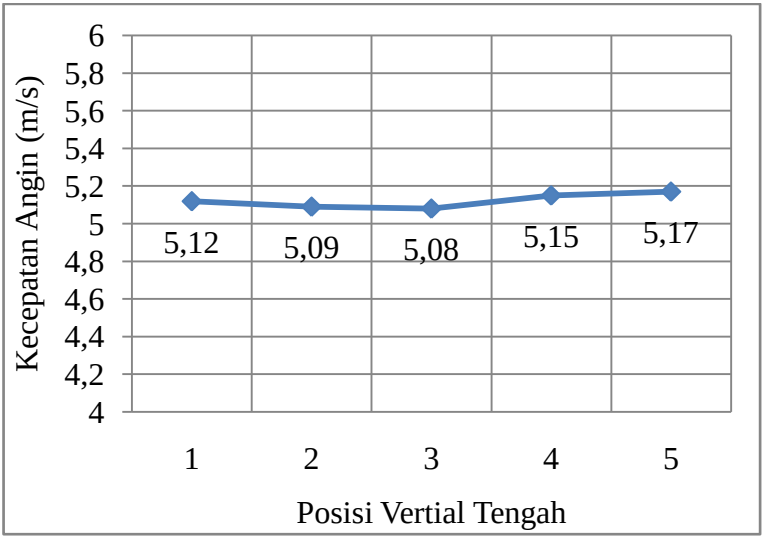
Keseragaman aliran (*uniform flow*) dibutuhkan dalam sebuah penelitian agar didapatkan hasil yang paling ideal. Agar dihasilkan aliran yang uniform, biasanya benda uji diuji di dalam sebuah terowongan angin pada *test section*. Akan tetapi, pada penelitian ini benda uji diletakkan di luar *wind tunnel*, hal ini dilakukan agar penelitian ini berada pada kondisi seperti di kondisi aslinya. Untuk menentukan keseragaman aliran pada kondisi *external flow* lebih sulit dibandingkan pada kondisi *internal flow*. Hal ini dikarenakan pada aliran eksternal memiliki sumber yang tidak hanya 1 titik, melainkan dari banyak titik. *Uniformity test* aliran udara dilakukan pada sisi *upstream* turbin angin Savonius dengan melakukan pengukuran kecepatan aliran fluida udara pada 5 titik vertikal dan 5 titik horizontal. *Uniformity test* dilakukan di depan turbin angin Savonius pada jarak 1236 mm atau 4 kali diameter sudu turbin angin Savonius.Berikut merupakan hasil pengujian keseragaman aliran yang telah dilakukan.



Gambar 3.18 Posisi titik *sample* pengambilan kecepatan angin



Gambar 3.19 Grafik Distribusi Kecepatan Posisi Horizontal



Gambar 3.20 Grafik Distribusi Kecepatan Posisi 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 *absolute* udara dalam keadaan standar (P_{std}) = $1{,}01325 \times 10^5$ N/m^2.
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_{std}) = 288,2 K.
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = 1,225 kg/m^3.
4. Temperatur udara ruang kerja (saat penelitian) (T_2) = 28,5^{o}C = 301,5 K

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

4.1.1 Perhitungan Reynolds Number

- **Langkah pertama mecari Massa Jenis Udara (ρ)**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- **Langkah kedua mencari Viskositas Udara**

Untuk perhitungan viskositas udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu:

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S+T} \text{.....} (4{,}4)$$

dimana untuk udara:

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

S = 110,4 K

T = temperatur saat penelitian = 301,5 K

Dari nilai-nilai tersebut, kemudian dimasukkan kedalam persamaan 4,4, sehingga didapatkan:

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

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

- ***Reynolds Number***

Berdasarkan persamaan 2.3, maka bilangan *Reynolds* pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

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

Setelah mendapatkan nilai panjang karakteristik, nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan 2.3, sehingga didapatkan hasil sebagai berikut:

$$Re = \frac{1{,}17\, kg/m^3 \times 5\, {}^{m}/_{s} \times\ 0{,}309\, m}{\left(1{,}86\ \times 10^{-5}\, \frac{kg}{m.s}\right)} = 97185$$
$$\approx 9{,}7\ x10^4$$

Tabel 4.1 Bilangan *Reynolds* Pada 7 Variasi Kecepatan Aliran Udara

Kecepatan Aliran Udara (m/s)	***Reynolds Number***
3,8	74000
4,4	86000
5.0	97000
6.0	117000
7.0	136000
8.0	155500
9.0	175000

4.1.2 Perhitungan Tip Speed Ratio

Berdasarkan persamaan 2.21 untuk mendapatkan nilai *Tip Speed Ratio* (λ) pada bilangan *Reynolds* 9,7 x 10^4 adalah sebagai berikut:

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

dimana:

n = jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)

$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\ \pi\ (188)}{60}$ = 19,67 rad/s

R = jari-jari turbin angin Savonius

= $\frac{L}{2} = \frac{(2D-b-2x)}{2} = \frac{(2\times167,1)-19-(2\times2,95)}{2}$ = 154,5 mm

$= 0,1545\ m$

V = kecepatan pada bilangan *Reynolds* 9,7 x 10^4 yaitu 5 m/s

Sehingga didapatkan nilai:

$$\lambda = \frac{19,67\ \frac{rad}{s} \times 0,1545\ m}{5\ \frac{m}{s}} = 0,608$$

4.1.3 Perhitungan Coefficient of Power(CoP)

Berdasarkan persamaan 2.20 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power*(CoP) pada bilangan *Reynolds*$9,7 \times 10^4$ (V = 5 m/s) adalah sebagai berikut:

$$CoP = \frac{|m-s|gr\omega}{\frac{1}{2}\rho AV^3}$$

dimana :

A = Luas penampang pada turbin angin Savonius yangditabrak oleh angin

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

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

= $0,0125\ m$

ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius = 19,24 rad/s

m = massa pembebanan (kg) = 68,6 gr = 0,00686 kg

s = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 250 gr = 0,25 kg

Sehingga didapatkan nilai CoP :

$$CoP = \frac{\left|\frac{68,6-250}{1000}\right| kg.9,81\frac{m}{s^2}.0,0125\,m.\ 19,67\ \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2}.1,17\frac{kg}{m^3}.0,092\,m^2.(5\frac{m}{s})^3}$$
$$= 0,0661$$
$$= 6,61\%$$

4.1.4 Perhitungan Coefficient of Moment (CM)

Berdasarkan persamaan 2.23 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* (C_M) pada bilangan *Reynolds* $9,7 \times 10^4$ (V = 5 m/s) adalah sebagai berikut:

$$Cm = \frac{CoP}{\lambda}$$

Sehingga didapatkan nilai C_M :

$$C_M = \frac{0,0646}{0,595} = 0,1086$$

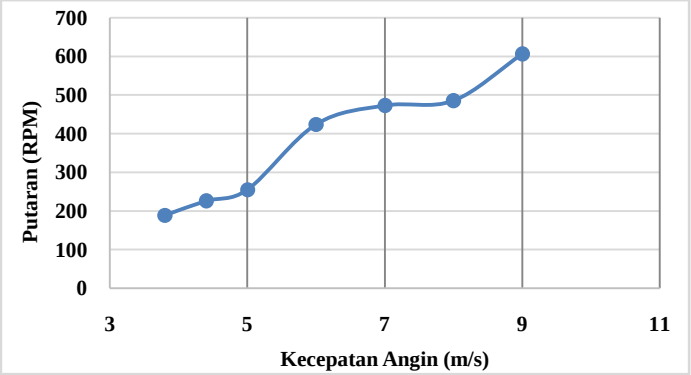
4.2 Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dengan Variasi Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s

Pada sub bab ini, analisa dari performa turbin angin Savonius dilakukan tanpa mengggunakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Adapun variasi yang akan dianalisa adalah variasi kecepatan angin. Sebelum dilakukan analisa performa dari turbin angin Savonius akibat pengaruh silinder pengganggu, maka perlu dilakukan analisa performa turbin angin Savonius tanpa adanya penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Analisa yang dilakukan disajikan dalam bentuk grafik. Analisa yang dilakukan meliputi putaran turbin(n_0) sebagai fungsi

dari kecepatan angin, *Coefficient of Power*(CoP_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin, *Coefficient of Power*(CoP) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ), *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ), dan torsi statis yang dihasilkan oleh turbin terhadap posisi angular sudu (θ).

4.2.1 Analisa Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.1 menunjukkan grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (n_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 3,8, 4,4 ; 5 ; 6 ; 7 ; 8, dan 9 m/s.



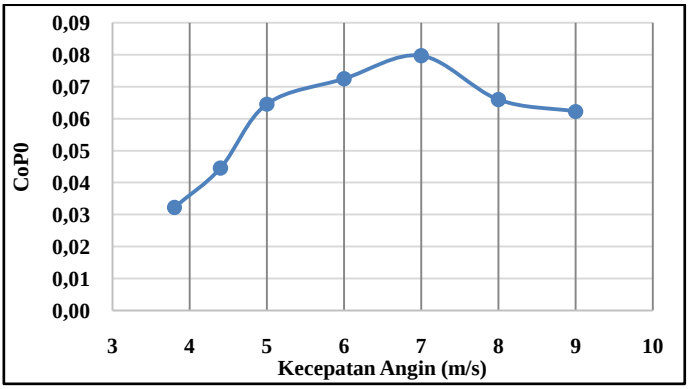
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi Kecepatan Angin

Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (n_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin untuk nilai kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s memiliki bentuk *trendline* yang meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa kecepatan angin yang melewati turbin angin Savonius mempengaruhi putaran dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan

oleh turbin juga semakin tinggi. Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa nilai putaran tertinggi terdapat pada kecepatan 9 m/s yaitu sebesar 606,157 rpm, pada kecepatan 3,8 m/s didapatkan putaran sebesar 189,203 rpm, pada kecepatan 4,4 m/s didapatkan putaran sebesar 226,174 rpm, pada kecepatan 5 m/s didapatkan putaran sebesar 255,49 rpm, pada kecepatan 6 m/s didapatkan putaran sebesar 424,43 rpm, pada kecepatan 7 m/s didapatkan putaran sebesar 472,78 rpm, pada kecepatan 8 m/s didapatkan putaran sebesar 485,17 rpm.

4.2.2 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.2 menunjukkan grafik *Coefficient of Power*turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.



Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi Kecepatan Angin

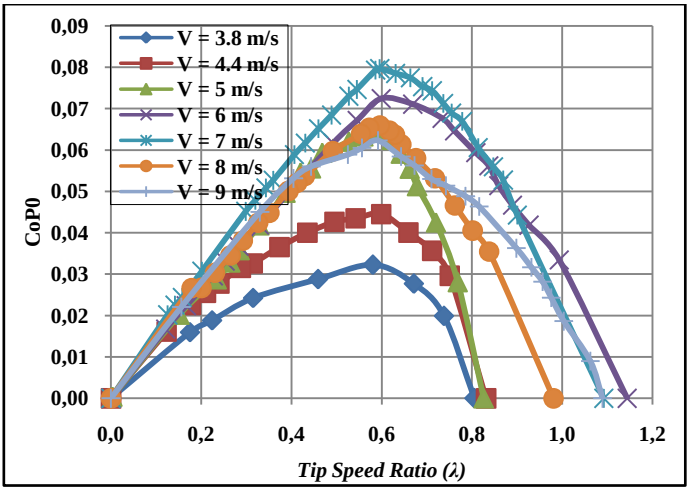
Melalui gambar 4.2 dapat dilihat bahwa grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin untuk nilai kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s memiliki bentuk *trendline* yang meningkat lalu menurun. Namun besar peningkatan yang terjadi semakin kecil seiring dengan semakin besarnya nilai kecepatan angin. Menunjukan bahwa seiring meningkatnya kecepatan angin, maka *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius juga akan semakin tinggi hingga mencapai titik optimumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa kecepatan angin yang melewati turbin angin Savonius mempengaruhi nilai *Coefficient of Power* dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin juga semakin tinggi. Namun saat kecepatan semakin mendekati nilai kecepatan angin optimum peningkatan nilai *Coefficient of Power*turbin akan semakin berkurang akibat semakin tidak optimalnya kecepatan angin yang dapat dimanfaatkan turbin untuk berputar oleh karena efek *solid wall* dan juga karena adanya kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin.

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai nilai *Coefficient of Power* tertinggi terdapat pada kecepatan 7 m/s yaitu sebesar 0,0797, pada kecepatan 3,8 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0323, pada kecepatan 4,4 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0445, pada kecepatan 5 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0661, pada kecepatan 6 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0724, pada kecepatan 8 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,066, dan pada kecepatan 9 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0623. Hal tersebut diperkuat dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud, et al. 2012** seperti pada gambar 2.12

yang menunjukkan nilai CoP turbin angin Savonius fungsi kecepatan angin mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada kecepatan angin tertentu dan akan turun setelah mencapai titik maksimumnya. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan *Reynolds* maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi.Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan *Reynolds* maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi. Hal ini dikarenakan kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat sehingga turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* terhadap angin dan dapat mengakibatkan turbulensi saat sudu berputar sehingga fluida tidak dapat mencapai sudu turbin yang akan meyebabkan nilai putaran turbin akan menurun dan menyebabkan nilai daya *output* akan menurun, dengan nilai daya *input* yang tetap sama maka nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) akan menurun.

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

Nilai dari *Coefficient of Power* menunjukkan performa dari turbin angin Savonius. Data *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada masing-masing kecepatan angindapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s

Pada gambar 4.3 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Berdasarkan gambar 4.3 nilai *Coefficient of Power* (CoP_o) akan terus meningkat hingga mencapai λ optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP_o) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Pada kecepatan 3,8 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,0323 dengan λ = 0,581; pada kecepatan 4,4 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0445 dengan λ = 0,599; pada kecepatan 5 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0661 dengan λ = 0,608 ; pada kecepatan 6 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0724 dengan λ = 0,599 ; pada kecepatan 7 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0797 dengan λ = 0,596 ; pada

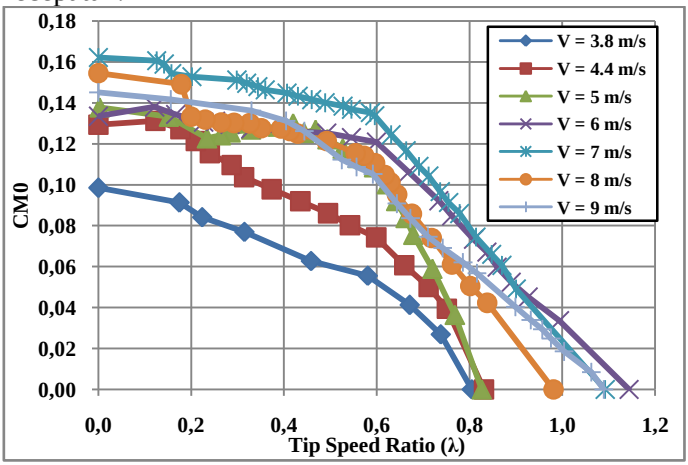
kecepatan 8 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,066 dengan λ = 0,596 dan pada kecepatan 9 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0623 dengan λ = 0,592.

Bersasarkan hasil yang didapat, titik optimum berada pada kecepatan 7 m/s, dimana performa yang dihasilkan paling besar dibandingkan keenam kecepatan angin lainnya, dimana pada kecepatan 3,8 m/s nilai CoP_0 akan meningkat sampai pada kecepatan 7 m/s dan setelah melewati kecepatan angin optimum yaitu pada kecepatan 7 m/s nilai CoP_0 akan mengalami penurunan sampai pada kecepatan 9 m/s. Hal ini disebaban pada kecepatan aliran fluida tinggi ,turbin angin Savonius kurang dapat bekerja secara efektif. Sehingga didapatkan performa terbaik dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif pada kecepatan 7 m/s dengan nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) optimum sebesar 0,0797 pada *Tip Speed Ratio* (λ) optimum 0,596. Hal tersebut diperkuat dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud, et al. 2012** seperti pada gambar 2.12 yang menunjukkan nilai CoP turbin angin Savonius fungsi kecepatan angin mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada kecepatan angin tertentu dan akan turun setelah mencapai titik maksimumnya. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan *Reynolds* maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi. Hal ini dikarenakan kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat sehingga turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* terhadap angin dan dapat mengakibatkan turbulensi saat sudu berputar sehingga fluida tidak dapat mencapai sudu turbin yang akan meyebabkan nilai putaran turbin akan menurun dan menyebabkan nilai daya *output* akan menurun, dengan nilai daya *input* yang tetap

sama maka nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) akan menurun.

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

Pada penelitian ini didapatkan nilai *Coefficient of Moment* (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio* turbin angin Savonius tanpa pengganggu pada masing-masing kecepatan.



Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CM_0) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada pada Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s

Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* (Cm_0) mengalami mengalami kenaikan seiring dengan menurunnya nilai *Tip Speed Ratio* (*λ*). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm_0) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius

berhenti. Dari gambar 4,4 dapat dilihat bahwa nilai Cm_0 maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 7 m/s yaitu sebesar 0,1622 pada λ = 0, pada kecepatan 3,8 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,0985 pada λ = 0, pada kecepatan 4,4 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,1313 pada λ = 0,123, pada kecepatan 5 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,1379 pada λ = 0, pada kecepatan 6 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,1381 pada λ = 0,0121, pada kecepatan 9 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,1451 pada λ = 0, pada kecepatan 8 m/s didapatkan Cm_0 maksimum sebesar 0,1545 pada λ = 0. Dari *trendline* grafik dapat dilihat bahwa pada kecepatan 7 m/s berada pada posisi teratas.

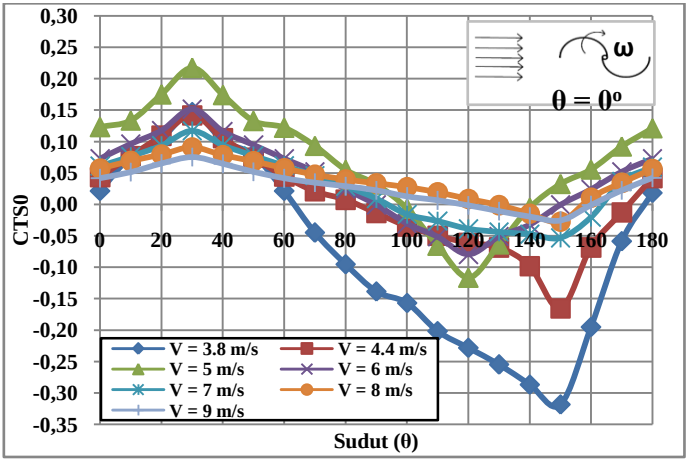
Nilai Cm_0 akan naik seiring meningkatnya nilai kecepatan angin sampai mencapai kecepatan angin optimum dan akan turun setelah melewati kecepatan angin optimum. *Trendline* Cm_0 setelah melewati titik optimum dalam hal ini pada kecepatan 7 m/s akan turun sampai pada pada kecepatan 9 m/s disebabkan oleh kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta ketika nilai kecepatan aliran fluida semakin naik, maka putaran turbin semakin naik, namun jika putaran turbin semakin cepat maka turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* terhadap angin dan dapat mengakibatkan turbulensi saat sudu berputar dan nilai putaran turbin akan menurun sehingga menyebabkan menurunnya nilai putaran sampai pada kecepatan 9 m/s

.

4.2.5 Analisa *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Studi eksperimen dilakukan dengan cara mengukur torsi statis dengan *torquemter* dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu (Ts_0) pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi angular sudu $0^o \leq \theta \leq 180^o$ dengan tiap kenaikan

10. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini menggunakan variasi kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s. Torsi statis ini kemudian diolah menjadi *Static Torque Coefficient* (CTS_0) fungsi posisi angular sudu (θ) dengan variasi kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s ditunjukkan pada gambar 4.5 .



Gambar 4.5 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CTS_0) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ)

Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada seluruh kecepatan angin. Pada seluruh variasi kecepatan angin didapatkan bahwa nilai *Static Torque Coefficient* mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 30°. Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada kecepatan angin tersebut mengalami penurunan hingga sudut 120° untuk kecepatan angin V = 5 m/s dan 6 m/s serta penurunan hingga sudut 150° untuk V = 3,8, 4,4, 7, 8 dan 9 m/s. Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada seluruh kecepatan angin tersebut

mengalami kenaikan hingga sudut 180°. Pada kecepatan angin 3,8 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1466 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum yaitu dengan nilai sebesar -0,3181 pada sudut 150°. Pada kecepatan angin 4,4 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1416 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum sebesar -0,1652 pada sudut 150°. Pada kecepatan angin 5 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,2174 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum yaitu sebesar -0,1164 pada sudut 120°. Pada kecepatan angin 6 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1516 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum sebesar -0,0795 pada sudut 120°. Pada kecepatan angin 7 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1173 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum yaitu sebesar -0,053 pada sudut 150°. Pada kecepatan angin 8 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,091 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum sebesar -0,0274 pada sudut 150°. Pada kecepatan angin 9 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,0754 pada sudut 30° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum yaitu sebesar -0,0255 pada sudut 150°. *Static Torque Coefficient* negatif pada masing-masing variasi kecepatan memiliki rentang sudut yang berbeda-beda. *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat kecepatan angin 9 m/s, karena semakin besar kecepatan angin semakin besar pula gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga pada sudut tertentu

turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut 30° untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terbesar pada sudut 120° untuk kecepatan angin V = 5 m/s dan 6 m/s serta sudut 150° untuk V = 3,8, 4,4, 7, 8 dan 9 m/s. Pada sudut 0° sampai 30° untuk seluruh kecepatan, sudut 120° sampai 180° untuk kecepatan 5 dan 6 m/s serta pada sudut 150° sampai 180° pada kecepatan sisanya, terjadi peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan *Static Torque Coefficient* akan meningkat. Penurunan nilai *Static Torque Coefficient* terjadi pada sudut 30° sampai dengan sudut 120° dan 150^0 dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan *Static Torque Coefficient* yang terjadi akan mengecil juga. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut 30° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan *Static Torque Coefficient* maksimum dan juga didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* dengan harga negatif. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu

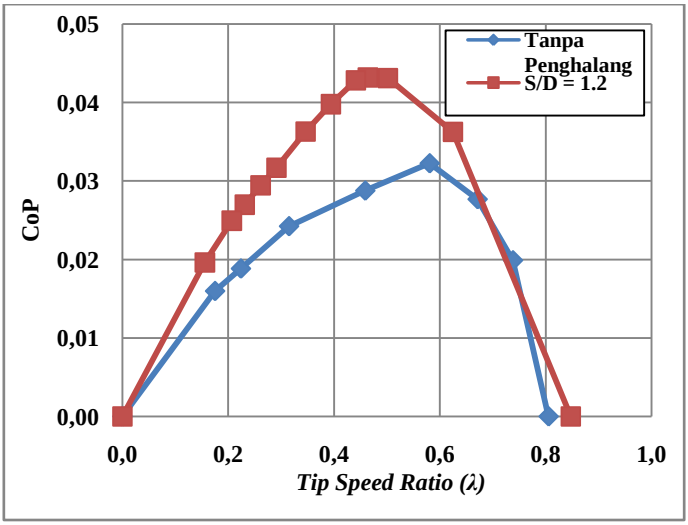
yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting*, sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

4.3 Analisa Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s

Pada sub bab ini, analisa dari performa turbin angin Savonius dilakukan dengan mengggunakan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan yaitu d/D = 0,5 dengan posisi y/D = 0,5 dan variasi rasio jarak antara pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) = 1,2. Adapun yang akan dianalisa adalah variasi kecepatan angin,*Static Torque Coefficient*, *Tip Speed Ratio*, *Coefficient of Power*dan *Coefficient of Moment* dari turbin angin Savonius. Analisa yang dilakukan disajikan dalam bentuk grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ),*Coefficient of Moment* (Cm) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan *Static Torque Coefficient* (CTS) terhadap posisi angular sudu (θ).

4.3.1 Analisa Nilai *Coefficient of Power*(CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu

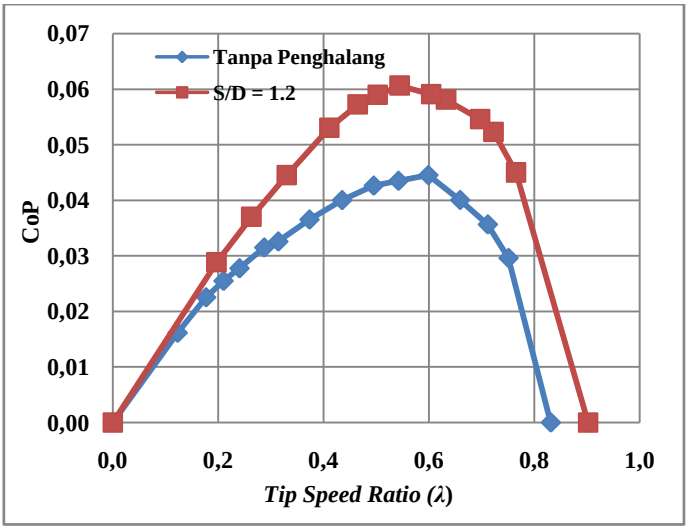
Gambar 4.6 - 4.12 menunjukkan grafik *Coefficient of Power*turbin angin Savonius dengandan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.



Gambar 4.6 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 3,8 m/s

Pada gambar 4.6 dapat dilihat grafik *Coefficient of Powe r*terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik.Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.6 pada kecepatan 3,8 m/s nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) tanpa penganngu maksimum sebesar 0,0323 dengan λ = 0,581; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0432 dengan λ = 0,464.

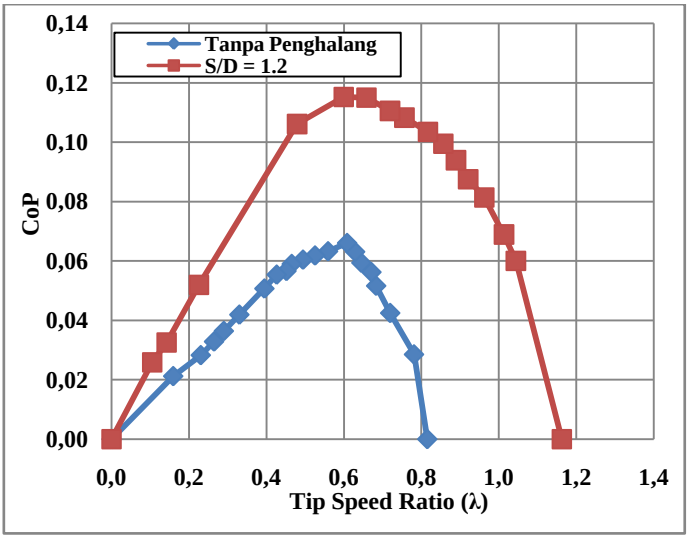
Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 3,8 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0323 menjadi 0,0464 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 33,74% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketike ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 4,4 m/s

Pada gambar 4.7 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.7 pada kecepatan 4,4 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0445 dengan λ = 0,599; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0606 dengan λ = 0,544.

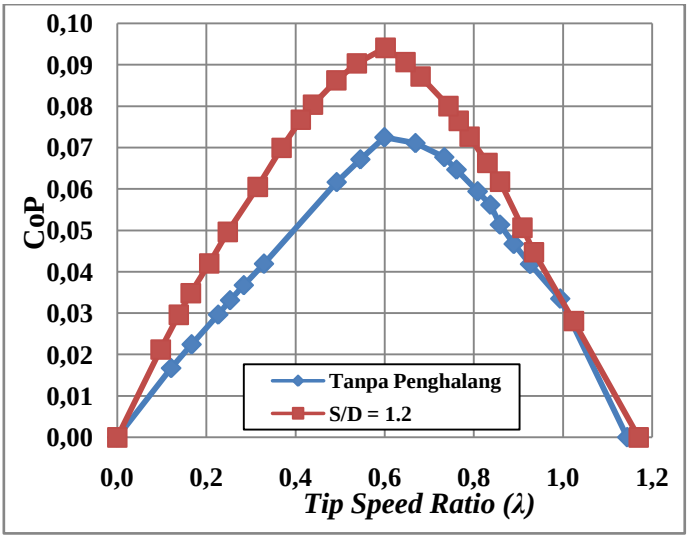
Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 4,4 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0445 menjadi 0,0606 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 36,18% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade*dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi** (2002) bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketike ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.8 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 5 m/s

Pada gambar 4.8 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.8 pada kecepatan 5 m/s nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0661 dengan λ = 0,595; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,1152 dengan λ = 0,597. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s

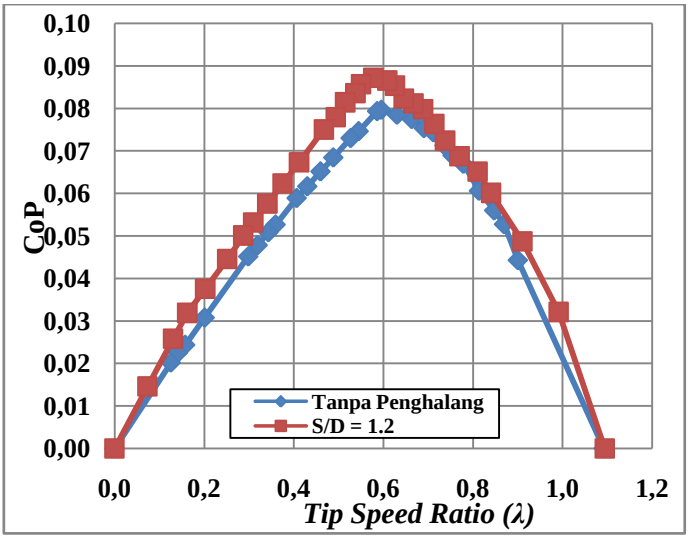
dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0646 menjadi 0,1152 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 74,28% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power*(CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi** (2002) bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketika ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Pada gambar 4.9 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.9 pada kecepatan 6 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0724 dengan λ = 0,599; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0941 dengan λ = 0,602. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s

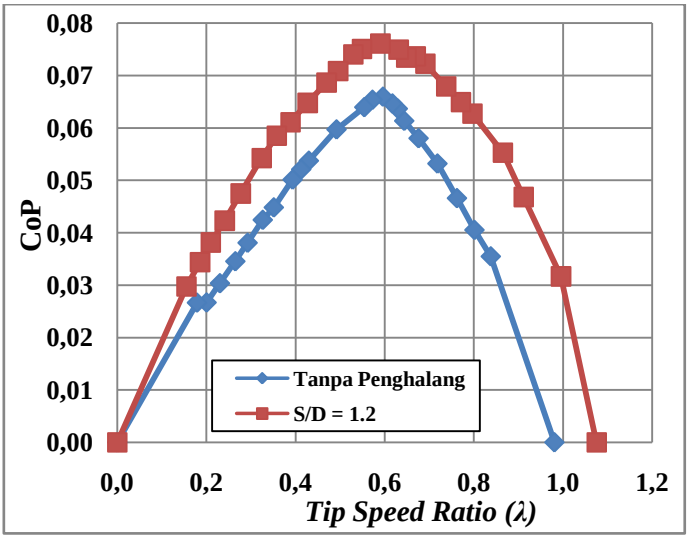
dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0724 menjadi 0,0941 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power*maksimum sebesar 29,97% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi** (2002) bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketike ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Pada gambar 4.10 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.10 pada kecepatan 7 m/s nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0797 dengan λ = 0,596; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0872 dengan λ = 0,578.

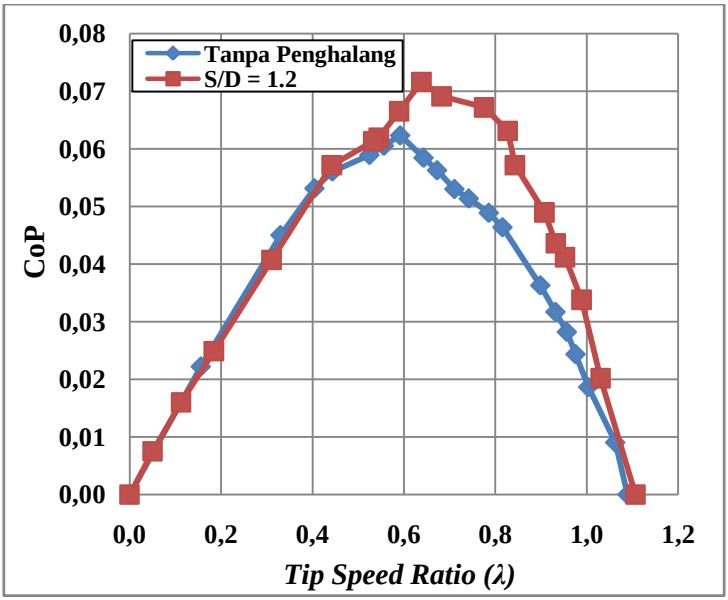
Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0797 menjadi 0,0872 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 9,41% dari nilai *Coefficient of Power*maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power*(CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi** (2002) bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketike ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Power*turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 8 m/s

Pada gambar 4.11 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.11 pada kecepatan 8 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,066 dengan λ = 0,595; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0761 dengan λ = 0,59. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 8 m/s dapat

meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,066 menjadi 0,0761 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 15,3% dari nilai CoP maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi** (2002) bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketika ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 9 m/s

Pada gambar 4.12 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio.* Berdasarkan gambar 4.12 pada kecepatan 9 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0623 dengan λ = 0,592; sedangkan

untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0716 dengan λ = 0,63. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 9 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0623 menjadi 0,0716 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 14,92% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di depan turbin, terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP). Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** bahwa terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima oleh sebuah silinder utama ketike ditempatkan sebuah silinder pengganggu di depan silinder utama.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai CoP dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

S/D	Kecepatan angin	tanpa pengganggu		dengan pengganggu		ΔCOP	% Kenaikan
		COP0max	TSR	COPmax	TSR		
1,2	3,8	0,0323	0,581	0,0432	0,464	0,0109	33,75
	4,4	0,0445	0,599	0,0606	0,544	0,0161	36,18
	5	0,0661	0,608	0,1152	0,597	0,0491	74,28
	6	0,0724	0,599	0,0941	0,602	0,0217	29,97
	7	0,0797	0,596	0,0872	0,578	0,0075	9,41
	8	0,066	0,595	0,0761	0,59	0,0101	15,30
	9	0,0623	0,592	0,0716	0,63	0,0093	14,93

Tabel 4.3 *Uncertainity* CoP_{max} Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

S/D	Kecepatan angin	Tanpa pengganggu			Dengan pengganggu		
		COP0 *max*	*uncertainty* (%)	*Range* Batas Toleransi	COP *max*	*uncertainty* (%)	*Range* Batas Toleransi
1,2	3,8	0,0323	18,7	0,026-0,038	0,0432	11,2	0,038-0,048
	4,4	0,0445	10,46	0,039-0,0491	0,0606	7,05	0,056-0,065
	5	0,0661	5,64	0,0623-0,067	0,1152	3,33	0,1114-0,120
	6	0,0724	3,63	0,0697-0,075	0,0941	2,9	0,091-0,097
	7	0,0797	2,55	0,0776-0,082	0,0872	2,32	0,085-0,089
	8	0,066	2,39	0,064-0,0675	0,0761	2,13	0,0745-0,078
	9	0,0623	2,08	0,061-0,0636	0,0716	1,97	0,07-0,073

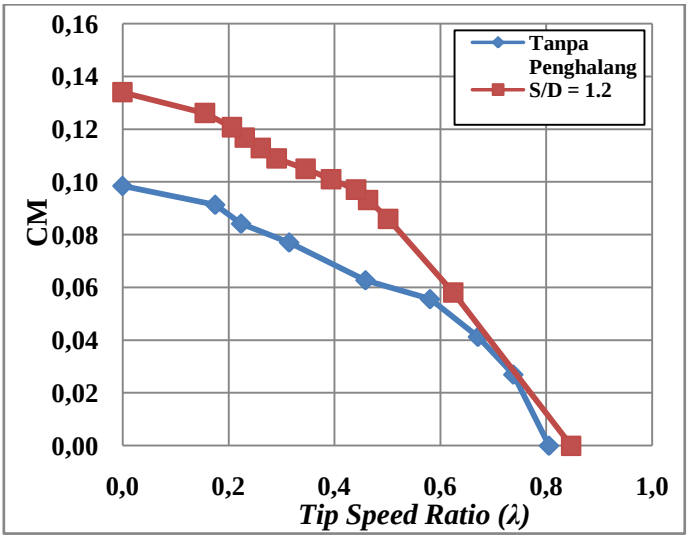
Berdasarkan tabel 4.2 di atas, disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu menghasilkan peningkatan CoP. Kenaikan CoP maksimum yang terbesar terjadi pada kecepatan optimum yaitu 5 m/s sebesar 74,28% setelah diberi pengganggu, sedangkan kenaikan CoP maksimum terendah terjadi di kecepatan angin 7 m/s sebesar 9,41% setelah diberi pengganggu. Padapenelitian di jarak pengganggu S/D = 1,2 ini, dapat disimpulkan bahwa kecepatan angin 5 m/s merupakan kecepatan optimum turbin Savonius, dimana setelah diberi pengganggu menghasilkan CoP paling tinggi

sebesar 0,1152 pada TSR = 0,597 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0491 atau 74,28%.

Tabel 4.3 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, *Range* tersebut adalah batas toleransi yang didapatkan sesuai dengan ketelitian alat ukur atau dapat dikatakan merupakan rentang nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan. Dengan meningkatkanya CoP maksimum turbin setelah diberi pengganggu maka dapat disimpulkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin, 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 mengakitbatkan turunnya *pressure drag* pada *returning blade* turbin sehingga selisih gaya *drag* membesar, serta pada posisi S/D = 1,2 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* (CM) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio*(λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.13 - 4.19 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengandan tanpa silinder pengganggu (CM_0) sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s.

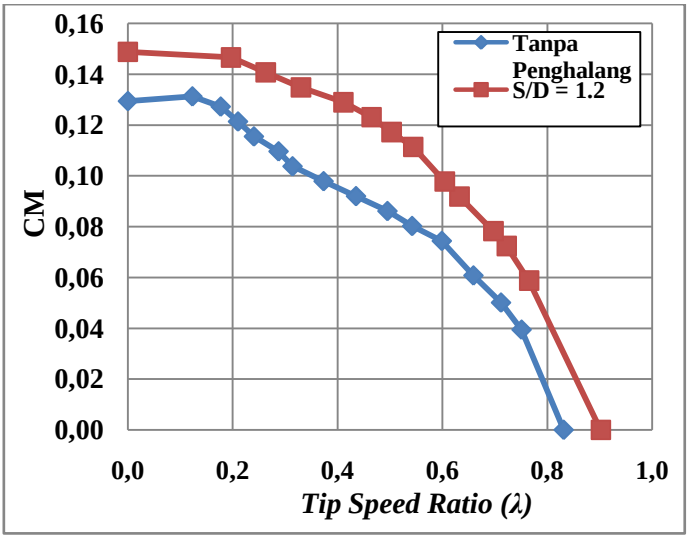


Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 3,8 m/s

Berdasarkan gambar 4.13 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (*λ*). Nilai *Coefficient of*

Moment (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 3,8 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0985 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1339 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

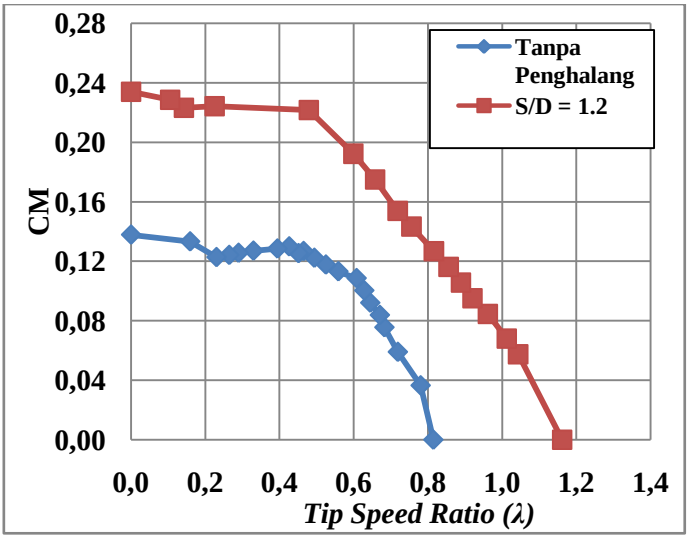
Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).



Gambar 4.14 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 4,4 m/s

Berdasarkan gambar 4.14 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.14 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 4,4 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1313 pada λ = 0,123, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1488 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).

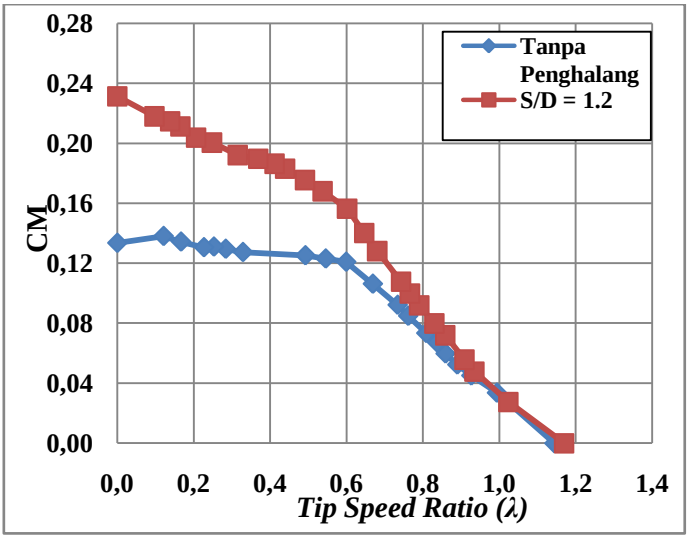


Gambar 4.15 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.15 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa

pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 5 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1379 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,2389 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).

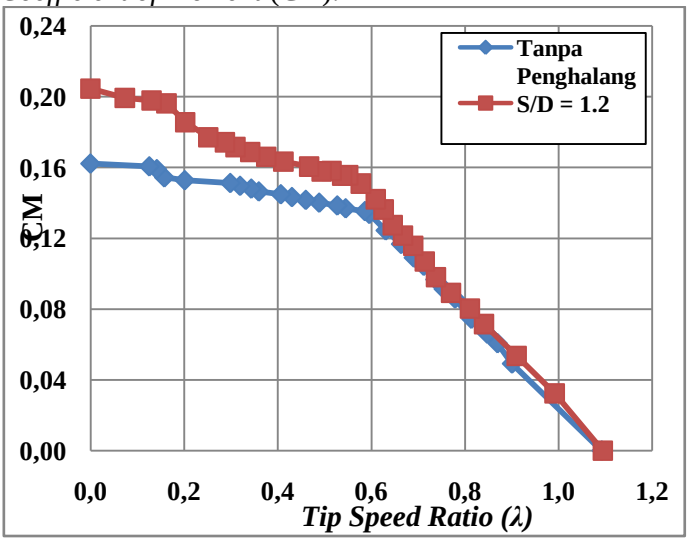


Gambar 4.16 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.16 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.16 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 6 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1381 pada λ = 0,121, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,2312 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum

yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).

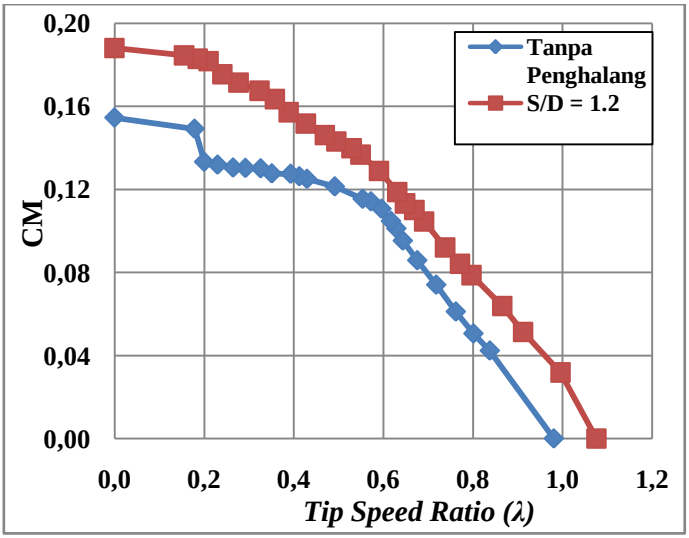


Gambar 4.17 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.17 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan

peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 7 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1622 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,2046 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

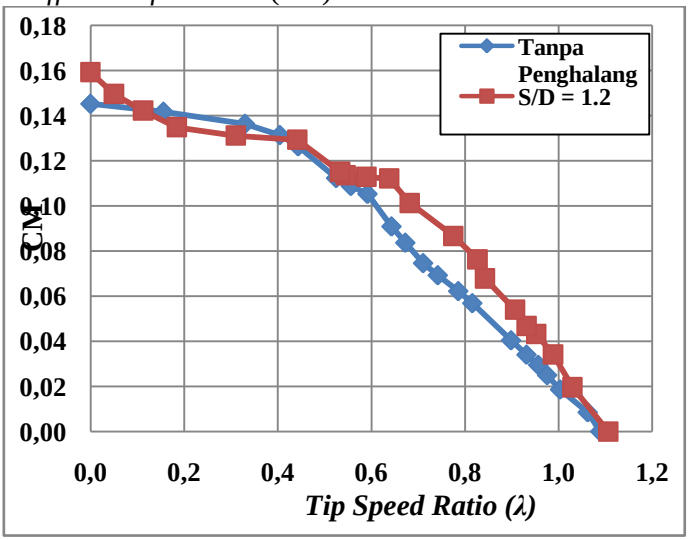
Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).



Gambar 4.18 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 8 m/s

Berdasarkan gambar 4.18 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.18 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 8 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1545 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1880 dengan λ = 0. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).



Gambar 4.19 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM_0) terhadap *Tip Speed Ratio*(λ) pada kecepatan angin 9 m/s

Berdasarkan gambar 4.19 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan

peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.19 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 9 m/s didapatkan Cm_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1451 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1592 dengan λ = 0. . Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Hal ini diakibatkan, setelah diberi silinder pengganggu terjadi penurunan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* sehingga selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* semakin naik. Kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (Cm).

Tabel 4.4 Perbandingan nilai CM dan TSR Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

S/D	Kecepatan angin	tanpa pengganggu		dengan pengganggu		ΔCOP	% Kenaikan
		CM0max	TSR	CMmax	TSR		
1,2	3,8	0,0985	0	0,1339	0	0,0354	35,94
	4,4	0,1313	0,123	0,1488	0	0,0175	13,33
	5	0,1379	0	0,2389	0	0,101	73,24
	6	0,1381	0,121	0,2312	0	0,0931	67,41
	7	0,1622	0	0,2046	0	0,0424	26,14
	8	0,1546	0	0,188	0	0,0334	21,60
	9	0,1452	0	0,1592	0	0,014	9,64

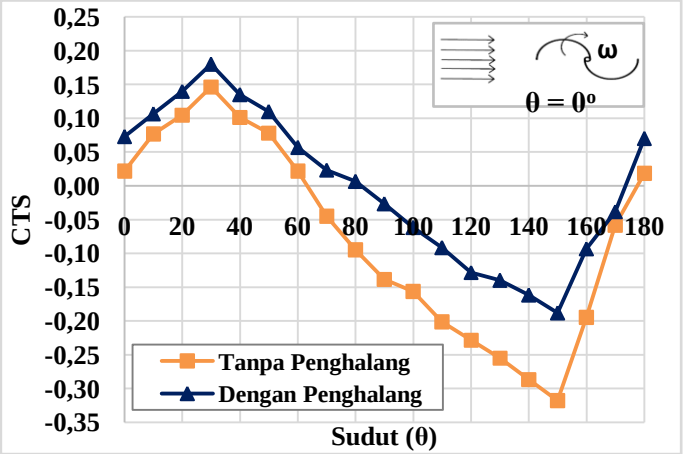
Tabel 4.5 *Uncertainity* CM_{max} Turbin Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8; 4,4; 5;6 ;7;8; dan 9 m/s

S/D	Kecepatan angin	Tanpa pengganggu			Dengan pengganggu		
		CM0 *max*	*uncertainty* (%)	*Range* Batas Toleransi	CM *max*	*uncertainty* (%)	*Range* Batas Toleransi
1,2	3,8	0,0985	18,69	0,0801-0,1169	0,1339	11,18	0,1189-0,1489
	4,4	0,1313	10,44	0,1175-0,145	0,1488	7,01	0,1383-0,1592
	5	0,1379	5,6	0,1301-0,1456	0,2389	3,26	0,2311-0,2467
	6	0,1381	3,56	0,1332-0,1430	0,2312	2,82	0,2247-0,2377
	7	0,1622	2,46	0,1582-0,1662	0,2046	2,22	0,2-0,2091
	8	0,1546	2,3	0,1510-0,1581	0,188	2,03	0,1841-0,1918
	9	0,1452	1,99	0,1423-0,1481	0,1592	1,88	0,1562-0,1621

Berdasarkan tabel di atas, disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu menghasilkan peningkatan CM turbin Savonius. Kenaikan CM maksimum yang terbesar terjadi pada kecepatan optimum yaitu 7 m/s sebesar 73,24% setelah diberi pengganggu, sedangkan kenaikan CM maksimum terkecil terjadi di kecepatan angin 9 m/s sebesar 9,64% setelah diberi pengganggu. Nilai CM 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 (CM) naik hingga pada titik optimumnya dimana kenaikan kecepatan angin kuadrat lebih dominan daripada peningkatan torsi dinamis sehingga kan menyebabkan semakin rendahnya nilai CM turbin angin Savonius. Tabel 4.5 menunjukkan nilai *uncertainty* dari nilai CM maksimum turbin dengan yang tanpa pengganggu pada semua variasi kecepatan. Dapat dilihat bahwa besar nilai *uncertainty* CMmax 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, *Range* tersebut adalah batas toleransi yang didapatkan sesuai dengan ketelitian alat ukur atau dapat dikatakan merupakan rentang nilai ketidakpastian yang diakibatkan oleh terbatasnya nilai ketelitian dari alat ukur yang digunakan.

4.3.3 Analisa *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu



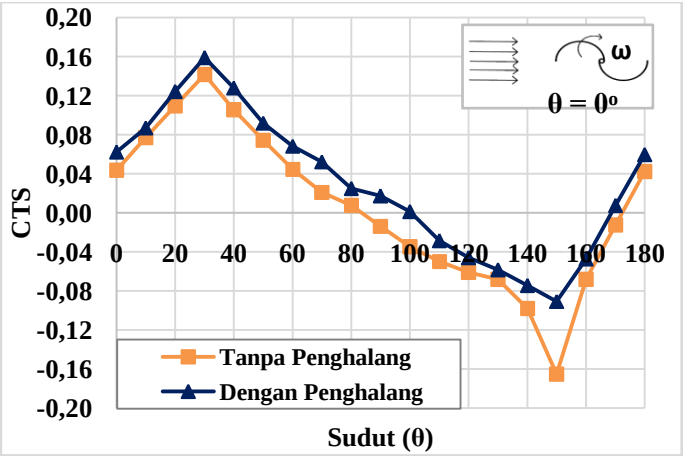
Gambar 4.20 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 3,8 m/s

Berdasarkan gambar 4.20 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 3,8 m/s, nilai *Static Torque Coefficient*

maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,1466 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150º yaitu sebesar -0,318. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,179 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150º sebesar -0,188. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,1466 menjadi 0,179 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,318 menjadi -0,188 pada posisi angular sudu 150º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 3,8 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 150º untuk kecepatan angin 3,8 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 150º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada

returning blade akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 70º - 80º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.20, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

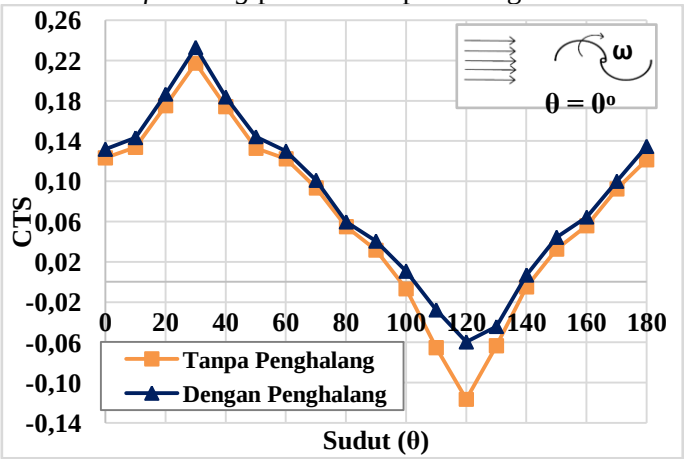


Gambar 4.21 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 4,4 m/s

Berdasarkan gambar 4.21 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 4,4 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,1416 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150º yaitu sebesar -0,165. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,159 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150º sebesar -0,091. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,1416 menjadi 0,159 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,165 menjadi -0,091 pada posisi angular sudu 150º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 4,4 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 150º untuk kecepatan angin 4,4 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 150º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu

yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 90º - 100º dan 170º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.21, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

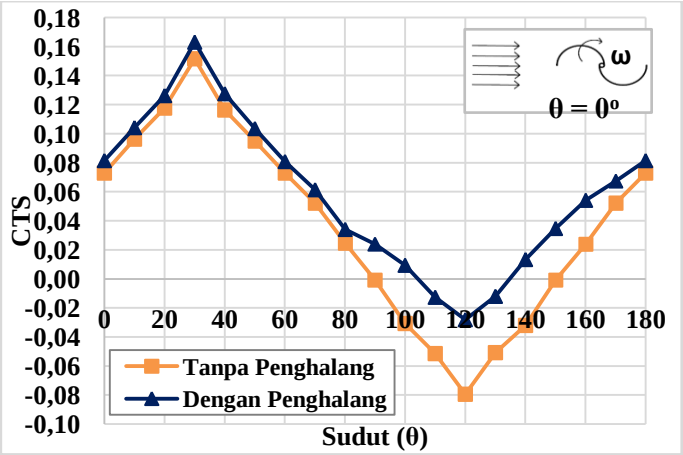


Gambar 4.22 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.22 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 5 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,217 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 120º yaitu sebesar -0,116. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,2328 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 120º sebesar -0,06. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,217 menjadi 0,2328 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,116 menjadi -0,06 pada posisi angular sudu 120º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 5 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 120º untuk kecepatan angin 5 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi

angular sudu 120º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 100º dan 140º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.22, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

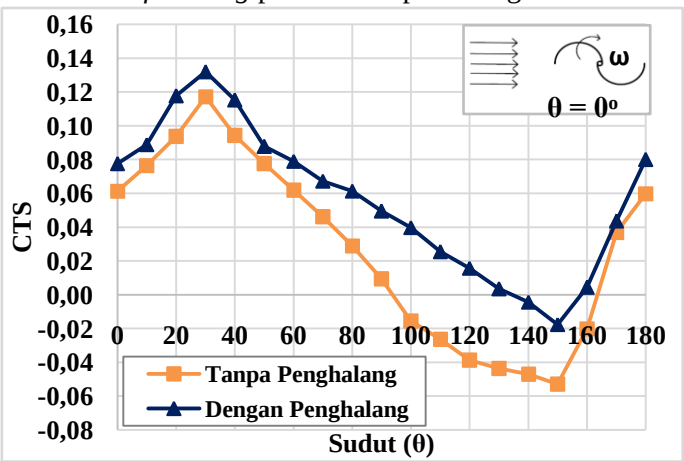


Gambar 4.23 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.23 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 6 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,1516 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 120º yaitu sebesar -0,0795. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,163 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 120º sebesar -0,028. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,1516 menjadi 0,163 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,0795 menjadi -0,028 pada posisi angular sudu 120º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 6 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 120º untuk kecepatan angin 6 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 120º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu

yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 90º -100º dan 140º- 150º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.23, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

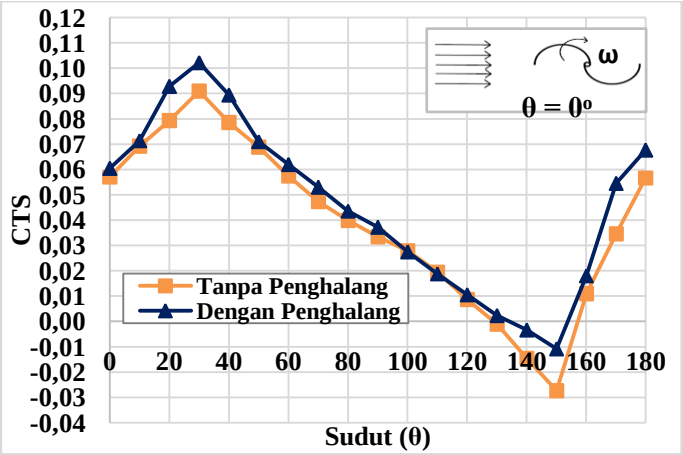


Gambar 4.24 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.24 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 7 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,1173 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150º yaitu sebesar -0,053. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,132 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150º sebesar -0,018. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,1173 menjadi 0,132 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,053 menjadi -0,018 pada posisi angular sudu 150º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 7 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 150º untuk kecepatan angin 7 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi

angular sudu 150º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 100º - 130º dan 160º sudu yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.24, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

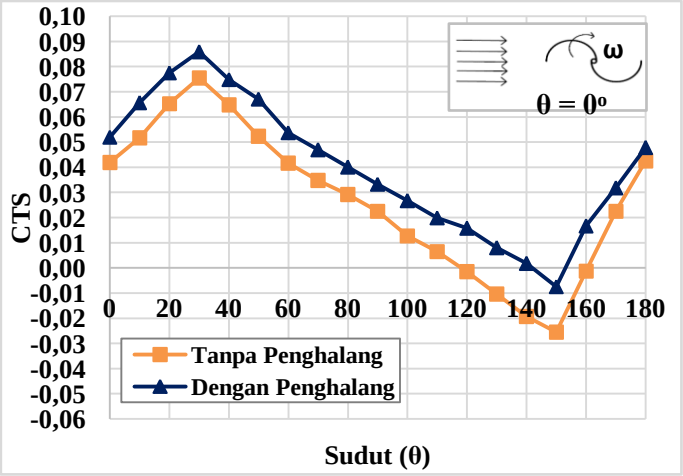


Gambar 4.25 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 8 m/s

Berdasarkan gambar 4.25 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 8 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,091 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150º yaitu sebesar -0,0274. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,1022 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150º sebesar -0,011. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,091 menjadi 0,1022 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,0274 menjadi -0,011 pada posisi angular sudu 150º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 8 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 150º untuk kecepatan angin 8 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi angular sudu 150º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu

yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 130º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.25 , turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.



Gambar 4.26 Grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan (CTS) dan tanpa silinder pengganggu (CTS_0) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 9 m/s

Berdasarkan gambar 4.26 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 9 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 0,0754 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150º yaitu sebesar -0,0255. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 0,858 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150º sebesar -0,007. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 berpengaruh pada peningkatan torsi maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0754 menjadi 0,858 pada posisi angular sudu 30º dan peningkatan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari -0,0255 menjadi -0,007 pada posisi angular sudu 150º. Hal ini disebabkan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 30º untuk kecepatan angin 9 m/s mengarahkan aliran fluida menuju sisi *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* naik. Disisi lain, penggunaan silinder pengganggu menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* mengalami penurunan dan diperoleh kenaikan selisih gaya *drag* antara kedua sudu dan kenaikan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. Penggunaan silinder pengganggu pada S/D = 1,2 dengan posisi angular sudu 150º untuk kecepatan angin 9 m/s menaikkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum terendah dari turbin, hal ini disebabkan pada posisi

angular sudu 150º dapat menghambat aliran fluida menuju sisi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* akan menurun dan dapat mengarahkan aliran fluida menuju *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat yang menghasilkan peningkatan selisih gaya *drag* antara kedua sudu. Selisih gaya *drag* antara kedua sudu yang meningkat akan berpengaruh pada peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* turbin. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius pada posisi angular sudu tersebuttidak memiliki kemampuan *self starting*. Penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 dapat membuat *Static Torque Coefficient* pada rentang posisi angular sudu 120º - 140º dan pada sudu 160º yang bernilai negatif saat sebelum penggunaan silinder pengganggu menjadi positif. Hal ini menunjukkan penggunaan silinder pengganggu pada y/D = 0,5 , d/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 dapat meningkatkan kemampuan *self starting* dari turbin angin Savonius. Berdasarkan gambar 4.26, turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *Static Torque Coefficient* dengan nilai positif pada semua posisi angular sudu. Hal ini menandakan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

4.4 Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* (CoP*max*) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP0*max*) Terhadap Variasi Kecepatan Angin 5 m/sdan 7 m/s.

Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai CoP_{max} antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu ($CoP_{max}/CoP_{0\ max}$) terhadap variasi kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s. Dimana nilai ($CoP_{max}/CoP_{0\ max}$) yang digunakan sebagai pembanding adalah nilai ($CoP_{max}/CoP_{0\ max}$) milik **Rizky (2020).**

Tabel 4.6 Tabel perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP*max*/CoP*max*) pada kecepatan 5 dan 7 m/s

Data Pembanding	Tanpa Silinder Pengganggu				Dengan Silinder Pengganggu				CoP_{max}/CoP_{0max}	
	Kecepatan 5 m/s		Kecepatan7 m/s		Kecepatan 5 m/s		Kecepatan7 m/s		Kecepatan 5 m/s	Kecepatan 7 m/s
	$CoP_{0\ max}$	TSR	$CoP_{0\ max}$	TSR	CoP_{max}	TSR	CoP_{max}	TSR		
Bagas S/D = 1.2	0.0661	0.595	0.0797	0.596	0.1152	0.597	0.0872	0.578	1.7428	1.0941
Rizky S/D = 1.4	0.152	0.6	0.104	0.64	0.2199	0.64	0.1458	0.74	1.4467	1.4019

Tabel 4.7 Tabel selisih nilai *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan
dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 5 dan 7 m/s

Data Pembanding	CoP_{0max}		CoP_{max}		ΔCoP_{0max}	Penurunan CoP_{0max} (%)	ΔCoP_{max}	Penurunan CoP_{max} (%)
	Rizky	Bagas	Rizky	Bagas				
Kecepatan 5 m/s	0,152	0,0661	0,2199	0,1152	0,0859	56,51%	0,1047	47,61%
kecepatan 7 m/s	0,104	0,0797	0,1458	0,0872	0,0243	23,37%	0,0586	40,19%

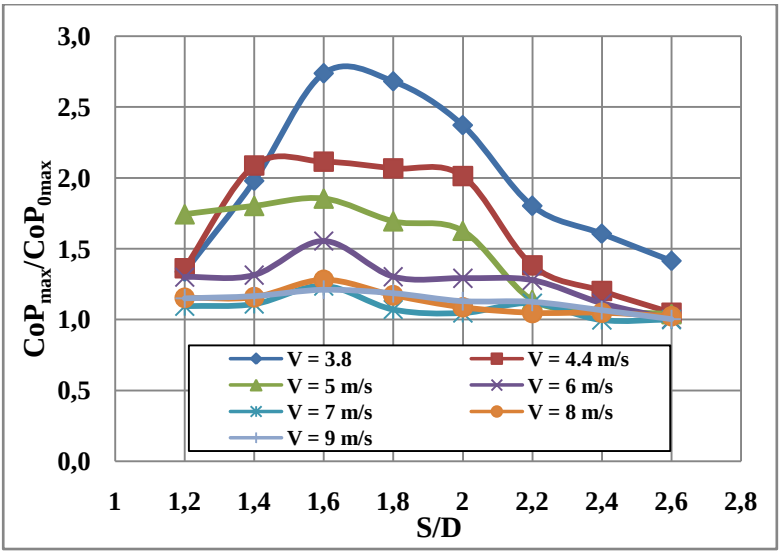
Penelitian yang dilakukan oleh **Bagas (2020)** sudah pernah dilakukan sebelumnya oleh **Rizky (2020)** dengan menggunakan peralatan dan mekanisme yang sama namun dengan variasi penelitian yang berbeda. Dimana pada penelitian **Rizky (2020)** variasi yang digunakan adalah variasi d/D sebesar 0,1 sampai 1 dengan kecepatan angin yang digunakan adalah kecepatan 5 dan 7 m/s pada S/D = 1.6. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh **Bagas (2020)** adalah dengan pengunaan d/D = 0,5 , S/D = 1,2 dengan variasi kecepatan 3,8 - 9 m/s. Tabel 4.1 menunjukkan perbandingan nilai CoP_{max} antara turbin angin Savonius dengan

dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi kecepatan angin 5 m/s dan 7 m/s. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Bagas (2020)** pada d/D = 0,5 dan S/D = 1,2 didapatkan nilai $CoP_{max}/CoP_{0\ max}$ sebesar 1,7428 atau terjadi kenaikan sebesar 74,28% untuk kecepatan 5 m/s dan 1.0941 atau terjadi kenaikan sebesar 9,41% untuk kecepatan 7 m/s. Untuk penelitian yang **Rizky (2020)** lakukan pada d/D = 0,5 dan S/D = 1.6 dan didapatkan nilai $CoP_{max}/CoP_{0\ max}$ sebesar 1,4467 atau terjadi kenaikan sebesar 44,67% untuk kecepatan 5 m/s dan 1,4019 atau terjadi kenaikan sebesar 14,19% untuk kecepatan 7 m/s.

Melalui tabel 4.1 dan 4.2 dapat dilihat bahwa,meskipun menggunakan dimensi turbin angin Savonius dan ukuran diameter silinder pengganggu (d/D = 0,5) yang sama, tetapi dapat dilihat bahwa nilai CoP_{max} , CoP_{0max} serta nilai $CoP_{max}/CoP_{0\ max}$yang didapat pada penelitian **Bagas (2020)** berbeda dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh **Rizky (2020)**. Dimana hasil yang didapatkan penelitian yang dilakukan oleh **Rizky (2020)** memiliki nilai CoP_{max} dan CoP_{0max} yang lebih tinggi daripada penelitian yang dilakukan oleh **Bagas (2020)** untuk semua kecepatan. Terdapat selisih nilai CoP_{0max} sebesar 0.0859 untuk kecepatan 5 m/s atau terjadi penurunan nilai CoP_{0max} sebesar 56,51% dan selisih nilai CoP_{0max} sebesar 0.0243 untuk kecepatan 7 m/s atau terjadi penurunan nilai CoP_{0max} sebesar 23,37%.Selanjutnya terdapat selisih nilai CoP_{max} sebesar 0,1047 atau terjadi penurunan nilai CoP_{max} sebesar 47,61% untuk kecepatan 5 m/s dan selisih nilai CoP_{max} sebesar 0.0586 atau terjadi penurunan nilai CoP_{max} sebesar 40,19% untuk kecepatan 7 m/s. Hal ini disebabkan karena adanya faktor perbedaan padavariasi jarak penempatan silinder pengganggu (S/D) yang digunakan serta penggunaan alat uji yang sama secara berulang yang menyebabkan *losses* yang lebih besar pada penelitian yang dilakukan oleh **Bagas (2020)**.

4.5 Analisa Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* (CoP*max*) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP$_0$*max*) Terhadap Variasi Kecepatan Angin 5 m/sdan 7 m/s

Pada subbab ini dianalisa pengaruh penggunaan silinder pengganggu berukuran d/D = 0,5 pada posisi y/D = 0,5 di depan *returning blade* dengan variasi rasio jarak S/D = 1,2; 1.4; 1.6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; dan 2,6; pada kecepatan angin 3,8 - 9 m/s untuk mengetahu perbandingan *Coefficient of Power* optimum dengan dan tanpa penganggu ($CoP_{max}/CoP_{0\ max}$) dari turbin Savonius. Adapun hasil penelitian diperoleh nilai *Coefficient of Power* terhadap variasi jarak S/Dditunjukkan pada gambar 4.27. Dimana pada penelitian ini dilakukan oleh delapan mahasiswa dengan variasi S/D yang berbeda – beda yaitu S/D = 1,2 yang dilakukan oleh Bagas Ramadhan Ananto (2020), S/D = 1.4 oleh Suksmatatya Paramesti (2020), S/D = 1.6 oleh Festy Merbasari (2020), S/D = 1.8 oleh Elza Lisdarina (2020), S/D = 2.0 oleh Vega Nabila (2020), S/D = 2.2 oleh Dionisius Jeremia (2020), S/D = 2.4 oleh Michael Lawrence (2020), dan S/D = 2.6 oleh Afiyah Shuhufam (2020. Sehingga akan dilakukan analisa performa turbin angin Savonius pada variasi S/D tersebut. Data yang akan dianalisa meliputi perbandingan nilai (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi S/D di kecepatan angin 3,8 - 9 m/ di d/D = 0,5



Gambar 4.27 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP_{max}/CoP_{0max}) terhadap variasi S/D di kecepatan = 3,8 s.d 9 pada d/D = 0,5

Berdasarkan gambar 4.27 didapatkan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terhadap S/D pada kecepatan angin 3,8 - 9 m/s dengan S/D = 1,2 – 2.6. Dapat dilihat bahwa pada S/D 1.2 - 2.6, nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang didapatkan memiliki nilai lebih dari 1 (CoP_{max}/CoP_{0max}> 1). Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu pada seluruh variasi kecepatan angin dengan S/D 1.2 - 2.6 mampu meningkatkan performa dari turbin angin.Pada setiap variasikecepatan mempunyai nilai CoP_{max}/CoP_{0max} maksimum pada S/D = 1,6. Pada kecepatan 3,8 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 127,68% dari 0,0323 menjadi 0,0884, pada kecepatan 4,4 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 111,4% dari 0,0445 menjadi 0,0941, pada kecepatan 5 m/s didapatkan CoP maksimum

meningkat sebesar 85,32% dari 0,0646 menjadi 0,1255, pada kecepatan 6 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 55,38% dari 0,0724 menjadi 0,0941, pada kecepatan 7 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 23,71% dari 0,0797 menjadi 0,0884, pada kecepatan 8 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 28,03% dari 0,066 menjadi 0,0845, dan pada kecepatan 9 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 21,02% dari 0,0623 menjadi 0,0754. Kemudian didapatkan bahwa kenaikan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} kurang efektif ketika silinder pengganggu diletakkan pada jarak S/D 2.2 - 2.6, dimana nilai CoP_{max}/CoP_{0max} cenderung mendekati 1.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk semakin jauh jarak pusat *returning blade* turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) akan berpengaruh terhadap nilai selisih gaya *drag* pada kedua sudu Savonius. Hal ini dikarenakan semakin dekat posisi jarak silinder pengganggu dengan *returning blade* akan berpengaruh terhadap kurang efektifnya mempengaruhi *boundary layer* pada *returning blade*. Sedangkan semakin jauh posisi jarak dari silinder pengganggu dengan *returning blade* akan menjadi tidak efektif dalam menurunkan *drag* pada sudu *returning blade* karena akan seperti dua buah *bluff body* yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan dari penelitian mengenai pengaruh penggunaan silinder pengganggu berdiameter 167 mm (d/D = 0,5), di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak S/D = 1,2 dengan variasi kecepatan angin 3,8, 4,4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s terhadap performa turbin didapatkan beberapa kesimpulan diantarannya adalah:

1. Penggunaan silinder pengganggu d/D = 0,5 didepan *returning blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukan dengan meningkatnnya nilai *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius.
2. Penggunaan silinder pengganggu d/D = 0,5 didepan *returning blade* turbin dengan posisi y/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* maksimum untuk semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 74,28% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
3. Penggunaan silinder pengganggu d/D = 0,5 didepan *returning blade* turbin dengan posisi y/D = 0,5 dan jarak S/D = 1,2 pada seluruh variasi kecepatan angin efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* maksimum untuk semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 73,24% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
4. Penggunaan silinder pengganggu d/D = 0,5 didepan *returning blade* turbin dengan posisi y/D = 0,5 dan jarak

S/D = 1,2 untuk semua variasi kecepatan angin efektif meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* pada semua posisi angular sudu. Namun belum mampu menmbuat turbin angin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu. Hal ini ditandai dengan adanya *Static Torque Coefficient* yang bernilai negatif pada beberapa posisi angular sudu.

5.2 Saran

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

1. Perlu dilakukan penelitian secara simulasi untuk mengetahui pengaruh silinder pengganggu pada performa turbin angin Savonius
2. Menggunakan neraca pegas pengukuran dengan kemampuan menerima beban yang lebih tinggi
3. Menempatkan sensor cahaya *tachometer* pada poros turbin
4. Dalam melakukan *setting* alat terutama *voltage regulator* yang harus dilakukan dengan lebih teliti dan hati-hati.
5. Pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* sebaiknya lebih diperhatikan karena seringnya terjadi *slip* pada benang dan poros turbin.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Shemmeri, T. 2011. *Wind Turbine: First Edition*. ISBN 978-87-7681-692-6.

Altan, B. D., Atilgan, M. & Ozdamar, A. 2008. "*An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining*". Experimental Thermal and Fluid Science. 32: 1673-1678.

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014 "Pengembangan Energi untuk Mendukung Program Subtitusi BBM"*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2017. *Outlook Energi Indonesia 2017 "Insiatif Pengembangan Teknologi Bersih"*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).

Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). 2018. *Outlook Energi Indonesia 2018 "Energi Berkelanjutan untuk Transportasi Darat"*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).

Badan Pusat Statistik. 2015. "*Proyeksi Penduduk Indonesia 2015-2045 Hasil SUPAS 2015"*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Mahmoud, N.H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., and M.H. Nasef. 2010. "*An Experimental Study On Improvement of Savonius Rotor Performance*". Alexandria Engineering Journal, pp.20-22.

Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., and D. Thévenin. 2010. "*Optimal Blade Shape of A Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning blade*". Renewable Energy 52, pp.236-242.

Munson, Okiishi, Huebsh and Rothamayer. 2013. *"Fundamentals of Fluid Mechanics". 7th.* USA: John Wiley & Sons,Inc.

Pritchard, Philip J. and John C. Leylegian. 2011. "*Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics".8th*. USA: John Wiley & Sons,Inc.

Putro, A.H.2017."Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi *Returning blade* Terhadap Performa Turbin Angin Savonius".Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Syafardinah,S.G.P.2018.”Studi Eksperimental Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Gunawan, S., Yuwono, T., and Aries Widodo, W. 2019. "*Experimental andNumerical Investgation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind TurbinePerformance*. Vol 19, No:05

Tsutsui, T. & Igarashi, T., 2002. "*Drag Reduction of a Circular Cylinder in an Air-Stream*".Wind Engineering and Industrial Aerodynamic. 90: 527-541.

LAMPIRAN

A. DATA PUTARAN, *COEFFICIENT OF POWER*, *COEFFICIENT OF MOMENT* DAN TORSI STATIS TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGGANGGU

Tabel A.1 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada
Kecepatan Angin 3,8 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	3,8	189,203	19,803	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,805	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	3,8	173,387	18,148	24	50	0,01269	0,092	1,17	0,738	0,0032	0,0199	0,0270
28,5	3,8	157,671	16,503	30,2	70	0,01269	0,092	1,17	0,671	0,0050	0,0277	0,0413
28,5	3,8	136,415	14,278	36,4	90	0,01269	0,092	1,17	0,581	0,0067	0,0323	0,0556
28,5	3,8	107,805	11,284	39,5	100	0,01269	0,092	1,17	0,459	0,0075	0,0288	0,0627
28,5	3,8	73,9563	7,741	45,7	120	0,01269	0,092	1,17	0,315	0,0092	0,0242	0,0770
28,5	3,8	52,5994	5,505	48,8	130	0,01269	0,092	1,17	0,224	0,0101	0,0188	0,0842
28,5	3,8	41,1151	4,303	51,9	140	0,01269	0,092	1,17	0,175	0,0110	0,0160	0,0913
28,5	3,8	0	0,000	55	150	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0118	0,0000	0,0985

Tabel A.2 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	4,4	226,174	23,673	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,831	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	4,4	204,314	21,385	19	70	0,01269	0,092	1,17	0,751	0,0063	0,0296	0,0394
28,5	4,4	193,635	20,267	25,2	90	0,01269	0,092	1,17	0,712	0,0081	0,0357	0,0501
28,5	4,4	179,33	18,770	31,4	110	0,01269	0,092	1,17	0,659	0,0098	0,0401	0,0608
28,5	4,4	162,91	17,051	43,8	140	0,01269	0,092	1,17	0,599	0,0120	0,0445	0,0744
28,5	4,4	147,497	15,438	56,2	160	0,01269	0,092	1,17	0,542	0,0129	0,0435	0,0803
28,5	4,4	134,703	14,099	68,6	180	0,01269	0,092	1,17	0,495	0,0139	0,0426	0,0861
28,5	4,4	118,383	12,391	81	200	0,01269	0,092	1,17	0,435	0,0148	0,0400	0,0920
28,5	4,4	101,559	10,630	93,4	220	0,01269	0,092	1,17	0,373	0,0158	0,0365	0,0979
28,5	4,4	85,4407	8,943	105,8	240	0,01269	0,092	1,17	0,314	0,0167	0,0326	0,1038
28,5	4,4	78,1874	8,184	118,2	260	0,01269	0,092	1,17	0,287	0,0177	0,0315	0,1097
28,5	4,4	65,3934	6,845	130,6	280	0,01269	0,092	1,17	0,240	0,0186	0,0278	0,1155
28,5	4,4	57,1327	5,980	143	300	0,01269	0,092	1,17	0,210	0,0195	0,0255	0,1214

28,5	4,4	48,1669	5,041	155,4	320	0,01269	0,092	1,17	0,177	0,0205	0,0225	0,1273
28,5	4,4	33,4588	3,502	180,2	350	0,01269	0,092	1,17	0,123	0,0211	0,0161	0,1313
28,5	4,4	0	0,000	192,6	360	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0208	0,0000	0,1295

Tabel A.3 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada
Kecepatan Angin 5 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	5	252	26,376	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,815	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	5	241,4	25,267	19	80	0,01269	0,092	1,17	0,781	0,0076	0,0285	0,0365
28,5	5	222,4	23,278	31,4	130	0,01269	0,092	1,17	0,719	0,0123	0,0425	0,0590
28,5	5	211,2	22,106	43,8	170	0,01269	0,092	1,17	0,683	0,0157	0,0516	0,0756
28,5	5	207,4	21,708	50	190	0,01269	0,092	1,17	0,671	0,0174	0,0562	0,0838
28,5	5	199,4	20,871	56,2	210	0,01269	0,092	1,17	0,645	0,0191	0,0594	0,0921
28,5	5	194,4	20,347	62,4	230	0,01269	0,092	1,17	0,629	0,0209	0,0631	0,1004
28,5	5	188	19,677	68,6	250	0,01269	0,092	1,17	0,608	0,0226	0,0661	0,1086
28,5	5	172,8	18,086	81	270	0,01269	0,092	1,17	0,559	0,0235	0,0633	0,1132

28,5	5	162,4	16,998	93,4	290	0,01269	0,092	1,17	0,525	0,0245	0,0618	0,1177
28,5	5	152,8	15,993	105,8	310	0,01269	0,092	1,17	0,494	0,0254	0,0604	0,1223
28,5	5	143,8	15,051	118,2	330	0,01269	0,092	1,17	0,465	0,0264	0,0590	0,1268
28,5	5	139,6	14,611	130,6	340	0,01269	0,092	1,17	0,451	0,0261	0,0566	0,1254
28,5	5	131,8	13,795	143	360	0,01269	0,092	1,17	0,426	0,0270	0,0554	0,1300
28,5	5	122	12,769	155,4	370	0,01269	0,092	1,17	0,395	0,0267	0,0507	0,1285
28,5	5	102	10,676	167,8	380	0,01269	0,092	1,17	0,330	0,0264	0,0419	0,1271
28,5	5	89,6	9,378	180,2	390	0,01269	0,092	1,17	0,290	0,0261	0,0364	0,1256
28,5	5	81,8	8,562	192,6	400	0,01269	0,092	1,17	0,265	0,0258	0,0329	0,1242
28,5	5	71,2	7,452	205	410	0,01269	0,092	1,17	0,230	0,0255	0,0283	0,1228
28,5	5	49,2	5,150	217,4	440	0,01269	0,092	1,17	0,159	0,0277	0,0212	0,1333
28,5	5	0	0,000	229,8	460	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0287	0,0000	0,1378

Tabel A.4 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	6	424,431	44,424	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,144	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	6	368,621	38,582	19	100	0,01269	0,092	1,17	0,993	0,0101	0,0335	0,0337
28,5	6	343,738	35,978	31,4	140	0,01269	0,092	1,17	0,926	0,0135	0,0418	0,0452
28,5	6	330,138	34,554	43,8	170	0,01269	0,092	1,17	0,890	0,0157	0,0467	0,0525
28,5	6	318,755	33,363	56,2	200	0,01269	0,092	1,17	0,859	0,0179	0,0514	0,0598
28,5	6	310,595	32,509	68,6	230	0,01269	0,092	1,17	0,837	0,0201	0,0562	0,0671
28,5	6	300,017	31,402	93,4	270	0,01269	0,092	1,17	0,809	0,0220	0,0594	0,0734
28,5	6	282,488	29,567	105,8	310	0,01269	0,092	1,17	0,761	0,0254	0,0647	0,0849
28,5	6	272,213	28,492	118,2	340	0,01269	0,092	1,17	0,734	0,0276	0,0677	0,0922
28,5	6	248,136	25,972	124,4	380	0,01269	0,092	1,17	0,669	0,0318	0,0711	0,1063
28,5	6	222,246	23,262	149,2	440	0,01269	0,092	1,17	0,599	0,0362	0,0724	0,1209
28,5	6	202,4	21,185	174	470	0,01269	0,092	1,17	0,546	0,0368	0,0671	0,1231
28,5	6	182,655	19,118	198,8	500	0,01269	0,092	1,17	0,492	0,0375	0,0617	0,1253
28,5	6	122,009	12,770	223,6	530	0,01269	0,092	1,17	0,329	0,0381	0,0419	0,1274

28,5	6	105,286	11,020	248,4	560	0,01269	0,092	1,17	0,284	0,0388	0,0368	0,1296
28,5	6	93,8021	9,818	294,9	610	0,01269	0,092	1,17	0,253	0,0392	0,0331	0,1310
28,5	6	84,131	8,806	325,9	640	0,01269	0,092	1,17	0,227	0,0391	0,0296	0,1306
28,5	6	61,8675	6,475	356,9	680	0,01269	0,092	1,17	0,167	0,0402	0,0224	0,1344
28,5	6	44,9432	4,704	387,9	720	0,01269	0,092	1,17	0,121	0,0413	0,0167	0,1381
28,5	6	0	0,000	418,9	740	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0400	0,0000	0,1335

Tabel A.5 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	7	472,786	49,485	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,092	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	7	389,776	40,797	19	180	0,01269	0,092	1,17	0,900	0,0200	0,0443	0,0492
28,5	7	376,378	39,394	31,4	230	0,01269	0,092	1,17	0,869	0,0247	0,0528	0,0607
28,5	7	366,908	38,403	43,8	260	0,01269	0,092	1,17	0,848	0,0269	0,0560	0,0661
28,5	7	352,2	36,864	56,2	300	0,01269	0,092	1,17	0,814	0,0304	0,0606	0,0745
28,5	7	337,089	35,282	68,6	350	0,01269	0,092	1,17	0,779	0,0350	0,0670	0,0860
28,5	7	326,713	34,196	81	380	0,01269	0,092	1,17	0,755	0,0372	0,0690	0,0914

28,5	7	318,956	33,384	93,4	410	0,01269	0,092	1,17	0,737	0,0394	0,0713	0,0967
28,5	7	308,177	32,256	118,2	460	0,01269	0,092	1,17	0,712	0,0426	0,0743	0,1044
28,5	7	299,009	31,296	143	500	0,01269	0,092	1,17	0,691	0,0444	0,0753	0,1091
28,5	7	287,223	30,063	167,8	550	0,01269	0,092	1,17	0,664	0,0476	0,0775	0,1168
28,5	7	273,019	28,576	192,6	600	0,01269	0,092	1,17	0,631	0,0507	0,0785	0,1245
28,5	7	257,807	26,984	242,2	680	0,01269	0,092	1,17	0,596	0,0545	0,0797	0,1338
28,5	7	253,777	26,562	267	710	0,01269	0,092	1,17	0,586	0,0551	0,0794	0,1354
28,5	7	235,946	24,696	291,8	740	0,01269	0,092	1,17	0,545	0,0558	0,0746	0,1369
28,5	7	228,189	23,884	316,6	770	0,01269	0,092	1,17	0,527	0,0564	0,0730	0,1385
28,5	7	211,466	22,133	341,4	800	0,01269	0,092	1,17	0,489	0,0571	0,0685	0,1401
28,5	7	199,075	20,837	366,2	830	0,01269	0,092	1,17	0,460	0,0577	0,0652	0,1417
28,5	7	186,281	19,497	391	860	0,01269	0,092	1,17	0,430	0,0584	0,0617	0,1433
28,5	7	176,006	18,422	415,8	890	0,01269	0,092	1,17	0,407	0,0590	0,0589	0,1449
28,5	7	155,656	16,292	440,6	920	0,01269	0,092	1,17	0,360	0,0597	0,0527	0,1465
28,5	7	148,705	15,564	465,4	950	0,01269	0,092	1,17	0,344	0,0603	0,0509	0,1481
28,5	7	138,329	14,478	490,2	980	0,01269	0,092	1,17	0,320	0,0610	0,0478	0,1497
28,5	7	129,263	13,529	515	1010	0,01269	0,092	1,17	0,299	0,0616	0,0452	0,1512

28,5	7	87,1532	9,122	539,8	1040	0,01269	0,092	1,17	0,201	0,0623	0,0308	0,1528
28,5	7	68,3149	7,150	564,6	1070	0,01269	0,092	1,17	0,158	0,0629	0,0244	0,1544
28,5	7	61,3638	6,423	589,4	1110	0,01269	0,092	1,17	0,142	0,0648	0,0225	0,1591
28,5	7	54,4127	5,695	614,2	1140	0,01269	0,092	1,17	0,126	0,0655	0,0202	0,1607
28,5	7	0	0,000	639	1170	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0661	0,0000	0,1622

Tabel A.6 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	8	485,177	50,782	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,981	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	8	414,558	43,390	19	200	0,01269	0,092	1,17	0,838	0,0225	0,0355	0,0423
28,5	8	396,425	41,492	43,8	260	0,01269	0,092	1,17	0,801	0,0269	0,0405	0,0506
28,5	8	376,982	39,457	68,6	330	0,01269	0,092	1,17	0,762	0,0325	0,0466	0,0611
28,5	8	355,323	37,190	93,4	410	0,01269	0,092	1,17	0,718	0,0394	0,0532	0,0741
28,5	8	334,369	34,997	143	510	0,01269	0,092	1,17	0,676	0,0457	0,0580	0,0859
28,5	8	318,452	33,331	192,6	600	0,01269	0,092	1,17	0,644	0,0507	0,0613	0,0953
28,5	8	311,3	32,583	217,4	650	0,01269	0,092	1,17	0,629	0,0539	0,0637	0,1012

28,5	8	305,356	31,961	242,2	690	0,01269	0,092	1,17	0,617	0,0557	0,0647	0,1048
28,5	8	294,879	30,864	267	740	0,01269	0,092	1,17	0,596	0,0589	0,0660	0,1106
28,5	8	283,193	29,641	291,8	780	0,01269	0,092	1,17	0,572	0,0608	0,0654	0,1142
28,5	8	274,127	28,692	316,6	810	0,01269	0,092	1,17	0,554	0,0614	0,0640	0,1154
28,5	8	243,3	25,465	391	910	0,01269	0,092	1,17	0,492	0,0646	0,0597	0,1214
28,5	8	212,575	22,249	465,4	1000	0,01269	0,092	1,17	0,430	0,0666	0,0537	0,1251
28,5	8	204,112	21,364	490,2	1030	0,01269	0,092	1,17	0,413	0,0672	0,0521	0,1263
28,5	8	194,542	20,362	515	1060	0,01269	0,092	1,17	0,393	0,0678	0,0501	0,1275
28,5	8	173,689	18,179	614,2	1160	0,01269	0,092	1,17	0,351	0,0679	0,0448	0,1277
28,5	8	161,399	16,893	663,8	1220	0,01269	0,092	1,17	0,326	0,0692	0,0424	0,1301
28,5	8	144,575	15,132	763	1320	0,01269	0,092	1,17	0,292	0,0693	0,0381	0,1303
28,5	8	130,975	13,709	862,2	1420	0,01269	0,092	1,17	0,265	0,0694	0,0345	0,1305
28,5	8	113,849	11,916	986,2	1550	0,01269	0,092	1,17	0,230	0,0702	0,0304	0,1319
28,5	8	99,0406	10,366	1110,2	1680	0,01269	0,092	1,17	0,200	0,0709	0,0267	0,1333
28,5	8	88,3621	9,249	1172,2	1810	0,01269	0,092	1,17	0,179	0,0794	0,0266	0,1492
28,5	8	0	0,000	1239,2	1900	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0823	0,0000	0,1545

Tabel A.7 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada
Kecepatan Angin 9 m/s

T (°C)	V (m/s)	n_0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP_0	CM_0
28,5	9	606,166	63,445	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,089	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	9	591,256	61,885	24	70	0,01269	0,092	1,17	1,062	0,0057	0,0090	0,0085
28,5	9	558,415	58,447	39,5	140	0,01269	0,092	1,17	1,003	0,0125	0,0186	0,0186
28,5	9	543,002	56,834	55	190	0,01269	0,092	1,17	0,976	0,0168	0,0243	0,0250
28,5	9	532,424	55,727	70,5	230	0,01269	0,092	1,17	0,957	0,0199	0,0282	0,0295
28,5	9	518,522	54,272	86	270	0,01269	0,092	1,17	0,932	0,0229	0,0317	0,0340
28,5	9	500,087	52,342	101,5	320	0,01269	0,092	1,17	0,899	0,0272	0,0363	0,0404
28,5	9	454,048	47,524	132,5	440	0,01269	0,092	1,17	0,816	0,0383	0,0464	0,0568
28,5	9	437,325	45,773	163,5	500	0,01269	0,092	1,17	0,786	0,0419	0,0489	0,0622
28,5	9	412,946	43,222	225,5	600	0,01269	0,092	1,17	0,742	0,0466	0,0514	0,0692
28,5	9	395,518	41,398	256,5	660	0,01269	0,092	1,17	0,711	0,0502	0,0530	0,0746
28,5	9	374,363	39,183	287,5	740	0,01269	0,092	1,17	0,673	0,0563	0,0563	0,0836

28,5	9	357,942	37,465	318,5	810	0,01269	0,092	1,17	0,643	0,0612	0,0584	0,0908
28,5	9	329,433	34,481	380,5	950	0,01269	0,092	1,17	0,592	0,0709	0,0623	0,1053
28,5	9	309,587	32,403	411,5	1000	0,01269	0,092	1,17	0,556	0,0733	0,0605	0,1088
28,5	9	292,058	30,569	442,5	1050	0,01269	0,092	1,17	0,525	0,0756	0,0589	0,1123
28,5	9	246,927	25,845	566,5	1250	0,01269	0,092	1,17	0,444	0,0851	0,0560	0,1263
28,5	9	225,167	23,567	659,5	1370	0,01269	0,092	1,17	0,405	0,0884	0,0531	0,1313
28,5	9	183,763	19,234	752,5	1490	0,01269	0,092	1,17	0,330	0,0918	0,0450	0,1363
28,5	9	86,7503	9,080	783,5	1550	0,01269	0,092	1,17	0,156	0,0959	0,0222	0,1424
28,5	9	0	0,000	814,5	1600	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0978	0,0000	0,1451

Tabel A.8 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 3,8 – 9 m/s

Sudut	Ts_0 (N.cm)						
	3,8 m/s	4,4 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

B. DATA PUTARAN, *COEFFICIENT OF POWER*, *COEFFICIENT OF MOMENT* DAN TORSI STATIS TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU

Tabel B.1 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 3,8 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	3,8	199	20,837	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,847	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	3,8	146,791	15,364	24	80	0,01269	0,092	1,17	0,625	0,0070	0,0363	0,0581
28,5	3,8	117,879	12,338	27,1	110	0,01269	0,092	1,17	0,502	0,0103	0,0431	0,0859
28,5	3,8	109	11,409	30,2	120	0,01269	0,092	1,17	0,464	0,0112	0,0432	0,0931
28,5	3,8	103,675	10,851	36,4	130	0,01269	0,092	1,17	0,441	0,0117	0,0428	0,0970
28,5	3,8	92,5932	9,691	42,6	140	0,01269	0,092	1,17	0,394	0,0121	0,0398	0,1010
28,5	3,8	81,3102	8,510	48,8	150	0,01269	0,092	1,17	0,346	0,0126	0,0363	0,1049
28,5	3,8	68,4156	7,161	55	160	0,01269	0,092	1,17	0,291	0,0131	0,0317	0,1089
28,5	3,8	61,3638	6,423	61,2	170	0,01269	0,092	1,17	0,261	0,0135	0,0295	0,1128
28,5	3,8	54,312	5,685	67,4	180	0,01269	0,092	1,17	0,231	0,0140	0,0270	0,1167
28,5	3,8	48,5698	5,084	73,6	190	0,01269	0,092	1,17	0,207	0,0145	0,0249	0,1207

28,5	3,8	36,5818	3,829	98,4	220	0,01269	0,092	1,17	0,156	0,0151	0,0196	0,1261
28,5	3,8	0	0,000	110,8	240	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0161	0,0000	0,1340

Tabel B.2 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4,4 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	4,4	245,416	25,687	0	0	0,01269	0,092	1,17	0,902	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	4,4	208,243	21,796	24	100	0,01269	0,092	1,17	0,765	0,0095	0,0450	0,0588
28,5	4,4	196,557	20,573	36,4	130	0,01269	0,092	1,17	0,722	0,0117	0,0523	0,0724
28,5	4,4	189,707	19,856	48,8	150	0,01269	0,092	1,17	0,697	0,0126	0,0546	0,0783
28,5	4,4	172,077	18,011	61,2	180	0,01269	0,092	1,17	0,632	0,0148	0,0581	0,0919
28,5	4,4	164,421	17,209	73,6	200	0,01269	0,092	1,17	0,604	0,0157	0,0591	0,0977
28,5	4,4	148,101	15,501	86	230	0,01269	0,092	1,17	0,544	0,0179	0,0606	0,1114
28,5	4,4	136,818	14,320	98,4	250	0,01269	0,092	1,17	0,503	0,0189	0,0589	0,1172
28,5	4,4	126,442	13,234	110,8	270	0,01269	0,092	1,17	0,465	0,0198	0,0572	0,1231
28,5	4,4	111,835	11,705	123,2	290	0,01269	0,092	1,17	0,411	0,0208	0,0530	0,1290
28,5	4,4	89,7725	9,396	135,6	310	0,01269	0,092	1,17	0,330	0,0217	0,0445	0,1349

28,5	4,4	71,5385	7,488	148	330	0,01269	0,092	1,17	0,263	0,0227	0,0370	0,1407
28,5	4,4	53,5061	5,600	160,4	350	0,01269	0,092	1,17	0,197	0,0236	0,0288	0,1466
28,5	4,4	0	0,000	172,8	360	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0233	0,0000	0,1488

Tabel B.3 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	5	359,353	37,612	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,162	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	5	322,683	33,774	24	120	0,01269	0,092	1,17	1,044	0,0120	0,0600	0,0575
28,5	5	313,214	32,783	36,4	150	0,01269	0,092	1,17	1,013	0,0141	0,0689	0,0680
28,5	5	297,498	31,138	48,8	190	0,01269	0,092	1,17	0,962	0,0176	0,0814	0,0846
28,5	5	284,604	29,789	61,2	220	0,01269	0,092	1,17	0,920	0,0198	0,0875	0,0951
28,5	5	274,933	28,776	73,6	250	0,01269	0,092	1,17	0,889	0,0220	0,0939	0,1056
28,5	5	264,758	27,711	86	280	0,01269	0,092	1,17	0,856	0,0242	0,0995	0,1162
28,5	5	252,468	26,425	98,4	310	0,01269	0,092	1,17	0,817	0,0263	0,1035	0,1267
28,5	5	233,73	24,464	110,8	350	0,01269	0,092	1,17	0,756	0,0298	0,1083	0,1432
28,5	5	222,246	23,262	123,2	380	0,01269	0,092	1,17	0,719	0,0320	0,1105	0,1538

28,5	5	203,407	21,290	148	440	0,01269	0,092	1,17	0,658	0,0364	0,1150	0,1749
28,5	5	185,313	19,396	179	500	0,01269	0,092	1,17	0,599	0,0400	0,1152	0,1922
28,5	5	148,101	15,501	210	580	0,01269	0,092	1,17	0,479	0,0461	0,1061	0,2216
28,5	5	69,7252	7,298	225,5	600	0,01269	0,092	1,17	0,226	0,0466	0,0506	0,2226
28,5	5	43,9358	4,599	287,5	660	0,01269	0,092	1,17	0,142	0,0470	0,0317	0,2231
28,5	5	32,4514	3,397	318,5	700	0,01269	0,092	1,17	0,105	0,0475	0,0240	0,2285
28,5	5	0	0,000	349,5	740	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0486	0,0000	0,2338

Tabel B.4 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	6	434	45,425	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,170	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	6	380	39,773	24	90	0,01269	0,092	1,17	1,024	0,0082	0,0281	0,0274
28,5	6	346,866	36,305	55	170	0,01269	0,092	1,17	0,935	0,0143	0,0447	0,0478
28,5	6	337,19	35,293	86	220	0,01269	0,092	1,17	0,909	0,0167	0,0506	0,0557
28,5	6	318,553	33,342	117	290	0,01269	0,092	1,17	0,859	0,0215	0,0618	0,0719
28,5	6	308,076	32,245	148	340	0,01269	0,092	1,17	0,830	0,0239	0,0663	0,0798

28,5	6	293,267	30,695	179	400	0,01269	0,092	1,17	0,790	0,0275	0,0726	0,0919
28,5	6	284,201	29,746	210	450	0,01269	0,092	1,17	0,766	0,0299	0,0765	0,0998
28,5	6	275,638	28,850	241	500	0,01269	0,092	1,17	0,743	0,0322	0,0800	0,1077
28,5	6	252,468	26,425	272	580	0,01269	0,092	1,17	0,680	0,0383	0,0872	0,1281
28,5	6	239,976	25,117	303	640	0,01269	0,092	1,17	0,647	0,0420	0,0906	0,1401
28,5	6	223,253	23,367	334	710	0,01269	0,092	1,17	0,602	0,0468	0,0941	0,1564
28,5	6	199,478	20,879	396	800	0,01269	0,092	1,17	0,538	0,0503	0,0903	0,1680
28,5	6	182,353	19,086	458	880	0,01269	0,092	1,17	0,491	0,0525	0,0863	0,1755
28,5	6	162,91	17,051	520	960	0,01269	0,092	1,17	0,439	0,0548	0,0803	0,1830
28,5	6	152,836	15,997	582	1030	0,01269	0,092	1,17	0,412	0,0558	0,0767	0,1863
28,5	6	136,818	14,320	644	1100	0,01269	0,092	1,17	0,369	0,0568	0,0699	0,1896
28,5	6	116,872	12,233	706	1168	0,01269	0,092	1,17	0,315	0,0575	0,0605	0,1921
28,5	6	91,888	9,618	768	1250	0,01269	0,092	1,17	0,248	0,0600	0,0496	0,2004
28,5	6	76,4748	8,004	830	1320	0,01269	0,092	1,17	0,206	0,0610	0,0420	0,2038
28,5	6	61,1623	6,402	892	1400	0,01269	0,092	1,17	0,165	0,0632	0,0348	0,2113
28,5	6	51,1891	5,358	954	1470	0,01269	0,092	1,17	0,138	0,0642	0,0296	0,2146
28,5	6	36,0781	3,776	1016	1540	0,01269	0,092	1,17	0,097	0,0652	0,0212	0,2179

28,5	6	0	0,000	1264	1820	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0692	0,0000	0,2312

Tabel B.5 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	7	473,774	49,588	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,094	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	7	429,266	44,930	24	130	0,01269	0,092	1,17	0,992	0,0132	0,0321	0,0324
28,5	7	394,209	41,261	55	230	0,01269	0,092	1,17	0,911	0,0218	0,0487	0,0535
28,5	7	363,987	38,097	86	320	0,01269	0,092	1,17	0,841	0,0291	0,0601	0,0715
28,5	7	350,991	36,737	117	380	0,01269	0,092	1,17	0,811	0,0327	0,0652	0,0804
28,5	7	333,463	34,902	148	440	0,01269	0,092	1,17	0,770	0,0364	0,0687	0,0892
28,5	7	319,56	33,447	179	500	0,01269	0,092	1,17	0,738	0,0400	0,0724	0,0981
28,5	7	309,083	32,351	210	560	0,01269	0,092	1,17	0,714	0,0436	0,0764	0,1069
28,5	7	298,405	31,233	241	620	0,01269	0,092	1,17	0,689	0,0472	0,0798	0,1158
28,5	7	288,935	30,242	272	670	0,01269	0,092	1,17	0,667	0,0495	0,0812	0,1216
28,5	7	279,567	29,261	303	720	0,01269	0,092	1,17	0,646	0,0519	0,0823	0,1274
28,5	7	271,104	28,376	334	780	0,01269	0,092	1,17	0,626	0,0555	0,0853	0,1363

28,5	7	263,75	27,606	365	830	0,01269	0,092	1,17	0,609	0,0579	0,0866	0,1421
28,5	7	250,05	26,172	396	890	0,01269	0,092	1,17	0,578	0,0615	0,0872	0,1509
28,5	7	238,263	24,938	380,5	890	0,01269	0,092	1,17	0,550	0,0634	0,0857	0,1557
28,5	7	232,823	24,369	411,5	920	0,01269	0,092	1,17	0,538	0,0633	0,0836	0,1554
28,5	7	222,951	23,336	442,5	960	0,01269	0,092	1,17	0,515	0,0644	0,0814	0,1581
28,5	7	213,783	22,376	473,5	990	0,01269	0,092	1,17	0,494	0,0643	0,0779	0,1578
28,5	7	202,299	21,174	504,5	1030	0,01269	0,092	1,17	0,467	0,0654	0,0750	0,1606
28,5	7	178,424	18,675	535,5	1070	0,01269	0,092	1,17	0,412	0,0665	0,0673	0,1633
28,5	7	162,507	17,009	566,5	1110	0,01269	0,092	1,17	0,375	0,0677	0,0623	0,1661
28,5	7	147,698	15,459	597,5	1150	0,01269	0,092	1,17	0,341	0,0688	0,0576	0,1688
28,5	7	134,098	14,036	628,5	1190	0,01269	0,092	1,17	0,310	0,0699	0,0531	0,1716
28,5	7	124,427	13,023	659,5	1230	0,01269	0,092	1,17	0,287	0,0710	0,0501	0,1743
28,5	7	108,913	11,400	690,5	1270	0,01269	0,092	1,17	0,252	0,0721	0,0445	0,1771
28,5	7	87,6569	9,175	752,5	1360	0,01269	0,092	1,17	0,203	0,0756	0,0376	0,1856
28,5	7	70,3297	7,361	907,5	1550	0,01269	0,092	1,17	0,162	0,0800	0,0319	0,1963
28,5	7	56,5283	5,917	1062,5	1710	0,01269	0,092	1,17	0,131	0,0806	0,0258	0,1978
28,5	7	31,7462	3,323	1217,5	1870	0,01269	0,092	1,17	0,073	0,0812	0,0146	0,1994

28,5	7	0	0,000	1310,5	1950	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0796	0,0000	0,2045

Tabel B.6 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	8	532	55,683	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,075	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	8	492,4	51,538	24	160	0,01269	0,092	1,17	0,995	0,0169	0,0317	0,0318
28,5	8	451	47,205	70,5	290	0,01269	0,092	1,17	0,912	0,0273	0,0468	0,0513
28,5	8	428	44,797	117	390	0,01269	0,092	1,17	0,865	0,0340	0,0552	0,0639
28,5	8	394,2	41,260	163,5	500	0,01269	0,092	1,17	0,797	0,0419	0,0627	0,0787
28,5	8	381,4	39,920	210	570	0,01269	0,092	1,17	0,771	0,0448	0,0649	0,0842
28,5	8	365	38,203	256,5	650	0,01269	0,092	1,17	0,738	0,0490	0,0679	0,0920
28,5	8	341,8	35,775	303	750	0,01269	0,092	1,17	0,691	0,0556	0,0722	0,1046
28,5	8	331	34,645	349,5	820	0,01269	0,092	1,17	0,669	0,0586	0,0736	0,1101
28,5	8	320,8	33,577	396	880	0,01269	0,092	1,17	0,648	0,0603	0,0734	0,1132
28,5	8	312,2	32,677	442,5	950	0,01269	0,092	1,17	0,631	0,0632	0,0749	0,1187
28,5	8	292	30,563	489	1040	0,01269	0,092	1,17	0,590	0,0686	0,0761	0,1289

28,5	8	271,6	28,427	535,5	1120	0,01269	0,092	1,17	0,549	0,0728	0,0751	0,1367
28,5	8	261,8	27,402	582	1180	0,01269	0,092	1,17	0,529	0,0744	0,0740	0,1399
28,5	8	245	25,643	628,5	1240	0,01269	0,092	1,17	0,495	0,0761	0,0708	0,1430
28,5	8	232,2	24,304	675	1300	0,01269	0,092	1,17	0,469	0,0778	0,0686	0,1462
28,5	8	211,2	22,106	721,5	1370	0,01269	0,092	1,17	0,427	0,0807	0,0648	0,1517
28,5	8	192,2	20,117	768	1440	0,01269	0,092	1,17	0,389	0,0837	0,0611	0,1572
28,5	8	177	18,526	861	1560	0,01269	0,092	1,17	0,358	0,0870	0,0585	0,1635
28,5	8	160,2	16,768	954	1670	0,01269	0,092	1,17	0,324	0,0891	0,0542	0,1675
28,5	8	137	14,339	1047	1780	0,01269	0,092	1,17	0,277	0,0913	0,0475	0,1715
28,5	8	119,2	12,476	1140	1890	0,01269	0,092	1,17	0,241	0,0934	0,0423	0,1754
28,5	8	103,8	10,864	1233	2010	0,01269	0,092	1,17	0,210	0,0967	0,0381	0,1818
28,5	8	91,8	9,608	1388	2170	0,01269	0,092	1,17	0,186	0,0974	0,0339	0,1829
28,5	8	76,8	8,038	1481	2270	0,01269	0,092	1,17	0,155	0,0982	0,0287	0,1846
28,5	8	0	0,000	1767	2540	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0962	0,0000	0,1881

Tabel B.7 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s

T (°C)	V (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m2)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	9	615,8	64,454	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,106	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	9	573,324	60,008	24	130	0,01269	0,092	1,17	1,030	0,0132	0,0202	0,0196
28,5	9	550,154	57,583	55	240	0,01269	0,092	1,17	0,989	0,0230	0,0338	0,0342
28,5	9	530,107	55,485	86	320	0,01269	0,092	1,17	0,952	0,0291	0,0412	0,0433
28,5	9	518,824	54,304	117	370	0,01269	0,092	1,17	0,932	0,0315	0,0436	0,0468
28,5	9	505,023	52,859	148	440	0,01269	0,092	1,17	0,907	0,0364	0,0490	0,0540
28,5	9	469,159	49,105	303	670	0,01269	0,092	1,17	0,843	0,0457	0,0572	0,0678
28,5	9	460,294	48,177	309,2	722	0,01269	0,092	1,17	0,827	0,0514	0,0631	0,0763
28,5	9	431,583	45,172	371,2	840	0,01269	0,092	1,17	0,775	0,0584	0,0672	0,0866
28,5	9	379,803	39,753	402,2	950	0,01269	0,092	1,17	0,682	0,0682	0,0691	0,1013
28,5	9	355,323	37,190	433,2	1040	0,01269	0,092	1,17	0,638	0,0755	0,0716	0,1122
28,5	9	328,123	34,344	439,4	1050	0,01269	0,092	1,17	0,590	0,0760	0,0665	0,1129
28,5	9	303,442	31,760	445,6	1060	0,01269	0,092	1,17	0,545	0,0765	0,0619	0,1136
28,5	9	296,793	31,064	507,6	1130	0,01269	0,092	1,17	0,533	0,0775	0,0613	0,1150

28,5	9	246,121	25,761	600,6	1300	0,01269	0,092	1,17	0,442	0,0871	0,0572	0,1293
28,5	9	172,782	18,085	910,6	1620	0,01269	0,092	1,17	0,310	0,0883	0,0407	0,1311
28,5	9	102,667	10,746	1220,6	1950	0,01269	0,092	1,17	0,184	0,0908	0,0249	0,1348
28,5	9	62,5727	6,549	1530,6	2300	0,01269	0,092	1,17	0,112	0,0958	0,0160	0,1422
28,5	9	27,9181	2,922	1840,6	2650	0,01269	0,092	1,17	0,050	0,1008	0,0075	0,1496
28,5	9	0	0,000	2088,6	2950	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,1072	0,0000	0,1592

Tabel B.8 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 3,8 – 9 m/s

Sudut	Ts (N.cm)

	3,8 m/s	4,4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0,875	1	2,74	2,44	3,16	3,22	3,5
10	1,28	1,4	2,98	3,12	3,62	3,8	4,42
20	1,68	2	3,88	3,78	4,8	4,94	5,22
30	2,16	2,56	4,84	4,88	5,38	5,44	5,78
40	1,62	2,06	3,82	3,82	4,7	4,76	5,04
50	1,32	1,48	3	3,1	3,58	3,78	4,52
60	0,68	1,1	2,7	2,42	3,22	3,3	3,62
70	0,28	0,84	2,1	1,84	2,74	2,82	3,16
80	0,08	0,4	1,24	1,02	2,5	2,32	2,7
90	-0,32	0,28	0,84	0,72	2,02	1,98	2,24
100	-0,74	0,02	0,22	0,28	1,62	1,46	1,8
110	-1,1	-0,46	-0,58	-0,38	1,04	1	1,34
120	-1,54	-0,74	-1,24	-0,84	0,64	0,56	1,06
130	-1,68	-0,94	-0,92	-0,36	0,14	0,12	0,54
140	-1,94	-1,2	0,14	0,4	-0,18	-0,18	0,12
150	-2,26	-1,46	0,92	1,04	-0,72	-0,58	-0,5
160	-1,12	-0,76	1,34	1,62	0,18	0,96	1,12
170	-0,46	0,12	2,08	2,02	1,78	2,9	2,14
180	0,84	0,96	2,8	2,44	3,26	3,6	3,22

C. DATA PUTARAN, *COEFFICIENT OF POWER*, *COEFFICIENT OF MOMENT* DAN TORSI STATIS TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU

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

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

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

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

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

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

- $\frac{\partial \lambda}{\partial \omega} = Ru^{-1}$
- $\frac{\partial \lambda}{\partial R} = \omega V^{-1}$
- $\frac{\partial \lambda}{\partial V} = -V^{-2}\omega R$

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

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

$$u\lambda, V = \frac{\delta \lambda V}{\lambda} = \frac{V}{\lambda}\frac{\partial \lambda}{\partial V} u_V = -u_V$$

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

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_\omega = \pm\{[u_n]^2\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm\frac{0,1}{188} = \pm 5,3\ x10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm\frac{1}{154,5} = \pm 6,4\ x10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (V)

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

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

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

$$u_\lambda = \pm\{\ (5,3\ x10^{-4})^2 + (6,47x10^{-3})^2 + (0,002)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

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

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

- *Uncertainty* pada pembacaan Kecepatan Angin

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

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

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

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

- $\frac{\partial Re}{\partial L} = (\rho V \mu^{-1})$
- $\frac{\partial Re}{\partial \mu} = (-\mu^{-2} \rho V L)$

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

• *Uncertainty* Massa Jenis (ρ)

ρ x T = C

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

$$\frac{d\rho}{dT} = -T^{-2}$$
$$u\rho, T = \frac{\delta \rho T}{\rho} = \frac{T}{T^{-1}}\ -T^{-2}\ u_T = -u_T$$
$$u_\rho = \pm\left[(-u_T)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
$$u_\rho = u_T$$
$$u_\rho = 0{,}35\%$$

• *Uncertainty* Luas (A)

A = L x H

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

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

$$dA = H + L$$

$$U_{A,L} = \frac{\delta A,L}{A} = \frac{L}{A}\ \frac{\partial A}{\partial L}\ U_L = \frac{L}{(\text{L x H})}.\text{H.}\ U_L = \text{U}_\text{L}$$

$$U_{A,H} = \frac{\delta A,H}{A} = \frac{H}{A}\ \frac{\partial A}{\partial H}\ U_H = \frac{H}{(\text{L x H})}.\text{L.}\ U_H = \text{U}_\text{H}$$

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

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

$$U_A = \pm\ 0{,}00466$$

$$U_A = \pm\ 0{,}466\%$$

- *Uncertainty* miu (***μ***)

$$u_\mu = \pm\frac{\partial\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\text{dT}} \pm \delta\text{T}$$

$$\frac{\text{d}\mu}{\text{dT}} = \frac{\Delta\mu}{\Delta\text{T}} = \frac{\mu\ (29^\circ\ \text{C}) - \mu\ (27^\circ\ \text{C})}{29^\circ\ \text{C} - 27^\circ\ \text{C}} = \frac{(1{,}86\ \text{x}\ 10^{-5} - 1{,}85\ \text{x}\ 10^{-5})}{2^\circ\ \text{C}}$$

$$= 5\ \text{x}\ 10^{-8}\ \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2\,^\circ\text{C}}$$

$$u_\mu = \frac{1}{\mu}\frac{\partial\mu}{\text{dT}} \pm \delta\text{T}$$

$$= \frac{1}{1{,}86\ \text{x}\ 10^{-5}\ \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2}}\ .\ 5\ \text{x}\ 10^{-8}\ \frac{\text{N.s}}{\text{m}^2\,^\circ\text{C}}\ .\ (\pm 0{,}5^\circ\text{C})$$

$$\text{U}_\mu = \pm 1{,}34\text{x}10^{-2}$$

Maka:

$$u_{RE} = \pm\{\ (3{,}5\ x10^{-3})^2 + (0{,}002)^2 + (3{,}23\ \times 10^{-3})^2 + (1{,}34\text{x}10^{-2})^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{RE} = \pm\ 14{,}36x10^{-3} = 1{,}436\%$$

- *Uncertainty* Torsi Dinamis (T_D)

T_D = (s-m) x g x r

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

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

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

$U_{T_D,r} = \frac{\delta T_D,r}{T_D} = \frac{r}{T_D}\ \frac{\partial T_D}{\partial r}\ U_r = \frac{r}{\left((\mathrm{s-m})\mathrm{x}\ \mathrm{r}\right)}.(\mathrm{s}-\mathrm{m}).\ U_r = U_r$

Maka:

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

- *Uncertainty* pada pembacaan neraca pegas (s-m)

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

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

$$u_{(r)} = \pm\frac{0{,}01}{12{,}69} = \pm 0{,}00078$$

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

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

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

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

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

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

dCm= $\frac{\partial Cm}{\partial T_D} + \frac{\partial Cm}{\partial \rho} + \frac{\partial Cm}{\partial A} + \frac{\partial Cm}{\partial v} + \frac{\partial Cm}{\partial v} + \frac{\partial Cm}{\partial R}$

- $\frac{\partial Cm}{\partial T_D} = (\, 2\rho^{-1}A^{-1}V^{-2}R^{-1})$
- $\frac{\partial Cm}{\partial \rho} = (-2\, \rho^{-2}T_D A^{-1}V^{-2}R^{-1})$
- $\frac{\partial Cm}{\partial A} = (-2A^{-2}T_D \rho^{-1}V^{-2}R^{-1})$
- $\frac{\partial Cm}{\partial V} = (-4V^{-3}T_D \rho^{-1}A^{-1}R^{-1})$
- $\frac{\partial Cm}{\partial R} = (-\, 2R^{-2}T_D \rho^{-1}A^{-1}V^{-2})$

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

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

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

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

$$u_{CM} = \pm \left\{ {u_{Td}}^2 + {u_\rho}^2 + (-2u_V)^2 + (-u_A)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm \{\, (0{,}05513)^2 + (3{,}5\, x10^{-3})^2 + (-2x0{,}002)^2 + (4{,}66 \times 10^{-3})^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$u_{CM} = \pm\, 0{,}05569$ = 5,60%

- *Uncertainty* pada pembacaan *Coefficient of Power* (CoP)
  - CoP = Cm .λ

    $dCoP = \frac{\partial \mathrm{CoP}}{\partial Cm} + \frac{\partial \mathrm{CoP}}{\partial \lambda}\, \partial CoP\, \partial \mathrm{Cm} + \partial CoP \partial\, \lambda$
    - $\frac{\partial \mathrm{CoP}}{\partial Cm} = (\lambda)$
    - $\frac{\partial \mathrm{CoP}}{\partial \lambda} = (\mathrm{Cm})$
  - $u_{CoP,Cm} = \frac{\delta \mathrm{CoP}, \mathrm{Cm}}{\mathrm{CoP}} = \frac{\mathrm{Cm}}{\mathrm{CoP}} \frac{\delta \mathrm{CoP}}{\delta \mathrm{Cm}}\, u\mathrm{Cm} = u\mathrm{Cm}$
  - $u_{CoP,\lambda} = \frac{\delta \mathrm{CoP}, \mathrm{Cm}}{\lambda} = \frac{\lambda}{\mathrm{CoP}} \frac{\delta \mathrm{CoP}}{\delta \lambda} = u\lambda = u\lambda$

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

Maka:

$$u_{CoP} = \pm \{ (0{,}0559)^2 + (6{,}8x10^{-3})^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$u_{CoP} = \pm 0{,}05637 = 5{,}64\%$

(HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN)

BIODATA PENULIS

Bagas Ramadhan Ananto merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis lahir di Gresik, Jawa Timur, pada tanggal 16 Januari 1998, memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Sidokumpul Gresik kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Gresik dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Gresik. Penulis melanjutkan ke jenjang Perguruan Tinggi di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya mulai tahun 2016.

Semasa kuliah penulis aktif dalam seluruh kegiatan akademik maupun non akademik. Penulis aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan yaitu sebagai Staff Departemen Dalam Negeri BEM FTI-ITS pada periode 2017-2018, Staff Departemen Syiar Kreatif Lembaga Dakwah Jurusan (LDJ) Ash-Shaff Teknik Mesin ITS pada tahun 2017-2018, Kabiro Departemen Kesejahteraan Mahasiswa HMM FTI-ITS pada periode 2018-2019 dan Ketua Departemen Kaderisasi Lembaga Dakwah Jurusan (LDJ) Ash-Shaff Teknik Mesin ITS pada tahun 2018-2019. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan yaitu sebagai Ketua Pelaksana dalam sebuah kegiatan Pelatihan Advokasi pada tahun 2017. Prestasi yang pernah diraih oleh penulis yaitu sebagai Finalis PIMNAS 32 Universitas Udayana Bali pada tahun 2019, dan berkesempatan mendapatkan beasiswa Peningkatan Prestasi Akademik selama 2 tahun perkuliahan. Pada tahun ketiga, penulis berkesempatan untuk melakukan kerja praktek di PT. PJB UP Gresik di bagian pemeliharaan dan perawatan selama satu bulan.

Penulis dapat dihubungi melalui email berikut bagasramadhana007@gmail.com.