TUGAS AKHIR-TM184835

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

"Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D = 2,3; d/D = 0,2; Pada Variasi Kecepatan Aliran Udara 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 dan 10 (m/s).
"

Ahmad Rifqi Romadhani
02111640000064

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA - 2021

TUGAS AKHIR-TM184835

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

"Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D = 2,3; d/D = 0,2; Pada Variasi Kecepatan Aliran Udara 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 dan 10 (m/s)."

Ahmad Rifqi Romadhani
02111440000064

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA – 2021

FINAL PROJECT-TM184835

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE BY PLACING CIRCULAR CYLINDER IN FRONT OF THE RETURNING BLADE
“Case Study of Placement and Size of Disturb Cylinder S/D = 2.3; d/D = 0.2; At Air Flow Velocity Variations 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10 (m/s)”

Ahmad Rifqi Romadhani
02111640000064

Supervisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEM ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA – 2021

HALAMAN PENGESAHAN

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

"Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D = 2,3; d/D = 0,2 ; Pada Variasi Kecepatan Aliran Udara 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 dan 10 (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:

Ahmad Rifqi Romadhani
NRP 02111640000064

Disetujui Oleh Pembimbing Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA……………(Pembimbing)
   NIP. 196001291987011001

2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.…………..(Penguji 1)
   NIP. 197104051997021001

3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.………………………(Penguji 2)
   NIP. 196709151995121001

4. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., PhD.……..(Penguji 3)
   NIP. 198105292003122001

SURABAYA
MARET 2021

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

"Studi Kasus Peletakan dan Ukuran Silinder Pengganggu S/D = 2,3; d/D = 0,2 ; Pada Variasi Kecepatan Aliran Udara 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 dan 10 (m/s)."

Nama Mahasiswa : Ahmad Rifqi Romadhani
NRP : 021 1 16 4000 0064
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut. Total potensi energi terbarukan ekuivalen 442 GW digunakan untuk pembangkit listrik pemanfaatan EBT untuk pembangkit listrik tahun 2018 sebesar 8,8 GW atau 14% dari total kapasitas pembangkit listrik (fosil dan non fosil) yaitu sebesar 64,5 GW. Akibatnya perlu dilakukan penggunaan energi baru. Salah satu sumber energi yang berpotensi besar untuk dikembangkan secara optimal adalah energi angin. Energi angin di Indonesia mempunyai potensi sebesar 60,6 GW dan hanya sekitar 3.1 MW pemanfaatannya. Karakteristik angin di Indonesia memiliki rata-rata kecepatan 2 m/s sampai dengan 6 m/s. Alat yang cocok untuk kondisi ini yaitu turbin angin. Dari data kecepatan angin yang tidak terlalu besar makanya sangat cocok untuk memilih turbin angin jenis Savonius sebagai pemanfaatan energi angin di Indonesia.

Studi eksperimen yang dilakukan menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dengan dimensi yaitu diameter sudu turbin (D) sebesar 165,2 mm, tinggi (H) sebesar

294,4 mm, diameter poros (b) sebesar 19 mm, dan diameter *end plate* (Do) sebesar 321 mm. Penelitian ini menggunakan pengganggu yang berbentuk silinder. Pengganggu tersebut diletakkan di depan *returning blade.* Penelitian ini menggunakan rasio diameter pengganggu terhadap diameter sudu turbin d/D sebesar 0,2 dengan variasi jarak dari titik pusat turbin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin S/D = 2.3 dan variasi kecepatan aliran udara 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s).".

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 silinder pengganggu pada jarak S/D = 2,3, d/D = 0,2 diperoleh peningkatan CoP maksimum sebesar 28,82% dan pada kecepatan 4 m/s diperoleh peningkatan CM maksimum sebesar 19,23%. Namun penggunaan silinder pengganggu dengan ukuran d/D = 0,2, dan jarak S/D = 2,3 untuk semua variasi kecepatan belum mampu menyebabkan turbin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu.

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

EXPERIMENT STUDY OF IMPROVING THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE WITH PLACEMENT OF CIRCULAR CYLINDERS IN THE FRONT OF *RETURNING BLADE*

"Case Study of Placement and Size of Disturb Cylinder S / D = 2.3; d / D = 0.2; At Air Flow Velocity Variations 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10 (m/s)"

Student Name : Ahmad Rifqi Romadhani
Student ID : 021 1 16 4000 0064
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Indonesia has a large potential for new and renewable energy to achieve the primary energy mix target. The total potential of renewable energy is equal to 442 GW used for power plants. Utilization of EBT for power plants in 2018 is equal to 8.8 GW or 14% of the total power generation capacity (fossil and non-fossil) 64.5 GW. As a result, it is necessary to use new energy. One of the energy sources that have great potential to be developed optimally is wind energy. Wind energy in Indonesia has a potential of 60.6 GW and only about 3.1 MW is utilized. The wind characteristics in Indonesia have an average speed of 2 m / s to 6 m / s. The tool that suitable for this condition is a wind turbine. From the data, it can be seen that the average speed of the wind is not that high. Thus it is very suitable for choosing a Savonius type of wind turbine as the use of wind energy in Indonesia.

The experimental study was carried out by using the Savonius wind turbine which has two blades with dimensions of turbine blade diameter (D) of 165.2 mm, height (H) of 294.4 mm, shaft diameter (b) of 19 mm, and diameter of the end plate (Do)

of 321 mm. This study uses a cylindrical disturbance. The disturbance is placed in front of the returning blade. This study uses a ratio of disturbance diameter to turbine blade diameter d / D of 0.2 with a variation of the distance from the center of the turbine to the center of the disturbing cylinder to the turbine diameter S / D = 2.3 and airflow velocity variations of 4, 5, 6, 7. 8, 9 and 10 (m / s).

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 was obtained at the velocity of wind 5 m/s with the addition of disturbance cylinder at a distance of S/D = 2,3 and d/D = 0,5 which obtained maximum increase in CoP of 28,82%, at the velocity of wind 4 m/s which obtained a maximum increase of Cm of 19,23%. However, 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, disturbance cylinder, Savonius wind turbine performance

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, serta kepada junjungan seluruh umat Islam Nabi Besar Muhammad SAW yang telah menjadi tauladan dalam hal ikhtiar, tawakkal, dan kesabaran sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder Sirkular Didepan *Returning Blade*.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan motivasi. Oleh sebab itu penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ayah Abd Samad dan Ibu Rofiqah yang selalu memberikan doa, menyemangati serta dukungan kepada penulis selama masa perkuliahan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terimakasih atas waktu, ilmu dan motivasi yang telah diberikan kepada penulis.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T, Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng, dan Ibu Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D sebagai dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran dan kritik yang membangun kepada penulis.
4. Seluruh teman kelompok 8 Tugas Akhir Savonius yang telah berjuang bersama dan memberi bantuan serta dukungan kepada penulis.
5. Teman-teman Laboratorium Mekanika Fluida atas dukungan selama proses pengerjaan tugas akhir.

6. Teman teman Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS yang selalu memberi dukungan selama proses pengerjaan tugas akhir.
7. Teman-teman M59 selaku teman satu angkatan yang berjuang bersama penulis selama masa perkuliahan.
8. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

Penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penyusunan Tugas Akhir ini, oleh sebab itu saran dan kritik yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan penelitian selanjutnya.

Akhir kata semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca, mahasiswa Teknik Mesin FTIITS dan khususnya untuk masyarakat luas.

Surabaya, 7 Maret 2021

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK i
ABSTRACT iii
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR SIMBOL xxv
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 11
TINJAUAN PUSTAKA 11
2.1 Energi angin 11
2.2 Turbin Angin 13

2.3 Turbin Angin Savonius 16
2.4 Aliran Melintasi Silinder 17
2.5 Koefisien *Drag* 19
2.6 *Coefficient* od Power (CoP) 20
2.7 Bilangan Reynolds 23
2.8 Tip Speed Ratio(λ) 24
2.9 *Coefficient* of Moment(C_M) 25
2.10 Hasil Penelitian Terdahulu 25
2.10.1. Penelitian Silinder dengan Pengganggu 25
2.10.2. Penelitian Peningkatan Performa dari Turbin Savonius 33
BAB III 71
METODOLOGI PENELITIAN 71
3.1. Parameter yang diukur 71
3.2. Analisa Dimensi 72
3.2.1. Analisa Dimensi untuk CoP 72
3.2.2. Analisa Dimensi *Coefficient* of Moment 76
3.3. Peralatan 79
3.3.1. Turbin Angin Savonius 79
3.3.2. Silinder Pengganggu 80
3.3.3. *Axial fan* 81
3.3.4. Honeycomb 83

3.3.5. Penyangga Turbin Angin Savonius 84
3.4. Alat ukur 87
3.4.1. Anemometer 87
3.4.2. Tachometer 88
3.4.3. *Torque* Meter 89
3.4.4. *Brake* Dynamometer 91
3.4.5. Neraca Pegas 92
3.4.6. Voltage Regulator 93
3.5. Prosedur Penelitian 94
3.5.1. Torsi Dinamis 94
3.5.2. Torsi Statis 95
3.6. Flowchart Penelitian 97
3.6.1. Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis 97
3.6.2. Flowchart Pengukuran Torsi Statis 100
3.6. Uncertainty 102
BAB IV 107
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 107
4.1. Contoh Perhitungan 107
4.1.1. Perhitungan Reynolds Number 107
4.1.2. Perhitungan Tip Speed Ratio(λ) 109
4.1.3. Perhitungan Coefficient of Moment (CM) 110

4.1.4. Perhitungan Coefficient of Power (CoP) 111

4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu.. 112

4.2.1. Analisa Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_0) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) 112

4.2.2. Analisa Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CM_0) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) 115

4.2.3. Analisa Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (T_{S0}) terhadap Fungsi Sudut *Blade* Turbin Angin Savonius (θ)................................. 117

4.3. Analisa Perbandingan Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu 120

4.3.1. Analisa *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada Kecepatan Udara 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s... 121

4.3.2. Analisa *Coefficient of Moment* (CM) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada Kecepatan Udara 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s... 138

4.3.3. Analisa Torsi Statis terhadap Fungsi Sudut *Blade* Turbin Angin Savonius (θ) pada Kecepatan 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s.. 152

4.4. Perbandingan Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu...... 166
4.5. Analisa Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Maksimum antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_{max} / CoP_{0max}) pada Variasi Kecepatan Udara... 169
BAB V.. 177
KESIMPULAN DAN SARAN.. 177
DAFTAR PUSTAKA 179
LAMPIRAN.. 183
BIODATA PENULIS 195

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Model Aliran dari Teori Momentum Beltz (Hau, 2006).. 12
Gambar 2. 2 Horizontal Axis Wind Turbine (Hau,2006) .. 14
Gambar 2. 3 Tipe Turbin Angin VAWT (Hau 2006, 2010) 15
Gambar 2. 4 Turbin Angin Savonius (R. Renato, R. Roberto, M. Sergio, 2016).. 16
Gambar 2. 5 Aliran pada Suatu Silinder (a) Aliran Viscous (b) Aliran Inviscid 17
Gambar 2. 6 Pengaruh Karakteristik Aliran Setelah Diberi Silinder Pengganggu (Triyogi, 2009)................................. 18
Gambar 2. 7 Skema FBD Brake Dynamometer................. 21
Gambar 2. 8 Skema Turbin Savonius................................ 23
Gambar 2. 9 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis turbin (Al-Shemmeri, 2011)... 25
Gambar 2. 10 Skema Penelitian (Tsutsui dan Igarashi, 2002) 26
Gambar 2. 11 Grafik Re dan Cd (Tsutsui dan Igarashi, 2002) 27
Gambar 2. 12 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkular (a)Variasi Bilangan Reynolds (b)Variasi Nilai d/D. (Tsutsui dan Igarashi, 2002)... 27
Gambar 2. 13 Skema Alat Silinder Pengganggu Tipe I yang Disusun Tandem dengan Silinder Utama (Triyogi et al, 2009)... 29
Gambar 2. 14 Grafik CD/CDO Terhadap Sudut Iris Silinder Pengganggu (Triyogi et al, 2009)...................................... 30
Gambar 2. 15 Visualisasi Aliran pada Silinder Pengganggu Tipe I (Triyogi et al, 2009)... 31
Gambar 2. 16 Visualisasi Aliran pada Silinder Utama Tipe I (Triyogi et al, 2009) 32

Gambar 2. 17 Profil Kecepatan pada Aliran Melalui Silinder Pengganggu Tipe I dengan Variasi Sudut Iris Berbeda (Triyogi et al, 2009) 33
Gambar 2. 18 Skema Alat untuk Pengganggu pada Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010) 34
Gambar 2. 19 Grafik Antara Speed Ratio dan coefficient power pada Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu. (Mohamed et al, 2010) 35
Gambar 2. 20 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (Bagas, 2020)... 36
Gambar 2. 21 Grafik Coefficient of Power (CoPo) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020)........................ 37
Gambar 2. 22 Grafik Coefficient of Moment (CMo) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020) 37
Gambar 2. 23 Grafik Torsi Statis (Ts0) Terhadap Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020)... 38
Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius dengan dan tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP0*max*) Terhadap Variasi S/D di Kecepatan = 3.8 s.d 9 pada d/D = 0,5 (Bagas,2020).......... 39
Gambar 2. 25 (a) Susuan Turbin Angin Savonius dengan Silinder Type I-650 dipasang didepan Returning *blade*. (b) Skema Diagram Pengukuran Rope-Brake Dynamometer (Gunawan Sakti et al. 2019).. 41
Gambar 2. 26 Kontur Kecepatan Turbin Konvensional pada θ = 300(Gunawan Sakti et al. 2019).................................. 42
Gambar 2. 27 Kontur Kecepatan Turbin dengan Silinder I-650 pada θ = 300(Gunawan Sakti et al. 2019) 43

Gambar 2. 28 Kontur Kecepatan Turbin Konvensional pada θ = 900(Gunawan Sakti et al. 2019).................................. 44
Gambar 2. 29 Kontur Kecepatan Turbin dengan Silinder I-650 pada θ = 900(Gunawan Sakti et al. 2019) 45
Gambar 2. 30 Kontur Kecepatan pada θ = 900 (a) Turbin Konvensional (b) Turbin dengan Silinder I-650(Gunawan Sakti et al. 2019).. 46
Gambar 2. 31 Hasil dari *Power coefficient* Turbin Sebagai Fungsi dari TSR (Gunawan Sakti et al. 2019) 47
Gambar 2. 32 Hasil dari Coefficient Moment Turbin Sebagai Fungsi dari TSR (Gunawan Sakti et al. 2019)...... 48
Gambar 2. 33 (a) Skema Turbin Angin Savonius dengan Silinder Sirkular Didepan Returning *Blade* (B) Skema Diagram Perhitungan Torsi Dinamis (Triyogi et al. 2020) 49
Gambar 2. 34 Perbandingan CoP Terhadap λ pada S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020)................................ 50
Gambar 2. 35 Perbandingan CoP Terhadap λ pada S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020)... 51
Gambar 2. 36 Perbandingan Rasio CoPmax/CoP0max Terhadap S/D (Triyogi et al. 2020) 52
Gambar 2. 37 Perbandingan CoM Terhadap λ pada S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020)................................ 53
Gambar 2. 38 Perbandingan CoM Terhadap λ pada S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020)....................................... 54
Gambar 2. 39 Perbandingan Torsi Statis Terhadap *Blade* Angle untuk S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020) . 55
Gambar 2. 40 Perbandingan Torsi Statis Terhadap *Blade* Angle untuk S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020) 56
Gambar 2. 41 Skema Single-Stage Turbin Savonius: (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas.(Mahmoud, 2012)........ 57

Gambar 2. 42 Hubungan antara *Power coefficient* dan Kecepatan Angin Untuk Turbin Dengan Dua, Tiga dan Empat *Blade*. (Mahmoud, 2012) 58
Gambar 2. 43 Hubungan antara Koefisien Torsi Statis dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat *blade*s (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5 (Mahmoud, 2012) 59
Gambar 2. 44 Hubungan antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat *blade*s (a) *aspect ratio* = 0,5; *single stage*, (b) *aspect ratio* = 5; *single stage*, dan (c) *aspect ratio* = 0,5; *double stages*. (Mahmoud, 2012) 60
Gambar 2. 45 Hubungan antara *Specific power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius *single stage* dan *double stages*(Mahmoud, 2012) 61
Gambar 2. 46 Hubungan antara Torsi Statis dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius *single stage* dan *double stages*(Mahmoud, 2012) 62
Gambar 2. 47 Hubungan antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *overlap ratio*(Mahmoud, 2012) 63
Gambar 2. 48 Hubungan antara *Coefficient of Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *aspect ratio*(Mahmoud, 2012) 64
Gambar 2. 49 Hubungan antara *Mechanical power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Adanya *End plate* dan Tanpa *End plate*(Mahmoud, 2012) 65
Gambar 2. 50 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (Riza, 2019).. 66
Gambar 2. 51 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoPmax/CoP0max) sebagai Fungsi Jarak S/D

dengan d/D = 0,2; y/D = 0,5 pada Re = $9,6 \times 10^4$; $13,4 \times 10^4$ dan $17,3 \times 10^4$(Riza, 2019).. 67
Gambar 2. 52 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin dengan Silinder Pengganggu (CM) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CMo) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) d/D = 0,2; y/D = 0,5; Re = $13,4 \times 10^4$(Riza, 2019) 69

Gambar 3. 1 Skema Penelitian (Pandangan Atas dan Samping) 72
Gambar 3. 2 Turbin Angin Savonius 79
Gambar 3. 3 Silinder Pengganggu.................................... 81
Gambar 3. 4 *Axial fan* CKESPV-18.................................. 82
Gambar 3. 5 Honeycomb 83
Gambar 3. 6 Skema Penyusunan Alat Penelitian............... 84
Gambar 3. 7Skema Penyusunan Alat Penelitian Dan Dimensinya.. 85
Gambar 3. 8 Bearing SKF 6301-2Z 86
Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141...................... 88
Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12..................... 89
Gambar 3. 11 Torque Meter LUTRON Model TQ-8800... 90
Gambar 3. 12 Skema pemasangan brake dynamometer 91
Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA C-5 93
Gambar 3. 14 Pemberat... 93
Gambar 3. 15 Powell Voltage regulator............................ 94

Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ).. 113
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CM_0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ).. 116

Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (TS_0) terhadap Fungsi Sudut Blade Turbin Angin Savonius (θ).. 118
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 4 m/s 122
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 5 m/s 124
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 6 m/s 126
Gambar 4. 7Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 7 m/s 129
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 8 m/s 131
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 9 m/s 133
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 10 m/s 136

Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 4 m/s 139
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 5 m/s 140
Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 6 m/s 142
Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 7 m/s 144
Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 8 m/s 146
Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 9 m/s 148
Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 10 m/s 150
Gambar 4. 18 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 4 m/s 152

Gambar 4. 19 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 5 m/s 154
Gambar 4. 20 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 6 m/s 156
Gambar 4. 21 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 7 m/s 158
Gambar 4. 22 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 8 m/s 160
Gambar 4. 23 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 9 m/s 162
Gambar 4. 24 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 10 m/s 164
Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) Maksimum antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_{max} / CoP_{0max}) pada Variasi Kecepatan Udara 170
Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power Maksimum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 172
Gambar 4. 27 Grafik Nilai TSR Maksimum Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Variasi Kecepatan 174

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Spesifikasi Turbin Angin Savonius.................. 80
Tabel 3. 2 Spesifikasi Axial fan CKESPV-18................... 82
Tabel 3. 3 Spesifikasi Honeycomb................................... 83
Tabel 3. 4 Spesifikasi Bearing SKF 6301-2Z 86
Tabel 3. 5 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141........ 87
Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA Seri HHT12. 89
Tabel 3. 7 Spesifikasi Torque Meter LUTRON Model TQ-8800 90
Tabel 3. 8 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA C-5.......... 92
Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage regulator 94
Tabel 3. 10 Hasil Perhitungan Uncertainty Pengukuran pada Kecepatan 5 m/s 105

Tabel 4. 1 Perbandingan Nilai CoP maksimum dan λ Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 166
Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai CM maksimum dan λ Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 167
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Torsi Statis Maksimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 167
Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai Torsi Statis minimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 168
Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai Torsi Statis minimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara 173
Tabel 4. 6 Nilai *Reynolds Number*, *Density*, Viscosity.... 175

Tabel A. 1 Data putaran, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4 m/s 183
Tabel A. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s 183
Tabel A. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s 184
Tabel A. 4 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s 184
Tabel A. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s 185
Tabel A. 6 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s 185
Tabel A. 7 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 10 m/s 186
Tabel A. 8 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 4 – 10 m/s 187

Tabel B. 1 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 4 m/s 188
Tabel B. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s 188

Tabel B. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s 189
Tabel B. 4 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s 190
Tabel B. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s 191
Tabel B. 6 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s 192
Tabel B. 7 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 10 m/s 193
Tabel B. 8 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 4 – 10 m/s 194

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

A	Luas permukaan benda yang terkena aliran fluida (m^2)
C_D	*Coefficient drag*
C_M	*Coefficient of Moment*
CP	*Coefficient of Power*
D	Diameter *blade* Turbin Savonius (m)
d	Diameter silinder pengganggu (m)
D_0	Diameter *end plates* (m)
e	Diameter poros (m)
F_D	Gaya *drag* (N)
g	gaya gravitasi (m/s^2)
h	Tinggi silinder pengganggu (m)
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
L	Panjang karakteristik turbin angin Savonius (m)
m	Massa pemberat (kg)
M	*Moment* (J)
P	*Power* (Watt)
P_T	Daya aktual turbin (Watt)
P_W	Daya kinetik angin (Watt)
r	Jari-jari poros turbin (m)
R	Jari-jari turbin (m)
Re_L	Bilangan reynolds yang mengacu pada L
S	Jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (m)
s	Massa yang terbaca pada neraca pegas (kgf)
U	Kecepatan aliran fluida (m/s)
x	Tebal *blade* turbin angin Savonius (m)
θ	Sudut *blade* turbin angin Savonius (°)
λ	*Tip Speed Rasio*

μ	Viskositas fluida (Ns/m^2)
τ	Torsi dinamis turbin (Nm)
ρ	Massa jenis fluida (kg/m^3)
ω	Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia. Letak astronomis Indonesia bisa dibilang sangat strategis karena terletak di antara dua samudra dan dua benua. Dengan letak Indonesia yang strategis ini pastinya terdapat berbagai aneka ragam suku, budaya, agama,dan kekayaan alam yang sangat melimpah ruah. Wilayah Indonesia ini sangat berpotensi memiliki energi yang sangat berlimpah baik dari atas tanah, permukaan tanah, bahkan bawah tanahnya. Atas tanah terdapat energi angin, dan matahari yang merupakan energi terbarukan. Permukaan tanah Indonesia juga terdapat sumber energi seperti air pegunungan. Selain itu dibawah tanah pun juga terdapat energi alam yang melimpah yaitu fosil yang terdapat gas, minyak bumi, dan batu bara yang nantinya bisa digunakan untuk keperluan industri.

Sesuai PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut. Total potensi energi terbarukan ekuivalen 442 GW digunakan untuk pembangkit listrik, sedangkan BBN dan Biogas sebesar 200 ribu Bph digunakan untuk keperluan bahan bakar pada sektor transportasi, rumah tangga, komersial dan industri. Pemanfaatan EBT untuk pembangkit listrik tahun 2018 sebesar 8,8 GW atau 14% dari total kapasitas pembangkit listrik (fosil dan non fosil) yaitu sebesar 64,5 GW. Minimnya pemanfaatan EBT untuk ketenagalistrikan disebabkan masih relative tingginya harga produksi pembangkit berbasis EBT, sehingga sulit bersaing dengan pembangkit fosil terutama batubara. Selain itu, kurangnyadukungan industri dalam negeri terkait komponen

pembangkit energi terbarukan serta masih sulitnya mendapatkan pendanaan berbunga rendah, juga menjadi penyebab terhambatnya pengembangan energi terbarukan. Kapasitas pembangkit tenaga listrik sampai dengan tahun 2018 mencapai 64,5 GW atau naik sebesar 3% dibandingkan kapasitas tahun 2017. Kapasitas terpasang pembangkit listrik tahun 2018 sebagian besar berasal dari pembangkit energi fosil khususnya batubara (50%), diikuti gas bumi (29%), BBM (7%) dan energi terbarukan (14%). Hampir sebagian besar pembangkit listrik diusahakan oleh PLN yaitu sebesar 43,2 GW (67%) dan IPP hanya sebesar 14,9 GW (23%). Sedangkan pembangkit listrik yang dibangkitkan oleh Private Power Utility (PPU) dan Izin Operasi (IO) non bbm masing-masing sebesar 2,4 GW (4%) dan 4,1 GW (6%). Pada tahun 2018, produksi pembangkit listrik mencapai 283,8 TWh yang sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara sebesar 56,4%, pembangkit listrik berbahan bakar gas sebesar 20,2% dan BBM hanya 6,3%, sementara 17,1% berasal dari EBT. Listrik dari PLN dan pembangkit non PLN yang telah tersambung pada jaringan PLN (on grid) disalurkan kepada konsumen rumah tangga sebesar 97,8 ribu GWh (42%), industri 76,9 ribu GWh (33%) dan komersial sebesar 59,5 ribu GWh (25%), sedangkan konsumsi listrik di sektor transportasi untuk pengoperasian kereta komuter konsumsinya sebesar 274 GWh (0,12%).

Dari data di atas terkonfirmasi bahwa fosil adalah salah satu sumber energi yang banyak digunakan di Indonesia. Sumber energi ini akan sangat bermanfaat untuk kehidupan umat manusia beberapa tahun kedepan. Seiring berkembangnya zaman sumber energi fosil di Indonesia akan menipis sehingga perlu melakukan terobosan dengan memanfaatkan atau mengkonversi sumber energi energi tadi menjadi energi lain. Salah satu sumber energi yang berpotensi besar untuk dikembangkan secara optimal adalah energi angin. Angin di Indonesia mempunyai potensi sebesar 60,6 GW dan hanya sekitar 3.1 MW pemanfaatannya. Karakteristik angin di Indonesia memiliki rata-rata kecepatan 2 m/s sampai

dengan 6 m/s. Alat yang cocok untuk kondisi ini yaitu turbin angin. Dari data kecepatan angin yang tidak terlalu besar makanya sangat cocok untuk memilih turbin angin jenis Savonius sebagai pemanfaatan energi angin di Indonesia.

Turbin Savonious adalah turbin angin yang termasuk dalam jenis *Vertical Axis Wind Turbin (VAWT)*. Turbin jenis ini ditemukan pada tahun 1922 oleh Sigurd Johannes Savonious yang berasal dari Finlandia. Turbin Savonious memiliki bentuk yang cukup sederhana yaitu menyerupai huruf S yang menyebabkan turbin ini bisa menerima energi angin dari segala arah dan dengan kecepatan yang rendah. Cara kerja turbin jenis ini adalah dengan menerima gaya *drag* dari aliran angin yang menyebabkan torsi dan membuat rotor turbin berputar. Torsi yang memutar rotor turbin ini kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Kelebihan dari turbin angin jenis Savonius adalah beroperasi pada kecepatan rendah, menerima angin dari segala arah, *Tip Speed Ratio coast*, dan instalasi dan *maintenance* mudah. Sedangkan kekurangannya adalah memiliki efisiensi terendah dibanding turbin lain. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi turbin angin jenis Savonius ini. Para peneliti terdahulu sudah pernah melakukan penelitian terkait turbin angin jenis Savonius. Berikut beberapa penelitian turbin angin Savonius yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensinya.

Pada penelitian **Triyogi et al (2009)** menggunakan silinder pengganggu tipe-I dengan variasi sudut iris dari 0° sampai 65° yang diposisikan di depan silinder sirkular utama dengan bilangan Reynolds $5{,}3 \times 10^4$. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa pengurangan koefisien *drag* silinder sirkular utama yang paling efektif adalah ketika diberi silinder pengganggu tipe-I dengan sudut iris 650. Hal ini dikarenakan daerah *maintenance* yang terjadi dibelakang silinder tipe-I dengan sudut iris 650 sebagai pengganggu sangat besar sehingga efektif mengganggu silinder utama dan mampu menunda letak titik separasi dan akhirnya akan menghasilkan daerah *maintenance* yang kecil dan

mereduksi gaya *drag* yang terjadi pada silinder utama. Besarnya pengurangan gaya *drag* yang dihasilkan mencapai 52% dibandingkan dengan gaya *drag* tanpa penghalang.

Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui sebuah silinder diganggu oleh sebuah silinder lain yang berdiameter lebih kecil juga telah dilakukan oleh **Tsutsui dan Igarashi (2002)** dengan memvariasikan diameter silinder pengganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan harga bilangan Reynolds. Hasil penelitian tersebut mendapatkan bahwa penurunan harga koefisien *drag* (CD) disebabkan oleh peningkatan bilangan Re, d/D dan penurunan harga L/D. Sedangkan pengurangan *pressure drag* didominasi oleh perubahan harga Re. Kondisi optimum penurunan harga *Pressure Drag Coefficient* (CDP) diperoleh pada nilai d/D = 0,25 ; L/D = 2 untuk Re kurang dari 4,1 x 10^4 dan diperoleh CD sebesar 73% dibanding pada silinder tunggal. Sedangkan penurunan *Total Pressure Drag Coefficient* (CDT) didapatkan untuk harga L/D = 1,75 pada Re lebih besar dari serta didapatkan CDT sebesar 63% dibandingkan pada silinder tunggal. Dari penelitian ini mengarahkan pemakaian L/D sebagai salah satu parameter sehingga dapat mengetahui seberapa besar perubahan koefisien *drag* yang terjadi.

Penelitian lain dilakukan oleh **M.H. Mohamed et al (2010),** ialah untuk meningkatkan efisiensi serta performansi dari turbin, maka dilakukan optimasi dalam peletakan *obstacle* (pengganggu) didepan *returning blade* dari Turbin Savonius yang memungkinkan aliran untuk mengarah ke arah *advancing blade*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* CFD. Penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan power output dengan memperbaiki desain turbin Savonius baik 3 menggunakan turbin dua sudu maupun turbin tiga sudu. *Improvement* pada turbin Savonius menunjukkan adanya peningkatan pada *power output coefficient* sebesar lebih dari 27%. Optimasi pada turbin Savonius dua sudu menunjukkan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan turbin Savonius tiga sudu.

Penelitian untuk meningkatkan performa rotor Savonius berdasarkan geometrinya dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010).** Pada eksperimen ini, turbin angin diletakkan di depan *wind tunnel* dengan kecepatan angin pada rentang 0-13 m/s saat keluar dari *wind tunnel* dengan parameter berupa jumlah sudu turbin (dua, tiga, dan empat sudu), jumlah *stages* (*single and double stages*), *overlap ratio* (0 sampai 0,35), *aspect ratio* (0,5 ; 1; 2; 4; 5), dan keberadaan *end plate*. Berdasarkan penelitian tersebut, didapatkan kesimpulan bahwa performa paling efisien ketika digunakan dua sudu turbin, *double stages*, tanpa *overlap ratio, aspect ratio* 5, dan dengan menggunakan *end plate*.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **Riza Umami (2019)** untuk meningkatkan kinerja turbin angin Savonius dengan d/D = 0,2 ; y/D = 0,5; S/D = 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; dengan Bilangan Reynolds = 9,6 × 104; 13,4 × 10^4 dan 17,3 × 10^4. Kesimpulan dari penelitian ini diperoleh peningkatan CoP sebesar 46,38% pada Re=13,4 × 10^4 dan pada Re=17,3 × 10^4 diperoleh peningkatan CoP sebesar 35,38%.

Penelitian menggunakan *software* CFD juga dilakukan oleh **Gunawan Sakti et al (2019)**, ialah untuk meningkatkan *Coefficient of Power* dan kemampuan *self-starting* yang sangat baik, silinder tipe I 65^0 dipasang aliran *upstream* dari *returning turbine* pada posisi tertentu dan bertindak sebagai faktor penentu untuk meningkatkan kinerja turbin secara aerodinamis. Dari penelitian ini didapatkan peningkatan *coefficient power* sebesar 23.61% lebih baik dibandingkan dengan turbin konvensional pada TSR $\lambda = 0.8$.

Penelitian selanjutnya juga telah dilakukan terkait meningkatkan performa turbin oleh **Triyogi Yuwono et al (2020)** dengan metode experimen. Penelitian ini dilakukan pada Re 99000 dengan variasi S/D = 1.4 sampai 2.2. Dari penelitian ini didapatkan pada saat S/D < 1.8 dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Maksimum performa turbin terjadi pada

saat S/D = 1.4 yaitu meningkat sebesar 12.2%, pada *tip speed ratio* 0.65. Namun pada saat S/D > 1.8 tidak ada perubahan pada *Coefficient of Power* atau hampir sama dengan turbin konvensional. Ini sama seperti dua objek yang tidak saling mempengaruhi. Artinya saat S/D > 1.8 kontrol *passive flow* tidak lagi efektif untuk meningkatkan performa turbin.

Penelitian terbaru terkait peningkatan kinerja turbin yang dilakukan oleh **Bagas Ramadhan (2020)** dengan 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. hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah Pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 74,42% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu dan terjadi kenaikan sebesar 69,63% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Dari studi literature diatas, penggunaan silinder sebagai penggangu di depan turbin angin Savonius belum pernah dilakukan sebelumnya. Maka dari itu penelitian ini perlu dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius. Penelitian kali ini mencoba meningkatkan efisiensi dari turbin Savonius dengan cara memberi silinder sirkular penggangu di depan *returning blade* dengan beberapa variasi jarak yang berbeda. Metode ini digunakan untuk mengurangi gaya *drag* pada sisi *returning blade*. Penelitian ini dilakukan eksperimen dengan penggunaan silinder sirkular dengan d/D = 0,2 sebagai pengganggu di depan turbin angin Savonius. Dengan variasi jarak S/D = 2,3 serta variasi kecepatan 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s).

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonious merupakan turbin dengan jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yang mempunyai konstruksi rotor tegak lurus dengan sumbu vertikal. Turbin Savonious memiliki dua sudu yang masing-masing memiliki bentuk setengah lingkaran yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* adalah sudu yang memberikan gaya *drag* lebih besar karena

arah putarnya searah dengan arah aliran angin, sedangkan *returning blade* adalah sudu yang berputar melawan arah aliran angin. Pada turbin savonious yang diperlukan adalah selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade*. Selisih gaya ini yang akan menyebabkan torsi dan jika dikalikan dengan kecepatan angular pada turbin angin maka akan menghasilkan daya turbin angin tersebut. Jika ingin menghasilkan daya turbin yang besar maka selisih gaya *drag* tersebut harus besar pula. Salah satu cara untuk memperbesar selisih gaya *drag* adalah dengan memberikan pengganggu di depan *returning blade*. Dengan adanya pengganggu tersebut maka diduga gaya *drag* pada *returning blade* menjadi lebih kecil dan menyebabkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* semakin besar.

Penelitian untuk meningkatkan efisiensi dan performa turbin Savonius sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah dengan menempatkan pengganggu di depan *returning blade.* Peletakan penggangu di depan *returning blade* ini dimaksudkan untuk menurunkan nilai gaya *drag* pada *returning blade,* sehingga nilai selisih gaya *drag* antara *returning* dan *advancing blade* akan meningkat dan menyebabkan peningkatan daya aktual pada turbin angin Savonius. Pada penelitian ini digunakan silinder pengganggu berupa silinder sirkular dengan variasi yang digunakan yaitu kecepatan angin yang mengalir dan rasio jarak pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder penggangu terhadap diameter sudu turbin Savonius (S/D). Hipotesa awal pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* diduga akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik.

Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.

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

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagi berikut:

1. Analisa aliran adalah *eksternal flow*
2. Aliran yang mengalir adalah *steady, incompressible,* dan *uniform flow* pada sisi *upstream.*
3. Variasi jarak silinder pengganggu terhadap *returning blade* (S/D) adalah 2,3

4. Variasi kecepatan angin bernilai 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s).
5. Menggunakan turbin angin tipe Savoius berdiameter (D) = 165 mm dan silinder pengganggu dengan diameter (d) = 33 mm dengan rasio diameter silinder pengganggu dan diameter sudu *returning blade* (d/D) = 0,2
6. Perpindahan panas dapat diabaikan

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonious terhadap performa turbin angin tersebut. Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonious (d/D) sebesar 0,2 Variasi rasio antara jarak pusat turbin angin Savonious dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin Savonious (S/D) sebesar 2,3 dan variasi kecepatan angin bernilai 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan 10 (m/s). Performa turbin dapat ditentukan dengan cara mengukur:

1. Mengukur torsi statis dan dinamis turbin.
2. Menghitung *Coefficient of Power* (CoP).
3. Menghitung *Coefficient of Moment* (CM).

1.5 Manfaat penelitian

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

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

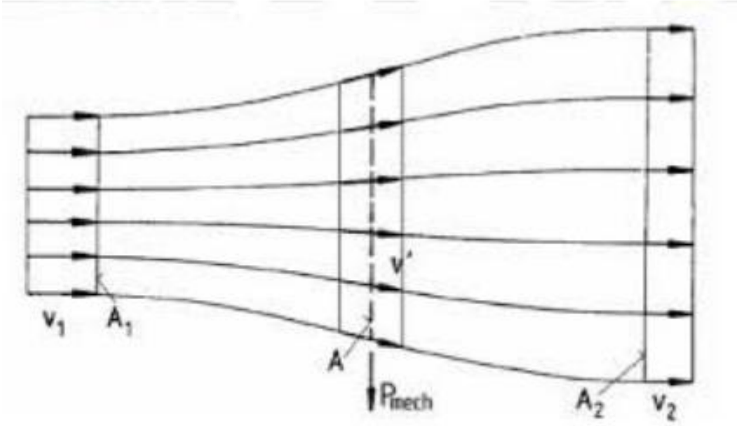
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi angin

Secara sederhana energi potensial yang terdapat pada angin dapat memutarkan *blade-blade* yang terdapat pada kincir angin, dimana *blade-blade* ini terhubung dengan poros dan memutarkan poros yang telah terhubung dengan generator dan menimbulkan arus listrik. Kincir yang besar dapat digabungkan secara bersama-sama sebagai energi tenaga angin, dimana akan memberikan daya kedalam sistem transmisi kelistrikan model sederhana dari turbin angin mengambil dasar teori dari momentum, angin dengan kecepatan tertentu menabrak rotor yang memiliki performa sayap atau propeler. Dalam model sederhana, dimana memungkinkan *newtonian mechanics* digunakan, aliran diasumsikan *steady* dan mendatar, udara diasumsikan *incompressible* dan *inviscid*, dan aliran *downstream* (aliran setelah melalui rotor) diasumsikan konstan di sekeliling bagian *streamtube* dengan tidak ada diskonuitas tekanan di seberang perbatasan *streamtube*.

Menurut Betz, seorang insinyur Jerman, besarnya energi yang maksimum dapat diserap dari angin adalah hanya 0.59259 dari energi yang tersedia. Sedangkan hal tersebut juga dapat dicapai dengan daun turbin yang dirancang dengan sangat baik serta dengan kecepatan keliling daun pada puncak daun sebesar 6 kali kecepatan angin. Pada dasarnya turbin angin untuk generator listrik hanya akan bekerja antara suatu kecepatan angin minimum, yaitu kecepatan star Cs, dan kecepatan nominalnya Cr. Teori momentum elementer Betz sederhana berdasarkan pemodelan aliran dua dimensi angin yang mengenai rotor menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran udara berkurang dan garis aliran membelok ketika melalui rotor dipandang pada satu bidang. Berkurangnya kecepatan aliran udara disebabkan sebagian energi kinetic angin diserap oleh rotor turbin angin. Pada kenyataannya, putaran rotor menghasilkan

perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang akibatnya mengurangi jumlah total energi yang dapat diambil dari angin. Walaupun teori elementer Betz telah mengalami penyederhanaan, namun teori ini cukup baik untuk menjelaskan bagaimana energi angin dapat dikonversikan menjadi bentuk energi lainnya. Model aliran dari teori momentum elementer Betz dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Model Aliran dari Teori Momentum Beltz (Hau, 2006)

Koefisien daya hasil dari konversi daya angin ke daya mekanis turbin tergantung pada perbandingan dari kecepatan angin sebelum dan sesudah dikonversikan. Denga kata lain, turbin angin dapat mengkonversikan tidak lebih dari 60% tenaga total angin menjadi tenaga berguna. Betz adalah orang pertama yang menemukan nilai ini, untuk itu nilai ini disebut juga dengan Betz *factor*.

Selain energi potensial juga ada energi kinetic angin. Menurut ilmu fisika klasik energi kinetik dari sebuah benda

dengan massa m dan kecepatan v adalah $E = \frac{1}{2}\ x\ \dot{m}\ x\ v^2$, dengan asumsi bahwa kecepatan v tidak mendekati kecepatan cahaya. Rumus tersebut diatas berlaku juga untuk menghitung energi kinetic yang diakibatkan oleh gerakan angin. Energi kinetik yang terkandung dalam angin inilah yang ditangkap oleh turbin angin untuk memutar rotor. Untuk menganalis seberapa besar energi angin yang dapat diserap oleh turbin angin.

2.2 Turbin Angin

Turbin angin merupakan teknologi energi alternatif yang mampu mengkonversi energi angin pada jalan tol menjadi energi listrik. Turbin angin memiliki dua buah tipe yaitu turbin angin tipe *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Prinsip kerja dari turbin angin HAWT berdasarkan gaya angkat (*lift force*) energi angin dan turbin angin VAWT berdasarkan gaya tarik (*drag force*) yang terjadi akibat pergerakan angin (Santhakumar *et al*, 2017). Gaya tarik (*drag force*) berdasarkan pergerakan angin sangat cocok dengan aliran angin dari pergerakan kendaraan karena memiliki gaya torsi yang lebih besar (Goh *et al*, 2016). Oleh karena itu, teknologi turbin VAWT dapat digunakan untuk teknologi alternatif konversi energi angin. Selain itu, turbin angin tipe VAWT memiliki kelebihan yaitu memiliki kapabilitas untuk menahan aliran turbulen, dan memungkinkan dapat berotasi dengan mudah pada aliran angin yang rendah (Mahmoud *et al*, 2012).

Turbin angin HAWT adalah jenis turbin angin dengan poros horizontal seperti baling – baling pesawat terbang pada umumnya. Turbin angin ini harus diarahkan sesuai dengan arah angin yang paling tinggi kecepatannya. Seperti yang terlihat dalam persamaan daya angin sebelumnya, keluaran daya dari turbin angin bervariasi linear dengan daerah yang melawati rotor *blade*. Contoh turbin angin tipe HAWT dapat dilihat pada Gambar 2.2

Gambar 2. 2 Horizontal Axis Wind Turbine (Hau,2006)

Turbin angin tipe VAWT memiliki dua tipe yaitu tipe *Darrieus* dan tipe *Savonius* (Ambrosio & Marco, 2010). Seperti pada Gambar 2.3 yang merupakan turbin angin tipe VAWT

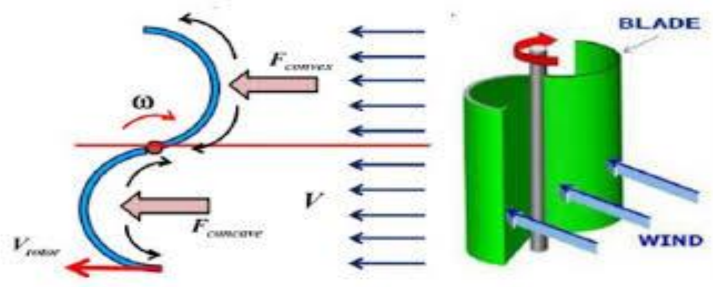
Gambar 2. 3 Tipe Turbin Angin VAWT (Hau 2006, 2010)

Tipe *Darius* memiliki koefisien daya (Cp) sebesar 0.2-0.4 dan kebutuhan kecepatan angin minimal untuk memutarkan sudu turbin sebesar 3–7.5 m/s lebih besar jika dibandingkan dengan koefisien daya (Cp) tipe *Savonius* sebesar 0.1 -0.2 dan kecepatan angin minimal sebesar 1.4 m/s (Promdee & Photong, 2016). Pada penelitian ini dikembangkan penggunaan turbin angin VAWT tipe *Darrieus*, dikarenakan pada penelitian ini lebih mengutamakan desain turbin dengan koefisien daya (Cp) besar yang memiliki pengaruh terhadap gaya torsi. Parameter dasar yang mempengaruhi desain dari turbin angin tipe *Darrieus* adalah kecepatan angin, jumlah suduturbin, sudut puntiran sudu turbin, massa jenis udara, dan tinggi rotor penggerak turbin. Berdasarkan data parameter tersebut, maka analisis kecepatan angin rata-rata yang masuk ke dalam turbin dan analisis daya energi angin untuk menghasilkan energi listrik pada penerangan jalan tol dapat diketahui. Selain itu, tujuan dari penelitian ini adalah mengoptimasi perancangan dan analisis turbin angin tipe *Darrieus* sebagai teknologi alternatif untuk penerangan jalan tol

dengan perhitungan variasi jumlah sudu dan sudut puntir sudu turbin yang berdampak pada penggunaan sejumlah lampu dan daya simpan energi listrik.

Setiap jenis turbin angin memiliki ukuran dan efisiensi yang berbeda. Untuk memilih jenis turbin angin yang tepat untuk suatu kegunaan diperlukan tidak hanya sekedar pengetahuan tetapi juga penelitian dengan eksperimen.

2.3 Turbin Angin Savonius



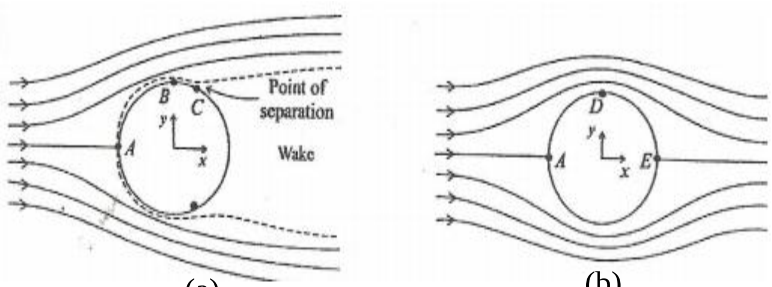
Gambar 2. 4 Turbin Angin Savonius (R. Renato, R. Roberto, M. Sergio, 2016)

Turbin Savonius diciptakan oleh seorang insinyur Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922. Sudu turbin Savonius memiliki dua bentuk utama yaitu, berbentuk setengah silinder atau biasa disebut dengan tipe U dan berbentuk seperti huruf L atau yang biasa disebut dengan turbin Savonius tipe L. Turbin Savonius tipe L merupakan hasil dari pengembangan turbin Savonius tipe S. Turbin angin Savonius tipe S bisa dilihat pada Gambar 2.4. Beberapa keunggulan turbin angin Savonius antara lain sederhana dan murah dalam konstruksi, torsi yang dihasilkan tinggi meski dioperasikan pada kecepatan angin rendah dan tidak tergantung arah angin sehingga dapat dioperasikan dimana saja. Pada turbin *Savonius* terdapat dua jenis *blade* sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade.* Perbedaan mendasar

kedua sudu ini terletak pada cekungan atau lengkungan dalam turbin. Bila *advancing blade* memiliki cekungan dalam sudu turbin tegak lurus dengan arah datangnya aliran *(flow direction)*, maka *returning blade* memiliki cekungan dalam sudu turbin yang membelakangi arah datangnya aliran.

2.4 Aliran Melintasi Silinder

Aliran *incompressible* melintasi silinder seperti pada Gambar 2.5



(a) (b)

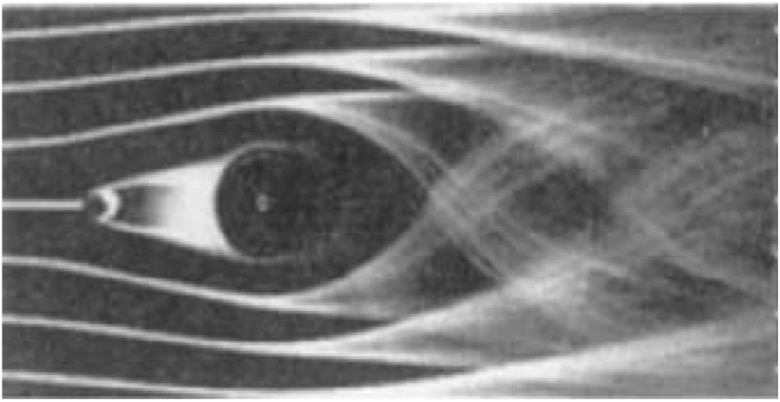
Gambar 2. 5 Aliran pada Suatu Silinder (a) Aliran Viscous (b) Aliran Inviscid

Gambar 2.5 (a). menunjukkan aliran *viscous* pada suatu silinder, *streamlines* adalah simetris. Titik A adalah titik stagnasi yang selanjutnya terjadi *boundary layer*. Dari titik A ke titik B terjadi kenaikan kecepatan yang berakibat penurunan tekanan dan selanjutnya dari titik B ke titik C terjadi penurunan kecepatan yang berarti terjadi kenaikan tekanan PC > PB. Di titik C momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser sehingga menyebabkan pecahnya *boundary layer*. Titik C disebut dengan *point of separation*. Diantara titiktitik atau tempat-tempat pemisahan *boundary layer* terjadi suatu kawasan yang disebut dengan *maintenance*. Makin besar *maintenance* makin besar terjadi perbedaan gaya didepan dan dibelakang silinder berakibat

makin besar gaya seret aliran silinder terhadap silinder. Aliran *inviscid* digambarkan pada Gambar 2.5 (b). terlihat bahwa *streamlines simetris*, terjadi slip pada permukaan silinder dan perbedaan besar kecilnya kecepatan aliran ditunjukkan oleh rapat longgarnya *streamlines* yang ada dan juga tidak terjadi *maintenance* sehingga tidak terjadi gaya seret pada silinder.

Bilangan Reynolds juga mempunyai pengaruh yang besar sebagai penyebab terjadinya separasi. Semakin besar bilangan Reynolds maka momentum yang dimiliki fluida juga semakin besar dan aliran semakin cepat menjadi turbulen sehingga terjadinya titik separasi bisa tertunda. Parameter lain yang mempengaruhi separasi diantaranya kekasaran permukaan dan stabilitas freestream.

Pengaruh turbulensi pada separasi aliran yang melintasi silinder dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2. 6 Pengaruh Karakteristik Aliran Setelah Diberi Silinder Pengganggu (Triyogi, 2009)

Karena momentum fluida dalam lapisan batas turbulen lebih besar daripada lapisan batas laminar, maka kemampuannya untuk melawan tegangan geser lebih besar sehingga akan lebih mampu

untuk menunda yang menyebabkan separasi, itu layak untuk mengharapkan transisi. Jika RE_D $2 \leq 10^5$, lapisan batas tetap laminar, dan separasi terjadi pada $\theta \approx 80^0$. tetapi, jika RE_D 2 x 10^5 , terjadi transisi lapisan batas, dan separasi ditunda sampai $\theta \approx 140^0$.

2.5 Koefisien *Drag*

Drag yaitu hambatan dari aliran pada suatu benda. *Drag* ini merupakan hambatan dari gerakan suatu benda dan hambatan ini dapat terjadi juga pada dinding pipa tempat mengalirnya fluida. Energi harus diberikan untuk mengatasi *drag* serta untuk mempertahankan gerakan relatif antara benda dan aliran fluida serta untuk menghambat terjadinya deformasi pada suatu benda yang disebabkan *drag*. Perbedaan antara tekanan tinggi di daerah stagnasi di depan dengan tekanan di daerah belakang memberikan sumbangan seretan yang besar, yang disebut *drag* tekanan. Ini ditambahkan pada integrase tegangan geser atau *drag* gesekan benda tadi yang lebih rendah, dengan kata lain keofisien *drag* dapat dibagi dalam dua macam :

1. Keofisien *drag* yang disebabkan oleh perbedaan tekanan antara bagian di depan dan di belakang bodi di sebut *pressure drag.*
2. Keofisien *drag* yang disebabkan aleh gesekan permukaan bodi dengan fluida disebut *friction drag*

Persamaan koefisien *drag* yang di depan turbin diberi penghalang yaitu:

$$C_D = C_{D,\ tek} + C_{D,\ gesekan}$$

Dengan C_D, gesekan karena kecil diabaikan maka persamaannya :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad \text{..........................(2.1)}$$

Keterangan:

F_D = gaya *drag* (N)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

U = kecepatan aliran (m/s)

A = luas permukaan (m^2)

Untuk persamaan gaya *drag* total dapat digunakan persamaan berikut:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho V^2 C_D A \quad \text{.......................(2.2)}$$

Dengan :

F_D = gaya *drag* (N)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

V= kecepatan aliran fluida (m/s)

A = luasan permukaan (m^2)

C_D = *Coefficient drag*

2.6 ***Coefficient*** **od Power (CoP)**

Coefficient of Power (*Cop*) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu oleh turbin angin terhadap daya yang dihasilkan oleh *drag force* yang dihasilkan oleh aliran udara. Rumus CoP dapat ditulis dengan persaamaam:

$$CoP = \frac{P_T}{P_w} \quad \text{.............................(2.3)}$$

Perhitungan daya aktual turbin (P_T) yaitu :

$$P_T = T\omega \quad \text{.............................(2.4)}$$

Dengan :

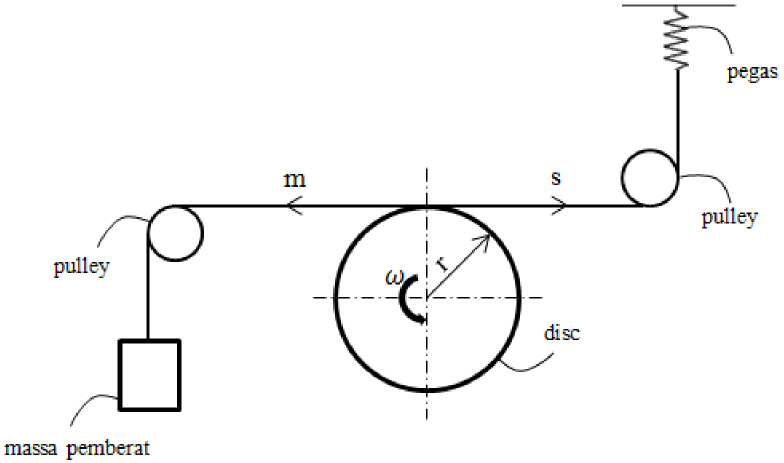
P_T = daya aktual turbin (watt)

T = Torsi dinamis turbin (Nm)

ω = kecepatan putaran turbin (rad/s)

Torsi dinamis dapat dihitung dengan persamaan:

$$T = F\,r \qquad (2.5)$$



Gambar 2. 7 Skema FBD Brake Dynamometer

Gambar 2.7 merupakan *Free Body Diagram* dari gaya yang bekerja pada poros yang nantinya digunakan untuk mencari daya aktual

Dengan :

F = gaya yang bekerja pada poros

r = radius *pulley*

Gaya pada poros dihitung dengan rumus :

$$F = (m - s)g \text{..........................(2.6)}$$

Dengan :

m = massa pemberat (kg)

s = pegas yang terbaca (kg)

g = percepatan grafitasi (m/s^2)

Untuk kecepatan putaran turbin dihitung dengan rumus:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{.................................(2.7)}$$

Dengan:

n = gerak rotasi poros turbin

Didapatkan hasil persamaan daya aktual dengan rumus:

$$P_T = \frac{(m-s)gr\pi n}{30} \text{.............................(2.8)}$$

Sedangkan untuk daya angin dapat dihitung dengan rumus:

$$EK = \frac{1}{2}\dot{m}V^2 \text{ ....(2.9)}$$

Untuk ṁ dihitung dengan persamaan:

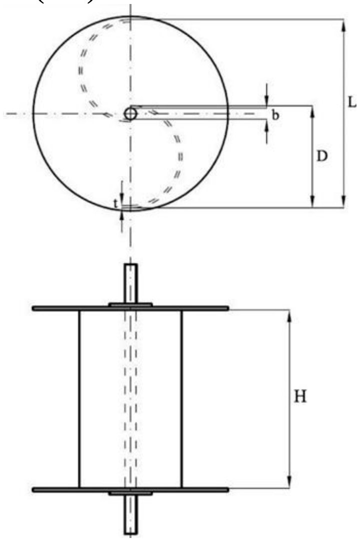
$$\dot{m} = \rho VA \text{................................(2.10)}$$

maka didapatkan daya angin yang berhembus dengan rumus:

$$P_w = \frac{1}{2}\rho AV^3 \text{...........................(2.11)}$$

Dengan:
EK = energi kinetik (Joule)
P_w = daya angin (watt)
ρ = masa jenis udara (kg/m^3)

A = luas penampang turbin (m^2)
V = kecepatan udara (m/s)



Gambar 2. 8 Skema Turbin Savonius

Rumus A dihitung dengan rumus:

$$A = (2D - b - 2t)H \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.12)$$

Untuk ilustrasi nilai A dapat dilihat pada Gambar 2.8
Dimana :
Sehingga dari persamaan 2.3 didapatkan rumus CoP dengan persamaan:

$$CoP = \frac{(m-s)gr\pi n}{15\rho AV^3} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.13)$$

2.7 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah bilangan tidak berdimensi yang dapat mengklasifikasikan jenis aliran fluida. Pada umumnya jenis aliran fluida dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu laminar, transisi,

dan turbulen. Aliran yang sering digunakan adalah jenis aliran laminar dan turbulen. Rumus Re dapat ditulis dengan rumus:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad \text{.............................(2.14)}$$

Dimana:
Re = bilangan Reynolds
ρ = densitas fluida
U = kecepatan aliran fluida
μ = viskositas absolut fluida
L = panjang karakteristik

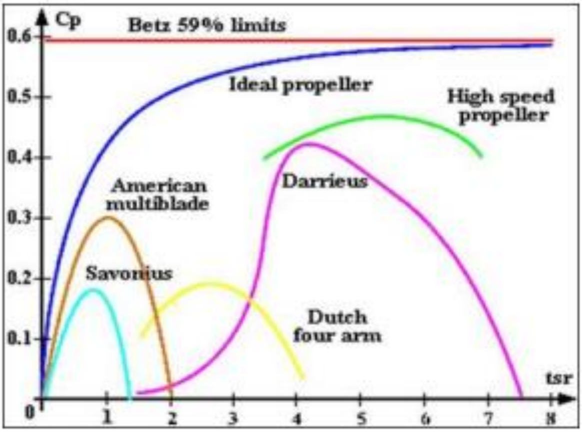
2.8 Tip Speed Ratio(λ)

Tip Speed Ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan tangensial dari turbin terhadap kecepatan angin. *Tip Speed Ratio* dapat dituliskan dengan rumus :

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad \text{..........................(2.15)}$$

Dengan:…
λ = *tip speed ratio*
ω = kecepatan angular turbin(rad/s)
R = jari-jari turbin(m)
U = kecepatan angin(m/s)

Setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka *factor* daya sebagai fungsi dati *Tip Speed Ratio*(TSR) juga berbeda. Dapat dilihat pada Gambar 2.9



Gambar 2. 9 Faktor daya sebagai fungsi TSR berbagai jenis turbin (Al-Shemmeri, 2011)

2.9 *Coefficient* of Moment(C_M)

Coefficient of Moment adalah perbandingan antara torsi aktual yang dimiliki oleh turbin terhadap torsi teoritis. Nilai C_M dapat ditulis dengan rumus:

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2}\rho U^2 AR} \quad \text{.........................(2.16)}$$

Maka hubungan dari persamaan CoP dan C_M adalah

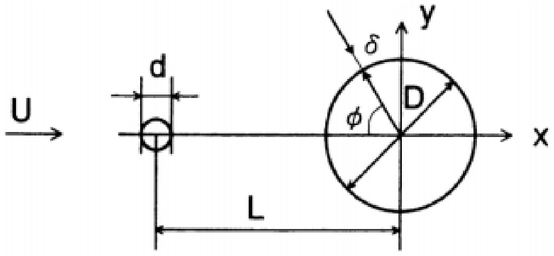
$$CoP = C_M\, \lambda \quad \text{.........................(2.17)}$$

2.10 Hasil Penelitian Terdahulu

2.10.1. Penelitian Silinder dengan Pengganggu

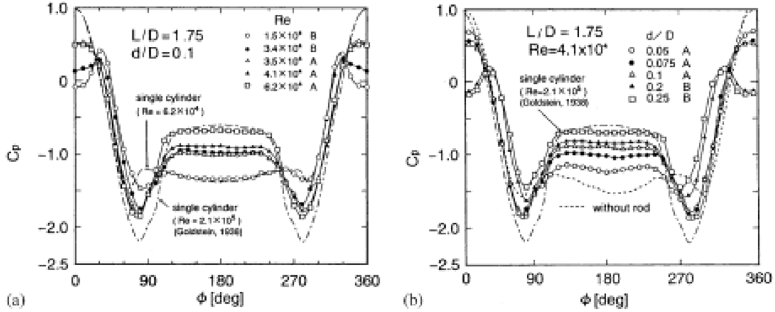
Pada tahun 2002 telah di lakukan penelitian mengenai aliran fluida yang melalui sebuah silinder yang diganggu oleh sebuah silinder lain yang berdiameter lebih kecil dilakukan oleh

Tsutsui dan Igarashi yang bertujuan untuk memperkecil gaya *drag* yang diterima oleh silinder utama. Penelitian ini dilakukan dengan variasi diameter silinder pengnganggu (d/D), jarak antara kedua pusat silinder (L/D) dan nilai bilangan Reynolds pada *range* 1,5 x $10^4 \leq Re \leq 6,2$ x 10^4. Gambar 2.10 adalah skema dari penelitian tersebut.

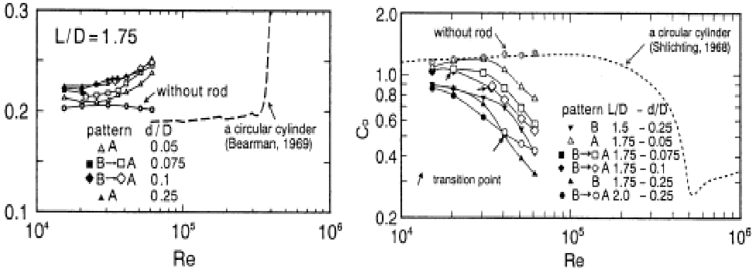


Gambar 2. 10 Skema Penelitian (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Hasil dari penelitian ini adalah peningkatan bilangan Strouhal yang disebabkan oleh peningkatan d/D dan penurunan harga L/D. Pada peningkatan bilangan Reynolds diatas 3 x 10^4 terjadi fenomena separasi yang semakin tertunda akibat tebal *Shear layer* yang semakin berkurang. Sehingga bilangan Strouhal akan meningkat dan area *maintenance* menyempit (Cd menurun). Hubungan bilangan Strouhal dan kofisien *drag* dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2. 11 Grafik Re dan Cd (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

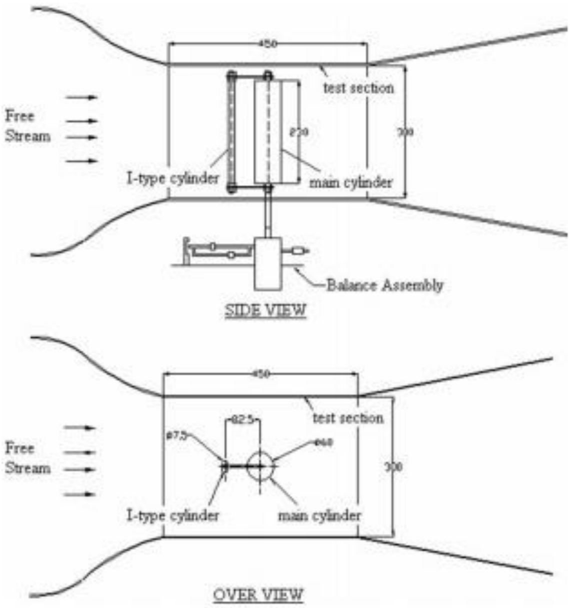


Gambar 2. 12 Grafik Distribusi Tekanan pada Silinder Sirkular (a)Variasi Bilangan Reynolds (b)Variasi Nilai d/D. (Tsutsui dan Igarashi, 2002)

Pada Gambar 2.12 (a) dilakukan percobaan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada L/D = 1,75 dan d/D = 0,1 dengan dua pola aliran yaitu pola aliran A dengan adanya *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu dan pola aliran B yaitu tanpa *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu. Dengan penambahan silinder pengganggu nilai dari Cp mengalami penurunan pada bagian depan silinder sirkular. Pola aliran A mengalami penurunan dengan nilai 0,5 dan pola aliran B nilainya negative di bagian depan silinder sirkular. Jadi dengan penambahan silinder pengganggu diperoleh kesimpulan ketika

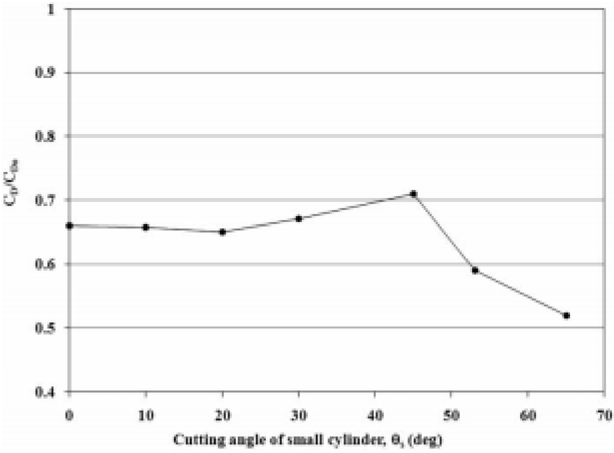
variasai nilai Re semakin meningkat maka area *maintenance* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit. Setelah itu dilakukan percobaan dengan variasi diameter silinder sirkular pada L/D = 1,75 dan Re 4,1 x 10^4. Pada Gambar 2.12 (b) diperoleh kesimpulan ketika variasi nilai d/D semakin meningkat maka area *maintenance* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

Kemudian pada tahun 2009 telah dilakukan penelitian yang hampir sama dengan menggunakan silinder pengganggu tipe I berdiamater 60 mm dengan variasi sudut iris(θ_s)= 0^0, 10^0, 20^0, 30^0, 45^0, 53^0, dan 65^0 yang diletakkan di depan silinder sirkular utama dengan Re 5,3 x 10^4. Jarak antara pusat silinder pengganggu dan silinder utama diposisikan tetap yaitu sebesar S/D = 1,375. Untuk skema alat bisa dilihat pada Gambar 2.13



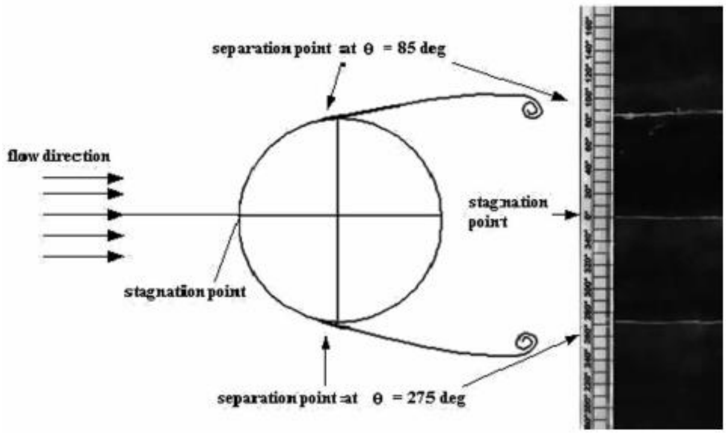
Gambar 2. 13 Skema Alat Silinder Pengganggu Tipe I yang Disusun Tandem dengan Silinder Utama (Triyogi et al, 2009)

Dari penelitian ini diperoleh hasil perbandingan antara C_D/C_{DO} terhadap sudut iris pengganggu dengan silinder utama tunggal yang dapat dilihat pada Gambar 2.14.



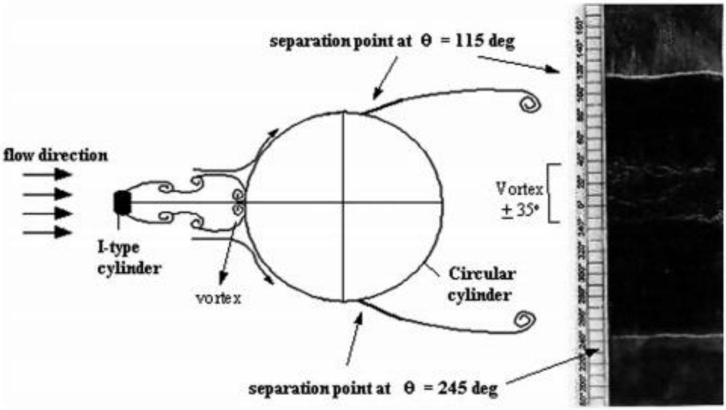
Gambar 2. 14 Grafik CD/CDO Terhadap Sudut Iris Silinder Pengganggu (Triyogi et al, 2009)

Dengan variasi sudut iris(θ_s)= 0^0, 10^0, 20^0, 30^0, 45^0, 53^0, dan 65^0 dibanding C_D/C_{DO} diperoleh bahwa pada sudut 65^0 memiliki nilai C_D/C_{DO} terkecil dengan nilai mencapai 0,52. Jadi terbukti dengan adanya benda pengganggu berupa silinder teriris bertipe I dapat memperkecil gaya *drag* yang muncul pada silinder utama sampai 48% dibandingkan dengan tidak menggunakan silinder pengganggu.



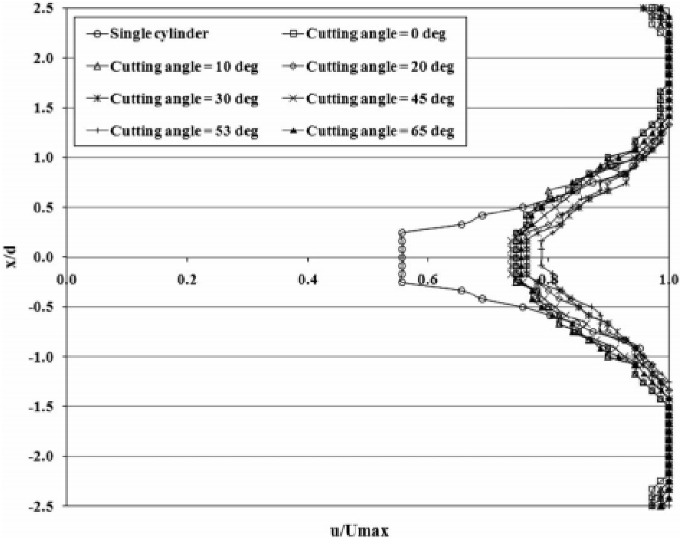
Gambar 2. 15 Visualisasi Aliran pada Silinder Pengganggu Tipe I (Triyogi et al, 2009)

Pada Gambar 2.15 diatas menjelaskan visualisasi aliran pada silinder pengganggu tipe I. Jadi bisa dilihat letak titik separasi pada $\theta = 85^0$ pada sisi atas dan $\theta = 275^0$ pada sisi bawah serta letak titik stagnasi nya pada $\theta = 0^0$. Sehingga menunjukkan streamline melintasi silinder sirkular tunggal adalah simetri wake yang dihasilkan juga simetri.



Gambar 2. 16 Visualisasi Aliran pada Silinder Utama Tipe I
(Triyogi et al, 2009)

Pada Gambar 2.15 menjelaskan di depan silinder sirkular dipasang sebuah silinder tipe I dengan sudut $\theta_s = 65^0$. Dapat dilihat dengan dipasang sebuah silinder tipe I di depan silinder sirkular terjadi perubahan karakteristik aliran. Kesimpulannya streamline aliran simetri antara sisi atas dan bawah dari silinder utama, dan pemasangan silinder pengganggu di depan silinder utama, menyebabkan silinder utama kehilangan titik stagnasi akibat tertutup oleh silinder pengganggu.



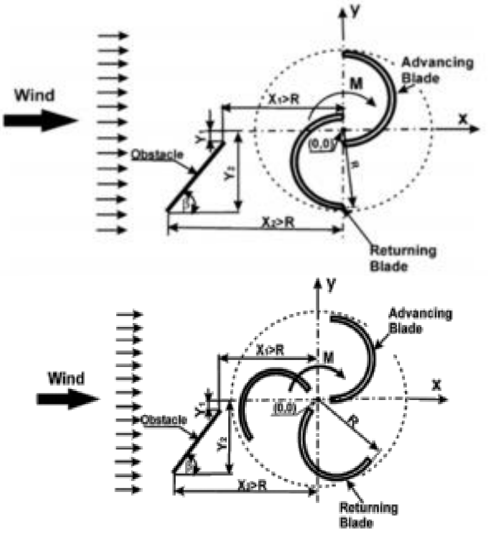
Gambar 2. 17 Profil Kecepatan pada Aliran Melalui Silinder Pengganggu Tipe I dengan Variasi Sudut Iris Berbeda (Triyogi et al, 2009)

Pada Gambar 2.17 didapatkan hasil bahwa pada sudut iris 65^0 merupakan pengurangan sudut iris yang efektif. Area *wake* ketika sudut iris 65^0 sangat besar sehingga efektif mengganggu silinder utama dan mampu menunda letak separasi dan menghasilkan area *wake* yang kecil dan mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada silinder utama. Diperoleh hasil pengurangan gaya *drag* sebesar 52%.

2.10.2. Penelitian Peningkatan Performa dari Turbin Savonius

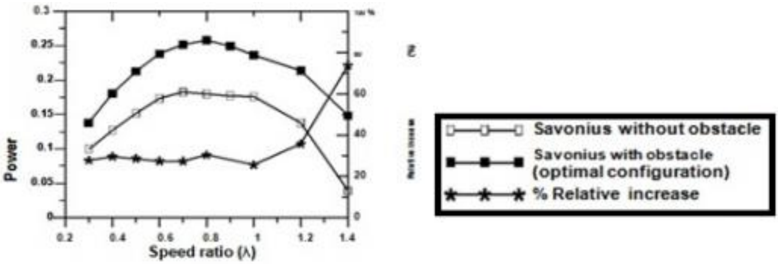
Penelitian mengenai peningkatan performa dari turbin Savonius pernah dilakukan oleh Mohamed et al pada tahun 2010

dengan menggunakan *software* CFD untuk simulasi pada turbin angin Savonius yang diberi pengganggu berupa alat yang diletakkan didepan turbin dengan variasi besar sudut plat (β) dan *speed ratio* (λ) dengan kecepatan angin 10 m/s. Skema alat dapat dilihat pada Gambar 2.18



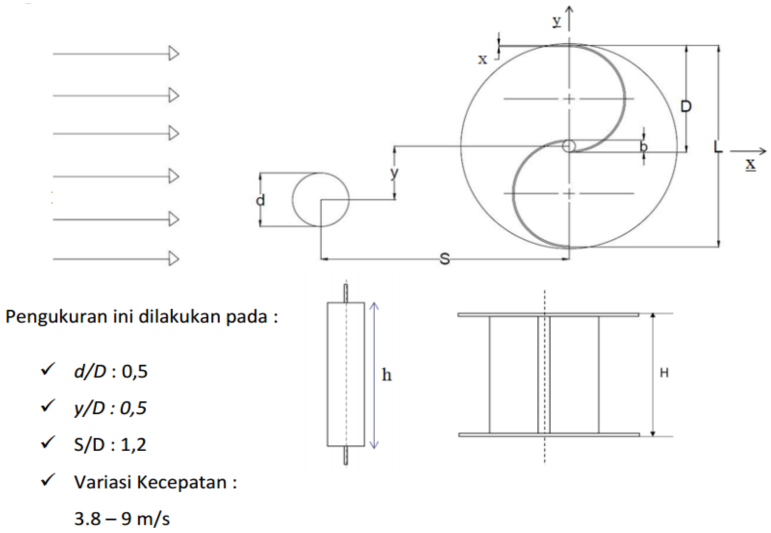
Gambar 2. 18 Skema Alat untuk Pengganggu pada Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)

Hasil dari penelitian ini adalah nilai *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius meningkat hingga 27,3% pada λ = 0,7 dan β = 100,83^0 dengan menggunakan dua buah sudu pengganggu. Dapat dilihat pada Gambar 2.19



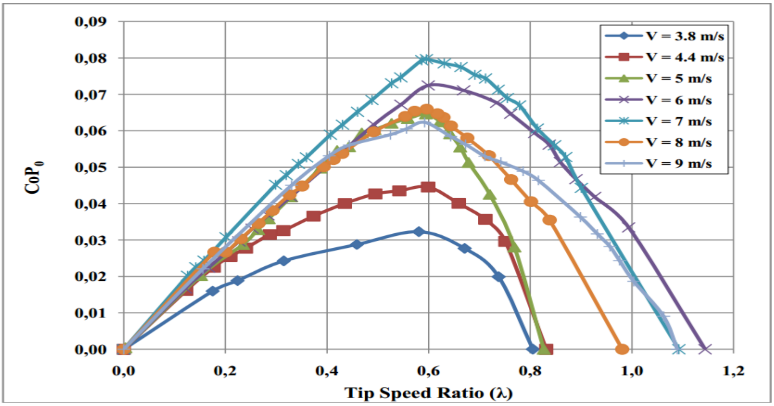
Gambar 2. 19 Grafik Antara Speed Ratio dan coefficient power pada Turbin Angin Savonius dengan Dua Sudu. (Mohamed et al, 2010)

Pada tahun 2020 dilakukan penelitian oleh Bagas Ramadhan Ananthо (2020) tentang peningkatan performa turbin Savonius dengan cara menambahkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini memiliki beberapa variasi, yaitu: d/D = 0,5; y/D = 0,5; S/D = 1,2 dengan Kecepatan Angin 3.8,4.4,5,6,7,8,9 m/s. Hasil yang akan diamati dari penelitian ini adalah nilai torsi statis dan dinamis 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 2.20 dibawah ini:

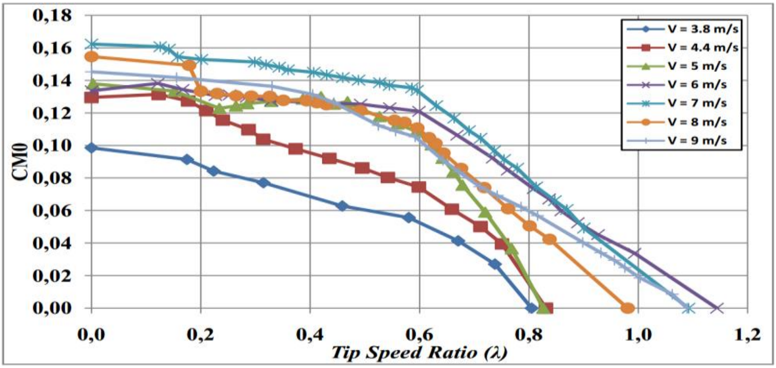


Gambar 2. 20 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (Bagas, 2020)

Pada penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius yang memiliki diameter (D) = 167 mm dan tinggi (H) = 298 mm, dan sebagai pengganggu digunakan silinder sirkular yang diletakkan di depan *returning blade* turbin. Berikut adalah hasil yang didapat dari penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 2.21 yang jika dilihat dari trendline bahwa nilai CoP_0 pada V=3.8,4.4,5,6,7,8,9 m/s mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan nilai Re mempengaruhi nilai CoP turbin angin Savonius.

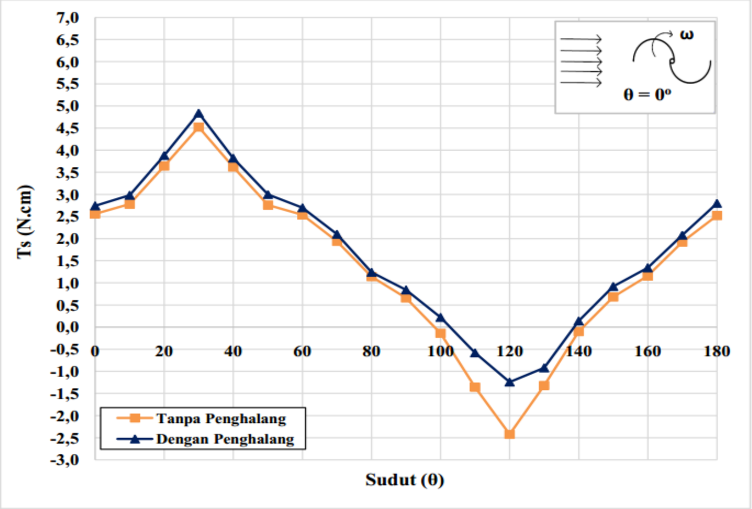


Gambar 2. 21 Grafik Coefficient of Power (CoPo) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020)



Gambar 2. 22 Grafik Coefficient of Moment (CMo) Terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020)

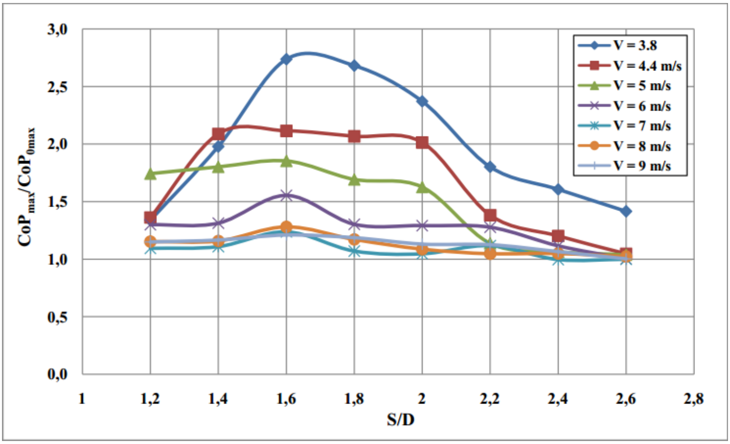
Gambar 2.22 menunjukan bahwa variasi dari kecepatan angin mempengaruhi kecepatan aliran fluida yang kemudian akan mempengaruni nilai *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius.



Gambar 2. 23 Grafik Torsi Statis (Ts0) Terhadap Fungsi Sudut (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu (Bagas, 2020)

Berdasarkan Gambar 2.23 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 5 m/s, nilai torsi statis maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 30º yaitu sebesar 4,52 N-cm dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 120º yaitu sebesar -2,42 N-cm. Nilai torsi statis maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,2 diperoleh pada posisi angular sudu 30º sebesar 4,84 N-cm dan minimum terendah pada posisi angular sudu 120º sebesar -1,24 N-cm. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu. Turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu belum memiliki torsi statis 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.

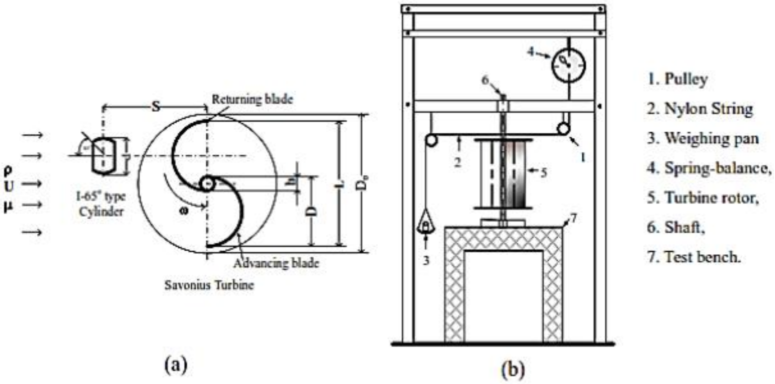


Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan *Coefficient of Power* antara Turbin Angin Savonius dengan dan tanpa Silinder Pengganggu (CoP*max*/CoP0*max*) Terhadap Variasi S/D di Kecepatan = 3.8 s.d 9 pada d/D = 0,5 (Bagas,2020)

Berdasarkan Gambar 2.24 didapatkan nilai CoP*max*/CoPo*max* 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*/CoPo*max* yang didapatkan memiliki nilai lebih dari 1 (CoP*max*/CoPo*max*> 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 variasi kecepatan mempunyai nilai CoP*max*/CoPo*max* 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

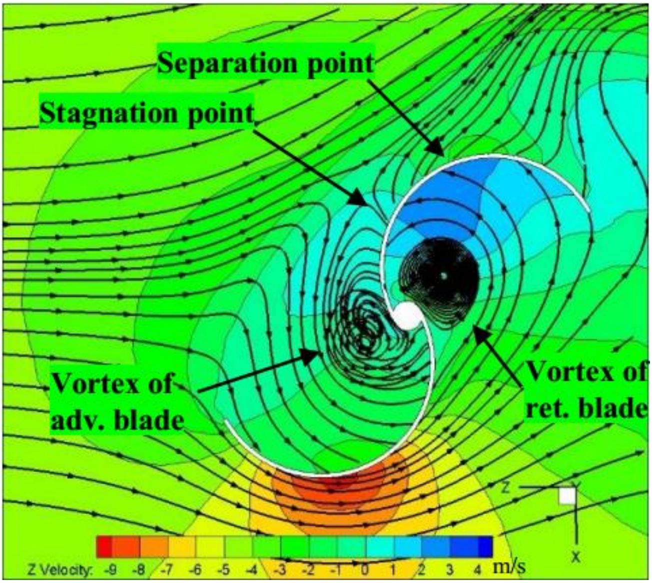
meningkat sebesar 85,32% dari 0,0646 menjadi 0,1255, pada kecepatan 6 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 55,38% dari 0,0724 menjadi 0,0941, pada kecepatan 7 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat sebesar 23,71% dari 0,0797 menjadi 0,0884, pada kecepatan 8 m/s didapatkan CoP maksimum meningkat 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*/CoPo*max* kurang efektif ketika silinder pengganggu diletakkan pada jarak S/D 2.2 - 2.6, dimana nilai CoP*max*/CoPo*max* 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.

Pada tahun 2019 juga telah dilakukan penelitian tentang peningkatan performa turbin Savonius menggunakan *software* CFD oleh Gunawan Sakti et al. Penelitian yang dilakukan pada S/D= 1,4 dan Re = 9,9 x 10^4. Skema alat dapat dilihat pada Gambar 2.25.



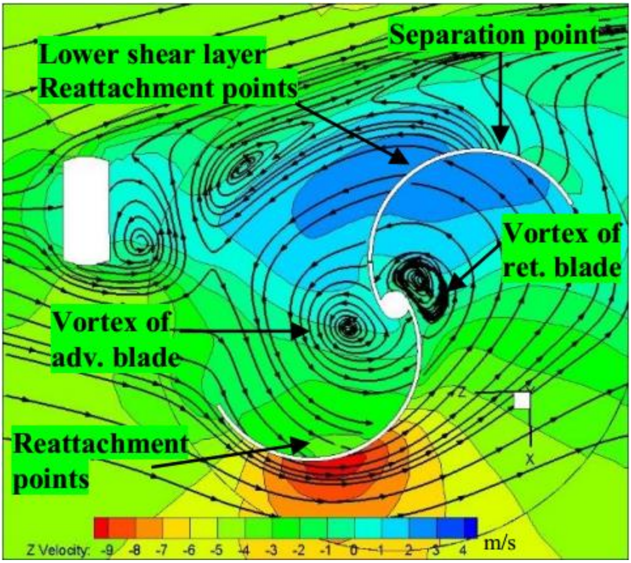
Gambar 2. 25 (a) Susunan Turbin Angin Savonius dengan Silinder Type I-650 dipasang didepan Returning *blade*. (b) Skema Diagram Pengukuran Rope-Brake Dynamometer (Gunawan Sakti et al. 2019)

Pada penelitian ini diberikan grafik perbandingan kontur kecepatan antara turbin konvensional dan turbin dengan I-65^0. Grafik diberikan pada pada saat θ = 30^0, 90^0, dan 150^0.



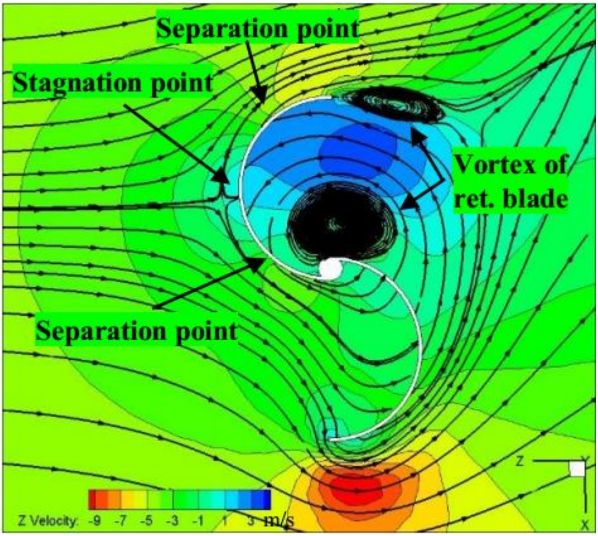
Gambar 2. 26 Kontur Kecepatan Turbin Konvensional pada θ = 300(Gunawan Sakti et al. 2019)

Titik stagnasi terjadi pada titik tertentu pada permukaan cembung *returning blade*. Titik separasi ditentikan ketika perlambatan aliran *upstream* melawan gesekan permukaan *blade* dan gradien tekanan yang berlawanan kemudian mulai berpisah dengan sedikit peningkatan kecepatannya. *Vortex* terangkat dekat poros pada *returning* dan *advancing blade* sebagai efek dari rotasi turbin seperti pada Gambar 2.26.



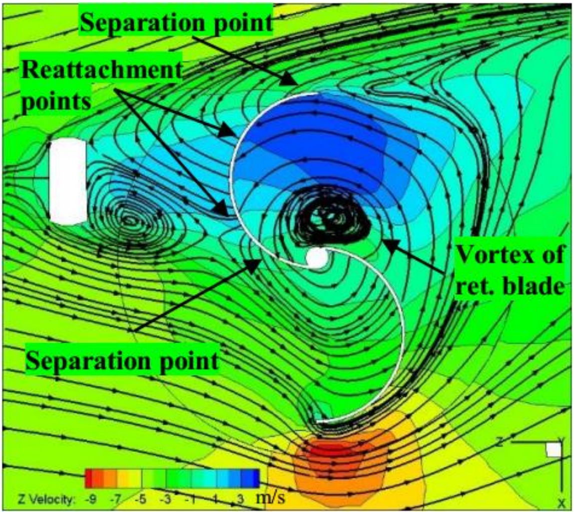
Gambar 2. 27 Kontur Kecepatan Turbin dengan Silinder I-650 pada θ = 300(Gunawan Sakti et al. 2019)

The Tip Speed Ratio shear layer terhubung kembali pada titik tertentu dari permukaan cembung *returning blade*, dan relatif bergeser keluar dari titik stagnasi dari titik stagnasi konvensional. Titik ini bergeser menunda titik separasi pada *returning blade* dan memperkecil lebar dari *maintenance downstream returning blade*. *Maintenance* meruncing dibelakang *returning blade* mengurangi tekanan *drag*, akibatnya meningkatkan torsi turbin. Berkurangnya lebar dari *maintenance* ditunjukkan dengan penyusutan lebar *vortex* dekat poros turbin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.27.



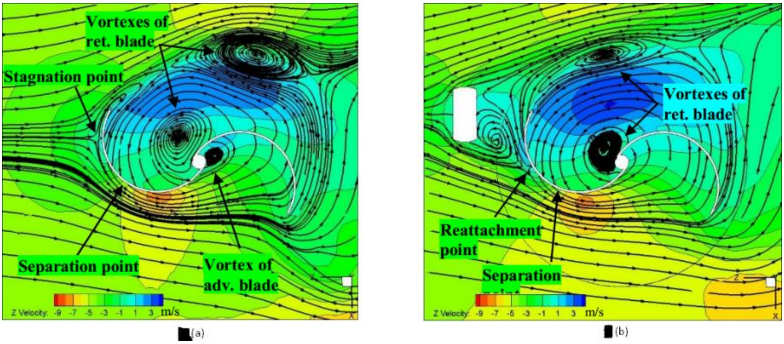
Gambar 2. 28 Kontur Kecepatan Turbin Konvensional pada θ = 900(Gunawan Sakti et al. 2019)

Titik stagnasi terlihat hampir di pusat cembung *returning blade*. kedua titik stagnasi jatuh pada beberarapa derajat di dekat titik stagnasi digambarkan ketika aliran *shear layer* mulai meninggalkan permukaan dengan seidikit peningkatan kecepatan. Dua *vortex* dari *returning blade* muncul pada saat posisi sudut ini yang ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2. 29 Kontur Kecepatan Turbin dengan Silinder I-650 pada θ = 900(Gunawan Sakti et al. 2019)

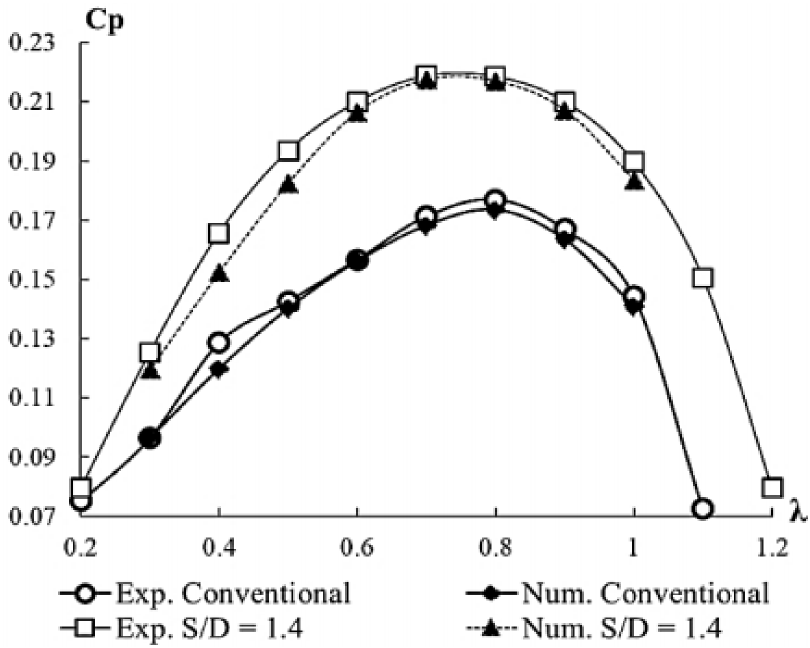
The *Tip Speed Ratio shear layer* kembali terhubung dan terpisah pada *returning blade* cembung semakin dekat ke poros turbin. The upper *shear layer* mempunyai karakteristik serupa yang menyatu kembali dan titik separasi bergeser lebih dekat ke ujung *returning blade*. Pergeseran dari titik separasi meruncingkan *maintenance* dan mengurangi tekanan *drag* dari *returning blade*, sehingga meningkatkan torsi turbin. *Vortex* dekat ujung *returning blade* menghilang karena *maintenance* meruncing, sedangkan *vortex* dekat poros turbin menyusut lebih kecil menandakan *maintenance downstream returning blade* melemah yang ditunjukkan pada Gambar 2.29.



Gambar 2. 30 Kontur Kecepatan pada θ = 900 (a) Turbin Konvensional (b) Turbin dengan Silinder I-650(Gunawan Sakti et al. 2019)

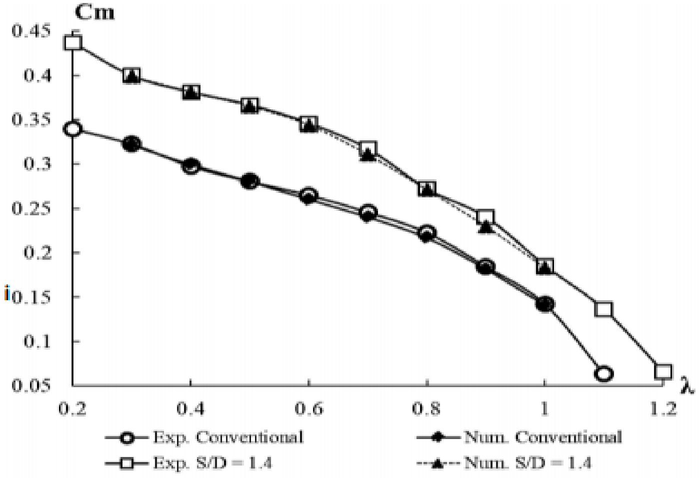
Pada silinder I-65^0 menghasilkan dua *shear layer*, *Tip Speed Ratio* *shear layer* terhubung kembali pada bagian cembung *returning blade* dan menunda titik separasi. Tertundanya titik separasi akan mempersempit *maintenance downstream returning blade* dan mengurangi tekanan *drag*, akhirnya meningkatkan kinerja turbin. *Maintenance* melemah ditunjukkan dengan lenyapnya *vortex*. Ketika *blade* pada sudut 150^0 diperoleh titik terendah karena beberapa bagian *advancing blade* terbenam dalam *maintenance* silinder I-65^0 dan tekanan *drag returning blade* meningkat yang ditunjukkan pada Gambar 2.30.

Dari penelitian didapatkan hasil dari *coefficient moment* dan *coefficient power* yang ditunjukkan pada Gambar 2.31



Gambar 2. 31 Hasil dari *Power coefficient* Turbin Sebagai Fungsi dari TSR (Gunawan Sakti et al. 2019)

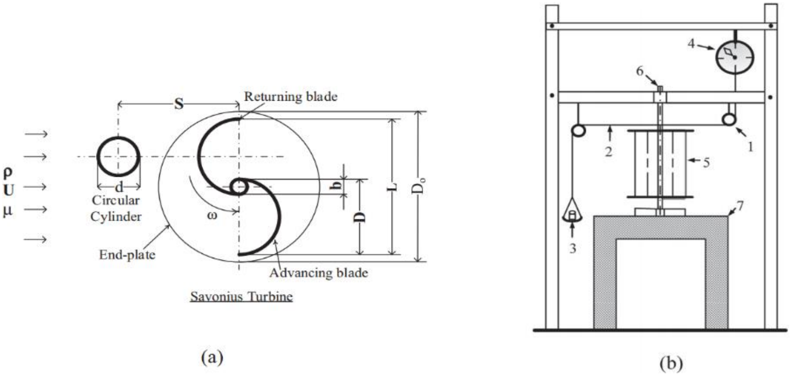
Nilai CoP maksimum antara turbin konvensional dan turbin dengan silinder I-65^{0} yaitu 0,177 dan 0,218. CoP maksimum pada turbin dengan silinder I-65^{0} pada TSR 0.8 meningkat sebesar 23.61% dibandingkan turbin konvensional. Sedangkan untuk nilai CoM bisa dilihat pada Gambar 2.32



Gambar 2. 32 Hasil dari Coefficient Moment Turbin Sebagai Fungsi dari TSR (Gunawan Sakti et al. 2019)

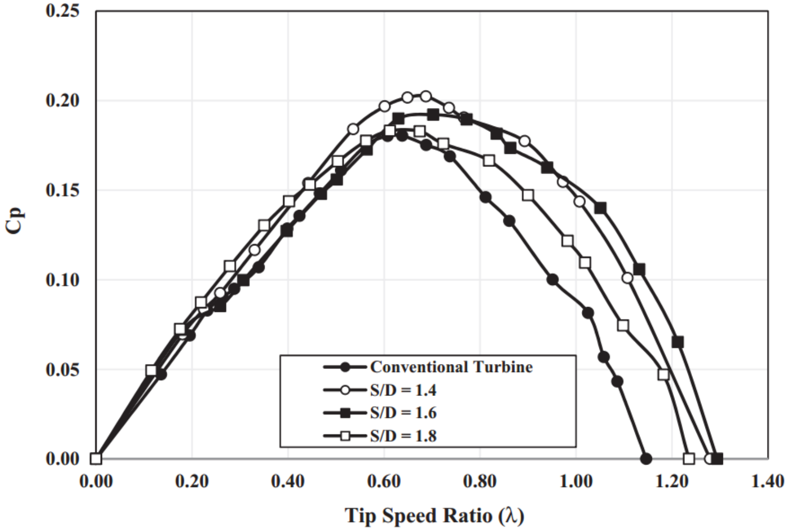
Dari Gambar 2.32 didapatkan hasil maksimum *gap* antara numerical dan experimen diperolah TSR = 0.8 untuk turbin konvensional dan TSR=0.9 untuk turbin dengan silinder I-65^0. Kondisi khusus pada maksimum *gap* dihitung mencapai 2.65% dan 4.25%. keseluruhan momen koefisien Cm spesifik untuk TSR rentang angka hingga 0,3 < λ≤ 1.0 diang*gap* masih di bawah nilai ketidakpastian, yaitu, 5,2%. Ini berarti bahwa penyimpangan dari Cm nilai antara kedua konfigurasi turbin masih bisa diterima.

Pada tahun 2020 juga telah dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius oleh Triyogi Yuwono et al dengan metode experimen. Penelitian dilakukan pada Re = 99000 dengan variasi S/D = 1.4 sampai 2.2. Skema penelitian pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.33.



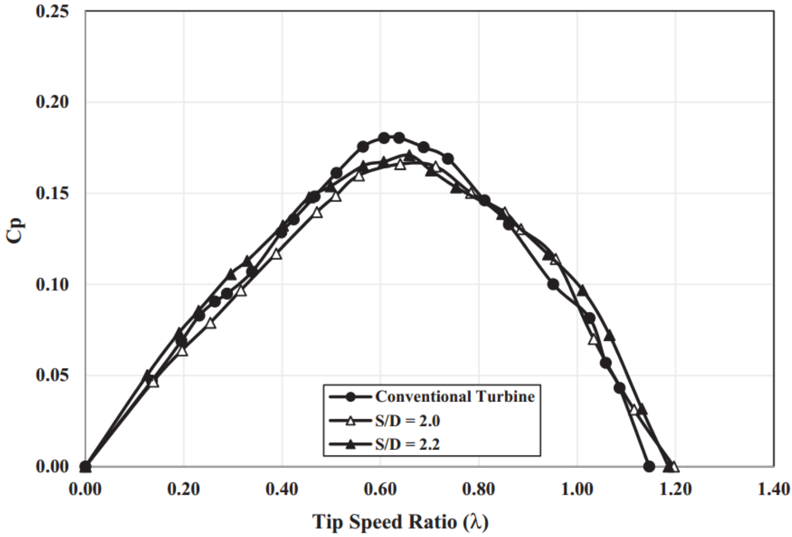
Gambar 2. 33 (a) Skema Turbin Angin Savonius dengan Silinder Sirkular Didepan Returning *Blade* (B) Skema Diagram Perhitungan Torsi Dinamis (Triyogi et al. 2020)

Pada penelitian ini didapatkan hasil pada turbin konvensional terjadi peningkatan nilai CoP ketika S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8. CoP maksimum terjadi pada λ = 0.65, 0.70, dan 0.67 meningkat sebesar 12.2%, 6.7 %, 1.7% untuk masing-masing S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.34.



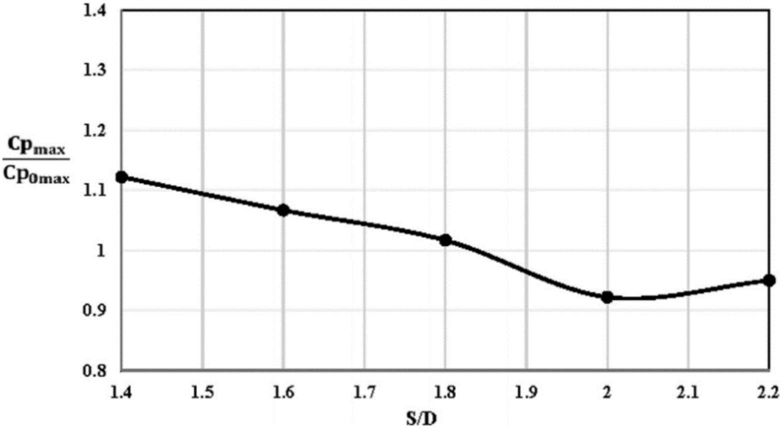
Gambar 2. 34 Perbandingan CoP Terhadap λ pada S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020)

Namun pada S/D > 1.8 performa turbin ditunjukkan oleh CoP dapat dianggap relatif sama seperti turbin konvensional atau bahkan lebih rendah untuk 0.44 < λ < 0.8 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.35



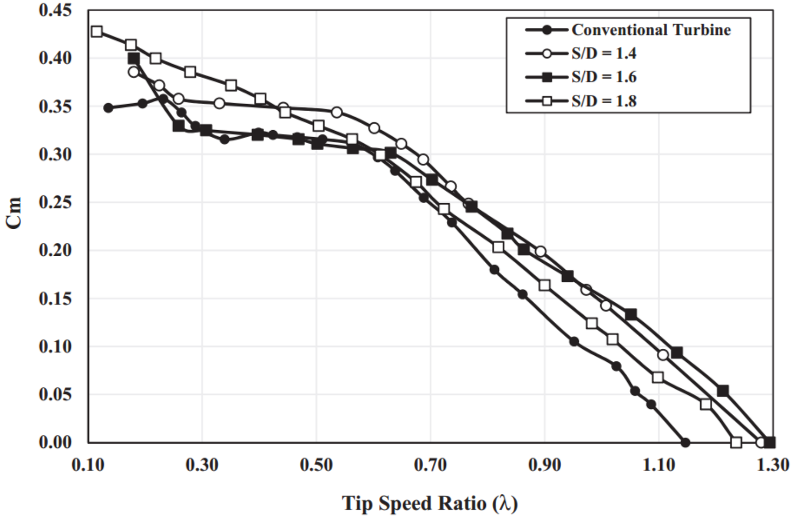
Gambar 2. 35 Perbandingan CoP Terhadap λ pada S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020)

Jadi ketika posisi silinder sirkular menjauhi *returning blade* seperti dua objek yang berdiri sendiri dan tidak saling mempengaruhi.



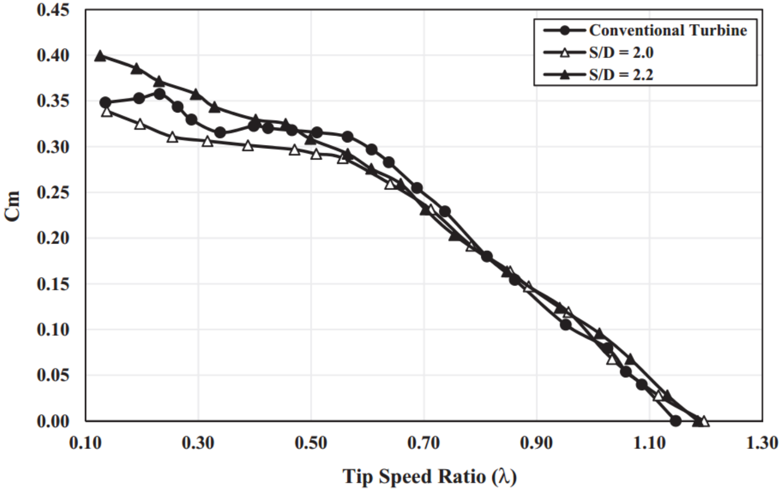
Gambar 2. 36 Perbandingan Rasio CoPmax/CoP0max Terhadap S/D (Triyogi et al. 2020)

Gambar 2.36 menunjukkan grafik CoP maksimum turbin Savonius dengan silinder sirkular diletakkan dibagian *upstream returning blade* terhadap CoP maksimum turbin konvensional (CoPmax/CoP_0max) sebagai fungsi S/D. Dari Gambar 2.36 menunjukkan CoP maksimum untuk S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 masing masing mengalami kenaikan CoP sebesar 12.2%, 6.7%, dan 1.7%. Namun ketika S/D > 1.8 atau menjauhi *returning blade* nilai CoPmax/CoP_0max mendekati 1 dan cenderung lebih kecil jika S/D meningkat. Hal ini bisa dikatakan ketika S/D > 1.8 tidak lagi efektif untuk mengubah performa turbin.



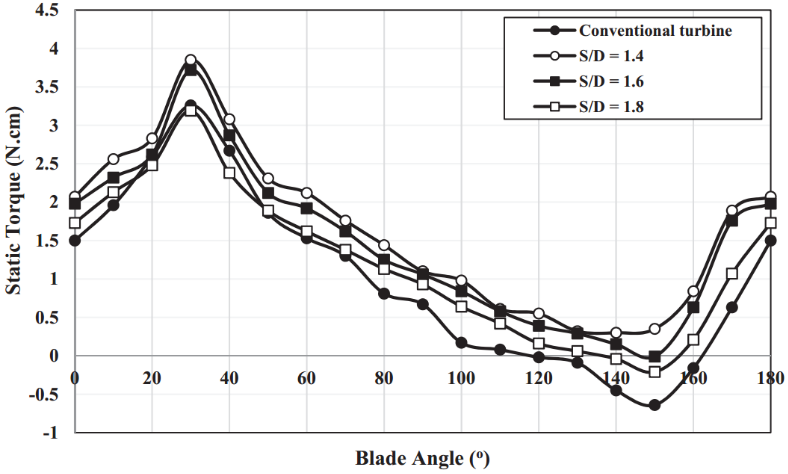
Gambar 2. 37 Perbandingan CoM Terhadap λ pada S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020)

Penelitian ini juga mendapatkan hasil pengaruh nilai *Coefficient of Moment* yang ditunjukkan pada Gambar 2.37. Dari gambar tersebut dapat dilihat terbukti ketika silinder sirkular dipasang didepan *returning blade* pada S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 mendapatkan nilai CoM yang lebih tinggi hampir untuk semua *tip speed ratio* relatif terhadap turbin Savonius konvensional dan menunjukkan terjadinya peningkatan turbin.



Gambar 2. 38 Perbandingan CoM Terhadap λ pada S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020)

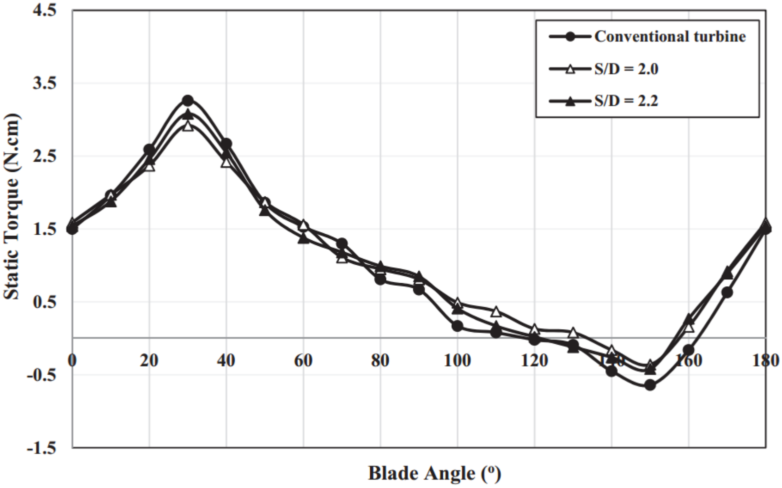
Namun ketika silinder sirkular dijauhkan dari *returning blade* pada S/D > 1.8 menunjukkan hasil perbandingan CoM agak rumit. Dimana untuk $\lambda < 0.44$ nilai CoM pada turbin konvensional lebih rendah ketika di depan returning *blade* dipasang silinder sirkular pada S/D = 2.2, tetapi masih lebih tinggi dari S/D = 2.0 seperti ditunjukkan pada Gambar 2.38.



Gambar 2. 39 Perbandingan Torsi Statis Terhadap *Blade* Angle untuk S/D = 1.4, 1.6, dan 1.8 (Triyogi et al. 2020)

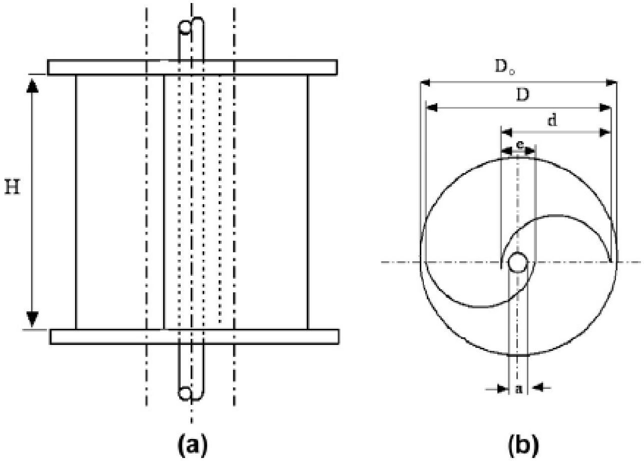
Pada turbin konvensional terdapat nilai torsi statis negatif yang diperoleh dalam kisaran sudut *blade* antara 130^0 dan 160^0. Nilai negatif menunjukkan turbin konvensional tidak memiliki kemampuan *self-starting*. Namun keberadaan silinder sirkular pada *upstream returning blade* pada S/D = 1.4 dan 1.6 dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin. Ini ditunjukkan dengan nilai positif torsi statis untuk semua posisi sudut *blade*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.39.

Hasil dari penelitian juga ditampilkan jarak S/D semakin jauh dari 1.6, peletakan silinder sirkular pada *upstream returning blade* tidak dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.40. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberadaan silinder sirkular didepan returning *blade* pada S/D > 1.8 tidak lagi efektif untuk meningkatkan performa turbin.



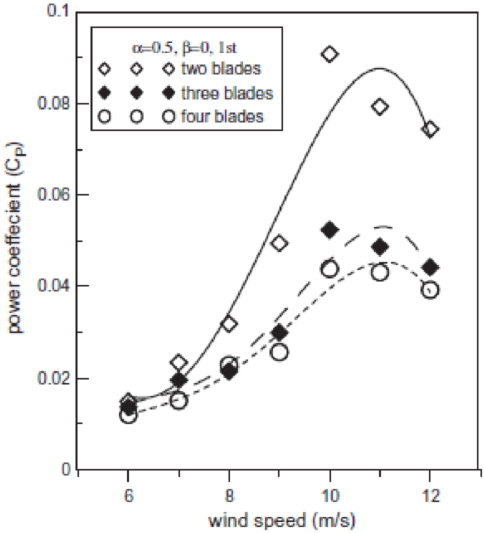
Gambar 2. 40 Perbandingan Torsi Statis Terhadap *Blade* Angle untuk S/D = 2.0 dan 2.2 (Triyogi et al. 2020)

Pada penlitian N.H. Mahmoud et al (2012) dilakukan percobaan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan menggunakan beberapa variasi yaitu: jumlah *blade* adalah dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b); *single stage* (1st) dan *doble stages* (2st); *overlap ratio* (β) 0, 0.2, 0.25, 0.3 dan 0.35; dan *aspect ratio* 0.5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada tidaknya *end plates*. Berikut skema *single-stage* turbin angin Savonius pada Gambar 2.41



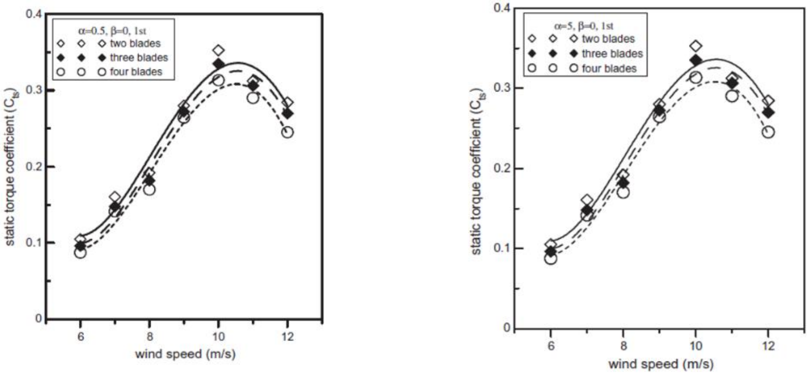
Gambar 2. 41 Skema Single-Stage Turbin Savonius: (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas.(Mahmoud, 2012)

Dari gambar 2.41 dapat dilihat skema dari turbin angin Savonius. Sudu turbin terbuat dari PVC dengan diameter yang berbeda (0.3, 0.2, 0.1 dan 0.08 m). Tebal *end plate* adalah 2.5 mm. Diameter *end plate* lebih besar 10% dari diameter turbin. Poros turbin Savonius memiliki diameter 14 mm. Berikut adalah hasil yang didapat dari percobaan ini dimulai dari pengaruh jumlah *blade*, pengaruh jumlah stage, pengaruh dari *overlap ratio* dan pengaruh dari *aspect ratio* berturut-turut adalah:



Gambar 2. 42 Hubungan antara *Power coefficient* dan Kecepatan Angin Untuk Turbin Dengan Dua, Tiga dan Empat *Blade*. (Mahmoud, 2012)

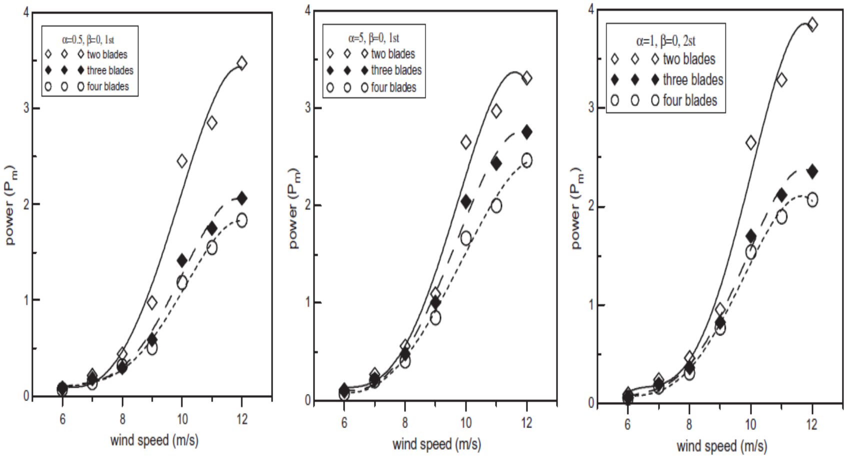
Gambar 2.42 diatas menunjukkan hubungan antara *power coefficient* dan kecepatan angin dari jumlah *blade* yang berbeda dengan *aspect ratio* 0.5, *overlap ratio* 0 dan *single stage*. Hasilnya adalah *power coefficient* untuk turbin yang menggunakan dua *blade* lebih tinggi dari pada turbin yang menggunakan tiga, dan empat *blade*.



(a) (b)

Gambar 2. 43 Hubungan antara Koefisien Torsi Statis dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat *blade*s (a) *aspect ratio* = 0,5 dan (b) *aspect ratio* = 5 (Mahmoud, 2012)

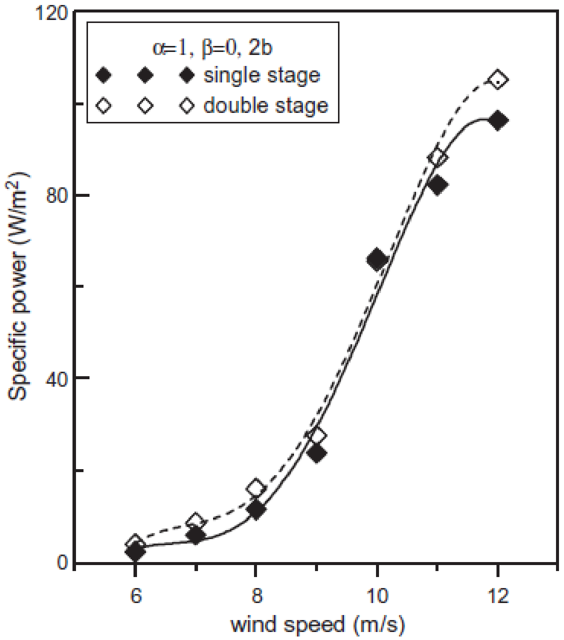
Pada penelitian ini Gambar 2.43 menunjukkan pengaruh jumlah *blade* terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius pada *aspect ratio* sebesar 0,5 dan 5, *overlap ratio* sebesar 0 dengan kondisi *single stage* rotor. Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa torsi statis pada turbin Savonius dengan dua *blade* lebih tinggi dari pada torsi statis pada turbin Savonius dengan tiga dan empat *blade* pada *aspect ratio* 0,5 dan 5.



(a) (b) (c)

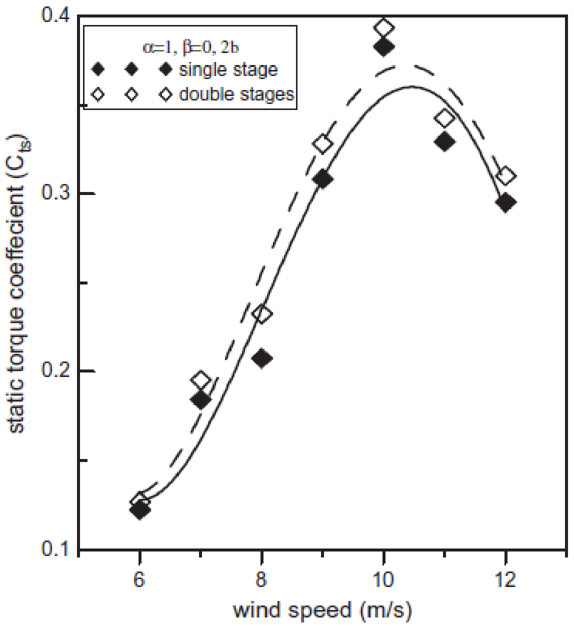
Gambar 2. 44 Hubungan antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat *blade*s (a) *aspect ratio* = 0,5; *single stage*, (b) *aspect ratio* = 5; *single stage*, dan (c) *aspect ratio* = 0,5; *double stages*. (Mahmoud, 2012)

Gambar 2.44 menunjukkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius dengan dua, tiga, dan empat *blade* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa turbin dengan dua *blade* mempunyai performa lebih baik dari pada tiga dan empat *blade* untuk semua *aspect ratio* dan pada *single stage* maupun *double stages*.



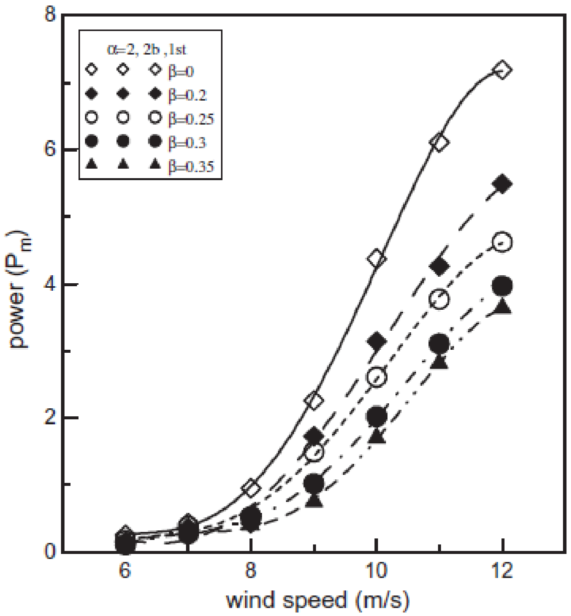
Gambar 2. 45 Hubungan antara *Specific power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius *single stage* dan *double stages*(Mahmoud, 2012)

Dari gambar 2.45 diatas didapatkan hubungan antara *specific power* dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai *specific power* pada turbin Savonius *double stages* lebih besar dari pada *specific power* pada turbin Savonius *single stage*.



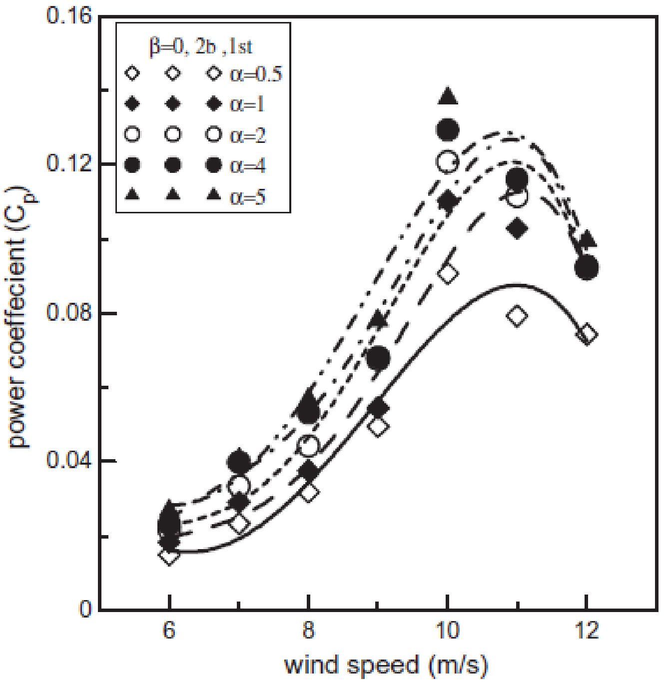
Gambar 2. 46 Hubungan antara Torsi Statis dan Kecepatan Angin pada Turbin Savonius *single stage* dan *double stages*(Mahmoud, 2012)

Pada gambar 2.46 didapatkan hubungan antara torsi statis dan kecepatan angin pada turbin Savonius *single stage* dan *double stages* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai torsi statis pada turbin Savonius *double stages* lebih besar dari pada torsi statis pada turbin Savonius *single stage*.



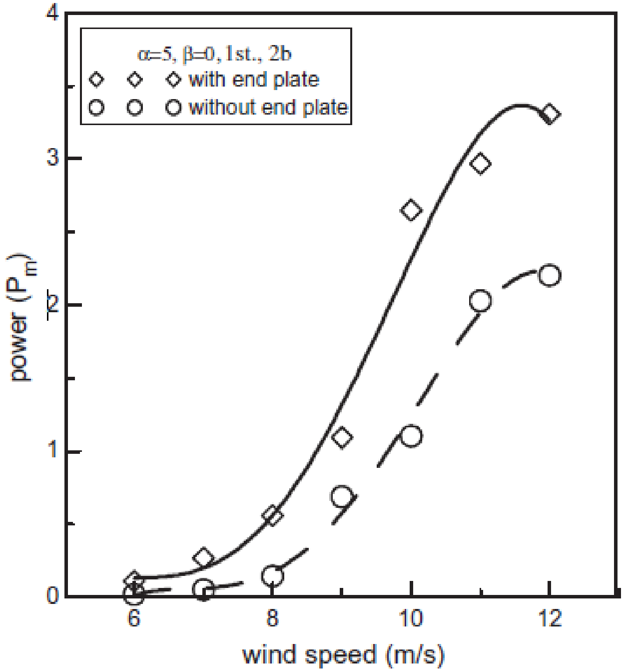
Gambar 2. 47 Hubungan antara *Mechanical Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *overlap ratio*(Mahmoud, 2012)

Pada gambar 2.47 didapatkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *overlap ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari *mechanical power* akan menurun seiring meningkatnya *overlap ratio* pada turbin Savonius.



Gambar 2. 48 Hubungan antara *Coefficient of Power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi *aspect ratio*(Mahmoud, 2012)

Pada Gambar 2.48 didapatkan hubungan antara *Coefficient of Power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan variasi *aspect ratio* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Dari gambar diatas didapatkan bahwa nilai dari *Coefficient of Power* akan meningkat seiring meningkatnya *aspect ratio* pada turbin Savonius.

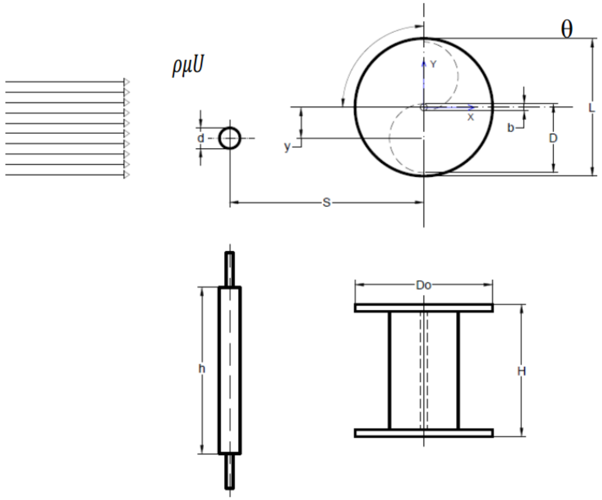


Gambar 2. 49 Hubungan antara *Mechanical power* dan Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Adanya *End plate* dan Tanpa *End plate*(Mahmoud, 2012)

Gambar 2.49 menunjukkan hubungan antara *mechanical power* dan kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan adanya *end plate* dan tanpa *end plate* terhadap peningkatan performa turbin Savonius. Pada gambar diatas didapatkan bahwa turbin Savonius yang menggunakan *end plate* memiliki nilai *mechanical power* yang lebih tinggi daripada tanpa menggunakan *end plate*.

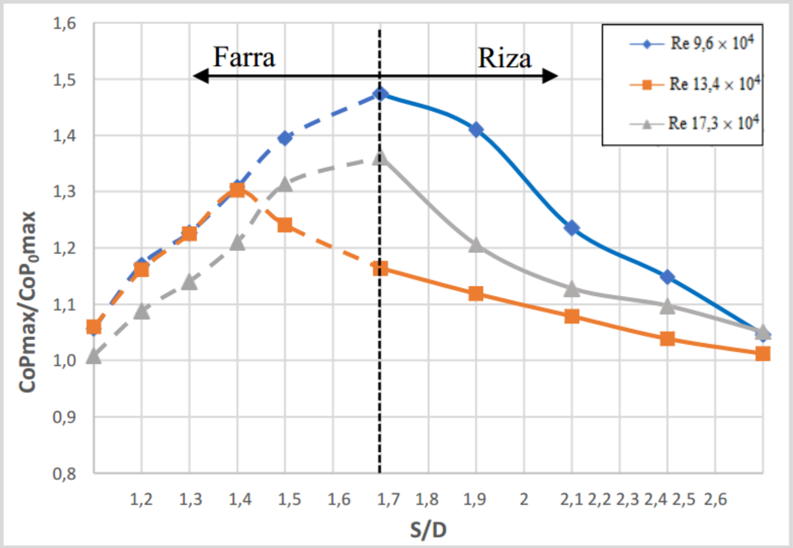
Penelitian berupa studi eksperimen pengaruh silinder pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius ini dilakukan oleh Riza Umami (2019). Tujuan penelitian ini adalah untuk meningkatkan

performa turbin dengan menambahkan silinder pengganggu didepan *returning blade*. Penelitian dilakukan pada y/D = 0,5 dan d/D = 0,2 dengan variasi S/D = 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; dan variasi bilangan Reynolds 96000, 135000 dan 173000. Hasil yang akan diamati dari penelitian ini adalah nilai torsi statis dan dinamis 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 2.50 dibawah ini:



Gambar 2. 50 Skema Penelitian dan Parameter Ukur (Riza, 2019)

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan maka didapatkan beberapa dara yang menunjukkan pengaruh adanya silinder penghalang didepan *returning blade* terhadap kinerja turbin angin Savonius. Didapatkan data berupa nilai *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada Bilangan Reynolds $9{,}6 \times 10^4$; $13{,}4 \times 10^4$ dan $17{,}3 \times 10^4$ dapat dilihat pada Gambar 2.51

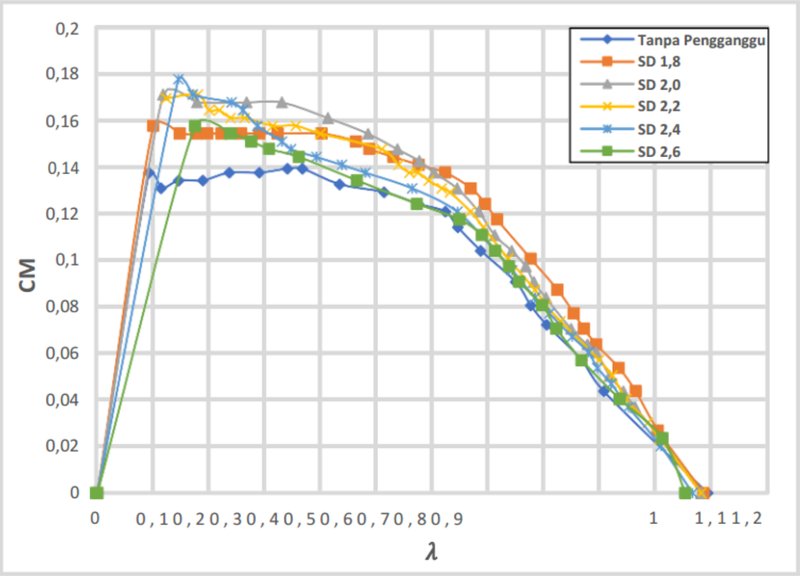


Gambar 2. 51 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Turbin dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu (CoPmax/CoP0max) sebagai Fungsi Jarak S/D dengan d/D = 0,2; y/D = 0,5 pada Re = 9,6 × 10^4; 13,4 × 10^4 dan 17,3 × 10^4(Riza, 2019)

Pada gambar 2.51 dapat diketahui perbandingan nilai CoP/CoPo terhadap jarak S/D = 1,2 – 2,6 pada bilangan Reynolds 9,6 × 10^4; 13,4 × 10^4 dan 17,3 × 10^4. Dari grafik dapat dilihat *trendline* pada awalnya naik sampai pada nilai S/D tertentu, kemudian *trendline* terus menurun seiring bertambahnya jarak S/D. Pada bilangan Reynolds 9,6 × 10^4 nilai CoP/CoPo maksimum terdapat pada jarak S/D = 1,8 sebesar 1,474. Pada bilangan Reynolds 13,4 × 10^4 nilai CoP/CoPo maksimum terdapat pada jarak S/D = 1,5 sebesar 1,302 dan pada bilangan Reynolds 17,3 × 10^4 nilai CoP/CoPo maksimum terdapat pada jarak S/D = 1,8 sebesar 1,362. Jadi Penambahan silinder pengganggu pada

semua jarak S/D untuk masing-masing bilangan Reynolds $9{,}6 \times 10^4$; $13{,}4 \times 10^4$ dan $17{,}3 \times 10^4$ efektif meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius.

Pada bilangan Reynolds $9{,}6 \times 10^4$ penambahan silinder pengganggu paling efektif meningkatkan *Coefficient of Power* saat diletakkan pada jarak S/D = 1,8 yaitu terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 46,38%. Pada bilangan Reynolds $13{,}4 \times 10^4$ penambahan silinder pengganggu paling efektif meningkatkan *Coefficient of Power* saat diletakkan pada jarak S/D = 1,5 yaitu terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 30,23%. Pada bilangan Reynolds $17{,}3 \times 10^4$ penambahan silinder pengganggu paling efektif meningkatkan *Coefficient of Power* saat diletakkan pada jarak S/D = 1,8 yaitu terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 35,38%.



Gambar 2. 52 Grafik Perbandingan *Coefficient of Moment* Turbin dengan Silinder Pengganggu (CM) dan Tanpa Silinder Pengganggu (CMo) sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) d/D = 0,2; y/D = 0,5; Re = 13,4 × 10^4(Riza, 2019)

Penambahan silinder pengganggu pada jarak S/D = 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6 untuk bilangan Reynolds 13,4 × 10^4 efektif meningkatkan *Coefficient of Moment* (CM) turbin angin Savonius. Penambahan silinder pengganggu paling efektif meningkatkan *Coefficient of Moment* saat diletakkan pada jarak S/D = 2,4 yaitu terjadi peningkatan *Coefficient of Moment* maksimum sebesar 29,93% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Hal ini dapat diartikan bahwa pada jarak S/D ini silinder pengganggu paling efektif untuk mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*

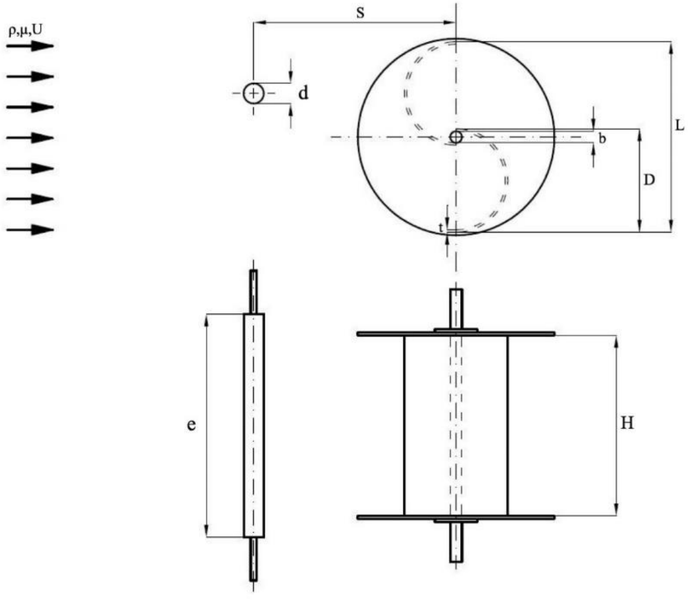
sehingga transisi aliran juga terjadi semakin cepat. Sehingga menyebabkan torsi yang didapat juga semakin besar.

.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Parameter yang diukur

Pada penelitian ini dimensi digunakan untuk mengetahui parameter yang mempengaruhi efisiensi turbin angin Savonius dengan diberi penghalang silinder. Penelitian ini dianalisa dengan variasi jarak antara pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu dan juga variasi kecepatan turbin angin Savonius. Beberapa parameter lain yang juga mempengaruhi performa turbin angin Savonius yaitu diameter *blade* (D), densitas(ρ), viskositas udara(μ), diameter silinder pengganggu (d), kecepatan fluida (U), tinggi turbin (H), panjang silinder(t), diameter overlap (b), jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (y), kecepatan putar sudu turbin Savonius (ω), jarak antara pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu (S/D). Parameter tadi dapat diilustrasikan dengan Gambar 3.1 berikut ini:



Gambar 3. 1 Skema Penelitian (Pandangan Atas dan Samping)

3.2. Analisa Dimensi

Pada penelitian ini dibutuhkan analisa dimensi untuk menentukan variabel apa saja yang mempengaruhi peforma turbin Savonius yang disebabkan oleh pemberian pengganggu berupa silinder sirkular.

3.2.1. Analisa Dimensi untuk CoP

Langkah yang dilakukan untuk analisa dimensi pada CoP dengan metode Buckingham-Phi Teorema yaitu:

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi CoP:

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

Jumlah parameter keseluruhan (n) = 11
Parameternya yaitu:

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

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam analisa, yaitu dipilih MLt pada analisa dimensi ini.
3. Dari semua parameter yang dipilih kemudian membuat dimensi primer

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

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

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

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

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

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

Mencari nilai a, b, dan c.

- M : 1+a = 0

a = -1

- t : -3-b = 0
  b = -3
- L : -3a + b + c + 2 = 0
  3-3+c+2 = 0
  c = -2

Sehingga,

$\pi_1 = P\ \rho^{-1}\ U^{-3}\ D^{-2}$

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

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

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

Nilai a = b = c =1, sehingga

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

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

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

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

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

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

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

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

Dari analisa dimensi didapatkan grup tak berdimensi yaitu:

π_1 : *Coefficient of Power*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius

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

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

π_6 : rasio ketebalan sudu dengan diameter turbin angin Savonius

π_7 : rasio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius

π_8 : *tip speed ratio*

Dari hubungan antara grup tak berdimensi dapat ditulis dengan rumus fungsi berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_{7,}\pi_8)$$

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

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

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

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

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

Atau dapat ditulis juga menjadi :

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

3.2.2. Analisa Dimensi *Coefficient* of Moment

Langkah yang dilakukan untuk analisa dimensi pada *Coefficient of Moment* dengan metode Buckingham-Phi Teorema yaitu:

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi *Coefficient* of Moment:

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

Jumlah parameter keseluruhan (n) = 11
Parameternya yaitu:
M : *power* (J/s)
ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
μ : viskositas udara (Ns/m^2)
U : kecepatan aliran udara (m/s)
D : diameter sudu turbin Savonius (m)
d : diameter silinder pengganggu (m)
S : jarak antara pusat silinder pengganggu terhadap pusat *returning blade* (m)
H : tinggi turbin angin Savonius (m)
y : jarak antara titik pusat silinder terhadap proyeksi titik pusat turbin Savonius (m)
b : diameter poros / *overlap* (m)
ω : kecepatan putar sudu turbin Savonius (rad/s)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam analisa, yaitu dipilih MLt pada analisa dimensi ini.
3. Dari semua parameter yang dipilih kemudian membuat dimensi primer

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

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

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3

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

i. π_1 = M ρ^a U^b D^c = 1

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

Mencari nilai a, b, dan c.

- M : 1+a = 0

  a = -1

- t : -3-b = 0
  b = -3
- L : -3a + b + c + 2 = 0
  3-3+c+2 = 0
  c = -2

Sehingga,

π_1 = M ρ^{-1} U^{-3} D^{-2}

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Dari analisa dimensi didapatkan grup tak berdimensi yaitu:

π_1 : *Coefficient* of *Moment*

π_2 : Bilangan Reynolds

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius
π_4 : rasio jarak pusat *returning blade* dengan silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius
π_5 : rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius
π_6 : rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius
π_7 : rasio diameter *overlap* dengan diameter turbin angin Savonius
π_8 : *tip speed ratio*
Dari hubungan antara grup tak berdimensi dapat ditulis dengan rumus fungsi berikut:

$$\pi_1 = f\left(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_{7,}\pi_8\right)$$

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

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

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

Dalam penelitian ini, nilai D sebanding dengan nilai L dimana L = 2D – b – 2t. Untuk nilai b dan t adalah konstan. Nilai CoM pada kasus ini tetap sehingga didapatkan persamaan :

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

Atau dapat ditulis juga menjadi :

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

3.3. Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

3.3.1. Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius yang diperlukan pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.2 dengan spesifikasi pada Tabel 3.1

Gambar 3. 2 Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 1 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

MATERIAL	
Sudu turbin	Pipa PVC
Endplate	Alumunium cladding 2024
SPESIFIKASI	
Diameter sudu turbin (D)	167 mm
Tinggi turbin (H)	298 mm
Diameter turbin (2D-b-2t)	309 mm
Diameter poros (b)	19 mm
Diameter *end plate* (Do)	320 mm
Tebal *end plate*	1 mm
Tebal sudu turbin	4 mm

3.3.2. Silinder Pengganggu

Silinder pengganggu digunakan untuk mengurangi gaya *drag* pada turbin angin Savonius dan berdampak pada torsi yang akan meningkat. Silinder pengganggu yang digunakan seperti pada Gambar 3.3

Gambar 3. 3 Silinder Pengganggu

- Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (d/D) = 0,2
- Diameter silinder pengganggu (d) = 83 mm
- Tinggi silinder pengganggu (h) = 500 mm

3.3.3. *Axial fan*

Axial fan seperti pada Gambar 3.4 dengan spesifikasi pada Tabel 3.2 digunakan sebagai sumber fluida angin untuk memutar sudu turbin angin Savonius.

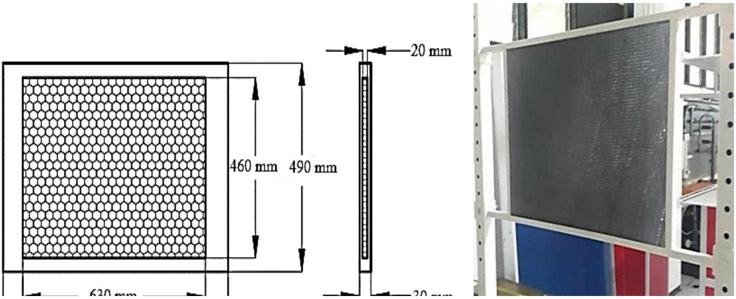
Gambar 3. 4 *Axial fan* CKESPV-18

Tabel 3. 2 Spesifikasi Axial fan CKESPV-18

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

3.3.4. Honeycomb

Honeycomb dengan spesifikasi pada Tabel 3.3 digunakan untuk menyeragamkan fluida angin yang bergerak menuju turbin angin Savonius yang diletakkan antara *axial fan* dengan turbin angin Savonius seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Honeycomb

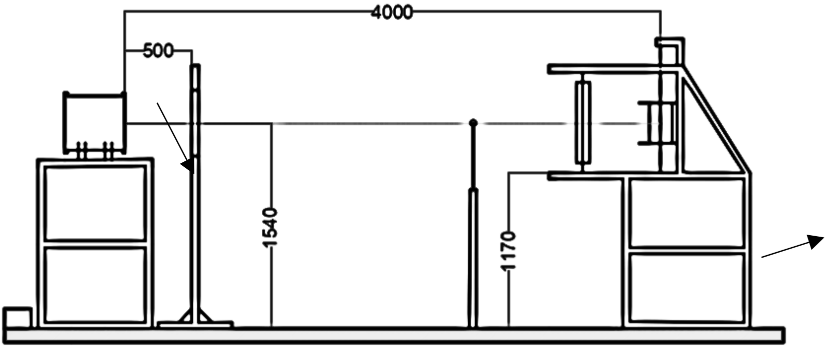
Tabel 3. 3 Spesifikasi Honeycomb

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

3.3.5. Penyangga Turbin Angin Savonius

Penyangga digunakan sebagai tempat untuk meletakkan dan meyusun turbin angin Savonius dan silinder pengganggu ditunjukkan pada Gambar 3.6 dan dimensinya pada Gambar 3.7

Gambar 3. 6 Skema Penyusunan Alat Penelitian



Gambar 3. 7Skema Penyusunan Alat Penelitian Dan Dimensinya

3.3.6. *Bearing*

Pada penelitian ini, *bearing* digunakan sebagai penghubung antara turbin angin Savonius dengan kerangka penyangganya. *Bearing* yang digunakan pada penelitian ini berjenis *deep-grove ball bearing* dengan tipe SKF 6301-2Z seperti pada Gambar 3.8 dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.4

Gambar 3. 8 Bearing SKF 6301-2Z

Tabel 3. 4 Spesifikasi Bearing SKF 6301-2Z

SPESIFIKASI BEARING SKF 6301-2Z	
Diameter Luar	37 mm
Diameter Dalam	12 mm
Tebal	12 mm
Limiting Speed	28.000 rpm
Basic Dynamic Load Rating	10.1 kN
Basic Static Load Rating	4.15 kN
Fatigue Load Rating	0.176 kN
Mass Bearing	0.063 kg

3.4. Alat ukur

3.4.1. Anemometer

Anemometer dengan spesifikasi pada Tabel 3.5 digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer ini juga bisa digunakan untuk mengukur suhu udara dalam satuan ^{o}C dan ^{o}F. Anemometer yang digunakan seperti pada Gambar 3.9

Tabel 3. 5 Spesifikasi Anemometer Omega HHF141

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

Gambar 3. 9 Anemometer Omega HHF141

3.4.2. Tachometer

Tachometer pada Gambar 3.10 adalah tipe Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12 dengan spesifikasi pada Tabel 3.6. Alat ini berguna untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar.

Tabel 3. 6 Spesifikasi Tachometer OMEGA Seri HHT12

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

Gambar 3. 10 Tachometer OMEGA HHT12

3.4.3. *Torque* Meter

Torque meter yang digunakan dalam penelitian ini adalah *torque* meter LUTRON model TQ-8800 seperti pada Gambar 3.11. *Torque* meter digunakan untuk mengukur torsi dari suatu

objek. Spesifikasi dari *Torque* Meter LUTRON Model TQ-8800 ditunjukkan pada Tabel 3.7

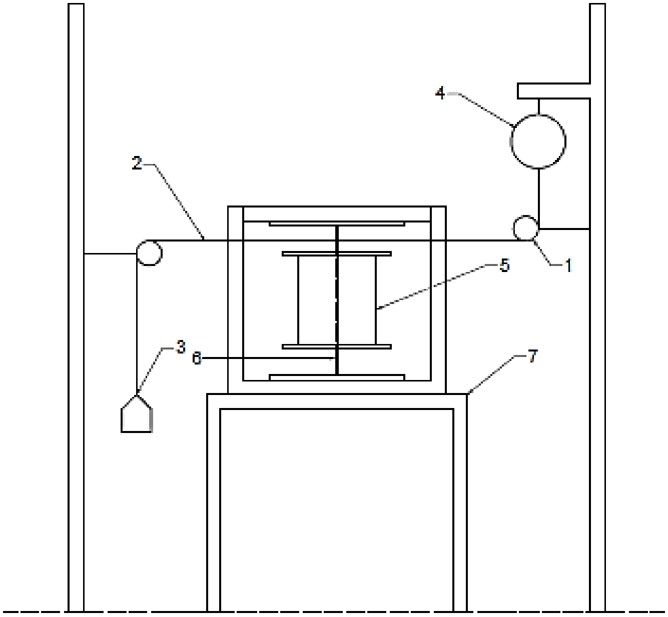
Tabel 3. 7 Spesifikasi Torque Meter LUTRON Model TQ-8800

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

Gambar 3. 11 Torque Meter LUTRON Model TQ-8800

3.4.4. *Brake* Dynamometer

Brake dynamometer digunakan untuk pengukuran torsi dinamis dengan timbangan sebagai spring balance. *Brake* dynamometer ditunjukkan pada Gambar 3.12



Gambar 3. 12 Skema pemasangan brake dynamometer

Keterangan :
1. Pulley
2. Benang nilon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius

7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

Langkah penggunaan *brake* dynamometer yaitu:

1. Benang nilon dipasang melingkari poros turbin angin Savonius. Benang nilon yang digunakan adalah benang nylon merek Lazer.
2. Pada saat turbin angin berputar, pemberat pemberat akana diletakkan pada benang untuk menurunkan putaran porosnya.
3. Saat menambahkan akan dicatat putaran porosnya dan pembacaan pada *spring balance*.
4. Penambahan pemberat akan terus dilakukan hingga turbin angin berhenti berputar.

3.4.5. Neraca Pegas

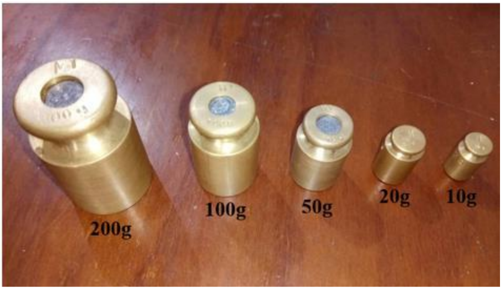
Neraca pegas digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake* dynamometer. Neraca pegas yang digunakan seperti pada Gambar 3.13 dengan spesifikasi pada Tabel 3.8

Tabel 3. 8 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA C-5

Specification	
Capacity	3 kg
Graduation	10 gram
Features	*High impact ABS body*
Platter Size	Pan size : Ø 290 mm Alum. Round pan Dual display chart, Dial 187 mm

Gambar 3. 13 Neraca Pegas NAGATA C-5

Pada saat pengambilan data torsi dinamis dan variasi TSR pada *brake* dynamometer dilakukan pembebanan dengan dengan berat 20 gram. Pemberat yang digunakan pada penelitian seperti pada Gambar 3.14



Gambar 3. 14 Pemberat

3.4.6. Voltage Regulator

Voltage regulator digunakan untuk mengatur kecepatan putar dari fan. *Voltage regulator* yang digunakan seperti pada Gambar 3.15 dengan spesifikasi pada Tabel 3.9

Tabel 3. 9 Spesifikasi Powell Voltage regulator

$TDGC_2$				
Capacity	Phase	Input	Ouput	Frekuensi
3 KVa	Φ1	220 V	0-250 V	50-60 Hz

Gambar 3. 15 Powell Voltage regulator

3.5. Prosedur Penelitian

Berikut merupakan prosedur pada penelitian ini yang mencari torsi dinamis dan statis. Prosedurnya yaitu:

3.5.1. Torsi Dinamis

Prosedur untuk mencari torsi dinamis sebagai berikut:

1. Meyiapkan peralatan yang akan digunakan pada penelitian
2. Mengukur suhu lingkungan menggunakan thermometer
3. Memasang turbin angin Savonius sebagai benda uji pada penyangga di depan *axial fan* dan peralatan lain seperti pada Gambar 3.6 tanpa memasang silinder pengganggu

4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga kecepatan angin sesuai yang diharapkan.
5. Menunggu beberapa menit sampai kecepatan putar poros turbin stabil, kemudian mengukur putaran poros turbin angin tanpa beban dengan menggunakan *Tachometer*.
6. Mengukur torsi dinamis tanpa pemberian massa beban dengan menggunakan *brake* dynamometer.
7. Menambahkan massa pemberat dengan massa beban dan mengukur putaran poros turbin menggunakan *tachometer*.
8. Membaca nilai massa yang dibaca pada neraca pegas
9. Mengulangi langkah nomor 4-8 dengan mengubah variasi kecepatan, yaitu 4; 5; 6; 7; 8; 9 dan 10 (m/s)
10. Meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak antara pusat turbin angin Savonius terhadap pusat silinder pengganggu (S/D) pada 2,3.
11. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 10.
12. Mengolah data yang diperoleh dari hasil pengukuran dan membuat grafik *Tip Speed Ratio* terhadap nilai *Coefficient of Power* serta *Tip Speed Ratio* terhadap *Coefficient of Moment.*

3.5.2. Torsi Statis

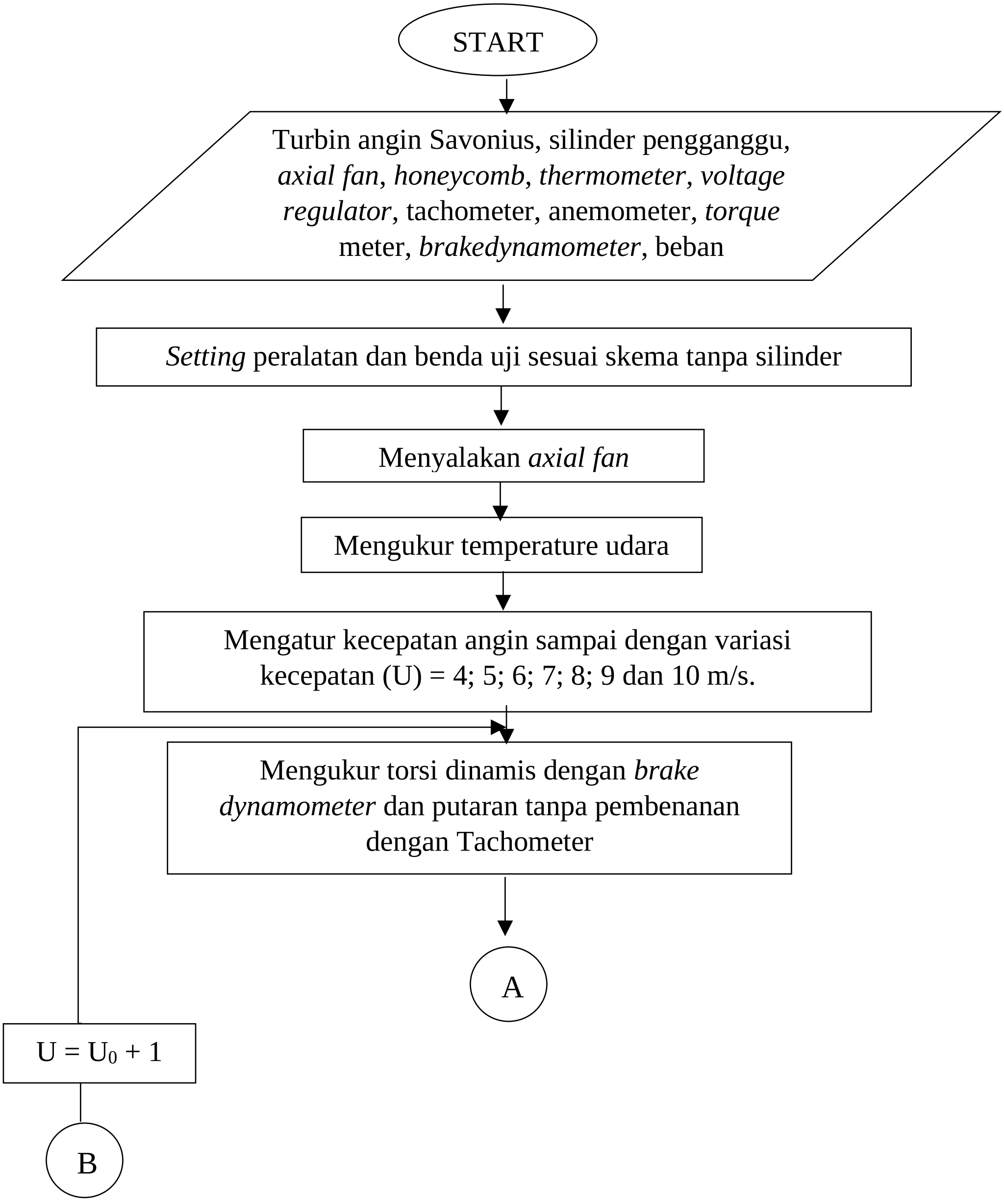
Prosedur untuk mencari torsi statis sebagai berikut:

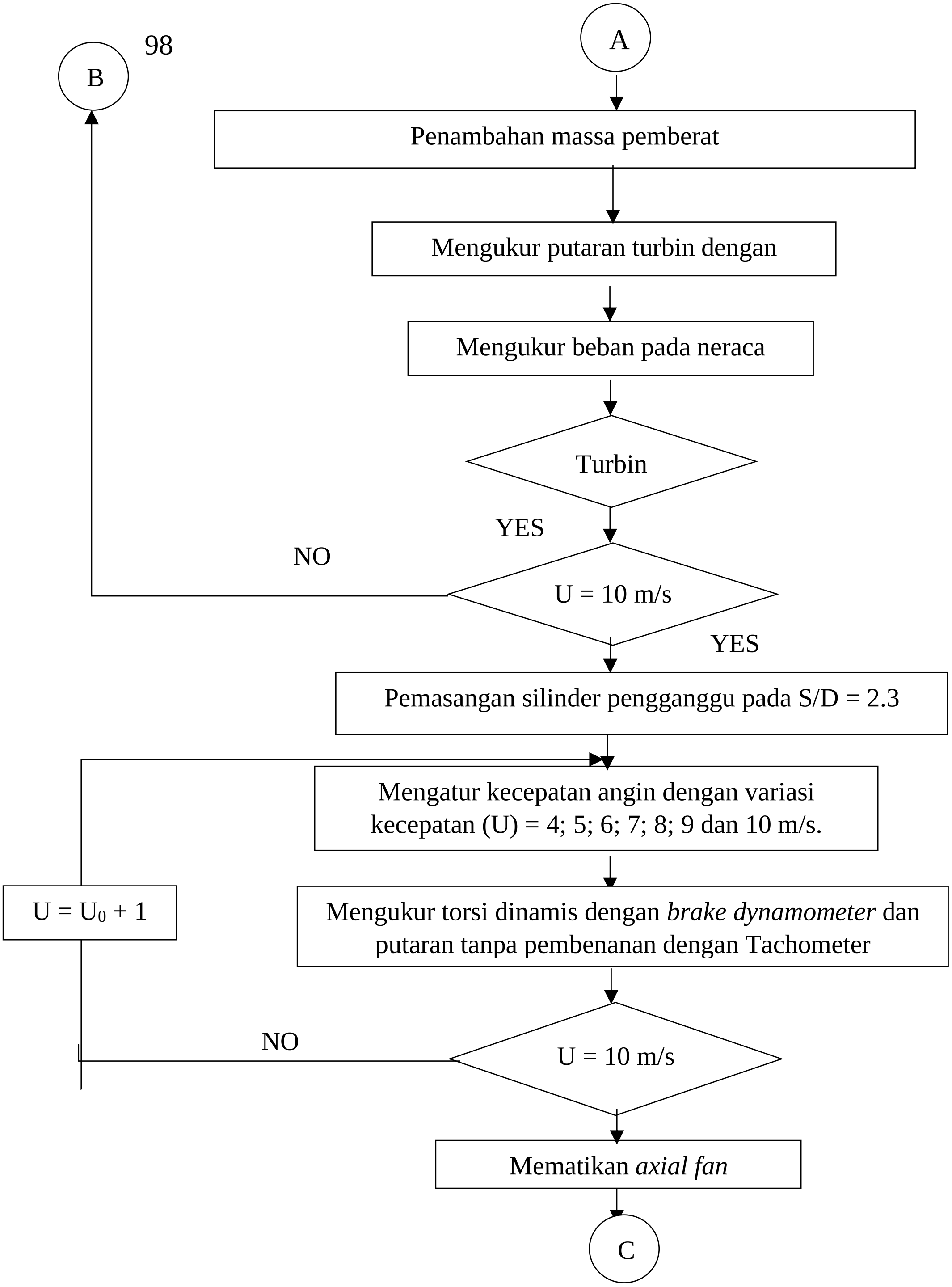
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan pada penelitian.
2. Memasang turbin angin Savonius sebagai benda uji pada penyangga di depan *axial fan* dan peralatan lain seperti pada Gambar 3.6 tanpa memasang silinder pengganggu
3. Menentukan variasi sudut turbin angin Savonius (θ) = 0^0.
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* hingga mendapatkan nilai kecepatan angin yang dibaca pada anemometer sesuai dengan kecepatan angin yang dibutuhkan, yaitu 3 m/s.
5. Mengukur torsi statis menggunakan *torque* meter
6. Mematikan *axial fan*

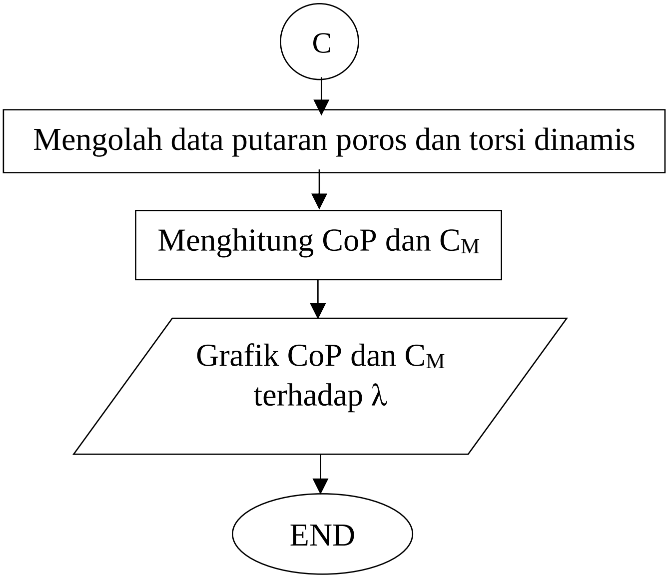
7. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 6 dengan mengubah variasi sudut turbin angin Savonius pada $0^0 \leq \theta \leq 180^0$ dan pengambilan data setiap kenaikan sudut 10^0.
8. Mengubah langkah 4 sampai 7 dengan mengubah variasi kecepatan *axial fan*, yaitu pada kecepatan 4; 5; 6; 7; 8; 9 dan 10 m/s.
9. Meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak antara pusat turbin angin Savonius terhadap pusat silinder pengganggu (S/D) pada 2,3.
10. Mengulangi langkah kerja nomor 4 sampai 8.
11. Mengolah data yang diperoleh, yaitu torsi statis dan melakukan *plotting* pada grafik torsi statis sebagai fungsi sudut.
12. Membandingkan grafik antara torsi statis tanpa silinder pengganggu dan torsi statis dengan silinder pengganggu.

3.6. Flowchart Penelitian

3.6.1. Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis

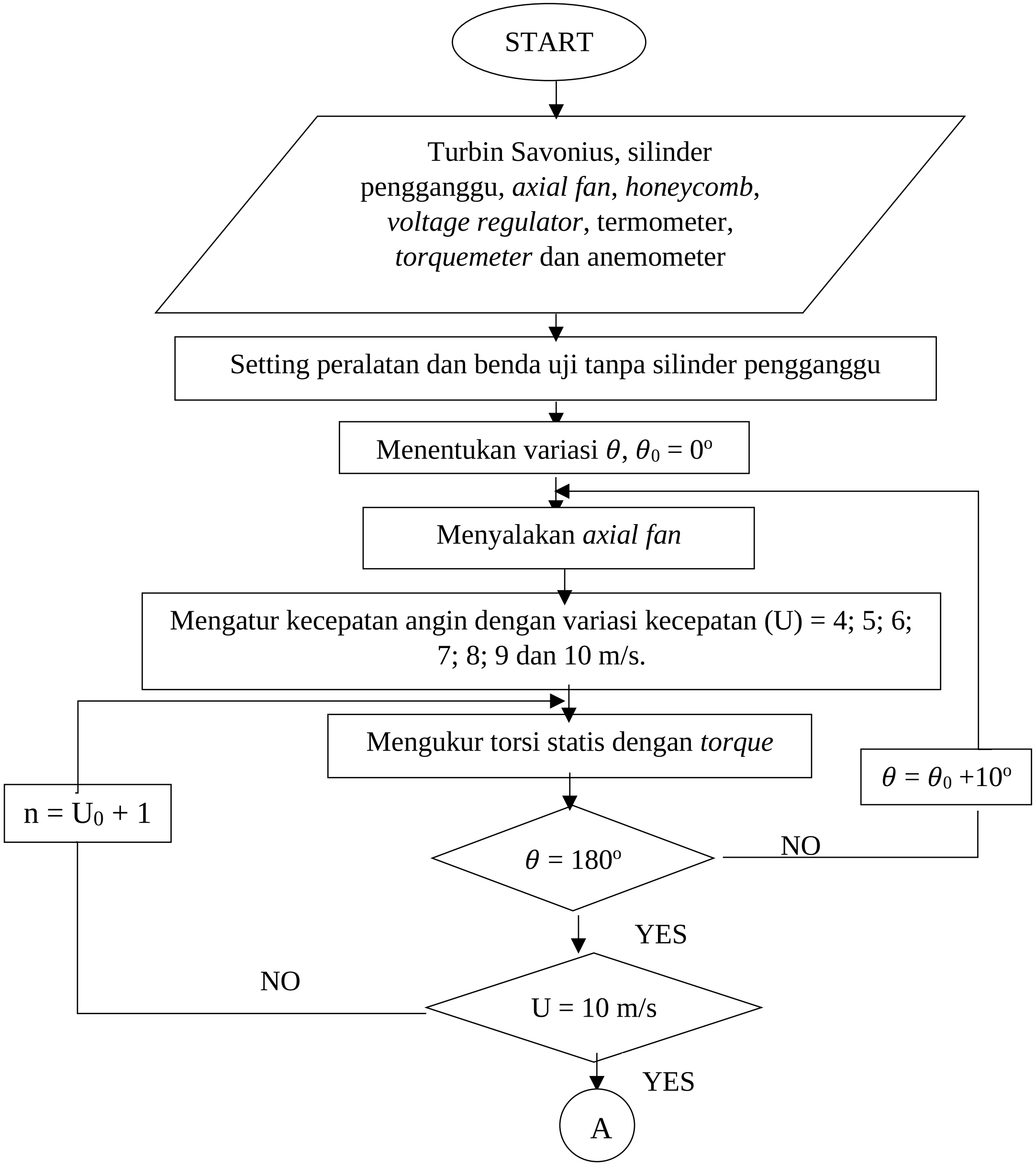


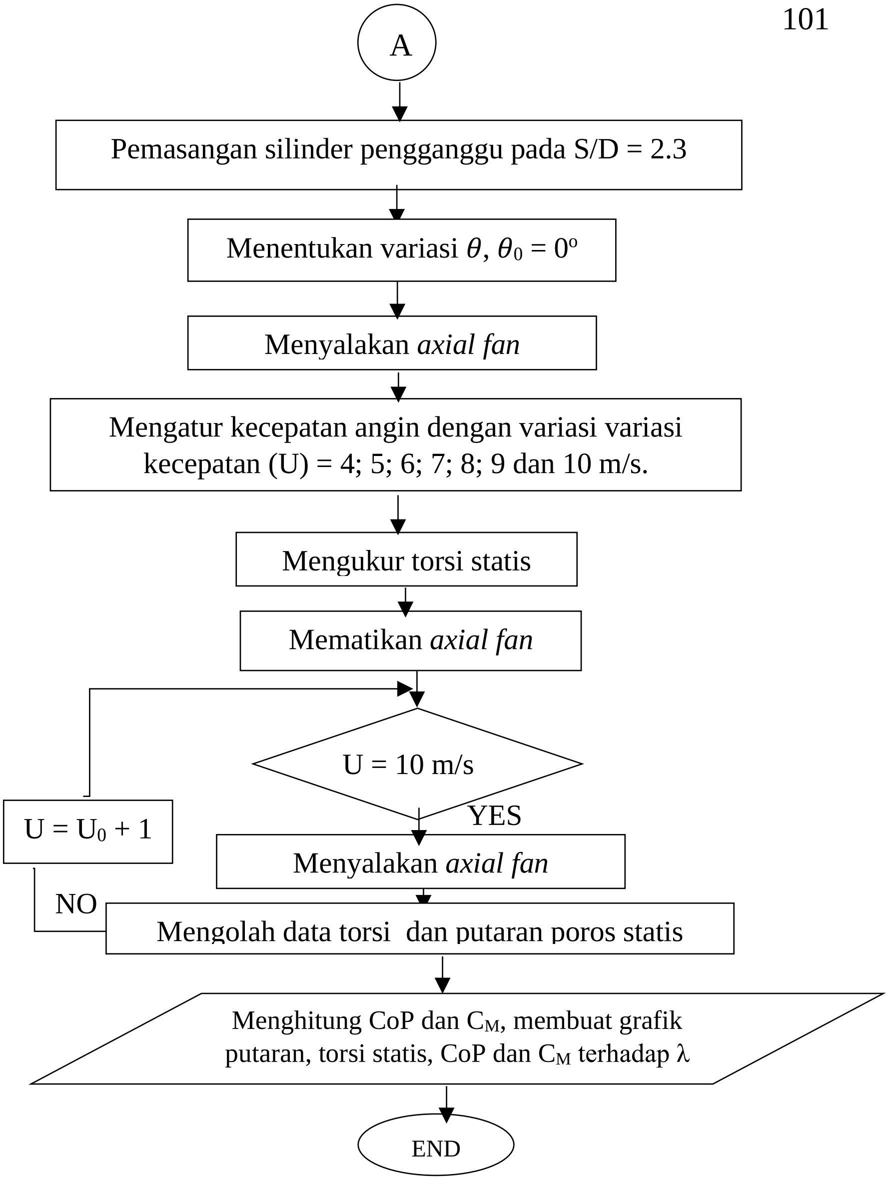

A
B
Penambahan massa pemberat
Mengukur putaran turbin dengan
Mengukur beban pada neraca
Turbin
YES
NO
U = 10 m/s
YES
Pemasangan silinder pengganggu pada S/D = 2.3
Mengatur kecepatan angin dengan variasi kecepatan (U) = 4; 5; 6; 7; 8; 9 dan 10 m/s.
U = U0 + 1
Mengukur torsi dinamis dengan brake dynamometer dan putaran tanpa pembenanan dengan Tachometer
NO
U = 10 m/s
Mematikan axial fan
C



Gambar 3.15 Flowchart Pengukuran Torsi Dinamis

3.6.2. Flowchart Pengukuran Torsi Statis





Gambar 3.16 Flowchart Pengukuran Torsi Statis

3.6. Uncertainty

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan *uncertainty* yang bertujuan untuk mengetahui angka ketidakpastian suatu pengukuran atau eksperimen. Perhitungan *uncertainty* dilakukan pada semua parameter. Misal perhitungan *uncertainty* pada kecepatan 5 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Berikut merupakan contoh perhitungan *uncertainty* pada titik maksimum *Coefficient of Power*.

1. *Uncertainty* (u) pada pembacaan *tip speed ratio* (λ)

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

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

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

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

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

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

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

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

$$u_{\lambda} = \pm\{u_{\omega}{}^2 + u_R{}^2 + u_U{}^2\}^{1/2} \tag{3.1}$$

Uncertainty (u) pada pembacaan kecepatan sudut turbin angin Savonius (ω)

$$u_{\omega} = \pm\{[u_n]^2\}^{1/2} = u_n = \pm\frac{0{,}1}{195{,}64} = 0{,}0005$$

Uncertainty (u) pada pembacaan jari – jari turbin angin Savonius (R)

$$u_R = \pm \frac{1}{151{,}7\,mm} = 0{,}0066$$

Uncertainty (u) pada pembacaan kecepatan aliran udara (U)

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

Hasil perhitungan *uncertainty* dari ω, R dan U di subtitusikan ke persamaan 3.1.

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

$$u_\lambda = \pm \{0{,}0005^2 + 0{,}0066^2 + 0{,}002^2\}^{1/2}$$

$$u_\lambda = \pm 0{,}0069$$

$$u_\lambda = \pm 0{,}69\%$$

2. *Uncertainty* (u) pada pembacaan *coefficient of moment* (C_M)

$$u_{C_M} = \pm \{[u_\tau]^2 + [-u_\rho]^2 + [-2u_U]^2 + [-u_A]^2 + [-u_R]^2\}^{1/2}$$

$$u_{C_M} = \pm \{[0{,}0553]^2 + [-0{,}0035]^2 + [-2\,x\,0{,}002]^2 + [-4{,}73\,x\,10^{-5}]^2 + [-0{,}0066]^2\}^{1/2}$$

$$u_{C_M} = \pm 0{,}0557$$

$$u_{C_M} = \pm 5{,}57\%$$

Uncertainty (u) pada pembacaan *coefficient of power* (CoP)

$$u_{CoP} = \pm \{[u_{C_M}]^2 + [u_\lambda]^2\}^{1/2}$$

$$u_{CoP} = \pm \{[0{,}0557]^2 + [0{,}0069]^2\}^{1/2}$$

$$u_{CoP} = \pm 0{,}0561$$

$$u_{CoP} = \pm 5{,}61\%$$

3. *Uncertainty* (u) pada pembacaan bilangan Reynolds (Re)

$$u_{Re} = \pm \{[u_\rho]^2 + [u_U]^2 + [u_L]^2 + [-u_\mu]^2\}^{1/2} \qquad (3.2)$$

Uncertainty (u) pada pembacaan massa jenis (ρ)

$$\rho \; x \; T = C$$
$$\rho = {}^{C}\!/_{T} = CT^{-1}$$
$$\frac{d\rho}{dT} = -T^{-2}$$
$$u\rho, T = \frac{\delta\rho T}{\rho} = \frac{T}{T^{-1}} x - T^{-2} u_T = -u_T$$
$$u_\rho = \pm \{[-u_T]^2\}^{1/2}$$
$$u_\rho = u_T = \pm \frac{0{,}1}{28{,}5} = 0{,}0035$$
$$u_\rho = \pm 0{,}35\%$$

Uncertainty (u) pada pembacaan panjang karakteristik (L)

$$u_L = \pm \frac{0{,}01}{303{,}4 \; mm} = \pm \; 3{,}3 \; x \; 10^{-5}$$

Uncertainty (u) pada pembacaan viskositas (μ) pada temperatur 28,5°C

$$u_\mu = \pm \frac{\partial\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial\mu}{dT} \; (\pm\delta T)$$
$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = \frac{\mu(29°\text{C}) - \mu(27°\text{C})}{29°\text{C} - 27°\text{C}}$$
$$= \frac{(1{,}86 \; x \; 10^{-5} - 1{,}85 \; x \; 10^{-5}) \; {}^{Ns}\!/_{m^2}}{2°\text{C}}$$
$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = 5 \; x \; 10^{-8} \; {}^{Ns}\!/_{m^2\,°\text{C}}$$

Maka didapatkan

$$u_\mu = \pm \frac{\partial\mu}{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial\mu}{dT} \; (\pm\delta T)$$
$$u_\mu == \frac{1}{1{,}86 \; x \; 10^{-5} \; {}^{Ns}\!/_{m^2}} \; x \; 5 \; x \; 10^{-8} \; {}^{Ns}\!/_{m^2°\text{C}} \; x \; (\pm 0{,}5°\text{C})$$

$$u_{\mu} = \pm 0{,}00134$$
$$u_{\mu} = \pm 0{,}134\%$$

Sehingga nilai uncertainty untuk bilangan Reynolds adalah sebagai berikut

$$u_{Re} = \pm \{[0{,}0035]^2 + [0{,}002]^2 + [3{,}3\ x\ 10^{-5}]^2 + [0{,}0013]^2\}^{1/2}$$
$$u_{Re} = \pm 0{,}0054$$
$$u_{Re} = \pm 0{,}54\%$$

Berikut merupakan tabel nilai uncertainty yang didapatkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di kecepatan 5 m/s.

Tabel 3. 10 Hasil Perhitungan Uncertainty Pengukuran pada Kecepatan 5 m/s

Parameter	*Uncertainty*
Tip Speed Ratio (λ)	0,69%
Coefficient of Moment (CM)	5,57%
Coefficient of Power (CoP)	5,61%
Bilangan Reynolds (Re)	0,54%

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

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. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_{std}) = T_1 = 288,2 K
2. Tekanan *absolute* udara dalam keadaan standar (P_{std}) = $1{,}01325 \times 10^5$ N/m^2.
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 °C = 301,5 K

Data ini 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 mencari massa jenis udara(ρ)

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

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

Karena $V = {}^{m}/_{\rho}$, sehingga persamaa 4.2 menjadi

$$\frac{P_1m_1}{T_1\rho_1} = \frac{P_2m_2}{T_2\rho_2} \quad (4.2)$$

Dimana :

P_1 : Tekanan udara absolut pada kedaan standar yaitu sebesar 1,01325 x 10^5 (Pa)
P_2 : Tekanan udara absolut pada saat penelitian (Pa)
T_1 : Temperatur udara pada kedaan standar yaitu sebesar 288,2 (K)
T_2 : Temperatur udara pada saat penelitian yaitu sebesar 301,5 (K)
ρ_1 : Massa jenis udara pada keadaan standar yaitu sebesar 1,225 (kg/m^3)
ρ_2 : Massa jenis udara pada saat penelitian (kg/m^3)
m_1 = massa udara pada keadaan standar (kg).
m_2 = massa udara pada keadaan penelitian (kg).
V_1 = Volume udara absolut pada keadaan standar (m^3).
V_2 = Volume udara absolut pada saat penelitian (m^3).

Kondisi 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama, maka $P_1 = P_2$ dan massa udara pada kondisi 1 dan 2 adalah sama, maka $m_1 = m_2$. Sehingga perhitungan massa jenis udara pada saat penelitian adalah sebagai berikut :

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

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

$$\rho_2 = 1{,}7096\ {}^{kg}/_{m^3}$$

- Langkah kedua mencari viskositas udara (μ)

Perhitungan viskositas udara dihitung menggunakan persamaan *Sutherland* sebagai berikut :

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

Dimana C dan S merupakan konstanta pada persamaan *Sutherland* dengan nilai

C = 1,458 x 10^{-6} kg/ms$K^{1/2}$
S = 110,4 K

Maka didapatkan nilai viskositas udara yang digunakan pada penelitin ini adalah sebagai berikut :

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

$$\mu = 1{,}86\, x\, 10^{-5}\ {}^{Ns}/_{m^2}$$

- Bilangan Reynolds

Berdasarkan persamaan 2.14, maka maka bilangan *Reynolds* pada kecepatan 4 m/s adalah sebagai berikut:

$$Re_L = \frac{\rho U L}{\mu}$$

dimana:

L : Panjang karakteristik = $2D - e - 2x$ = 0,3034 m
µ = 1,86 x 10^{-5} Ns/m^2
ρ = 1,7096 kg/m^3

dengan mensubstitusikan nilai – nilai tersebut, maka didapatkan nilai bilangan *Reynolds* pada kecepatan 4 m/s adalah sebagai berikut:

$$Re_L = \frac{1{,}7096\ kg/m^3\, x\, 4\ m/s\, x\, 0{,}3034\, m}{1{,}86\, x\, 10^{-5}\, Ns/m^2}$$

$$Re_L = 76402$$

4.1.2. Perhitungan Tip Speed Ratio(λ)

Tip speed ratio pada kecepatan 4 m/s untuk putaran tanpa silinder pengganggu dihitung menggunakan rumus 2.15 sebagai berikut:

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

dimana :

ω : Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s) = 162,04 rpm maka

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$\omega = \frac{2\pi\ x\ 162{,}04\ rpm}{60}$$

$$\omega = 16{,}96\ \ rad/s$$

R : Jari – jari turbin = $L/2$ = 0,1517 m

U : Kecepatan angin = 4 m/s

Maka didapatkan nilai *tip speed ratio* pada kecepatan 4 m/s tanpa silinder pengganggu adalah sebgai berikut:

$$\lambda = \frac{16{,}96\ \ rad/s\ \ x\ 0{,}1517\ m}{4\ m/s}$$

$$\lambda = 0{,}643$$

Maka didapatkan nilai *tip speed ratio* pada kecepatan 4 m/s tanpa silinder pengganggu adalah sebgai berikut:

$$\lambda = \frac{16{,}96\ \ rad/s\ \ x\ 0{,}1517\ m}{4\ m/s}$$

$$\lambda = 0{,}643$$

4.1.3. Perhitungan Coefficient of Moment (CM)

Nilai *coefficient of moment* (CM) pada kecepatan angin 4 m/s tanpa silinder pengganggu dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16 sebagai berikut:

$$C_M = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\ .\ \rho\ .\ A\ .\ U^2 .\ R}$$

dimana :

τ : Nilai torsi dinamis = {(|s - m|)g}r = 0,0058 Nm

ρ : 1,7096 kg/m³

A : Luas permukaan benda yang terkena aliran fluida = 0,0893 m²

R : Jari – jari turbin = $L/2$ = 0,1517 m

Sehingga didapatkan nilai *coefficient of monet* (CM) pada kecepatan angin 4 m/s tanpa silinder pengganggu adalah sebagai berikut:

$$CM = \frac{0{,}0058\ Nm}{\frac{1}{2}\ x\ 1{,}7096 \frac{kg}{m^3} x\ (4 \frac{m}{s})^2\ x\ 0{,}1517\ m}$$

$$C_M = 0{,}0454$$

4.1.4. Perhitungan Coefficient of Power (CoP)

Nilai *coefficient of power* (CoP) pada kecepatan angin 4 m/s tanpa silinder pengganggu dapat dihitung menggunakan rumus 2.13 sebagai berikut:

$$CoP = \frac{\{(|s - m|)g\}\,.\,r\,.\,\pi\,.\,\omega}{15\,.\,\rho\,.\,A\,.\,U^3}$$

dimana :

m : Massa pemberat = 0,029 kg

s : Pembacaan neraca pegas = 0,09 kg

r : Jari – jari poros turbin = 0,009625 m

ω : Kecepatan sudut turbin angin Savonius = 16,96 rad/s

A : Luas permukaan benda yang terkena aliran fluida = 0,0893 m²

ρ = 1,7096 kg/m³

dengan mensubstitusikan nilai – nilai tersebut, maka didapatkan nilai *coefficient of power* (CoP) pada kecepatan 4 m/s tanpa silinder pengganggu adalah sebagai berikut:

$$CP = \frac{\left\{(|0{,}09\ kg - 0{,}029\ kg|)9{,}81\frac{m}{s^2}\right\} x 0{,}009625m\ x 3{,}14\ x 16{,}96 rad/s}{15\ x\ 1{,}7096\frac{kg}{m^3} x\ 0{,}0893\ m\ x\ (4\frac{m}{s})^3}$$

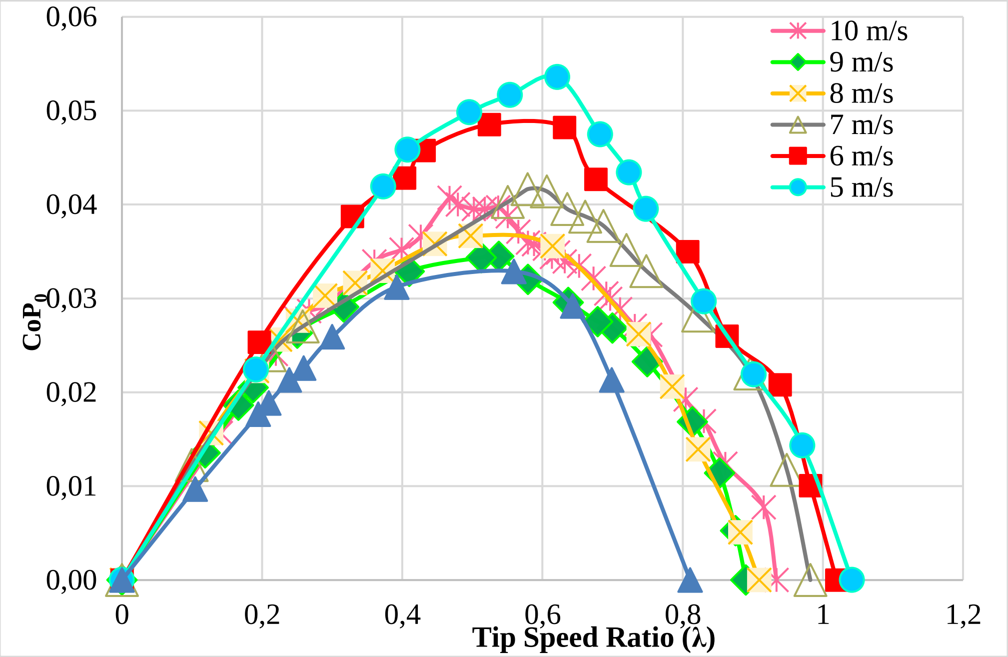
$$CP = 0{,}0292$$
$$CP = 2{,}92\ \%$$

4.2. Analisa Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Hasil dari penelitian mengenai performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan variasi kecepatan udara 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s akan dibahas pada subbab ini. Pengukuran performan turbin angin Savonius tanpa pengganggu ini dilakukan untuk menjadi sebuah pembanding terhadap performa turbin angin Savonius dengan pengganggu yang diletakkan pada nilai S/D = 2,3 dengan rasio d/D = 0,2 dan *aspect ratio* ≈ 1. Analisa yang dilakukan meliputi analisa *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), analisa *coefficient of moment* (CM) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), dan torsi statis (T_S) sebagai fungsi sudut *blade* turbin angin Savonius (θ) untuk mengetahui kemampuan *self-starting* dari turbin angin Savonius.

4.2.1. Analisa Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_0) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Grafik nilai *coefficient of power* dari turbin angin Savonius (CoP_0) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada kecepatan 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ)

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* (CoP_0) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Berdasarkan Gambar 4.1 nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai λ optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai λ. Pada kecepatan 4 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,0329 dengan λ = 0,559; pada kecepatan 5 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0536 dengan λ = 0,6213; pada kecepatan 6 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0485 dengan λ = 0,524 ; pada

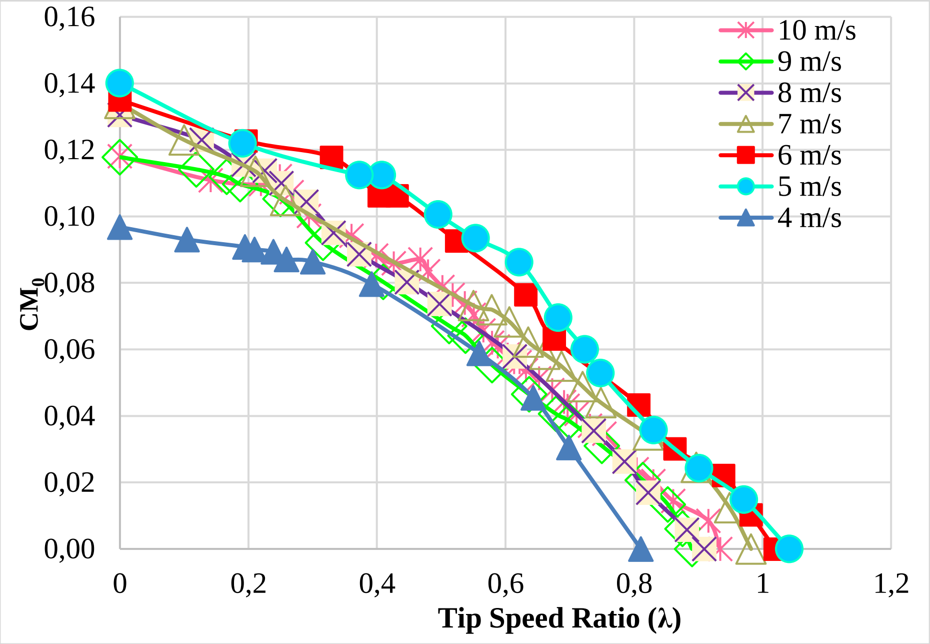
kecepatan 7 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0416 dengan λ = 0,579 ; pada kecepatan 8 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0367 dengan λ = 0,498 ; pada kecepatan 9 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0345 dengan λ = 0,538 dan pada kecepatan 10 m/s nilai CoP_0 maksimum sebesar 0,0407 dengan λ = 0,468.

Berdasarkan hasil yang didapat, kecepatan optimum berada pada kecepatan 5 m/s, hal ini disebabkan karena pada kecepatan tersebut memiliki nilai CoP_0 maksimum tertinggi, sehingga performa yang dihasilkan paling besar dibandingkan keenam kecepatan angin lainnya, dimana pada kecepatan 4 m/s nilai CoP_0 akan meningkat sampai pada kecepatan 5 m/s dan setelah melewati kecepatan angin optimum yaitu pada kecepatan 5 m/s nilai CoP_0 akan mengalami penurunan sampai pada kecepatan 10 m/s. Performa terbaik dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* efektif pada kecepatan 5 m/s karena diperoleh *Coefficient of Power* (CoP_0) optimum sebesar 0,0536 pada *Tip Speed Ratio* (λ) optimum 0,6213. Pada kecepatan rendah juga kurang efektif dikarenakan pada kecepatan terlalu rendah menghasilkan output daya yang rendah dan kurang efektif dalam meningkatkan nilai CoP. Sedangkan pada kecepatan aliran fluida tinggi, turbin angin Savonius kurang dapat bekerja secara efektif. Hal ini dikarenakan oleh semakin tingginya kecepatan angin yang berasal dari *axial fan* maka aliran yang datang menuju sudu turbin tidak mengenai sudu turbin dengan sempurna sehingga semakin banyak *losses* yang terjadi. Faktor lainya semakin tinggi aliran udara akan memberikan energi kinetis yang semakin tinggi pada turbin tersebut. Turbin mengubah energi kinetis yang diberikan oleh aliran udara menjadi energi mekanis turbin dikarenakan batas maksimum kemampuan alat yang diberikan pada instalasi turbin tersebut. 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* dimana fluida tidak dapat mencapai sudu turbin dengan sempurna

yang akan menyebabkan nilai putaran turbin akan menurun dan menyebabkan nilai daya *output* akan menurun. Seperti halnya penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud, et al. 2012** seperti pada Gambar 2.42 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, dengan nilai daya *input* yang tetap sama maka nilai *Coefficient of Power*(CoP_0) akan menurun. Hal ini berdasarkan persamaan 2.17 dimana fungsi TSR pangkat satu maka CoP_0 merupakan fungsi TSR pangkat dua sehingga menghaslkan grafik CoP_0 = f(TSR) yang parabolik.

4.2.2. Analisa Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CM_0) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

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. 2 Grafik Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CM_0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ)

Berdasarkan Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* (CM_0) mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* sampai titik optimum. Kemudian mengalami penurunan nilai *Coefficient of Moment* (CM_0) seiring dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio*. 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 4.2 dapat dilihat bahwa nilai (CM_0) maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 5 m/s yaitu sebesar 0,1401. pada kecepatan 4; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s memiliki nilai CM_0 maksimal masing – masing sebesar 0,0968;

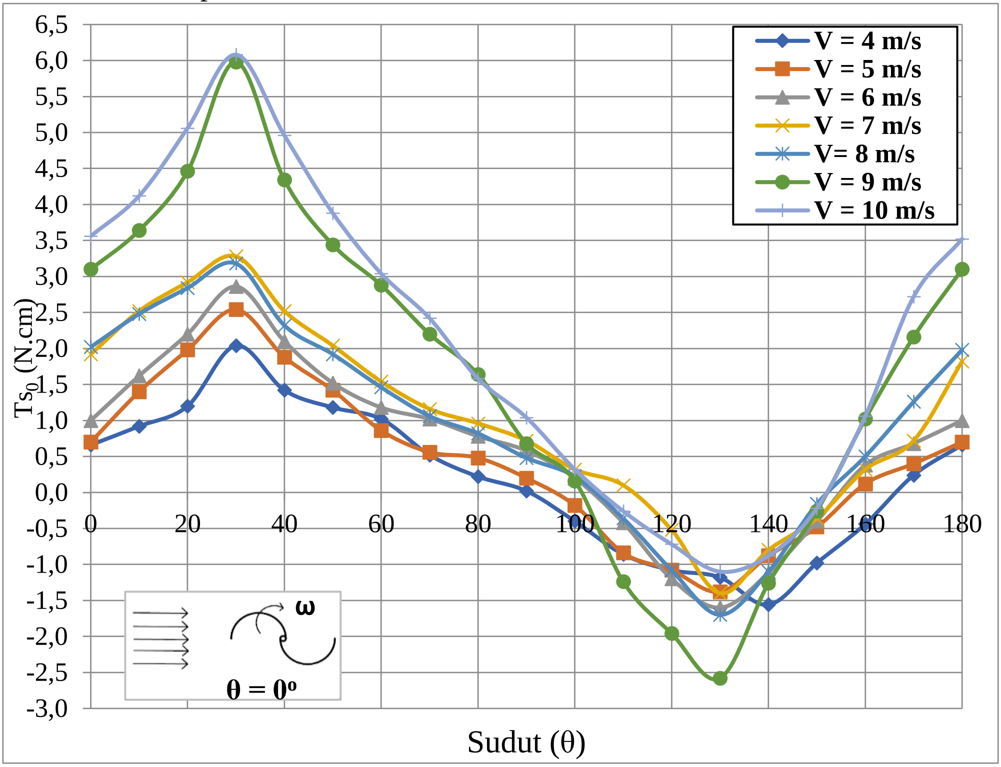
0,1350; 0,1339; 0,1305; 0,1178; dan 0,1180. Semua nilai CM_0 maksimum pada semua kecepatan udara terjadi pada $\lambda = 0$.

Nilai (CM_0) akan naik seiring meningkatnya nilai kecepatan angin sampai mencapai kecepatan angin optimum dan akan turun setelah melewati kecepatan angin optimum. Nilai *trendline* (CM_0) setelah melewati titik optimum dalam hal ini pada kecepatan 5 m/s akan turun sampai pada pada kecepatan 10 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* dimana fulida tidak dapat mencapai susu turbin dengan sempurna sehingga menyebabkan menurunnya nilai putaran sampai pada kecepatan 10 m/s. Kemudian nilai CM_0 menurun ketika nilai *tip speed ratio* naik. Nilai *tip speed ratio* semakin besar diartikan putarannya tinggi dikarenakan beban pada turbin mengecil atau [m-s] mengecil sehingga nilai Td mengecil yang nantinya menyebabkan nilai CM_0 mengecil. Begitu juga sebaliknya ketika beban ditambahkan maka putarannya rendah karena nilai [m-s] membesar sehingga nilai Td membesar yang nantinya menyebabkan nilai CM_0 membesar sampai nilai maksimum. Hal ini menjelaskan bahwa (CoP_0) sebagai efisiensi turbin sama dengan daya output dibagi daya input yang akan sangat dipengaruhi oleh kerugian yang terjadi sehingga menyebabkan daya output kurang dari daya input atau bisa dibilang CoP kurang dari 100%.

4.2.3. Analisa Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (T_{S0}) terhadap Fungsi Sudut *Blade* Turbin Angin Savonius (θ)

Studi eksperimen dilakukan dengan cara mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) pada saat bladeturbin angin Savonius berada pada posisi angular

sudu 0º ≤ θ ≤ 180º dengan tiap kenaikan 10º. Torsi statis pada penelitian ini dilakukan pada kecepatan angin 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s. Torsi statis turbin angin Savonius diukur menggunakan *torquemeter*. Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan didapat nilai torsi statis yang kemudian diolah menjadi grafik torsi statis tanpa penghalang (T_{S0}) terhadap sudut (θ) yang bisa dilihat pada Gambar 4.3



Gambar 4. 3 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (TS_0) terhadap Fungsi Sudut Blade Turbin Angin Savonius (θ)

Pada Gambar 4.3 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada ketujuh grafik kecepatan angin tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^o kemudian turun hingga sudut 140^o kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 4 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 2,04 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,56 N.cm pada sudut 140°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 5 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 2,54 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,38 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 6 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 2,86 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,6 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 7 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 3,28 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,4 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 8 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 3,18 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,7 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 9 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 5,98 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -2,58 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) pada kecepatan 10 m/s memiliki nilai maksimum sebesar 6,08 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,1 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis negatif pada masing-masing kecepatan memiliki rentang sudut yang relatif sama. Nilai T_{S0} berdasarkan urutan T_{S0} maksimum tertinggi pada saat kecepatan 10 m/s dan T_{S0} maksimum terendah berada pada kecepatan 4 m/s terjadi pada posisi sudut 30^o. Hal ini dikarenakan 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.

Berdasarkan Gambar 4.3 didapatkan bahwa turbin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut 30^o untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terendah pada sudut 130^o untuk kecepatan angin 5,6,7,8,9, dan 10 m/s serta sudut 140^o untuk kecepatan angin 4 m/s. Pada sudut 0^o sampai 30^o untuk seluruh kecepatan, sudut 120^o sampai 180^o untuk kecepatan 5,6,7,8,9,dan 10 m/s serta pada sudut 140^o sampai 180^o pada kecepatan 4 m/s, terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^o sampai dengan sudut 130^o dan 140^o dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

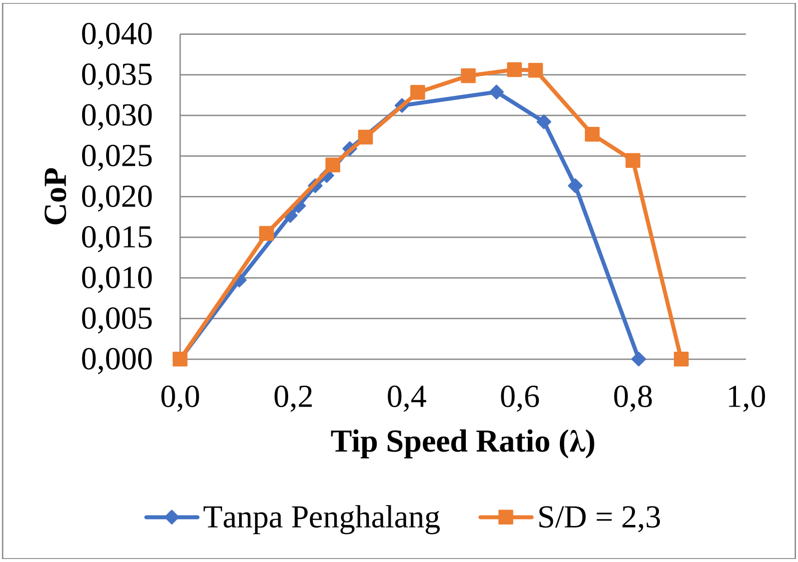
4.3. Analisa Perbandingan Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dan Tanpa Silinder Pengganggu

Pada subbab ini, akan dibahas hasil dari penelitian mengenai performan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin savonius dengan rasio peletakan S/D = 2,3, rasio d/D = 0,2, dan *aspect ratio* (H/L) ≈ 1 dengan variasi kecepatan udara 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s. Analisa yang dilakukan meliputi

analisa *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), analisa *coefficient of moment* (CM) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), dan torsi statis (T_S) sebagai fungsi sudut *blade* turbin angin Savonius (θ) untuk mengetahui kemampuan *self-starting* dari turbin angin Savonius.

4.3.1. Analisa *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (*λ*) pada Kecepatan Udara 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s

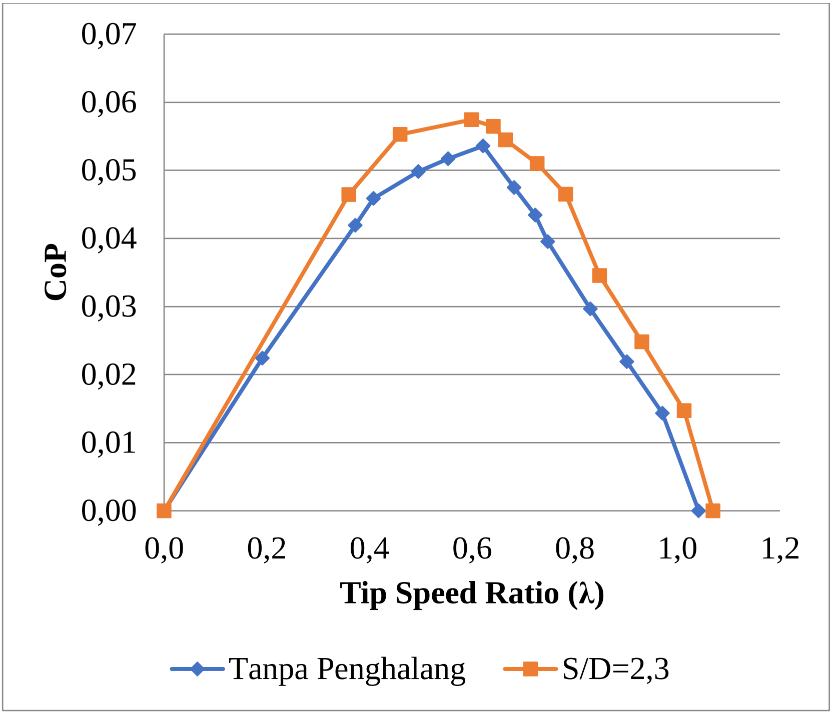
Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 4 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.4 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 4 m/s

Pada Gambar 4.4 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 4.4 pada kecepatan 4 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganngu maksimum sebesar 0,0329 dengan λ = 0,559; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0356 dengan λ = 0,591. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 4 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada rentang

nilai TSR 0,39 sampai dengan 0,81 dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0329 menjadi 0,0356 atau mengalami kenaikan sebesar 8,35 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.



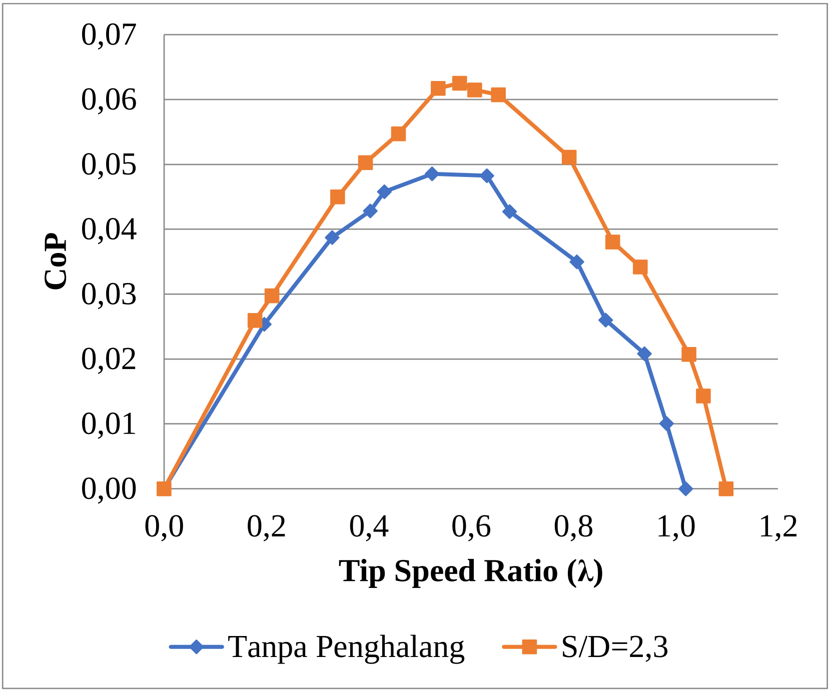
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 5 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 4 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.5 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih

tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Pada Gambar 4.5 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 4.5 pada kecepatan 5 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa pengganngu maksimum sebesar 0,0536 dengan λ = 0,6213; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0574 dengan λ = 0,599. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada semua nilai TSR dari minimum sampai maksimum dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0536 menjadi 0,0574 atau mengalami kenaikan sebesar 7,21 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.



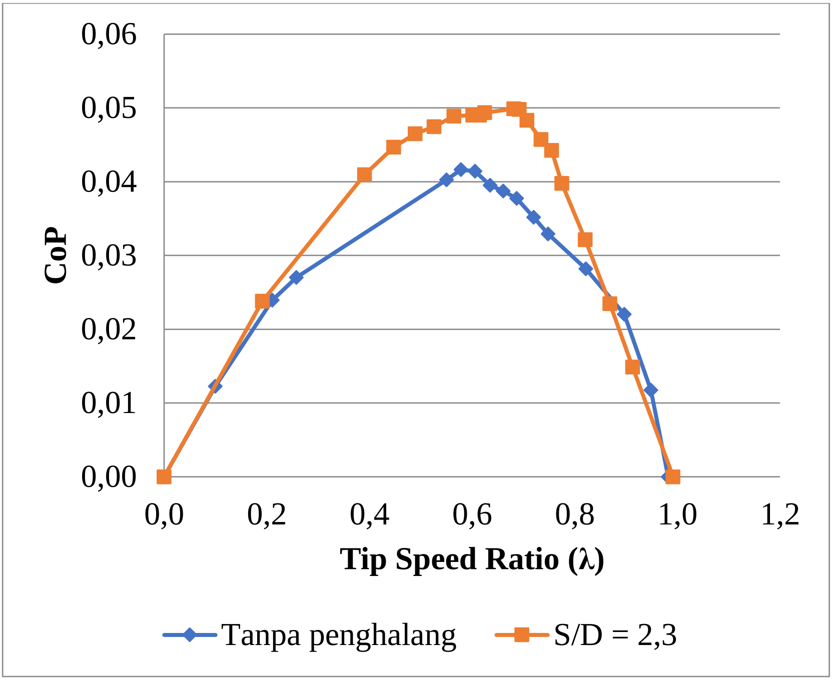
Gambar 4. 6 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 6 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 6 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.6 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada

turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Pada Gambar 4.6 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 4.6 pada kecepatan 6 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa penggangngu maksimum sebesar 0,049 dengan λ = 0,524; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,063 dengan λ = 0,578. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada semua nilai TSR dari minimum sampai maksimum dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,049 menjadi 0,063 atau mengalami kenaikan sebesar 28,82 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang

terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.



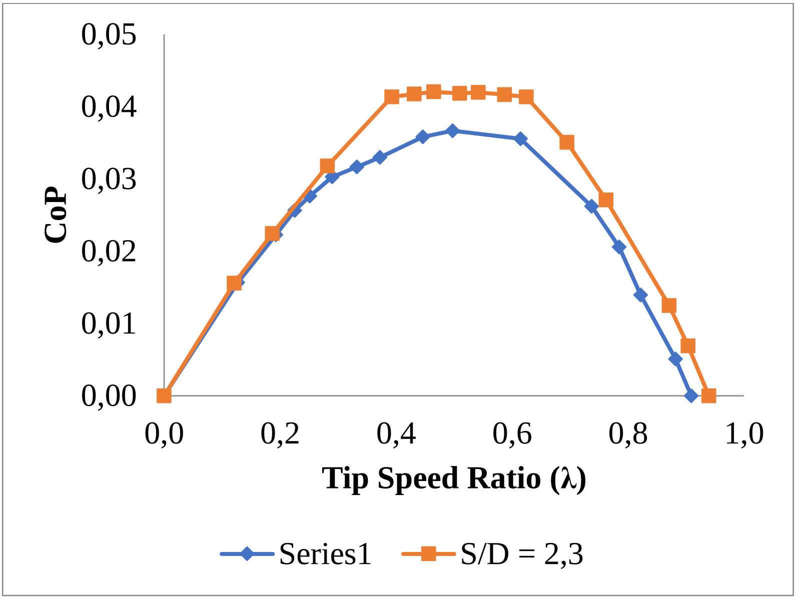
Gambar 4. 7Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 7 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 7 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.7 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih

tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

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 7 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa penggangngu maksimum sebesar 0,0416 dengan λ = 0,579; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0499 dengan λ = 0,682. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada rentang nilai TSR 0,21 sampai dengan 0,82 dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0416 menjadi 0,0499 atau mengalami kenaikan sebesar 19,95 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.



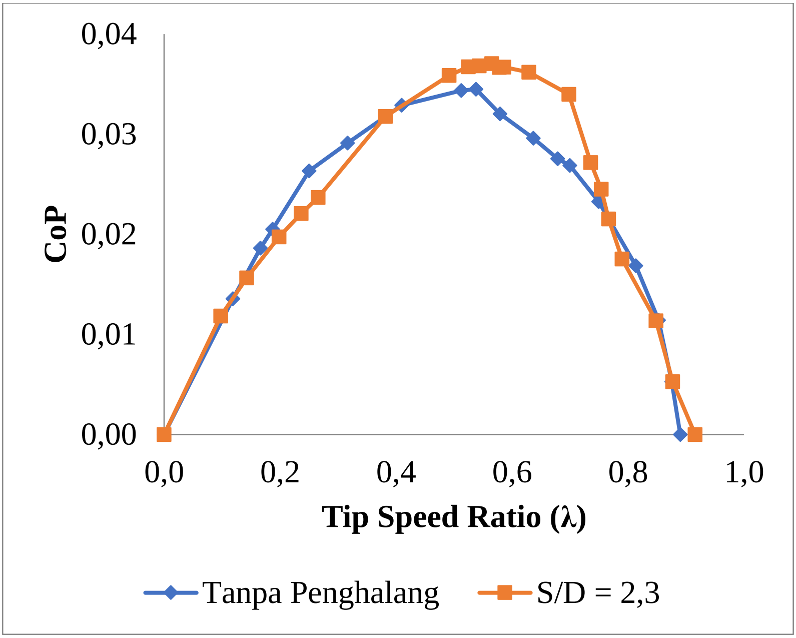
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 8 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 8 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.8 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada

turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

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 8 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa penggangngu maksimum sebesar 0,0367 dengan λ = 0,498; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0420 dengan λ = 0,542. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 8 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada rentang nilai TSR 0,25 sampai dengan 0,91 dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0367 menjadi 0,0420 atau mengalami kenaikan sebesar 14,44 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai

selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.



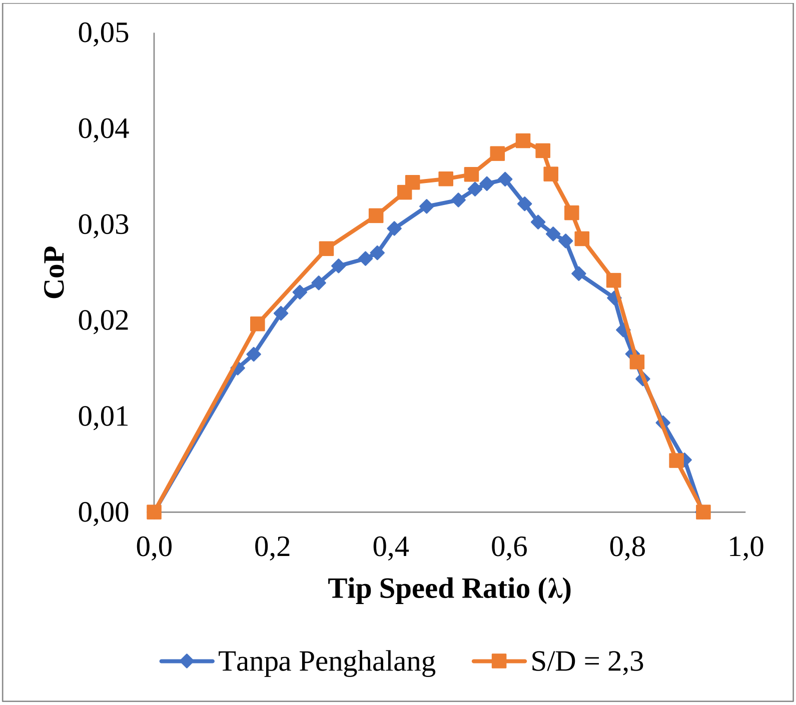
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 9 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder

pengganggu pada kecepatan udara 9 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.9 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan pengganggu lebih tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

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 9 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa penggangngu maksimum sebesar 0,0345 dengan λ = 0,538; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0371 dengan λ = 0,565. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 9 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada rentang nilai TSR 0,41 sampai dengan 0,75 dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0345 menjadi 0,0371 atau mengalami kenaikan sebesar 7,54 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang

terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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. 10 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 10 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of power* (CoP) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 10 m/s dapat dilihat dari Gambar 4.10 yang menjelaskan bahwa grafik CoP terhadap λ pada turbin angin Savonius dengan maupun tanpa silinder pengganggu memiliki bentuk parabolik terbuka kebawah, dimana *trendline* dari grafik awalnya naik hingga mencapai titik maksimumnya lalu kembali turun hingga nilai CoP = 0. Grafik *coefficient of power* (CoP) dari turbin angin Savonius dengan

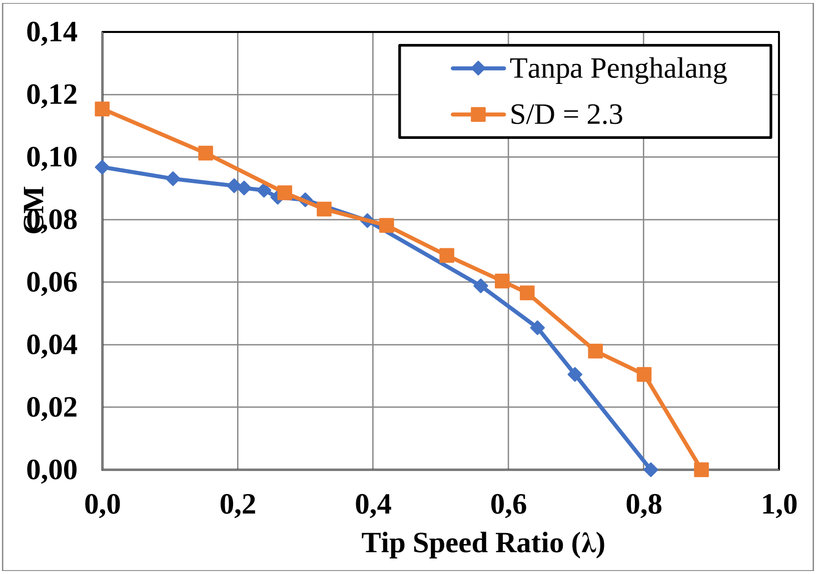
pengganggu lebih tinggi dibanding grafik *coefficient of power* (CoP_0) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

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 10 m/s nilai *Coefficient of Power* (CoP_0) tanpa penggangngu maksimum sebesar 0,0347 dengan λ = 0,593; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan pengganggu sebesar 0,0387 dengan λ = 0,565. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 10 m/s efektif meningkatkan nilai CoP pada rentang nilai TSR 0,17 sampai dengan 0,81 dan dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,0347 menjadi 0,0387 atau mengalami kenaikan sebesar 11,53 %. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade* akan menyebabkan tekanan diantara silinder pengganggu dan *returning blade* akan menurun dan tekanan di belakang *returning blade* naik, maka selisih tekanan antara sisi depan dan sisi belakang *returning blade* akan semakin kecil. Penurunan perbedaan tekanan ini menyebabkan gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* juga turun, sehingga nilai selisih gaya *drag* antara yang terjadi pada *returning blade* dan *advancing blade* akan naik. Kenaikan nilai selisih gaya *drag* ini akan meningkatkan nilai selisih torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. 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.

4.3.2. Analisa *Coefficient of Moment* (CM) terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (*λ*) pada Kecepatan Udara 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s

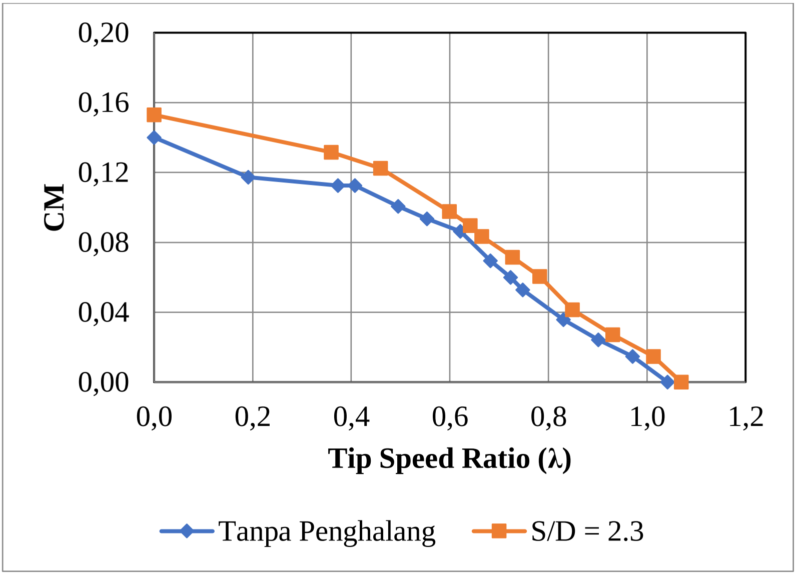
Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 4 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.11 yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (*λ*). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.



Gambar 4. 11 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 4 m/s

Berdasarkan Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. Nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 4 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,0968 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1154 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).



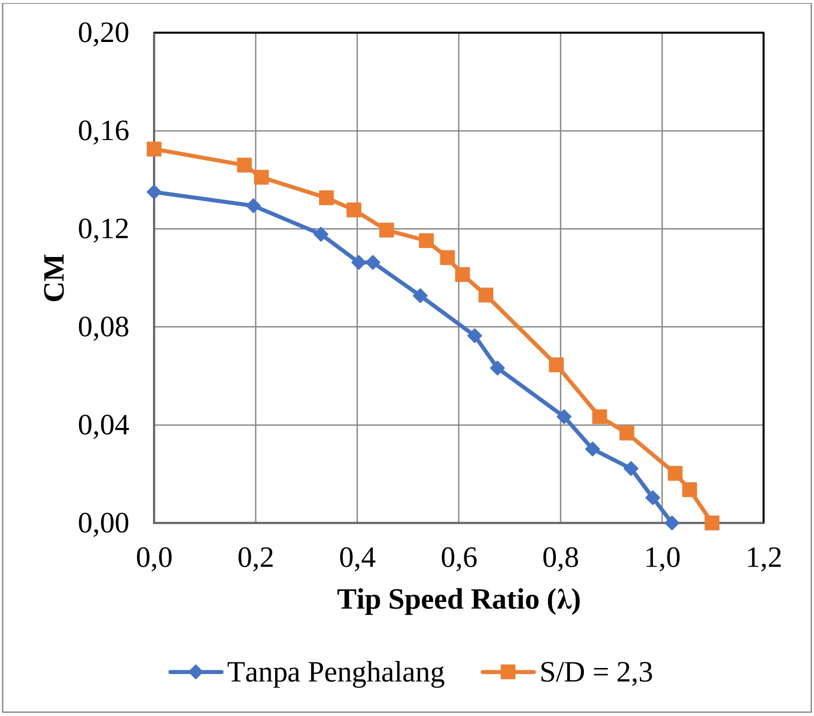
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 5 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 5 m/s dapat dilihat pada

Gambar 4.12 yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (λ). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. Nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 5 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1401 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1529 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).



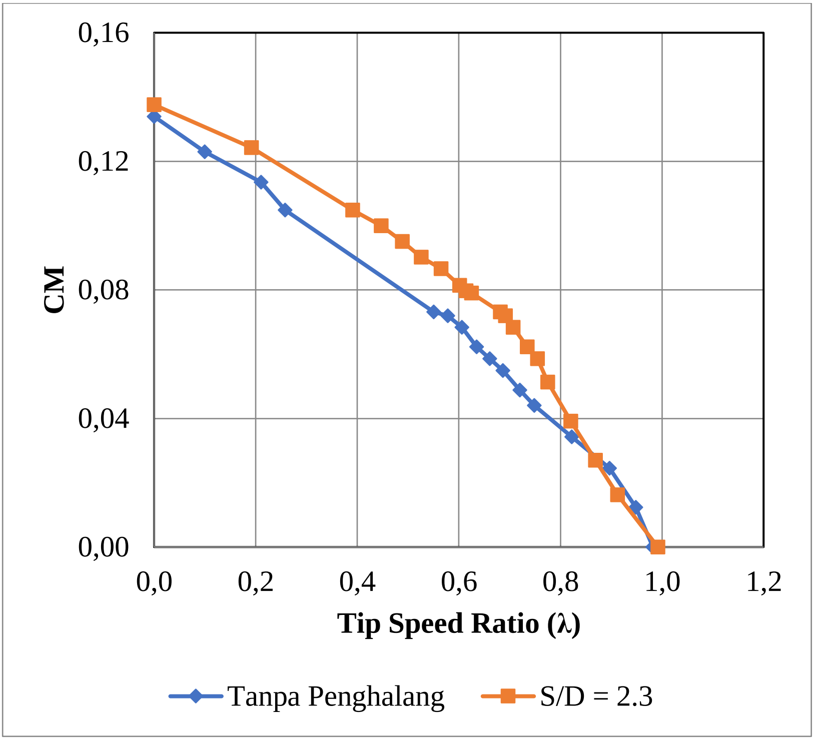
Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 6 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 6 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.13 yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (λ). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada

kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. 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 6 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,135 pada $\lambda = 0$, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,153 dengan $\lambda = 0$. 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).



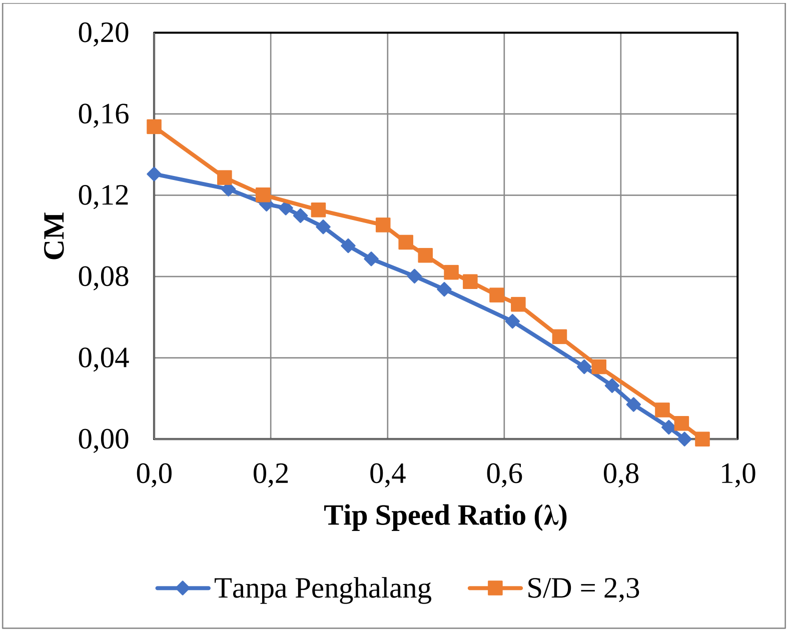
Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 7 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 7 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.14 yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM_0) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip*

speed ratio (λ). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. 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 7 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1339 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1376 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).

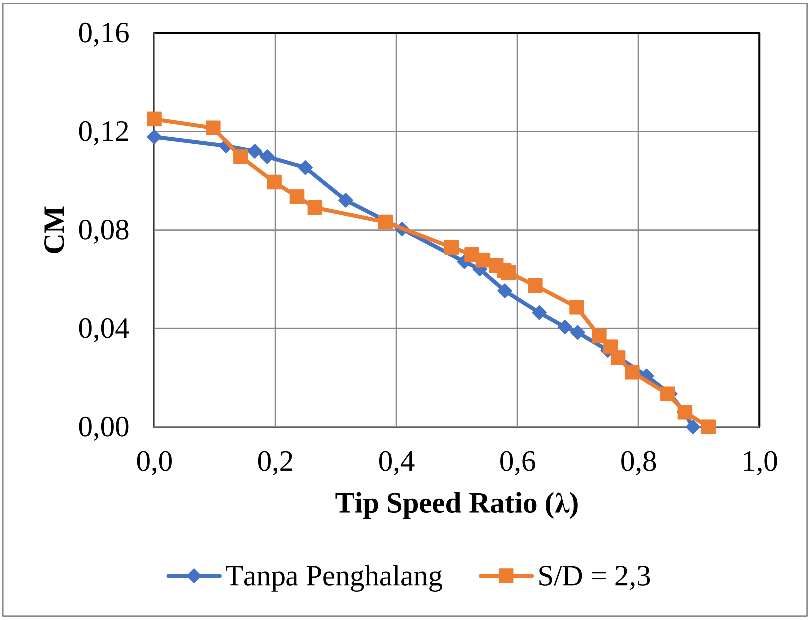


Gambar 4. 15 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 8 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 8 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.15 Yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (*λ*). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. 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 8 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1305 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1537 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).

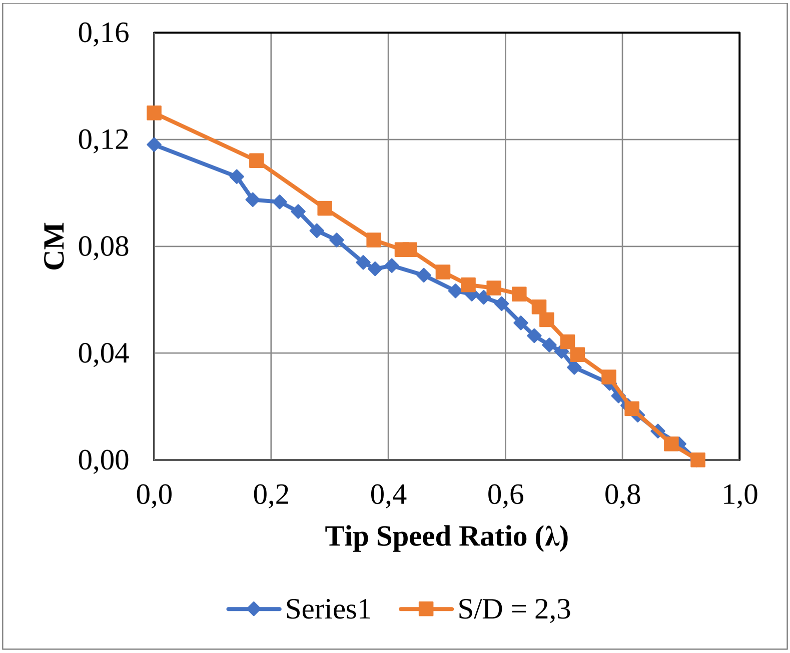


Gambar 4. 16 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 9 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (*λ*) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 9 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.16 Yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (*λ*). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. 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 9 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1178 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1250 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).



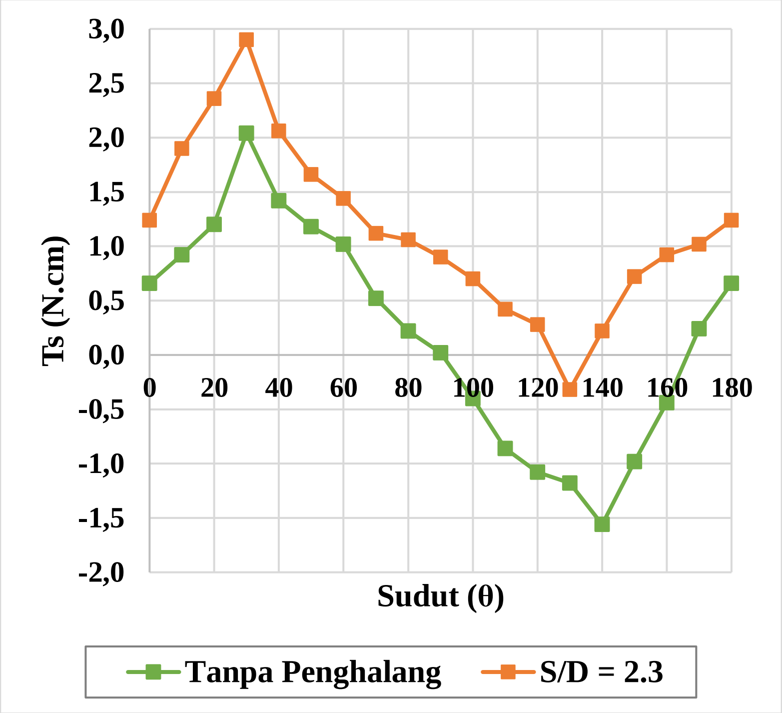
Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Moment (CM) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Kecepatan Udara 10 m/s

Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (CM) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) dengan dan tanpa silinder pengganggu pada kecepatan udara 10 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.17 Yang menjelaskan bahwa grafik *coefficient of moment* (CM) pada turbin angin Savonius dengan pengganggu berada di atas grafik *coefficient of moment* (CM) dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Selain itu dapat dilihat pula bahwa nilai CM terus meningkat seiring menurunnya nilai *tip speed ratio* (λ). Nilai λ maksimum menandakan bahwa turbin berputar pada kondisi tidak ada pembebanan, dan nilai λ minimum menandakan bahwa turbin pada kondisi pembebanan maksimum.

Berdasarkan Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio*. Nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 10 m/s didapatkan CM_0 maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,1180 pada λ = 0, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu sebesar 0,1300 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).

4.3.3. Analisa Torsi Statis terhadap Fungsi Sudut *Blade* Turbin Angin Savonius (θ) pada Kecepatan 4,5,6,7,8,9, dan 10 m/s



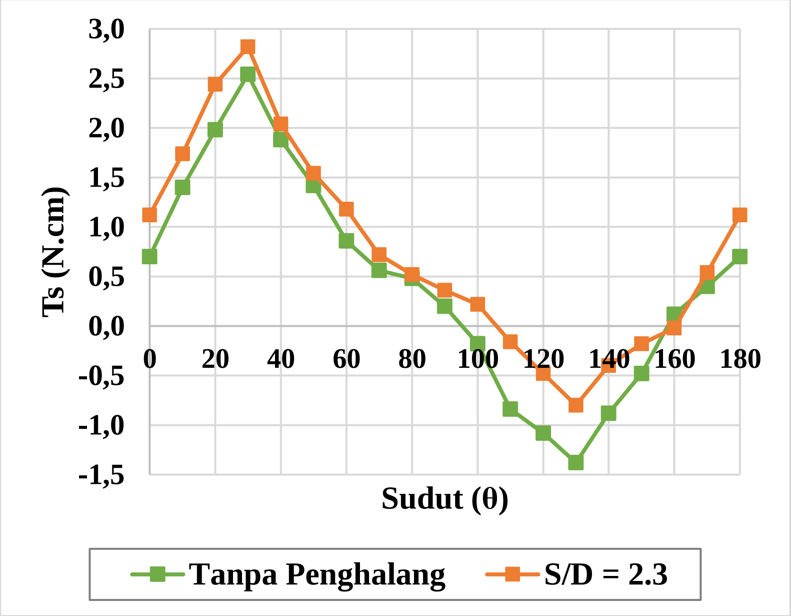
Gambar 4. 18 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 4 m/s

Pada Gambar 4.18 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 4 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^o kemudian turun hingga sudut 130^o dan 140^o kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius

tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 2,04 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,56 N.cm pada sudut 140°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 2,90 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,32 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.18 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 2,04 N.cm menjadi 2,90 N.cm pada sudut 30^o. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,56 N.cm menjadi -0,32 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0^o hingga 30^o dan 130^o hingga 180^o terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^o sampai dengan sudut 130^o dan 140^o dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang

terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.



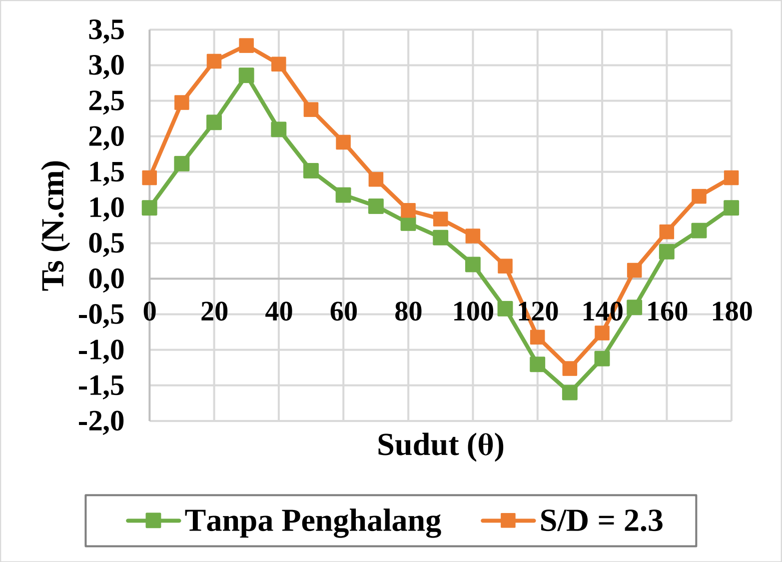
Gambar 4. 19 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 5 m/s

Pada Gambar 4.19 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 5 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^{o} kemudian turun hingga sudut 130^{o} kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan

silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 2,54 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,38 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 2,82 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,80 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.19 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 2,54 N.cm menjadi 2,82 N.cm pada sudut 30^o Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,38 N.cm menjadi -0,80 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0^o hingga 30^o dan 130^o hingga 180^o terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^o sampai dengan sudut 130^o dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara

kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

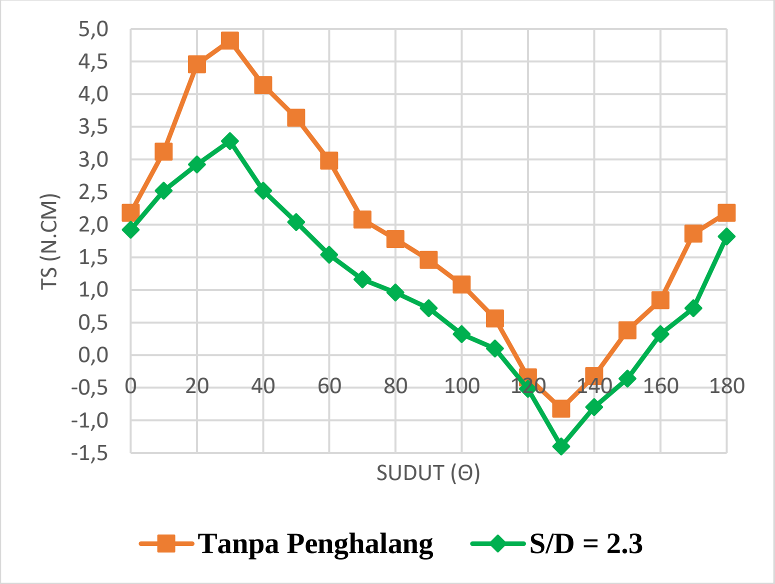


Gambar 4. 20 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 6 m/s

Pada Gambar 4.20 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 6 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^o kemudian turun hingga sudut 130^o kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 2,86 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,60 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 3,28

N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,26 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.20 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 2,86 N.cm menjadi 3,28 N.cm pada sudut 30°. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,60 N.cm menjadi -1,26 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0° hingga 30° dan 130° hingga 180° terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30° sampai dengan sudut 130° dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

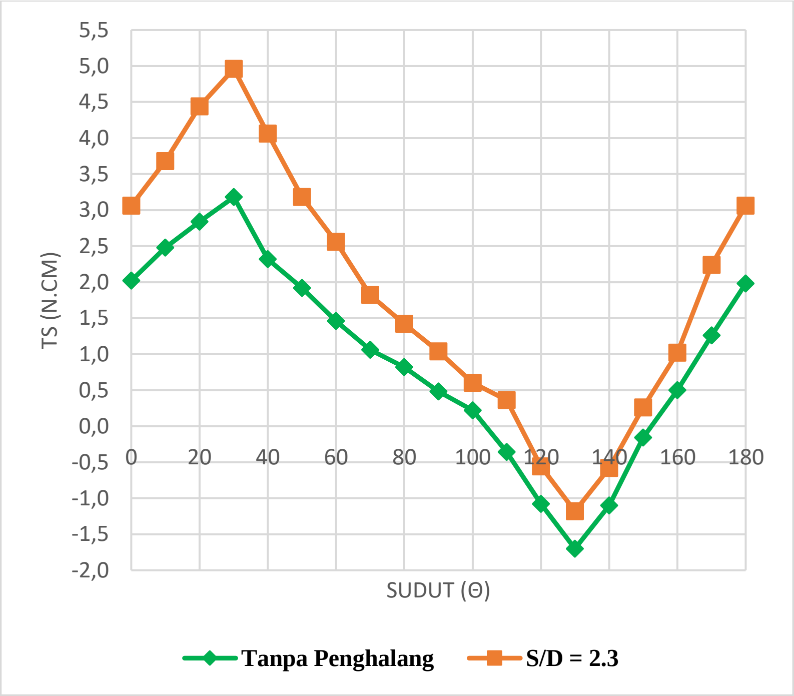


Gambar 4. 21 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 7 m/s

Pada Gambar 4.21 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 7 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^o kemudian turun hingga sudut 130^o kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 3,28 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,40 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 4,82 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,82 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi

statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.21 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 3,28 N.cm menjadi 4,82 N.cm pada sudut 30^o. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,40 N.cm menjadi -0,82 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0^o hingga 30^o dan 130^o hingga 180^o terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^o sampai dengan sudut 130^o dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

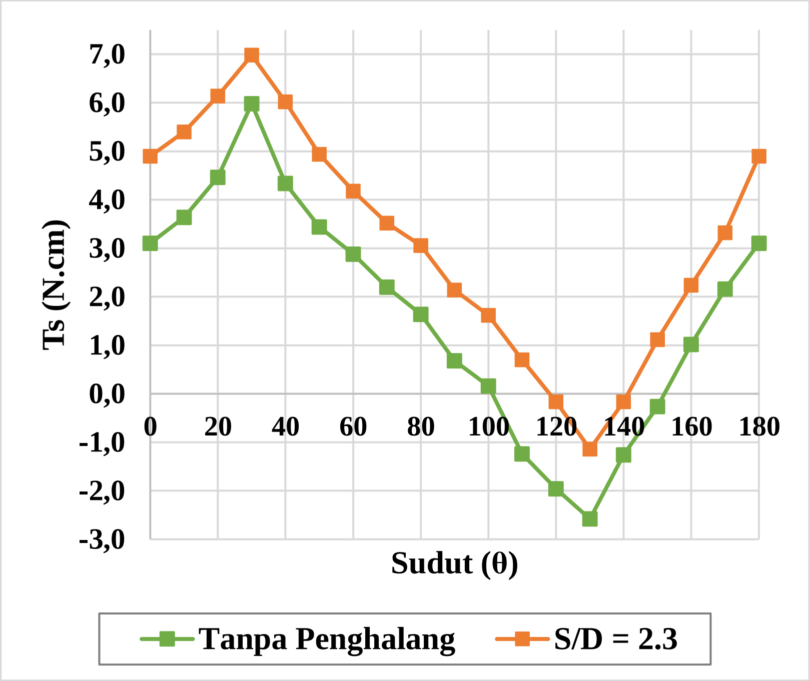


Gambar 4. 22 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 8 m/s

Pada Gambar 4.22 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 8 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30° kemudian turun hingga sudut 130° kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 3,18 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,70 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 4,96

N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,18 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.22 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 3,18 N.cm menjadi 4,96 N.cm pada sudut 30^{o}. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,70 N.cm menjadi -1,18 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0^{o} hingga 30^{o} dan 130^{o} hingga 180^{o} terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^{o} sampai dengan sudut 130^{o} dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

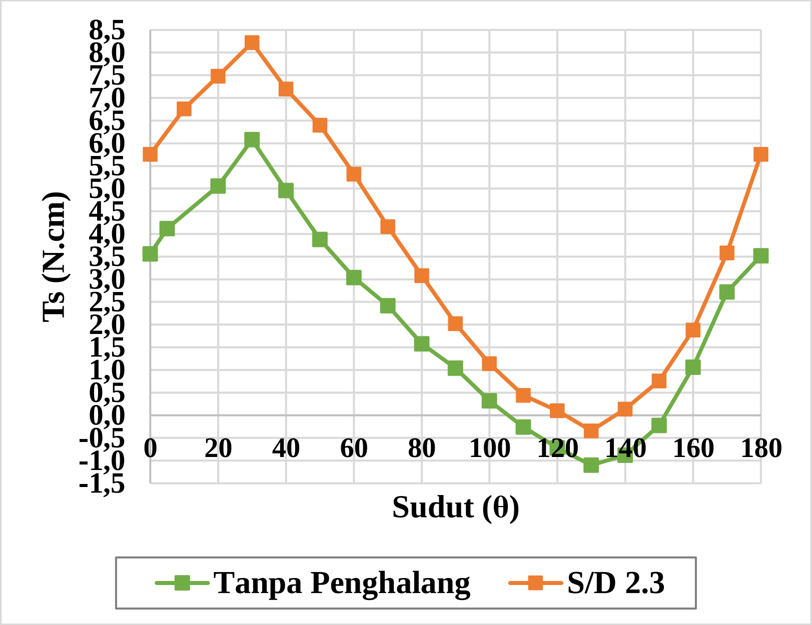


Gambar 4. 23 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 9 m/s

Pada Gambar 4.23 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 9 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30^o kemudian turun hingga sudut 130^o kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 5,98 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -2,58 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 6,98

N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,14 N.cm pada sudut 130°. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu terjadi peningkatan pada torsi statis maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan Gambar 4.23 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 5,98 N.cm menjadi 6,98 N.cm pada sudut 30°. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -2,58 N.cm menjadi -1,14 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0° hingga 30° dan 130° hingga 180° terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30° sampai dengan sudut 130° dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.



Gambar 4. 24 Grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan (TS) dan tanpa silinder pengganggu (T_{S0}) terhadap posisi angular sudu (θ) pada kecepatan angin 10 m/s

Pada Gambar 4.24 bisa dilihat bahwa trendline grafik berbentuk sinusoidal. Pada grafik kecepatan angin 10 m/s tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi statis meningkat hingga sudut 30° kemudian turun hingga sudut 130° kemudian kembali naik hingga sudut terakhir. Torsi statis turbin angin Savonius tanpa diberikan silinder pengganggu (T_{S0}) memiliki nilai maksimum sebesar 6,08 N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -1,10 N.cm pada sudut 130°. Torsi statis turbin angin Savonius dengan diberikan silinder pengganggu (T_S) memiliki nilai maksimum sebesar 8,22

N.cm pada sudut 30° dan nilai minimum sebesar -0,34 N.cm pada sudut 130°.

Berdasarkan Gambar 4.24 didapatkan bahwa dengan diberinya silinder pengganggu turbin Savonius mengalami peningkatan nilai torsi statis maksimum dibanding tanpa pengganggu yaitu dari 6,08 N.cm menjadi 8,22 N.cm pada sudut 30^{o}. Kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade sehingga gaya advancing naik dan menghambat aliran fluida menuju sisi returning blade sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat yang nantinya meningkatkan kemampuan torsi statis turbin. Hal ini dibuktikan dengan kenaikan nilai torsi statis yang semakin menuju nilai positif yaitu -1,10 N.cm menjadi -0,34 N.cm. Pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai torsi statis negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting,* sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar. Pada sudut 0^{o} hingga 30^{o} dan 130^{o} hingga 180^{o} terjadi peningkatan nilai torsi statis karena gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan torsi statis akan meningkat. Penurunan nilai torsi statis terjadi pada sudut 30^{o} sampai dengan sudut 130^{o} dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan torsi statis yang terjadi akan mengecil juga sehingga ketika gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari gaya *drag* pada *advancing* blade, maka nilai torsi akan menjadi negatif.

4.4. Perbandingan Hasil Eksperimen Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan hasil eksperimen turbin angin Savonius dengan dan tanpa pengganggu ini meliputi nilai *tip speed ratio* (λ), *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan torsi statis (T_S) pada semua variasi kecepatan udara. Silinder pengganggu yang digunakan memiliki rasio diameter d/D = 0,2, *aspect ratio* ≈ 1, dan rasio S/D =1,5.

Tabel 4. 1 Perbandingan Nilai CoP maksimum dan λ Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

U(m/s)	Tanpa Penghalang		Dengan Penghalang	
	CoP_{0max}	λ	CoP_{max}	λ
4	0,0329	0,5592	0,0356	0,5910
5	0,0536	0,6213	0,0977	0,5990
6	0,0485	0,5239	0,0625	0,5779
7	0,0416	0,5786	0,0499	0,6817
8	0,0367	0,4976	0,0420	0,4648
9	0,0345	0,5379	0,0371	0,5649
10	0,0347	0,5934	0,0387	0,6238

Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai CM maksimum dan λ Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

U(m/s)	Tanpa Penghalang		Dengan Penghalang	
	CM_0	λ	CM	λ
4	0,0968	0,5592	0,1154	0,5910
5	0,1401	0,6213	0,1529	0,5990
6	0,1350	0,5239	0,1525	0,5779
7	0,1339	0,5786	0,1376	0,6817
8	0,1305	0,4976	0,1537	0,4648
9	0,1178	0,5379	0,1250	0,5649
10	0,1180	0,5934	0,1300	0,6238

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Torsi Statis Maksimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

U(m/s)	Tanpa Penghalang		Dengan Penghalang	
	TS_{0max}	θ°	TS_{max}	θ°
4	2,04	30°	2,9	30°
5	2,54	30°	2,82	30°
6	2,86	30°	3,28	30°
7	3,28	30°	4,82	30°
8	3,18	30°	4,96	30°
9	5,98	30°	6,98	30°
10	6,08	30°	8,22	30°

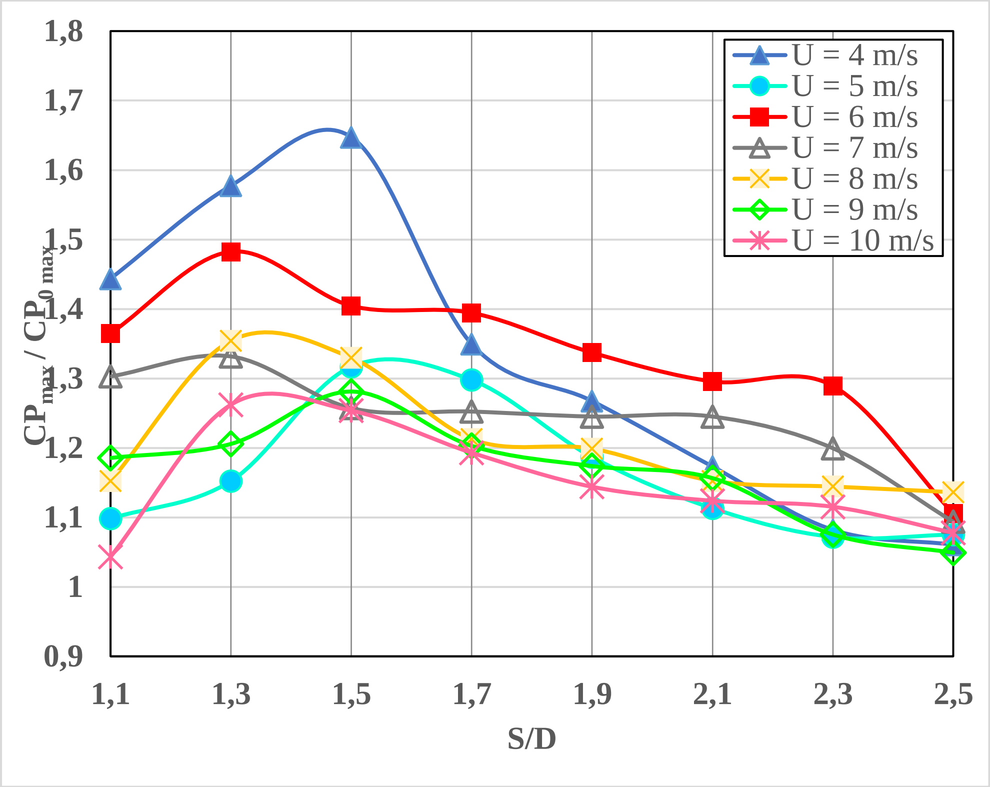
Tabel 4. 4 Perbandingan Nilai Torsi Statis minimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

U(m/s)	Tanpa Penghalang		Dengan Penghalang	
	TS0min	θ°	Tsmin	θ°
4	-1,56	140°	-0,32	130°
5	-1,38	130°	-0,8	130°
6	-1,6	130°	-1,26	130°
7	-1,4	130°	-0,82	130°
8	-1,7	130°	-1,18	130°
9	-2,58	130°	-1,14	130°
10	-1,1	130°	-0,34	130°

Berdasarkan Tabel 4.4 dapat disimpulkan bahwa nilai torsi statis maksimum selalu berada pada sudut 30^o. Hal ini dikarenakan pada sudut 30^o dengan kehadiran silinder pengganggu akan mengarahkan aliran fluida menuju sisi advancing blade lebih banyak yang sehingga gaya *drag advancing blade* mengalami peningkatan. Sedangkan pada sisi *returning blade* semakin menjauhi datangnya aliran fluida dan secara otomatis akan lebih sedikit menerima aliran fluida dan gaya drag pada *returning blade* semakin berkurang dan meningkatnya nilai torsi statis. Dari fenomena tersebut didapatkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu semakin meningkat dan torsi statis pada posisi angular sudu 30^o bernilai paling besar dibanding pada posisi angular lainnya.

4.5. Analisa Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Maksimum antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_{max} / CoP_{0max}) pada Variasi Kecepatan Udara

Pada penelitian ini dilakukan analisa terkait pengaruh silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* terhadap peningkatan dari performa turbin angin Savonius pada variasi nilai S/D dan kecepatan udara. Adapaun hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah nilai CoP pada variasi jarak S/D yang ditunjukkan pada Gambar 4.25

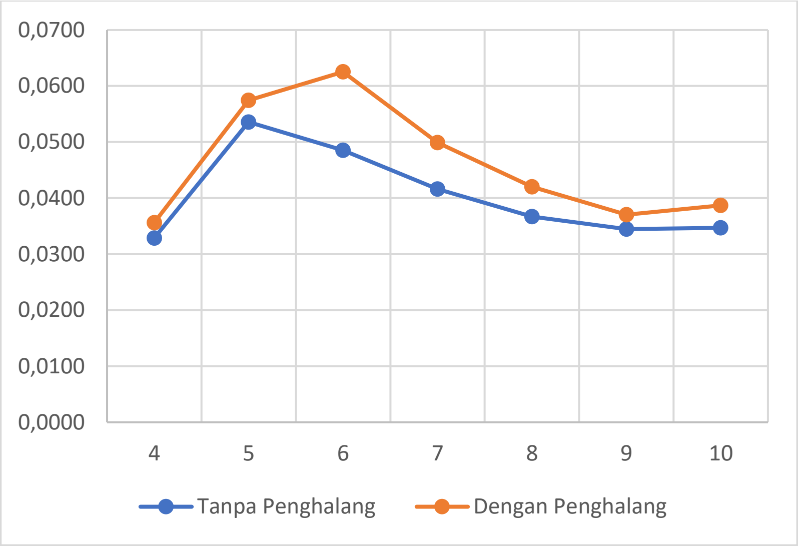


Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power (CoP) Maksimum antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu (CoP_{max} / CoP_{0max}) pada Variasi Kecepatan Udara

Pada penelitian ini didapatkan grafik CoP_{max} / CoP_{0max} pada variasi S/D dan pada kecepatan 4 -10 m/s. Berdasarkan Gambar 4.25 diketahui bahwa nilai CoP_{max} / CoP_{0max} > 1. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diletakkan silinder pengganggu

didepan returning blade pada turbin angin Savonius dapat meningkatkan performa dari turbin. Nilai CoP_{max} / CoP_{0max} tertinggi berada pada S/D = 1,5 saat kecepatan 4 m/s sebesar 1,6474 sedangkan nilai CoP_{max} / CoP_{0max} terendah berada pada S/D = 1,1 saat kecepatan 10 m/s sebesar 1,0432. Pada saat S/D = 1,3 terdapat nilai CoP_{max} / CoP_{0max} tertinggi pada kecepatan 6 m/s, 7 m/s, dan 8 m/s dengan masing masing nilai sebesar 1,4825; 1,3317; dan 1,3542. Sedangkan pada kecepatan 4 m/s, 5m/s, 9 m/s, dan 10 m/s nilai CoP_{max} / CoP_{0max} tertinggi terdapat pada saat S/D = 1,5 dengan masing masing nilai 1,6474; 1,317; 1,2812; dan 1,2622.

Pada saat S/D = 1,1 kecepatan 5 m/s dan 10 m/s, S/D = 2,3 kecepatan 4 m/s; 5 m/s; dan 9 m/s, dan S/D = 2,5 kecepatan 4 m/s; 5m/s; 9 m/s; dan 10 m/s kurang efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius karena nilai CP_{max} / $CP_{0\ max}$ yang didapatkan cenderung mendekati 1. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jarak peletakkan silinder pengganggu berpengaruh pada nilai performa turbin angin Savonius. Pada nilai S/D kecil, daerah *wake* yang terbentuk cenderung tidak luas, sehingga daerah yang mengalami penurunan tekanan di depan *retruning blade* juga tidak luas. Akibatnya perbedaan tekanan di depan dan belakang *returning blade* tidak banyak berubah dari turbin angin Savonius tanpa pengganggu. Sedangkan pada nilai S/D besar, silinder pengganggu tidak efektif mengganggu aliran yang terjadi di *returning blade*, karena akan seperti dua buah *bluff body* yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi.



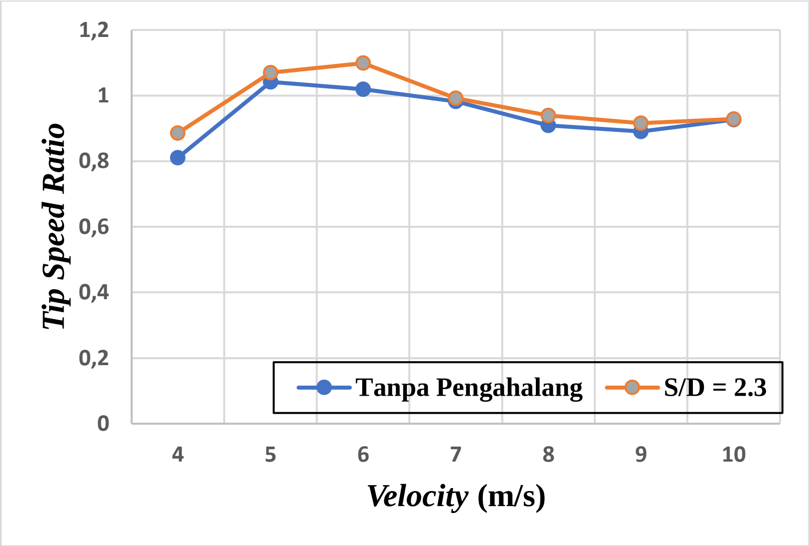
Gambar 4. 26 Grafik Perbandingan Nilai Coefficient of Power Maksimum (CoP_{max}) antara Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu dan Turbin Angin Savonius Tanpa Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

Bedasarkan Gambar 4.26 bisa dilihat bahwasanya terjadi perubahan kecepatan optimum yang mana pada turbin angin Savonius tanpa penghalang mempunyai nilai kecepatan optimum pada kecepatan 5 m/s dengan nilai CoP_{max} 0,0536 pada TSR 0,6213, sedangkan dengan menggunakan silinder penghalang mempunyai nilai kecepatan optimum pada kecepatan 6 m/s dengan nilai CoP_{max} 0,0625 pada TSR 0,5579. Hal ini terjadi dikarenakan pengaruh setelah diberikannya silinder pengganggu didepan returning blade yang menyebabkan *shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan jatuh pada permukaan *returning blade* yang akan mengganggu *boundary layer* pada *returning blade*. Terganggunya *boundary layer* pada *returning blade* membuat transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen

akan lebih cepat terjadi, sehingga titik separasi akan tertunda atau mundur ke belakang. Tertundanya titik separasi pada *returning blade* ini menyebabkan gaya *drag* akan turun dan area *wake* di belakang *returning blade* akan menyempit, sehingga nilai selisih torsi antara *returning blade* dan *advancing blade* ini naik dan nilai daya juga meningkat.

Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai Torsi Statis minimum Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Udara

U	TSR_0 max	TSR max
4	0,810648	0,885671
5	1,041656	1,06955
6	1,019575	1,098753
7	0,982164	0,991917
8	0,90921	0,939616
9	0,890188	0,915839
10	0,92689	0,928954



Gambar 4. 27 Grafik Nilai TSR Maksimum Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Variasi Kecepatan

Berdasarkan Gambar 4.27 ditunjukkan bahwa *trendline* grafik TSR turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (TSR_{0max}) dan dengan silinder pengganggu (TSR_{max}) sebagai fungsi kecepatan angin mempunyai bentuk parabolik. Nilai TSR mengalami kenaikan hingga titik optimum yang kemudian turun dengan semakin meningkatnya nilai kecepatan angin. Nilai TSR maksimum untuk turbin tanpa silinder pengganggu mempunyai nilai sebesar 1,042 pada kecepatan 5 m/s, kemudian untuk turbin dengan silinder pengganggu (TSR_{max}) mempunyai nilai sebesar 1,099 pada kecepatan 6 m/s. Pada kecepatan yang terlalu rendah nilai TSR maksimum mempunyai nilai yang rendah dikarenakan pada kecepatan rendah akan mengakibatkan pembebanan terlalu kecil yang menyebabkan nilai torsi terlalu kecil dan nilai CM

meningkat sedangkan nilai TSR nya mengalami penurunan. Sedangkan pada kecepatan terlalu tinggi nilai TSR mengalami penurunan dikarenakan beban yang diberikan semakin besar sehingga menyebabkan nilai TSR berbanding terbalik dengan nilai CM yang mana nilai TSR nya semakin rendah. Hal ini sesuai dengan hipotesa ketiga bahwa ketika sudah kecepatan sudah mencapai nilai optimum maka kenaikan nilai kecepatan akan menurunkan nilai TSR disebabkan semakin banyaknya kerugian yang terjadi sehingga menyebabkan performa dari turbin angin Savonius.

Tabel 4. 6 Nilai *Reynolds Number*, *Density*, Viscosity

T (^oC)	ρ (kg/m^3)	μ ($N.s/m^3$)	L (m)	V (m/s)	Re
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	4	76401,99
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	5	95502,49
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	6	114603
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	7	133703,5
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	8	152804
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	9	171904,5
28,5	1,17096	0,0000186	0,3034	10	191005

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan data penelitian dari hasil eksperimen untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu di depan returning blade dengan rasio d/D = 0,2, *aspect ratio* ≈ 1, rasio jarak S/D = 2,3, dan dengan variasi kecepatan udara, yaitu 4; 5; 6; 7; 8; 9; dan 10 m/s diperoleh kesimpulan yaitu:

1. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio diameter d/D = 0,2 *aspect ratio* ≈ 1, dan rasio jarak S/D =1,5 efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan torsi statis turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan.
2. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio diameter d/D = 0,2 *aspect ratio* ≈ 1, dan rasio jarak S/D =1,5 efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of power* (CoP) turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan yang mana nilai *coefficient of power* maksimum (CoP_{max}) tertinggi terletak pada kecepatan angin 6 m/s dengan peningkatan sebesar 28,57%.
3. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio diameter d/D = 0,2 *aspect ratio* ≈ 1, dan rasio jarak S/D =1,5 efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *coefficient of moment* (CM) turbin angin Savonius pada semua variasi kecepatan yang mana nilai *coefficient of moment* maksimum (CM_{max})

tertinggi terletak pada kecepatan angin 6 m/s dengan peningkatan sebesar 19,21%.

4. Peletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio diameter d/D = 0,2 *aspect ratio* ≈ 1, dan rasio jarak S/D =1,5 efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai torsi statis pada semua angular sudu. Namun belum mampu membuat turbin angin Savonius memiliki self starting pada semua posisi angular sudu. Hal ini ditunjukkan dengan adanya nilai torsi negatif pada beberapa posisi angular sudu.
5. Pada semua variasi kecepatan diperoleh hasil bahwa konsidi operasi terbaik terjadi pada rentang nilai TSR 0,5 sampai dengan 0,7.

5.2. Saran

Pada penelitian yang telah dilakukan tentunya ada beberapa saran untuk di lakukannya penelitian selanjutnya terkait meningkatkan performa turbin angin Savonius. Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan kalibrasi ulang untuk awal dilakukan eksperimen seperti melumasi bearing, memberi jeda waktu untuk *axial fan* agar tidak *over heating*.
2. Selalu mengecek kondisi ketelitian alat dan bahan seperti pada benang, ketelitian brake dynamometer, dan neraca pegas.

DAFTAR PUSTAKA

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

Ambrosio, D.M. & Marco, M. 2010. *Vertical Axis Wind Turbines : History, Technology and Applications*. Tesis tidak diterbitkan. Swedia : Hogskolan Halmstad

Aryanto F, Mara IM, Nuarsa M, “Pengaruh Kecepatan Angin dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal” Dinamika Teknik Mesin, Vol 3 No. 1 Page 50-59. Januari 2013.

Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. “*Introduction to Fulid Mechanics*”. 8th penyunt. USA: John Willey & Sons Inc..

Goh, S.C., Raman, B.S., Chidambaresan, K. & Uwe, S.J. 2016. Tow Testing of Savonius Wind Turbine Above a Bluff Body Complemented by CFD Simulation. *Journal of Renewable Energi*. (87): 332-345.

Hau, Eric. 2006. Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Edisi Kedua. Germany.Springer, Inc

Hemami, Ahmad. 2012. “*Wind Turbine Technology*”. *Associate of* McGill University, Montreal, Canda *and* Iowa Lakes *Community College*, IA, USA

Mahmoud, N.H., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2012, “*An experimental study on improvement of Savonius rotor performance*”. Mesir: Alexandria university

Mahmoud, N.H., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2012, “An experimental study on improvement of Savonius rotor performance”. Mesir: Alexandria university

Mohamed MH, Janiga G, Pap E, and Thevenin D. 2010. *Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning blade*, Journal Renewable Energi, Vol 35, Page Paper 2618-2626.

PT PLN (Persero), Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RPUTL) PT PLN (Persero) 2019-2028. Jakarta: PT PLN, 2019

R.Renato, R.Roberto, M. Sergio, and V. Daniele, “Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting system”. Applied Energi, Vol 161. Page 143-152, 2016.

Ramadhan Bagas. 2020. “Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder Sirkular didepan Returning Blade Turbin”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Sakti Gunawan, Y Triyogi, and AW Wawan. 2019. *Experimental and Numerical Investigation of I-65^0 Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance,* Vol 19, No 05, Page Paper 115-125.

Santhakumar, S., Palanivel, I. & Venkatasubramanian, K. 2017. “A Study on The Rotational Behaviour of a Savonius Wind Turbine in Low Rise Highways During Different Monsoons”. *Journal of Energi for Sustainable Development*. (40) : 1 -10.

Suryati, Sadmoko, Jamaludin, Walujanto, 2019. Outlook Energi Indonesia 2019. ISSN 2527-3000

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

Umami Riza. 2019. “Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder Sirkular didepan Returning Blade Turbin”. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Y Triyogi, D Suprayogi, dan E Spirda., 2009, “*Reducing the drag on a circular cylinder bu upstream installation of an I-type bluff body as passive control*”. Journal Mechanical Engineering Science, Vol 223 Part C, Page Paper 2291-2296.

Yuwono T, Sakti G, Aulia FN, Wijaya AC. 2020. “Improving The Performance of Savonius Wind Turbine By Installation of A Circular Cylinder Upstream of Returning Turbine *Blade*”

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 4 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	R (m)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2								
140	28,5	4	205,4	206,1	204,5	202,6	202,5	204,22	21,375	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,811	0,0000	0,0000	0,0000
140	28,5	4	176,7	173,6	179,9	172,8	177,0	176	18,421	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,699	0,0039	0,0213	0,0305
140	28,5	4	162,3	161,0	162,4	161,3	163,2	162,04	16,960	29	90	90	90	90	90	90	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,643	0,0058	0,0292	0,0454
140	28,5	4	143,2	137,3	133,5	144,4	146,0	140,88	14,745	31	110	110	110	110	110	110	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,559	0,0075	0,0329	0,0588
140	28,5	4	100,5	99,4	96,2	100,0	97,7	98,76	10,337	33	140	140	140	140	140	140	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,392	0,0101	0,0312	0,0797
140	28,5	4	84,9	80,0	68,5	73,4	71,2	75,6	7,913	34	150	150	150	150	150	150	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,300	0,0110	0,0259	0,0864
140	28,5	4	61,2	66,3	64,9	65,5	68,8	65,34	6,839	35	150	150	160	150	150	152	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,259	0,0110	0,0226	0,0871
140	28,5	4	60,7	59,7	58,6	61,2	60,6	60,16	6,297	36	150	160	160	150	160	156	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,239	0,0113	0,0213	0,0893
140	28,5	4	55,3	63,3	48,2	51,6	45,5	52,78	5,524	37	150	160	160	160	160	158	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,210	0,0114	0,0189	0,0901
140	28,5	4	53,3	53,6	51,7	44,6	42,0	49,04	5,133	38	160	160	160	160	160	160	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,195	0,0115	0,0177	0,0908
140	28,5	4	28,0	24,4	21,3	27,5	30,3	26,3	2,753	39	160	170	170	160	160	164	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,104	0,0118	0,0097	0,0931
140	28,5	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	40	170	170	170	170	170	170	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,000	0,0123	0,0000	0,0968

Tabel A. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM	R (m)
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2								
155	28,5	5	323,5	335,2	330,5	325,9	325	328,02	34,333	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	1,0417	0	0	0	0,1517
155	28,5	5	303,7	305,5	306,2	308,9	304,4	305,74	32,001	19	50	50	50	50	50	50	0,0096	0,0893	1,17	0,9709	0,0029	0,0143	0,0148	0,1517
155	28,5	5	284,4	285	282,1	278,4	289,5	283,88	29,713	29	80	80	80	80	80	80	0,0096	0,0893	1,17	0,9015	0,0048	0,0219	0,0243	0,1517
155	28,5	5	257,8	266,5	256,6	261,2	265,4	261,5	27,37	39	120	110	110	120	110	114	0,0096	0,0893	1,17	0,8304	0,0071	0,0297	0,0357	0,1517
155	28,5	5	232,5	236,6	238,6	234,7	234,9	235,46	24,645	49	160	160	160	160	160	160	0,0096	0,0893	1,17	0,7477	0,0105	0,0395	0,0529	0,1517
155	28,5	5	229,5	228,6	222,2	228,4	230,5	227,84	23,847	54	180	180	180	180	180	180	0,0096	0,0893	1,17	0,7235	0,0119	0,0434	0,06	0,1517
155	28,5	5	213,8	216,6	213,2	211	219,8	214,88	22,491	64	210	210	210	210	210	210	0,0096	0,0893	1,17	0,6824	0,0138	0,0475	0,0696	0,1517
155	28,5	5	195,5	191,3	192,4	195,5	203,5	195,64	20,477	69	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,6213	0,0171	0,0536	0,0862	0,1517
155	28,5	5	171,3	173	171,4	175,3	180,5	174,3	18,243	74	270	270	270	270	270	270	0,0096	0,0893	1,17	0,5535	0,0185	0,0517	0,0934	0,1517
155	28,5	5	155,2	158,4	157,7	153	156	156,06	16,334	79	290	290	290	290	290	290	0,0096	0,0893	1,17	0,4956	0,0199	0,0498	0,1005	0,1517
155	28,5	5	120,9	123,8	126	132,8	138,6	128,42	13,441	84	320	320	320	320	320	320	0,0096	0,0893	1,17	0,4078	0,0223	0,0459	0,1124	0,1517
155	28,5	5	116,4	117,8	125,2	115,4	112,2	117,4	12,288	94	330	330	330	330	330	330	0,0096	0,0893	1,17	0,3728	0,0223	0,0419	0,1124	0,1517
155	28,5	5	61,9	73,4	53,8	51,2	60,8	60,22	6,303	104	350	350	350	350	350	350	0,0096	0,0893	1,17	0,1912	0,0232	0,0224	0,1172	0,1517
155	28,5	5	0	0	0	0	0	0	0	106	400	400	400	400	400	400	0,0096	0,0893	1,17	0	0,0278	0	0,1401	0,1517

Tabel A. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
165	28,5	6	385,1	388,1	388,6	384,7	379,9	385,28	40,326	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	1,020	0,0000	0	0
165	28,5	6	372	371,1	372,6	368,9	371,1	371,14	38,846	19	60	60	60	60	60	50	0,0096	0,0893	1,17	0,982	0,0029	0,0101	0,0103
165	28,5	6	355,2	354	355,9	356,2	352,8	354,82	37,138	29	90	100	90	100	100	96	0,0096	0,0893	1,17	0,939	0,0063	0,0208	0,0222
165	28,5	6	321,2	332,7	328,7	325,4	323,3	326,26	34,149	39	130	130	130	130	130	130	0,0096	0,0893	1,17	0,863	0,0086	0,026	0,0301
165	28,5	6	302,5	306	304,1	307,3	305,1	305	31,923	49	180	180	180	180	180	180	0,0096	0,0893	1,17	0,807	0,0124	0,035	0,0433
165	28,5	6	255	256,1	262,1	253,1	250,6	255,38	26,730	59	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,676	0,0180	0,0427	0,0632
165	28,5	6	239	238	238,9	237,6	239,1	238,52	24,965	69	300	300	300	300	300	300	0,0096	0,0893	1,17	0,631	0,0218	0,0482	0,0764
165	28,5	6	200	199,5	199,7	193,7	197	197,98	20,722	74	350	360	350	360	350	354	0,0096	0,0893	1,17	0,524	0,0264	0,0485	0,0926
165	28,5	6	160,5	161,3	163,7	163,3	165,4	162,84	17,044	79	400	400	400	400	400	400	0,0096	0,0893	1,17	0,431	0,0303	0,0458	0,1062
165	28,5	6	148,4	153,9	158,5	148,2	152,9	152,38	15,949	89	410	410	410	410	410	410	0,0096	0,0893	1,17	0,403	0,0303	0,0428	0,1062
165	28,5	6	120	122,7	122	127,2	129,5	124,28	13,008	94	450	450	450	450	450	450	0,0096	0,0893	1,17	0,329	0,0336	0,0387	0,1178
165	28,5	6	71,7	73,7	77,7	74,7	72,2	74	7,745	99	490	490	490	490	490	490	0,0096	0,0893	1,17	0,196	0,0369	0,0253	0,1294
165	28,5	6	0	0	0	0	0	0	0,000	102	510	510	510	510	510	510	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0385	0	0,135

Tabel A. 4 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
170	28,5	7	433,0	431,7	430,8	432,0	437,5	433,00	45,321	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,982	0,0000	0,0000	0,0000
170	28,5	7	419,6	417,1	415,6	418,5	420,1	418,18	43,770	19	70	70	70	70	70	70	0,0096	0,0893	1,17	0,949	0,0048	0,0118	0,0124
170	28,5	7	396,5	394,8	386,0	396,7	402,5	395,30	41,375	39	140	140	140	140	140	140	0,0096	0,0893	1,17	0,897	0,0095	0,0220	0,0246
170	28,5	7	365,4	361,5	355,5	366,6	363,3	362,46	37,937	59	200	200	200	200	200	200	0,0096	0,0893	1,17	0,822	0,0133	0,0282	0,0343
170	28,5	7	331,4	330,3	328,8	329,3	329,8	329,92	34,532	69	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,748	0,0171	0,0329	0,0440
170	28,5	7	312,4	316,7	318,3	317,7	321,9	317,40	33,221	79	280	280	280	280	280	280	0,0096	0,0893	1,17	0,720	0,0190	0,0352	0,0489
170	28,5	7	305,7	304,1	304,9	299,4	300,2	302,86	31,699	84	310	310	310	310	310	310	0,0096	0,0893	1,17	0,687	0,0213	0,0377	0,0549
170	28,5	7	290,2	288,9	292,2	291,0	295,1	291,48	30,508	89	330	330	330	330	330	330	0,0096	0,0893	1,17	0,661	0,0228	0,0387	0,0586
170	28,5	7	283,0	280,0	278,3	277,8	281,1	280,04	29,311	94	350	350	350	350	350	350	0,0096	0,0893	1,17	0,635	0,0242	0,0395	0,0622
170	28,5	7	265,8	267,8	265,0	267,6	270,1	267,26	27,973	99	380	380	380	380	380	380	0,0096	0,0893	1,17	0,606	0,0265	0,0414	0,0683
170	28,5	7	257,5	255,7	252,8	253,0	256,5	255,10	26,700	104	400	400	400	400	400	400	0,0096	0,0893	1,17	0,579	0,0279	0,0416	0,0720
170	28,5	7	236,4	237,7	242,0	247,8	249,3	242,64	25,396	109	410	410	410	410	410	410	0,0096	0,0893	1,17	0,550	0,0284	0,0403	0,0732
170	28,5	7	115,1	111,3	116,3	111,8	113,7	113,64	11,894	129	560	560	560	560	560	560	0,0096	0,0893	1,17	0,258	0,0407	0,0270	0,1048
170	28,5	7	98,9	96,4	91,3	89,9	88,5	93,00	9,734	139	610	610	610	600	600	606	0,0096	0,0893	1,17	0,211	0,0441	0,0239	0,1135
170	28,5	7	48,0	41,5	43,5	44,8	42,0	43,96	4,601	144	650	650	650	650	650	650	0,0096	0,0893	1,17	0,100	0,0478	0,0123	0,1230
170	28,5	7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,000	149	700	700	700	700	700	700	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0520	0,0000	0,1339

Tabel A. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

Voltase	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
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
175	28,5	8	455,7	450,1	460,1	457,9	466,7	458,1	47,948	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,909	0,0000	0,0000	0,0000
175	28,5	8	447,7	447,9	449,9	440,5	436,7	444,54	46,529	19	50	50	50	50	50	50	0,0096	0,0893	1,17	0,882	0,0029	0,0051	0,0058
175	28,5	8	410,3	417,9	412,3	413,5	417,0	414,2	43,353	39	130	130	130	130	130	130	0,0096	0,0893	1,17	0,822	0,0086	0,0139	0,0169
175	28,5	8	397,1	399,0	393,7	395,7	392,5	395,6	41,406	59	200	200	200	200	200	200	0,0096	0,0893	1,17	0,785	0,0133	0,0206	0,0262
175	28,5	8	386,7	373,5	363,5	363,7	370,0	371,48	38,882	79	270	270	270	270	270	270	0,0096	0,0893	1,17	0,737	0,0180	0,0262	0,0355
175	28,5	8	306,3	312,1	307,9	310,7	311,3	309,66	32,411	99	410	410	410	410	410	410	0,0096	0,0893	1,17	0,615	0,0294	0,0356	0,0579
175	28,5	8	242,3	249,9	250,0	253,5	257,9	250,7	26,242	114	510	510	510	510	510	510	0,0096	0,0893	1,17	0,498	0,0374	0,0367	0,0737
175	28,5	8	224,6	227,0	229,0	224,0	220,3	225,0	23,548	119	550	550	550	550	550	550	0,0096	0,0893	1,17	0,447	0,0407	0,0358	0,0802
175	28,5	8	187,6	188,5	185,1	186,2	190,2	187,52	19,627	124	600	600	600	600	600	600	0,0096	0,0893	1,17	0,372	0,0449	0,0330	0,0886
175	28,5	8	160,0	166,5	167,4	178,7	165,7	167,66	17,548	129	640	640	640	640	640	640	0,0096	0,0893	1,17	0,333	0,0482	0,0316	0,0951
175	28,5	8	146,5	147,6	144,9	144,8	146,9	146,14	15,296	139	700	700	700	700	700	700	0,0096	0,0893	1,17	0,290	0,0530	0,0303	0,1044
175	28,5	8	127,9	129,0	125,6	125,7	124,6	126,56	13,247	159	750	750	750	750	750	750	0,0096	0,0893	1,17	0,251	0,0558	0,0276	0,1100
175	28,5	8	114,2	112,3	115,9	115,1	110,5	113,6	11,890	169	780	780	780	780	780	780	0,0096	0,0893	1,17	0,225	0,0577	0,0256	0,1137
175	28,5	8	101,3	96,3	98,6	90,3	99,1	97,12	10,165	179	800	800	800	800	800	800	0,0096	0,0893	1,17	0,193	0,0586	0,0223	0,1156
175	28,5	8	88,0	86,1	87,2	85,8	77,2	64,1	6,709	189	850	850	850	850	850	850	0,0096	0,0893	1,17	0,127	0,0624	0,0157	0,1230
175	28,5	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	199	900	900	900	900	900	900	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0662	0,0000	0,1305

Tabel A. 6 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s

Voltase	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
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
195	28,5	9	506,7	500,1	503,7	502,7	509,7	504,58	52,813	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,890	0,0000	0,0000	0,0000
195	28,5	9	497,7	495,0	494,0	496,7	497,7	496,22	51,938	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	0,875	0,0039	0,0053	0,0060
195	28,5	9	489,0	482,7	478,0	479,0	487,9	483,32	50,587	39	130	130	130	130	130	130	0,0096	0,0893	1,17	0,853	0,0086	0,0114	0,0134
195	28,5	9	476,3	457,0	455,0	458,0	460,0	461,26	48,279	59	200	200	200	200	200	200	0,0096	0,0893	1,17	0,814	0,0133	0,0169	0,0207
195	28,5	9	420,6	417,5	428,9	429,9	427,9	425,0	44,479	79	290	290	290	290	290	290	0,0096	0,0893	1,17	0,750	0,0199	0,0233	0,0310
195	28,5	9	396,2	396,9	397,7	397,1	395,5	396,68	41,519	99	360	360	360	360	360	360	0,0096	0,0893	1,17	0,700	0,0246	0,0269	0,0384
195	28,5	9	381,0	386,7	386,9	383,3	385,4	384,7	40,261	114	390	390	390	390	390	390	0,0096	0,0893	1,17	0,679	0,0261	0,0275	0,0406
195	28,5	9	358,0	363,2	359,5	361,6	362,0	360,9	37,770	124	440	440	440	440	440	440	0,0096	0,0893	1,17	0,637	0,0298	0,0296	0,0465
195	28,5	9	325,6	328,3	328,7	330,0	329,0	328,32	34,364	134	510	510	510	510	510	510	0,0096	0,0893	1,17	0,579	0,0355	0,0320	0,0553
195	28,5	9	304,1	304,7	305,6	305,7	304,5	304,92	31,915	144	580	580	580	580	580	580	0,0096	0,0893	1,17	0,538	0,0412	0,0345	0,0641
195	28,5	9	290,0	289,9	290,9	290,3	291,3	290,48	30,404	154	610	610	610	610	610	610	0,0096	0,0893	1,17	0,512	0,0431	0,0344	0,0671
195	28,5	9	230,9	231,7	231,4	233,2	234,0	232,24	24,308	174	720	720	720	720	720	720	0,0096	0,0893	1,17	0,410	0,0516	0,0329	0,0803
195	28,5	9	175,4	178,7	179,3	180,5	182,5	179,28	18,765	194	820	820	820	820	820	820	0,0096	0,0893	1,17	0,316	0,0591	0,0291	0,0921
195	28,5	9	147,3	140,3	140,5	137,8	142,5	141,68	14,829	214	930	930	930	930	930	930	0,0096	0,0893	1,17	0,250	0,0676	0,0263	0,1053
195	28,5	9	103,7	105,6	108,9	107,0	105,0	106,04	11,099	234	980	980	980	980	980	980	0,0096	0,0893	1,17	0,187	0,0704	0,0205	0,1097
195	28,5	9	90,9	98,7	92,9	90,1	99,0	94,32	9,872	239	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0,0096	0,0893	1,17	0,166	0,0719	0,0186	0,1119
195	28,5	9	69,8	69,7	63,6	68,5	65,0	67,32	7,046	244	1020	1020	1020	1020	1020	1020	0,0096	0,0893	1,17	0,119	0,0733	0,0136	0,1141
195	28,5	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	249	1050	1050	1050	1050	1050	1050	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0756	0,0000	0,1178

Tabel A. 7 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 10 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
220	28,5	10	581,7	579,5	586,0	588,9	582,7	583,76	61,100	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,927	0,0000	0,0000	0,0000
220	28,5	10	567,7	567,2	560,2	565,3	563,7	564,82	59,118	19	70	70	70	70	70	70	0,0096	0,0893	1,17	0,897	0,0048	0,0054	0,0061
220	28,5	10	548,4	540,5	538,2	544,2	539,0	542,06	56,736	39	130	130	130	130	130	130	0,0096	0,0893	1,17	0,861	0,0086	0,0093	0,0108
220	28,5	10	518,5	520,4	519,8	521,0	522,3	520,4	54,469	59	200	200	200	200	200	200	0,0096	0,0893	1,17	0,826	0,0133	0,0139	0,0168
220	28,5	10	506,1	508,7	509,9	510,8	512,2	509,54	53,332	79	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,809	0,0161	0,0165	0,0204
220	28,5	10	499,1	503,0	499,7	492,4	504,3	499,7	52,302	99	300	300	300	300	300	300	0,0096	0,0893	1,17	0,793	0,0190	0,0190	0,0239
220	28,5	10	490,2	488,4	491,7	491,9	488,3	490,1	51,297	119	360	360	360	360	360	360	0,0096	0,0893	1,17	0,778	0,0228	0,0223	0,0287
220	28,5	10	454,4	453,7	451,2	453,0	448,6	452,2	47,328	139	430	430	430	430	430	430	0,0096	0,0893	1,17	0,718	0,0275	0,0249	0,0347
220	28,5	10	434,4	439,9	440,6	442,0	434,9	438,36	45,882	159	500	500	500	500	500	500	0,0096	0,0893	1,17	0,696	0,0322	0,0283	0,0406
220	28,5	10	428,7	421,2	424,0	423,8	428,0	425,14	44,498	179	540	540	540	540	540	540	0,0096	0,0893	1,17	0,675	0,0341	0,0290	0,0430
220	28,5	10	411,7	407,7	411,1	409,8	404,0	408,86	42,794	199	590	590	590	590	590	590	0,0096	0,0893	1,17	0,649	0,0369	0,0302	0,0466
220	28,5	10	399,5	377,2	397,2	399,7	399,3	394,58	41,299	219	650	650	650	650	650	650	0,0096	0,0893	1,17	0,627	0,0407	0,0322	0,0513
220	28,5	10	375,7	370,7	371,8	376,7	373,7	373,72	39,116	239	730	730	730	730	730	730	0,0096	0,0893	1,17	0,593	0,0464	0,0347	0,0585
220	28,5	10	349,2	351,0	357,0	356,1	358,8	354,42	37,096	259	770	770	770	770	770	770	0,0096	0,0893	1,17	0,563	0,0482	0,0343	0,0609
220	28,5	10	339,2	339,4	336,3	346,4	347,1	341,68	35,763	279	800	800	800	800	800	800	0,0096	0,0893	1,17	0,543	0,0492	0,0337	0,0621
220	28,5	10	322,4	325,8	328,5	320,1	324,2	324,2	33,933	299	830	830	830	830	830	830	0,0096	0,0893	1,17	0,515	0,0501	0,0326	0,0633
220	28,5	10	288,7	296,4	295,8	285,6	284,1	290,12	30,366	359	940	940	940	940	940	940	0,0096	0,0893	1,17	0,461	0,0549	0,0319	0,0692
220	28,5	10	257,6	256,6	254,1	250,9	260,1	255,86	26,780	389	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0,0096	0,0893	1,17	0,406	0,0577	0,0296	0,0728
220	28,5	10	234,1	237,0	238,5	239,1	240,9	237,92	24,902	449	1050	1050	1050	1050	1050	1050	0,0096	0,0893	1,17	0,378	0,0567	0,0270	0,0716
220	28,5	10	221,0	225,7	224,3	229,2	225,1	225,06	23,556	529	1150	1150	1150	1150	1150	1150	0,0096	0,0893	1,17	0,357	0,0586	0,0264	0,0740
220	28,5	10	199,8	197,6	190,0	196,6	198,2	196,44	20,561	609	1300	1300	1300	1300	1300	1300	0,0096	0,0893	1,17	0,312	0,0652	0,0257	0,0823
220	28,5	10	173,3	171,0	171,4	171,9	188,6	175,24	18,342	689	1410	1410	1410	1410	1410	1410	0,0096	0,0893	1,17	0,278	0,0681	0,0239	0,0859
220	28,5	10	157,2	154,6	154,4	155,6	154,1	155,18	16,242	749	1530	1530	1530	1530	1530	1530	0,0096	0,0893	1,17	0,246	0,0737	0,0229	0,0930
220	28,5	10	131,0	130,5	139,7	139,9	134,9	135,2	14,151	829	1640	1640	1640	1640	1640	1640	0,0096	0,0893	1,17	0,215	0,0766	0,0207	0,0966
220	28,5	10	107,2	119,0	102,4	102,1	100,5	106,24	11,120	909	1720	1730	1730	1730		1727,5	0,0096	0,0893	1,17	0,169	0,0773	0,0164	0,0975
220	28,5	10	82,1	82,8	84,3	97,5	98,9	89,12	9,328	989	1880	1880	1880	1880	1880	1880	0,0096	0,0893	1,17	0,142	0,0841	0,0150	0,1061
220	28,5	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	1009	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0936	0,0000	0,1180

Tabel A. 8 Data torsi statis turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan 4 – 10 m/s

Sudut	Ts_0 (N.cm)						
	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s
0	0,66	0,7	1	1,92	2,02	3,1	3,56
10	0,92	1,4	1,62	2,52	2,48	3,64	4,12
20	1,2	1,98	2,2	2,92	2,84	4,46	5,06
30	2,04	2,54	2,86	3,28	3,18	5,98	6,08
40	1,42	1,88	2,1	2,52	2,32	4,34	4,96
50	1,18	1,42	1,52	2,04	1,92	3,44	3,88
60	1,02	0,86	1,18	1,54	1,46	2,88	3,04
70	0,52	0,56	1,02	1,16	1,06	2,2	2,42
80	0,22	0,48	0,78	0,96	0,82	1,64	1,58
90	0,02	0,2	0,58	0,72	0,48	0,68	1,04
100	-0,4	-0,18	0,2	0,32	0,22	0,16	0,32
110	-0,86	-0,84	-0,42	0,1	-0,36	-1,24	-0,26
120	-1,08	-1,08	-1,2	-0,52	-1,08	-1,96	-0,72
130	-1,18	-1,38	-1,6	-1,4	-1,7	-2,58	-1,1
140	-1,56	-0,88	-1,12	-0,8	-1,1	-1,26	-0,88
150	-0,98	-0,48	-0,4	-0,36	-0,16	-0,26	-0,22
160	-0,44	0,12	0,38	0,32	0,5	1,02	1,06
170	0,24	0,4	0,68	0,72	1,26	2,16	2,72
180	0,66	0,7	1	1,82	1,98	3,1	3,52

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 4 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m²)	ρ(kg/m³)	R (m)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2								
140	28,5	4	221,0	222,2	224,7	224,4	223,3	223,12	23,353	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,886	0,0000	0,0000	0,0000
140	28,5	4	196,0	202,4	207,1	201,1	201,8	201,68	21,109	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,801	0,0039	0,0244	0,0305
140	28,5	4	186,0	185,0	182,3	184,3	180,2	183,56	19,213	29	80	80	80	80	80	80	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,729	0,0048	0,0277	0,0380
140	28,5	4	154,5	156,9	157,7	159,7	162,4	158,24	16,562	34	110	110	110	110	110	110	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,628	0,0072	0,0355	0,0566
140	28,5	4	154,2	150,1	146,1	145,8	148,2	148,88	15,583	39	120	120	120	120	120	120	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,591	0,0076	0,0356	0,0603
140	28,5	4	126,5	127,2	125,4	129,8	132,6	128,3	13,429	42	130	130	140	130	140	134	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,509	0,0087	0,0349	0,0685
140	28,5	4	107,7	107,4	104,5	105,2	104,3	105,82	11,076	45	150	150	150	150	150	150	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,420	0,0099	0,0328	0,0782
140	28,5	4	88,5	85,3	82,3	79,6	77,3	82,6	8,645	48	160	160	160	160	160	160	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,328	0,0106	0,0273	0,0834
140	28,5	4	73,8	70,7	70,5	60,2	64,5	67,94	7,111	51	170	170	170	170	170	170	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,270	0,0112	0,0239	0,0886
140	28,5	4	34,5	38,9	42,4	38,1	38,7	38,52	4,032	54	190	190	190	190	190	190	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,153	0,0128	0,0155	0,1012
140	28,5	4	0,0	0,0	0	0	0	0	0,000	55	210	210	210	210	210	210	0,0096	0,0893	1,17	0,1517	0,000	0,0146	0,0000	0,1154

Tabel B. 2 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 5 m/s

Voltase	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	R (m)
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2								
155	28,5	5	332,3	331,4	331	331,8	327	330,7	34,613	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	1,0695	0	0	0	0,1517
155	28,5	5	316,7	313,7	312,8	311	312,2	313,28	32,79	19	50	50	50	50	50	50	0,0096	0,0893	1,17	1,0132	0,0029	0,0147	0,0148	0,1517
155	28,5	5	293,3	296,3	287,4	279	283,1	287,82	30,125	29	80	80	90	90	90	86	0,0096	0,0893	1,17	0,9309	0,0054	0,0248	0,0272	0,1517
155	28,5	5	268,9	268,1	260,8	258	256	262,36	27,46	39	120	120	130	130	130	126	0,0096	0,0893	1,17	0,8485	0,0082	0,0345	0,0415	0,1517
155	28,5	5	248,7	249,3	236,8	238,6	236,7	242,02	25,331	49	170	170	180	180	180	176	0,0096	0,0893	1,17	0,7827	0,012	0,0465	0,0605	0,1517
155	28,5	5	237	227,3	226,8	224,5	223,1	224,8	23,529	54	200	200	200	210	210	204	0,0096	0,0893	1,17	0,727	0,0142	0,051	0,0715	0,1517
155	28,5	5	211,7	199	207,5	197,1	212,4	205,67	21,526	59	230	240	230	240	230	234	0,0096	0,0893	1,17	0,6652	0,0165	0,0545	0,0834	0,1517
155	28,5	5	194,8	189,1	192,1	204,3	198,8	198,4	20,766	62	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,6417	0,0178	0,0564	0,0896	0,1517
155	28,5	5	188,3	194	186,9	183	185,7	185,2	19,384	65	270	270	270	270	270	270	0,0096	0,0893	1,17	0,599	0,0194	0,0574	0,0977	0,1517
155	28,5	5	135,8	144,4	143,5	146,3	136,7	142,17	14,88	69	330	320	330	320	330	326	0,0096	0,0893	1,17	0,4598	0,0243	0,0553	0,1225	0,1517
155	28,5	5	111,7	116,3	118,4	107,3	108	111,23	11,642	74	350	350	350	350	350	350	0,0096	0,0893	1,17	0,3598	0,0261	0,0465	0,1315	0,1517
155	28,5	5	0	0	0	0	0	0	0	79	400	400	400	400	400	400	0,0096	0,0893	1,17	0	0,0303	0	0,1529	0,1517

Tabel B. 3 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 6 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
165	28,5	6	411,6	420,5	411,3	415,7	416,9	415,2	43,4576	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	1,09875	0	0	0
165	28,5	6	395,7	397,9	399,5	400	398,8	398,38	41,6971	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	1,05424	0,00387	0,0143	0,01357
165	28,5	6	388,7	388,9	387,7	385,7	387,9	387,78	40,5876	29	90	90	90	90	90	90	0,0096	0,0893	1,17	1,02619	0,00576	0,02071	0,02018
165	28,5	6	350,2	351,9	352,2	353,2	351,1	351,72	36,8134	39	150	150	150	150	150	150	0,0096	0,0893	1,17	0,93076	0,01048	0,03418	0,03673
165	28,5	6	330,3	330,2	332,7	331,3	332,8	331,46	34,6928	49	180	180	180	180	180	180	0,0096	0,0893	1,17	0,87715	0,01237	0,03802	0,04335
165	28,5	6	298,9	297,2	298,8	300,2	301,1	299,24	31,3205	59	250	260	250	260	250	254	0,0096	0,0893	1,17	0,79189	0,01841	0,05109	0,06452
165	28,5	6	247,2	244	245,2	250,3	247,7	246,88	25,8401	69	350	350	350	350	350	350	0,0096	0,0893	1,17	0,65332	0,02653	0,06074	0,09298
165	28,5	6	235,7	227,7	229,9	230,7	223,3	229,46	24,0168	74	380	380	380	380	380	380	0,0096	0,0893	1,17	0,60723	0,02889	0,06148	0,10125
165	28,5	6	216,7	218,2	216,8	221,8	219,7	218,375	22,8566	79	400	400	410	410	410	406	0,0096	0,0893	1,17	0,57789	0,03088	0,06253	0,1082
165	28,5	6	201,3	200	199,9	206,7	204,9	202,56	21,2013	84	430	430	440	430	430	432	0,0096	0,0893	1,17	0,53604	0,03286	0,06172	0,11515
165	28,5	6	173,1	174,8	176	171,2	170,7	173,16	18,1241	89	450	450	450	450	450	450	0,0096	0,0893	1,17	0,45824	0,03409	0,05474	0,11945
165	28,5	6	155,8	144,4	143,3	148,2	151,9	148,72	15,566	94	480	480	480	480	480	480	0,0096	0,0893	1,17	0,39356	0,03645	0,05027	0,12772
165	28,5	6	127,3	129,8	124,4	130,5	129	128,2	13,4183	99	500	500	500	500	500	500	0,0096	0,0893	1,17	0,33926	0,03786	0,04501	0,13268
165	28,5	6	80	84,1	77,3	74,3	83,3	79,8	8,3524	104	530	530	530	530	530	530	0,0096	0,0893	1,17	0,21118	0,04022	0,02977	0,14096
165	28,5	6	60,4	61,9	66,4	75,5	72,1	67,26	7,03988	109	550	550	550	550	550	550	0,0096	0,0893	1,17	0,17799	0,04164	0,02597	0,14592
165	28,5	6	0	0	0	0	0	0	0	109	570	570	570	570	570	570	0,0096	0,0893	1,17	0	0,04353	0	0,15254

Tabel B. 4 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 7 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
170	28,5	7	435,3	437,4	437,2	438,0	438,6	437,30	45,771	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,992	0,0000	0,0000	0,0000
170	28,5	7	404,1	403,2	401,8	401,0	401,8	402,38	42,116	19	80	80	90	90	90	86	0,0096	0,0893	1,17	0,913	0,0063	0,0149	0,0163
170	28,5	7	381,1	381,3	384,4	385,5	383,1	383,08	40,096	39	150	150	150	150	150	150	0,0096	0,0893	1,17	0,869	0,0105	0,0234	0,0270
170	28,5	7	362,3	357,2	359,1	366,7	364,0	361,86	37,875	59	220	220	220	220	220	220	0,0096	0,0893	1,17	0,821	0,0152	0,0321	0,0391
170	28,5	7	342,7	336,8	343,4	345,4	340,3	341,72	35,767	69	280	280	280	280	280	280	0,0096	0,0893	1,17	0,775	0,0199	0,0398	0,0513
170	28,5	7	326,5	331,4	336,6	334,8	335,0	332,86	34,839	89	330	330	330	330	330	330	0,0096	0,0893	1,17	0,755	0,0228	0,0442	0,0586
170	28,5	7	323,3	327,9	324,8	323,0	320,2	323,84	33,895	94	350	350	350	350	350	350	0,0096	0,0893	1,17	0,735	0,0242	0,0457	0,0622
170	28,5	7	311,4	308,8	310,1	313,6	315,0	311,78	32,633	99	380	380	380	380	380	380	0,0096	0,0893	1,17	0,707	0,0265	0,0483	0,0683
170	28,5	7	304,6	305,7	305,6	304,0	305,5	305,08	31,932	104	400	400	400	400	400	400	0,0096	0,0893	1,17	0,692	0,0279	0,0498	0,0720
170	28,5	7	296,4	299,4	300,4	302,8	303,6	300,52	31,454	109	410	410	410	410	410	410	0,0096	0,0893	1,17	0,682	0,0284	0,0499	0,0732
170	28,5	7	276,1	273,0	274,4	278,8	275,1	275,48	28,834	119	440	440	440	450	450	444	0,0096	0,0893	1,17	0,625	0,0307	0,0494	0,0790
170	28,5	7	266,3	272,1	273,6	272,6	270,0	270,92	28,356	124	450	450	450	450	460	452	0,0096	0,0893	1,17	0,615	0,0310	0,0490	0,0797
170	28,5	7	262,4	264,6	267,3	266,6	265,5	265,28	27,766	129	460	460	460	470	470	464	0,0096	0,0893	1,17	0,602	0,0316	0,0490	0,0814
170	28,5	7	248,1	248,2	249,4	250,5	249,2	249,08	26,070	134	490	490	490	490	490	490	0,0096	0,0893	1,17	0,565	0,0336	0,0489	0,0865
170	28,5	7	231,3	233,3	232,5	232,8	230,0	231,98	24,281	139	510	510	510	510	510	510	0,0096	0,0893	1,17	0,526	0,0350	0,0475	0,0902
170	28,5	7	215,0	215,9	217,6	215,6	213,8	215,58	22,564	149	540	540	540	540	540	540	0,0096	0,0893	1,17	0,489	0,0369	0,0465	0,0951
170	28,5	7	195,9	194,9	196,4	199,8	199,1	197,22	20,642	159	570	570	570	570	570	570	0,0096	0,0893	1,17	0,447	0,0388	0,0447	0,0999
170	28,5	7	170,0	172,3	175,4	173,8	170,2	172,34	18,038	179	610	610	610	610	610	610	0,0096	0,0893	1,17	0,391	0,0407	0,0410	0,1048
170	28,5	7	87,2	83,2	85,6	82,0	84,3	84,46	8,840	189	700	700	700	700	700	700	0,0096	0,0893	1,17	0,192	0,0482	0,0238	0,1242
170	28,5	7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,000	194	800	750	750	750	750	760	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0534	0,0000	0,1376

Tabel B. 5 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 8 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
175	28,5	8	475,6	477,6	472,2	470,5	471,2	473,42	49,551	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,940	0,0000	0,0000	0,0000
175	28,5	8	457,1	453,9	455,8	456,8	453,6	455,44	47,669	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	0,904	0,0039	0,0069	0,0076
175	28,5	8	443,8	440,2	437,8	435,0	437,4	438,84	45,932	39	120	110	120	110	120	116	0,0096	0,0893	1,17	0,871	0,0073	0,0125	0,0143
175	28,5	8	383	381	382,2	384,5	389,7	384,08	40,200	59	250	250	250	250	250	250	0,0096	0,0893	1,17	0,762	0,0180	0,0271	0,0355
175	358,5	8	350,8	345	351,2	349,6	354	350,12	36,646	69	340	340	340	340	340	340	0,0096	0,0893	1,17	0,695	0,0256	0,0350	0,0504
175	28,5	8	312,4	314,8	314,7	313,5	317,8	314,64	32,932	94	450	450	450	450	450	450	0,0096	0,0893	1,17	0,624	0,0336	0,0414	0,0663
175	28,5	8	297,0	299,0	298,9	292,2	292,4	295,9	30,971	99	480	480	480	480	480	480	0,0096	0,0893	1,17	0,587	0,0360	0,0416	0,0709
175	28,5	8	273,5	275,5	270,5	273,3	272,9	273,14	28,589	104	520	520	520	520	520	520	0,0096	0,0893	1,17	0,542	0,0393	0,0420	0,0774
175	28,5	8	257,8	256,6	257,9	252,8	258,9	256,8	26,878	109	550	550	550	550	550	550	0,0096	0,0893	1,17	0,510	0,0416	0,0418	0,0821
175	28,5	8	233,7	238,2	231,4	235,2	232,4	234,18	24,511	114	600	600	600	600	600	600	0,0096	0,0893	1,17	0,465	0,0459	0,0420	0,0905
175	28,5	8	216,7	217,6	218,9	215,4	218,2	217,36	22,750	124	640	640	640	650	650	644	0,0096	0,0893	1,17	0,431	0,0491	0,0418	0,0968
175	28,5	8	193,8	196,1	201,1	198,8	199,2	197,8	20,703	134	700	700	700	700	700	700	0,0096	0,0893	1,17	0,393	0,0534	0,0414	0,1053
175	28,5	8	150,6	142,9	142,5	140,2	134,0	142,04	14,867	144	750	750	750	750	750	750	0,0096	0,0893	1,17	0,282	0,0572	0,0318	0,1128
175	28,5	8	91,4	105,6	100,3	80,0	92,7	94	9,839	154	800	800	800	800	800	800	0,0096	0,0893	1,17	0,187	0,0610	0,0224	0,1202
175	28,5	8	73,6	66,5	58,8	52,0	53,9	60,96	6,380	159	850	850	850	850	850	850	0,0096	0,0893	1,17	0,121	0,0652	0,0156	0,1286
175	28,5	8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	174	1000	1000	1000	1000	1000	1000	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0780	0,0000	0,1537

Tabel B. 6 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 9 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
195	28,5	9	518,0	514,9	521,1	520,7	520,9	519,12	54,335	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,916	0,0000	0,0000	0,0000
195	28,5	9	491,2	495,3	500,3	500,9	498,0	497,14	52,034	19	60	60	60	60	60	60	0,0096	0,0893	1,17	0,877	0,0039	0,0053	0,0060
195	28,5	9	446	451,2	444,9	445,5	450,9	447,7	46,859	59	210	210	210	210	210	210	0,0096	0,0893	1,17	0,790	0,0143	0,0175	0,0222
195	28,5	9	429,6	428,0	422,3	425,9	431,6	427,48	44,743	79	300	300	300	300	300	300	0,0096	0,0893	1,17	0,754	0,0209	0,0245	0,0325
195	28,5	9	416,8	417,0	420,2	416,6	414,1	416,94	43,640	89	340	340	340	340	340	340	0,0096	0,0893	1,17	0,736	0,0237	0,0272	0,0369
195	28,5	9	394,6	398,9	394,2	395,6	396,0	395,86	41,433	99	430	430	430	430	430	430	0,0096	0,0893	1,17	0,698	0,0313	0,0340	0,0487
195	28,5	9	330,3	329,8	331,2	334,0	334,9	332,04	34,754	114	540	540	540	540	540	540	0,0096	0,0893	1,17	0,586	0,0402	0,0367	0,0626
195	28,5	9	327,6	329,8	324,9	327,9	328,9	327,82	34,312	119	550	550	550	550	550	550	0,0096	0,0893	1,17	0,578	0,0407	0,0367	0,0634
195	28,5	9	317,9	321,0	320,2	321,5	320,5	320,22	33,516	124	570	570	570	570	570	570	0,0096	0,0893	1,17	0,565	0,0421	0,0371	0,0656
195	28,5	9	312,7	308,9	306,5	303,4	308,3	307,96	32,233	129	590	590	590	590	590	590	0,0096	0,0893	1,17	0,543	0,0435	0,0368	0,0678
195	28,5	9	297,5	296,6	301,6	297,0	294,5	297,44	31,132	134	610	610	610	610	610	610	0,0096	0,0893	1,17	0,525	0,0449	0,0367	0,0700
195	28,5	9	282,1	281,7	281,9	271,1	276,8	278,72	29,173	144	640	640	640	640	640	640	0,0096	0,0893	1,17	0,492	0,0468	0,0359	0,0729
195	28,5	9	212,3	217,9	218,9	214,2	218,7	216,4	22,650	164	730	730	730	730	730	730	0,0096	0,0893	1,17	0,382	0,0534	0,0318	0,0832
195	28,5	9	185,4	178,9	18,5	184,3	186,3	150,68	15,771	174	780	780	780	780	780	780	0,0096	0,0893	1,17	0,266	0,0572	0,0237	0,0891
195	28,5	9	131,7	134,3	129,1	138,0	136,1	133,84	14,009	184	820	820	820	820	820	820	0,0096	0,0893	1,17	0,236	0,0601	0,0221	0,0935
195	28,5	9	106,5	111,9	114,3	113,0	116,7	112,48	11,773	194	870	870	870	870	870	870	0,0096	0,0893	1,17	0,198	0,0638	0,0197	0,0994
195	28,5	9	82,1	84,2	77,1	77,6	83,5	80,9	8,468	214	960	960	960	960	960	960	0,0096	0,0893	1,17	0,143	0,0704	0,0157	0,1097
195	28,5	9	58,8	56,5	57,0	48,9	55,0	55,24	5,782	224	1050	1050	1050	1050	1050	1050	0,0096	0,0893	1,17	0,097	0,0780	0,0118	0,1215
195	28,5	9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	234	1100	1080	1080	1080	1080	1084	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,0803	0,0000	0,1250

Tabel B. 7 Data putaran, Coefficient of Power dan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Kecepatan Angin 10 m/s

Voltase	T (°C)	V (m/s)	n (rpm)						ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)						r (m)	A (m^2)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
			1	2	3	4	5	Rata2			1	2	3	4	5	Rata2							
220	28,5	10	588,0	586,4	587,5	582,1	581,3	585,06	61,236	0	0	0	0	0	0	0	0,0096	0,0893	1,17	0,929	0,0000	0,0000	0,0000
220	28,5	10	570,0	555,0	554,1	551,0	552,1	556,44	58,241	19	70	70	70	70	70	70	0,0096	0,0893	1,17	0,884	0,0048	0,0054	0,0061
220	28,5	10	515,6	512,7	513,9	515,7	513,2	514,22	53,822	69	230	230	230	230	230	230	0,0096	0,0893	1,17	0,816	0,0152	0,0157	0,0192
220	28,5	10	488,8	489,7	489,6	489,3	489,5	489,38	51,222	119	380	380	380	380	380	380	0,0096	0,0893	1,17	0,777	0,0246	0,0242	0,0311
220	358,5	10	456	455,1	454,2	455,8	456,8	455,58	47,684	169	500	500	500	500	500	500	0,0096	0,0893	1,17	0,723	0,0313	0,0285	0,0394
220	28,5	10	445,0	446,6	445,9	444,8	442,1	444,88	46,564	219	590	590	590	590	590	590	0,0096	0,0893	1,17	0,706	0,0350	0,0312	0,0442
220	28,5	10	422,0	424,4	423,8	421,2	421,7	422,62	44,234	269	710	710	710	710	710	710	0,0096	0,0893	1,17	0,671	0,0416	0,0352	0,0525
220	28,5	10	410,0	417,9	415,7	415,9	411,3	414,16	43,349	319	800	800	800	800	800	800	0,0096	0,0893	1,17	0,658	0,0454	0,0377	0,0573
220	28,5	10	391,5	390,5	393,3	394,0	395,0	392,86	41,119	369	890	890	890	890	890	890	0,0096	0,0893	1,17	0,624	0,0492	0,0387	0,0621
220	28,5	10	367,7	366,4	365,1	367,1	361,2	365,5	38,256	409	950	950	950	950	950	950	0,0096	0,0893	1,17	0,580	0,0511	0,0374	0,0644
220	28,5	10	338,1	337,9	338,9	334,6	339,9	337,88	35,365	459	1010	1010	1010	1010	1010	1010	0,0096	0,0893	1,17	0,536	0,0520	0,0352	0,0656
220	28,5	10	310,0	312,6	311,4	309,1	311,1	310,84	32,535	509	1100	1100	1100	1100	1100	1100	0,0096	0,0893	1,17	0,494	0,0558	0,0347	0,0704
220	28,5	10	271,1	272,3	274,9	279,8	277,5	275,12	28,796	559	1220	1220	1220	1220	1220	1220	0,0096	0,0893	1,17	0,437	0,0624	0,0344	0,0787
220	28,5	10	267,0	266,0	265,6	268,9	266,6	266,82	27,927	609	1270	1270	1270	1270	1270	1270	0,0096	0,0893	1,17	0,424	0,0624	0,0334	0,0787
220	28,5	10	230,0	241,7	234,1	240,0	236,6	236,48	24,752	709	1400	1400	1400	1400	1400	1400	0,0096	0,0893	1,17	0,375	0,0652	0,0309	0,0823
220	28,5	10	183,0	187,0	188,4	185,8	173,6	183,56	19,213	809	1600	1600	1600	1600	1600	1600	0,0096	0,0893	1,17	0,291	0,0747	0,0275	0,0942
220	28,5	10	111,0	112,4	113,7	109,3	104,7	110,22	11,536	859	1680	1680	1680	1680	1680	1800	0,0096	0,0893	1,17	0,175	0,0889	0,0196	0,1121
220	28,5	10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,000	909	2000	2000	2000	2000	2000	2000	0,0096	0,0893	1,17	0,000	0,1030	0,0000	0,1300

Tabel B. 8 Data torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 4 – 10 m/s

Sudut	Dengan Penghalang (N.cm)						
	4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s	10 m/s
0	1,24	1,12	1,42	2,18	3,06	4,9	5,76
10	1,9	1,74	2,48	3,12	3,68	5,4	6,76
20	2,36	2,44	3,06	4,46	4,44	6,14	7,48
30	2,9	2,82	3,28	4,82	4,96	6,98	8,22
40	2,06	2,04	3,02	4,14	4,06	6,02	7,2
50	1,66	1,54	2,38	3,64	3,18	4,94	6,4
60	1,44	1,18	1,92	2,98	2,56	4,18	5,32
70	1,12	0,72	1,4	2,08	1,82	3,52	4,16
80	1,06	0,52	0,96	1,78	1,42	3,06	3,08
90	0,9	0,36	0,84	1,46	1,04	2,14	2,02
100	0,7	0,22	0,6	1,08	0,6	1,62	1,14
110	0,42	-0,16	0,18	0,56	0,36	0,7	0,44
120	0,28	-0,48	-0,82	-0,34	-0,56	-0,16	0,1
130	-0,32	-0,8	-1,26	-0,82	-1,18	-1,14	-0,34
140	0,22	-0,4	-0,76	-0,32	-0,58	-0,16	0,14
150	0,72	-0,18	0,12	0,38	0,26	1,12	0,76
160	0,92	-0,02	0,66	0,84	1,02	2,24	1,88
170	1,02	0,54	1,16	1,86	2,24	3,32	3,58
180	1,24	1,12	1,42	2,18	3,06	4,9	5,76

BIODATA PENULIS

Ahmad Rifqi Romadhani merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis lahir di Pamekasan, Jawa Timur, pada tanggal 31 Desember 1997, memulai pendidikan dari jenjang Sekolah Dasar di SD Negeri 2 Branta Pesisir Gresik kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 2 Pamekasan dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Pamekasan. 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 Divisi Human Resource Development LBMM ITS pada periode 2017-2018 dan Kabiro Otomotif Divisi Human Resource Development LBMM ITS pada periode 2018-2019. Penulis juga aktif dalam kegiatan kepanitiaan yaitu sebagai Koordinator Wilayah Madura dalam sebuah kegiatan Mechanic's Skill Competition pada tahun 2018, sebagai mekanik service dalam sebuah kegiatan Engine Tune Up pada tahun 2019, dan sebagai pemateri dalam sebuah kegiatan Kursus Dasar Dasar Otomotif pada tahun 2019. Pada tahun ketiga, penulis berkesempatan untuk melakukan kerja praktek di PT. Dirgantara Indonesia di Bandung pada bagian Divisi Enviromental selama satu bulan. Penulis dapat dihubungi melalui email rifqirifqa91@gmail.com.