



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR SEBAGAI
PENGANGGU ALIRAN DIDEPAN *RETURNING BLADE* TURBIN ANGIN
SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN**

“Studi kasus untuk ukuran silinder pengganggu $d/D = 0.5$; $y/D = 0.5$; $S/D = 1.6$ serta kecepatan aliran angin 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s dan 9 m/s”

FESTY MERBASARI MAHARDINA
NRP 0211164000031

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

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



TUGAS AKHIR – TM184835

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER
SIRKULAR SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN
DIDEPAN *RETURNING BLADE* TURBIN ANGIN
SAVONIUS TERHADAP PERFORMA TURBIN**

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

Festy Merbasari Mahardina
0211164000031

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

**PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA
SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA2020**



FINAL PROJECT – TM184835

**THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDERS AS FLOW
DISRUPTORS IN FRONT OF RETURNING BLADES OF
SAVONIUS WIND TURBINE ON ITS PERFORMANCE:
AN EXPERIMENTAL STUDY**

“A study case with Circular Cylinder Sizes of $d/D = 0.5$, $y/D = 0.5$, and $S/D = 1.6$, and Wind Speeds Variations of = 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, and 9 m/s.”

Festy Merbasari Mahardina
0211164000031

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

**BACHELOR’S DEGREE
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND
SYSTEM ENGINEERING
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA2020**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR
SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN DIDEPAN
RETURNING BLADE TURBIN ANGIN SAVONIUS
TERHADAP PERFORMA TURBIN**

“Studi kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0.5$; $y/D = 0,5$
; $S/D = 1.6$; Kecepatan Angin = 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s,
8 m/s, dan 9 m/s.”

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

Festy Merbasari Mahardina

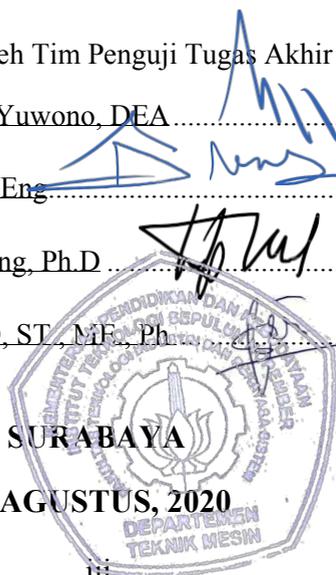
NRP. 0211164000031

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Prof. Dr. Ir Tri Yogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196001291987011001
2. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng (Penguji 1)
NIP. 196709151995121001
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D (Penguji 2)
NIP. 196412281990081002
4. Vivien Suphandani D, ST., MF., Ph (Penguji 3)
NIP. 198105292003122001

SURABAYA

AGUSTUS, 2020



STUDI EKSPERIMEN PENGARUH SILINDER SIRKULAR SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN DIDEPAN *RETURNING* *BLADE* TURBIN ANGIN *SAVONIUS* TERHADAP PERFORMA TURBIN

“Studi kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0.5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 1.6$; Kecepatan Angin = 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s.”

Nama : Festy Merbasari Mahardina
NRP : 0211164000031
Departemen : Teknik Mesin ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

Abstrak

Indonesia dan seluruh negara dibelahan dunia tengah diacam oleh semakin menipisnya energi fosil. Sebagai antisipasi terhadap kondisi tersebut, Pemerintah berkomitmen untuk membangun misi *Indonesia Clean Energy*. Salah satu Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang cocok diterapkan di Indonesia adalah Energi Angin. Turbin angin yang cocok digunakan dengan kondisi angin di Indonesia adalah Turbin Angin *Savonius*. Kekurangan dari Turbin Angin *Savonius* adalah efisiensinya yang rendah sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut dengan tujuan untuk meningkatkan performa Turbin Angin *Savonius* tersebut. Studi eksperimen dengan pemberian silinder penghalang didepan *returning blade* Turbin Angin *Savonius* perlu untuk dilakukan dan diduga dapat meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Studi eksperimen ini bertujuan untuk mengukur torsi statis dan torsi dinamis turbin angin *Savonius*, menghitung *Coefficient of Power* serta menghitung *Coefficient of Moment*.

Studi eksperimen yang dilakukan menggunakan Turbin Angin *Savonius* dengan dua sudu yaitu *Returning Blade* dan *Advancing Blade* dengan dimensi yaitu diameter sudu turbin (D) sebesar 167

mm, tinggi turbin (H) sebesar 298 mm, lebar turbin (L) sebesar 309 mm, diameter *endplate* (D_0) sebesar 320 mm dan diameter poros turbin (e) sebesar 19 mm. Pada penelitian ini silinder sirkular yang digunakan sebagai pengganggu aliran memiliki dimensi yaitu diameter silinder (d) sebesar 83 mm, dengan tinggi (h) sebesar 500 mm. Dalam penelitian ini sumber angin yang digunakan berasal dari *Axial Fan* dimana untuk dapat menghasilkan kecepatan angin yang *uniform* maka *Honeycomb* diletakkan didepan *Axial Fan* dan untuk dapat menghasilkan kecepatan angin yang diinginkan maka *Axial Fan* dihubungkan dengan *Voltage Regulator*. Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin *Savonius* (d/D) sebesar 0,5 dan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan pusat turbin angin *Savonius* terhadap diameter sudu turbin angin *Savonius* (S/D) sebesar 1,6 dan 1,7 dengan variasi kecepatan angin sebesar 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s. Pada penelitian ini, putaran turbin angin *Savonius* diukur dengan menggunakan *Tachometer* dan kecepatan angin diukur dengan menggunakan *Anemometer*. Untuk memperoleh nilai torsi dinamis alat ukur yang digunakan yaitu *Brake Dynamometer* dan untuk memperoleh nilai torsi statis alat ukur yang digunakan yaitu Torsi Meter.

Hasil yang dicapai pada penelitian ini yaitu pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin *Savonius* dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* pada semua variasi kecepatan. *Coefficient of Power* yang paling tertinggi terletak pada kecepatan angin 5 m/s dengan nilai CoP maksimum sebesar 0,1225 atau sebesar 12,25% dengan kenaikan CoP sebesar 85,3% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin *Savonius* dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ juga efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* pada semua variasi kecepatan. Nilai *coefficient of moment* tertinggi terletak pada kecepatan 5 m/s dengan nilai C_M maksimum sebesar 0,2358 atau sebesar 23,58%. Selain itu,

pemberian silinder pengganggu didepan returning blade turbin angin *Savonius* dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ pada semua variasi kecepatan efektif dalam meningkatkan kemampuan self-starting turbin angin *Savonius* pada semua posisi sudut *blade*.

Kata Kunci: *Coeffocoent of Moment, Coefficient of Power, Gaya Drag, Silinder Sirkular, Torsi Dinamis, Torsi Statis.*

THE EFFECT OF CIRCULAR CYLINDERS AS FLOW DISRUPTORS IN FRONT OF RETURNING BLADES OF SAVONIUS WIND TURBINE ON ITS PERFORMANCE: AN EXPERIMENTAL STUDY

“A study case with Circular Cylinder Sizes of $d/D = 0.5$, $y/D = 0.5$, and $S/D = 1.6$, and Wind Speeds Variations of $= 3.8$ m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, and 9 m/s.”

Name : Festy Merbasari Mahardina
NRP : 0211164000031
Department : Mechanical Engineering, ITS
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

Abstract

Fossil energy depletion is a common threat to the entire countries in the world. Indonesian Government, for anticipation, has been committed to the mission of “Indonesian Clean Energy” where Wind Energy, among other New and Renewable Energies (NRE), is conveniently applicable for its climate. In this scheme, the Savonius Wind Turbine can be supportive, given the low speed of Indonesian wind type. However, the low efficiency of Savonius type has prompted this experimental study to seek for improvement. A circular cylinder placed in front of the returning blades of Savonius Wind Turbine is expected to increase its performance. The analysis includes measurements of the turbine static and dynamic torques and estimations of Coefficient of Power (CoP) and Coefficient of Moment (C_M).

The experiment employs a two-bladed Savonius Wind Turbine. The Returning and the Advancing Blades were 167 mm in diameter (D), 298 mm in height (H), 309 mm in length (L), and were equipped with endplates of 320 mm in diameter (D_0) and an axis of 19 mm in diameter (e). In addition, the circular cylinder had a diameter (d) of 83 mm, and height (h) of 500 mm. A

honeycomb screen was installed in front of an axial fan wind source to achieve uniformed wind speeds, and the fan was equipped with a voltage regulator to arrange for the desired speeds. The d/D ratio (disruptor cylinder diameter (d) relative to Savonius wind turbine diameter (D)) was set at 0.5, and the ratio of the centre-to-centre distance between the circular cylinder and the Savonius wind turbine (S) relative to the turbine blade diameter (D) (or the S/D ratios) were 1.6. The wind velocities used were varied into 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, and 9 m/s. In the experiment, the torques of the Savonius wind turbine were measured using a tachometer and the wind speed using an anemometer. A Brake Dynamometer and a Torque Meter were used in order to measure values of static torque and dynamic torque, respectively.

The results experiment show that the placing the circular cylinder in front of the Returning Blade of Savonius Wind Turbine with the S/D ratio of 1.6 and the d/D ratio of 0.5 is effective to improve the CoP in all speed variations, where the highest value being 0.1225 or 12.25% derived at 5 m/s wind speed. It is an 85.3% rise when compared to the CoP value without using a circular cylinder. The same ratios were similarly effective for C_M results at any speed variation, with the highest result of 0.2358 or 23.58% derived at the speed of 5 m/s. Suitably, installing the circular cylinder in such position and ratios was capable of increasing self-starting capability of the Savonius Wind Turbine for any speed variation and at any angular position of the blades.

Keyword: Circular Cylinder, Coefficient of Power, Coefficient of Moment, Drag Force, Dynamic Torque, Static Torque

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat dan hidayahnya sehingga Tugas Akhir yang berjudul **Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Didepan Returning Blade Turbin Angin Savonius Terhadap Performa Turbin** “Studi Kasus untuk Ukuran Silinder Pengganggu $d/D = 0.5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 1.6$; Kecepatan Angin = 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s” dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam penulis panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Penulis sangat menyadari bahwa penyelesaian dan penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Adek Farida, Mas Huda Maulana serta keluarga besar penulis yang tiada hentinya memberikan doa, semangat, dukungan serta kasih sayang setiap harinya.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan ilmu, tenaga, waktu, perhatian, bimbingan serta arahan yang diberikan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng., Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., serta Ibu Vivien Suphandani D., S.T., M.E., Ph.D., Dr. Wawan Aries W., S.T., M.T., selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, saran serta masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan di Departemen Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak bantuan selama penulis menjalankan studi di ITS baik dalam bidang akademik maupun non akademik.

5. Tri Indah, Oni, Fanny sebagai sahabat dan teman baik penulis yang selalu menghibur, memberikan dukungan dan semangat yang tiada henti untuk penulis.
6. Elza dan Afiyah sebagai sahabat dan teman baik yang selalu memberikan semangat, doa dan dukungan serta menjadi teman belajar yang baik
7. Tim Savonius kelompok 7; Bagas, Afiyah, Elza, Vega, Taty, Dion dan Michael yang bekerja sama menyelesaikan penelitian, menjadi teman belajar dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh teman-teman angkatan penulis, M59 yang telah memberikan banyak cerita dan pengalaman selama 4 tahun perkuliahan.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan perkuliahan yang tidak dapat ditulis dan disebutkan satu per-satu.

Penulis sangat menyadari masih terdapat banyak kesalahan dan kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan saran serta masukan dari berbagai pihak. Penulis berharap penulisan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	IV
ABSTRACT	VII
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	8
1.3 BATASAN MASALAH.....	11
1.4 TUJUAN PENELITIAN.....	11
1.5 MANFAAT PENELITIAN	12
BAB II.....	13
TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 TURBIN ANGIN.....	13
2.2 TURBIN ANGIN SAVONIUS	17
2.3 GAYA <i>DRAG</i>	19
2.4 <i>DRAG COEFFICIENT</i>	21
2.6 BILANGAN <i>REYNOLDS</i>	25
2.7 DAYA TEORITIS.....	26
2.8 TORSI STATIS	27
2.9 TORSI DINAMIS	28
2.10 DAYA TURBIN AKTUAL (<i>MECHANICAL POWER</i>)	29
2.11 <i>COEFFICIENT OF POWER</i>	29
2.12 TIP SPEED RATIO DAN COEFFICIENT OF MOMENT.....	30
2.13 PENELITIAN TERDAHULU.....	31
2.13.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu.....	31
2.13.2 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Angin <i>Savonius dengan Variasi Geometri</i>	35
.....	40
2.13.3 Penelitian Turbin Angin Savonius dengan <i>Pengganggu Plat Datar</i>	41

.....	46
2.13.4 PENELITIAN TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU	46
.....	48
.....	50
2.13.5 PENELITIAN PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PEMBERIAN PENGGANGGU DIDEPAN RETURNING BLADE DENGAN METODE SIMULASI	53
.....	55
.....	55
2.13.6 PENELITIAN PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN METODE SIMULASI	58
BAB III.....	67
METODOLOGI PENELITIAN	67
3.1 PARAMETER YANG DIUKUR.....	67
3.2 ANALISA DIMENSI	68
3.2.1 <i>Analisa Dimensi untuk Coefficient of Power</i>	68
3.2.2 <i>Analisa Dinensi untuk Coefficient of Moment</i>	71
3.3 PERALATAN.....	75
3.3.1 <i>Axial Fan</i>	75
.....	75
3.3.2 <i>Benda Uji</i>	76
.....	76
.....	77
3.3.3 <i>Penyangga Turbin Angin Savonius</i>	78
3.3.4 <i>Honeycomb</i>	79
3.3.5 <i>Alat Ukur</i>	80
.....	82

3.4 LANGKAH PENGUKURAN	87
3.4.1 <i>Prosedur Penelitian Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis</i>	87
3.4.2 <i>Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis</i>	88
3.4.3 <i>Flowchart Penelitian</i>	91
3.5 PERHITUNGAN <i>UNCERTAINTY</i>	95
3.6 PENGUJIAN UNIFORMITY KECEPATAN.....	99
BAB IV	103
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	103
4.1 PERHITUNGAN DATA	103
4.1.1 PERHITUNGAN MASSA JENIS UDARA (ρ)	103
4.1.2 PERHITUNGAN VISKOSITAS UDARA (μ)	104
4.1.3 PERHITUNGAN <i>REYNOLDS NUMBER</i>	105
4.1.4 PERHITUNGAN <i>TIP SPEED RATIO</i> (λ)	106
4.1.5 PERHITUNGAN <i>COEFFICIENT OF POWER (COP)</i>	106
4.1.6 PERHITUNGAN <i>COEFFICIENT OF MOMENT (C_M)</i>	108
4.2 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGGANGGU.....	110
4.2.1 ANALISA GRAFIK NILAI <i>COEFFICIENT OF POWER (COP₀)</i> TERHADAP <i>TIP SPEED RATIO</i> (λ) TURBIN ANGIN <i>SAVONIUS</i> TANPA SILINDER PENGGANGGU.....	111
4.2.2 ANALISA GRAFIK <i>COEFFICIENT OF MOMENT (C_{M0})</i> TERHADAP <i>TIP SPEED RATIO</i> (λ) TURBIN ANGIN <i>SAVONIUS</i> TANPA SILINDER PENGGANGGU.....	113
4.2.3 ANALISA GRAFIK STATIC TORQUE COEFFICIENT (<i>C_{Ts}</i>) TERHADAP POSISI SUDUT <i>BLADE</i> (θ) TURBIN ANGIN <i>SAVONIUS</i> TANPA SILINDER PENGGANGGU.....	115
4.3 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU.....	118

4.3.1 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGAGGU DAN DENGAN SILINDER PENGAGGU PADA KECEPATAN 3,8 M/S	119
4.3.1.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 3,8 m/s	119
4.3.1.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 3,8 m/s..	122
4.3.1.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 3,8 m/s	125
4.3.2 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGAGGU PADA KECEPATAN 4,4 M/S	127
4.3.2.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 4,4 m/s	127
4.3.2.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 4,4 m/s..	131
4.3.2.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 4,4 m/s	134
4.3.3 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGAGGU PADA KECEPATAN 5 M/S	137
4.3.3.1 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 5 m/s.....	137
4.3.3.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 5 m/s.....	140
4.3.3.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 5 m/s	143
4.3.4 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGAGGU PADA KECEPATAN 6 M/S	146
4.3.4.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 6 m/s	146
4.3.4.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 6 m/s.....	149

4.3.4.3 ANALISA GRAFIK STATIC TORQUE COEFFICIENT (C_{Ts}) TERHADAP FUNGSI POSISI SUDUT BLADE (θ) PADA KECEPATAN 6 M/S.....	152
4.3.5 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU PADA KECEPATAN 7 M/S	155
4.3.5.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Penggangu pada Kecepatan 7 m/s.....	155
4.3.5.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 7 m/s.....	158
4.3.5.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 7 m/s	161
4.3.6 ANALISA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU PADA KECEPATAN 8 M/S	164
4.3.6.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 8 m/s.....	164
4.3.6.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 8 m/s.....	167
4.3.6.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 8 m/s	170
4.3.7 ANALISA GRAFIK TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU PADA KECEPATAN 9 M/S	173
4.3.7.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada Kecepatan 9 m/s.....	173
4.3.7.2 Analisa Grafik Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 9 m/s.....	176
4.3.7.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 9 m/s	179
4.3.8 ANALISA GRAFIK CoP MAX TERHADAP KECEPATAN ANGIN TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN DAN TANPA SILINDER PENGGANGGU PADA VARIASI KECEPATAN ANGIN	182

4.3.9 TABEL PERBANDINGAN HASIL PENELITIAN TURBIN ANGIN SAVONIUS TANPA SILINDER PENGGANGGU DAN DENGAN SILINDER PENGGANGGU PADA VARIASI KECEPATAN	185
4.4 ANALISA PERBANDINGAN GRAFIK COP MAX/COP ₀ MAX TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU DENGAN PENELITIAN M. RIZKY RAMADHAN PADA TAHUN 2019	186
4.5 ANALISA GRAFIK COP _{MAX} / COP _{0MAX} TERHADAP FUNGSI S/D TURBIN ANGIN SAVONIUS UNTUK TUJUH VARIASI REYNOLDS NUMBER.....	189
BAB V.....	195
KESIMPULAN DAN SARAN.....	195
5.1 KESIMPULAN.....	195
5.2 SARAN.....	196
DAFTAR PUSTAKA	131
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....	201

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) (Mc Harg Jan, 2019)	15
Gambar 2. 2 Rotor dari Vertical Axis Wind Turbine (Hau, Erich 2006).....	16
Gambar 2. 3 Rotor Turbin Angin Savonius (Akwa et al, 2012).....	18
Gambar 2. 4 Penguraian gaya-gaya Aerodinamika yang bekerja pada suatu airfoil (Anderson, 2011)	20
Gambar 2. 5 Aliran Viscous dan aliran Inviscid pada bola pejal (Fox, Robert W dan Mc. Donald, Alan T, 2011)	23
Gambar 2. 6 Pengaruh Reynold Number terhadap Titik Separasi (Incropera et al, 2011).....	24
Gambar 2. 7 Skema Turbin Angin Savonius Tampak Atas	26
Gambar 2. 8 Mekanisme Brake Dynamometer dalam pengukuran Torsi Dinamis	28
Gambar 2. 9 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002)	32
Gambar 2. 10 Grafik Distribusi Pressure Coefficient (Cp) pada silinder sirkular (a) Pengaruh variasi bilangan Reynolds (b) Pengaruh variasi d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	34
Gambar 2. 11 (a) Strouhal Number (b) Pressure Drag Coefficient (CD) (Tsutsui & Igarashi, 2002)	34
Gambar 2. 12 Skematika single-stage rotor turbin angin Savonius (a) elevation view; (b) plan view (Mahmoud et al, 2010).....	35
Gambar 2. 13 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power (CoP) terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga dan Empat Sudu (Mahmoud et al, 2010).....	36

Gambar 2. 14 Grafik Hubungan antara Specific Power dan Static Torque Coefficient terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius untuk Single Stage dan Double Stages (Mahmoud et al, 2010).....	37
Gambar 2. 15 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio (Mahmoud et al, 2010)	38
Gambar 2. 16Grafik Hubungan antara Mechanical Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio (Mahmoud et al, 2010)	39
Gambar 2. 17 Grafik Hubungan Mechanical Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan ada atau tidak adanya End Plate (Mahmoud et al, 2010).....	40
Gambar 2. 18 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Plat Datar Penganggu (Altan et al, 2008)	42
Gambar 2. 19 Gemoteri Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008).....	43
Gambar 2. 20 Pengaruh panjang Curtain terhadap Power Coefficient pada Rotor Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008).....	44
Gambar 2. 21 Pengaruh Rotational Speed (n) terhadap Besar Sudut Plat atau Curtain Angle (α dan β) pada Curtain 1(Altan et al, 2008).....	45
Gambar 2. 22 Pengaruh Panjang Plat Pengganggu Terhadap CoP dengan Variasi Tip Speed Ratio $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15$ (Altan et al, 2008).....	46
Gambar 2. 23 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius (Ramadhan, M Rizky 2019)	47
Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoPo) terhadap Fungsi Tip	

Speed Ratio (λ) dengan $S/D = 1,6$ dan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; \dots$	48
Gambar 2. 25 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CM) dan tanpa silinder pengganggu (CM0) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$; dan $1,0$ pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$	50
Gambar 2. 26 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (T_s) dan tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) terhadap Fungsi Sudut (θ) dengan $d/D = 0,5; S/D = 1,6$; pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$ (Ramadhan, M.Rizky 2019)	52
Gambar 2. 27 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius (Pradhito, Arnoldus A 2017)	54
Gambar 2. 28 a) Distribusi Tekanan Pada Sudu Turbin Angin Savonius Tanpa Diberikan Silinder Pengganggu (b) Menunjukkan Distribusi Tekanan Pada Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak Optimal $S/D 1,7$ (Pradhito, Arnoldus A 2017)	55
Gambar 2. 29 a) Distribusi Tekanan Pada Sudu Turbin Angin Savonius Tanpa Diberikan Silinder Pengganggu (b) Menunjukkan Distribusi Tekanan Pada Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak Optimal $S/D 1,7$ (Pradhito, Arnoldus A 2017)	57
Gambar 2. 30 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius (Sakti, 2018)	58
Gambar 2. 31 Grafik (a) Perbandingan Power Coefficient dan grafik (b) Coefficient of Moment dengan dan tanpa menggunakan pengganggu pada Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ (Sakti, 2018)	60

Gambar 2. 32 Perbandingan distribusi tekanan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ (a) & (b) pada sudut 30° , dan (c) dan (d) pada sudut 90° (Sakti, 2018).....	62
Gambar 2. 33 (a) dan (b) Perbandingan distribusi tekanan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada 150° (Sakti, 2018)	63
Gambar 2. 34 Perbandingan distribusi kecepatan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder pengganggu tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada sudut (a) dan (b) 30° , (c) dan (d) 90° (Sakti, 2018).....	87
Gambar 2. 35 Perbandingan distribusi kecepatan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder pengganggu tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada sudut 150° (Sakti, 2018).....	88
Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius.....	67
Gambar 3. 2 Axial Fan	75
Gambar 3. 3 Skema Turbin Angin Savonius.....	76
Gambar 3. 4 Skema Silinder Pengganggu.....	77
Gambar 3. 5 Instalasi Peralatan Penelitian	78
Gambar 3. 6 Skema Honeycomb.....	79
Gambar 3. 7 Tachometer OMEGA seri HHT12	81
Gambar 3. 8 Digital Anemometer tipe Omega HHF141 ...	82
Gambar 3. 9 Skematika Brake Dynamometer.....	83
Gambar 3. 10 Torque Meter LUTRON Model TQ-8800...	84
Gambar 3. 11 Voltage Regulator.....	85
Gambar 3. 12 Neraca Pegas	86

Gambar 3. 13 Posisi Pengambilan Data Uji Uniformity	99
Gambar 3. 14 Hasil Uniformity Test Pada Posisi Horizontal	100
Gambar 3. 15 Hasil Uniformity Test Pada Posisi Vertical	100
Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	111
Gambar 4. 2 Grafik Coefficient of Moment (CM0) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	113
Gambar 4. 3 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade (θ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	115
Gambar 4. 4 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 3,8 m/s	119
Gambar 4. 5 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 3,8 m/s	122
Gambar 4. 6 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 3,8 m/s	125
Gambar 4. 7 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 4,4 m/s.	127

Gambar 4. 8 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 4,4 m/s	131
Gambar 4. 9 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 4,4 m/s....	134
Gambar 4. 10 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 5 m/s	137
Gambar 4. 11 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 5 m/s	140
Gambar 4. 12 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 5 m/s	143
Gambar 4. 13 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 6 m/s	146
Gambar 4. 14 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 6 m/s	149
Gambar 4. 15 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 6 m/s	152
Gambar 4. 16 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder	

Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 7 m/s	155
Gambar 4. 17 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 7 m/s	158
Gambar 4. 18 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 7 m/s	161
Gambar 4. 19 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 8 m/s	164
Gambar 4. 20 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 8 m/s	167
Gambar 4. 21 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 8 m/s	170
Gambar 4. 22 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 9 m/s	173
Gambar 4. 23 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 9 m/s	176
Gambar 4. 24 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 9 m/s	179

Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Maksimal (CoP_{max}) Terhadap Kecepatan Angin Pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu	182
Gambar 4. 26 Grafik CoP_{max}/CoP_{0max} Terhadap Fungsi S/D Turbin Angin Savonius pada Tujuh Variasi Kecepatan Angin.....	190

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Drag Coefficient untuk berbagai geometri benda dengan $Re \geq 1000$ (Fox, Robert W dan Mc. Donald, Alan T)	22
Tabel 2. 2 Variasi Panjang Plat Pengganggu (11) dan Plat Pengarah (12) (Altan et al, 2008)	42
Tabel 2. 3 Hasil Power Coefficient pada curtain 1,2, dan 3 (Sumber: Altan et al, 2008)	44
Tabel 3. 1 Dimensi Primer Parameter CoP	69
Tabel 3. 2 Dimensi Primer Parameter CM	72
Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18	75
Tabel 3. 4 Spesifikasi Sudu Turbin Angin Savonius	76
Tabel 3. 5 Spesifikasi Silinder Pengganggu	77
Tabel 3. 6 Spesifikasi Honeycomb	80
Tabel 3. 7 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12 ..	81
Tabel 3. 8 Spesifikasi Digital Anemometer tipe Omega HHF141	82
Tabel 3. 9 Spesifikasi Torque Meter LUTRON Model TQ-8800	85
Tabel 3. 10 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC 2J-3	86
Tabel 3. 11 Spesifikasi Neraca Pegas	86
Tabel 3. 12 Hasil Perhitungan <i>Uncertainty</i> Pengukuran Pada Kecepatan 5 m/s	98
Tabel 4. 1 Perbandingan nilai CoP dan TSR Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$	185

Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu	185
Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu	186
Tabel 4. 4 Perbandingan Hasil Penelitian M. Rizky Ramadhan dan Penelitian Festy Merbasari	187
Tabel A. 1 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 3,8 m/s	201
Tabel A. 2 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 4,4 m/s	202
Tabel A. 3 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 5 m/s	203
Tabel A. 4 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 6 m/s	205
Tabel A. 5 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 7 m/s	206
Tabel A. 6 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 8 m/s	209
Tabel A. 7 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 9 m/s	211
Tabel A. 8 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	213
Tabel B. 1 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 3,8 m/s.	215
Tabel B. 2 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 4,4 m/s.	216
Tabel B. 3 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 5 m/s ...	218

Tabel B. 4 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D =1,6 Pada Kecepatan 6 m/s	220
Tabel B. 5 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 7 m/s ...	223
Tabel B. 6 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 8 m/s ...	224
Tabel B. 7 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 9 m/s ...	226
Tabel B. 8 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D 1,6 Pada Semua Variasi Kecepatan	228
Tabel B. 9 Static Torque Coefficient Turbin Angin Tanpa Silinder Pengganggu	231
Tabel B. 10 Static Torque Coefficient Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu	232

DAFTAR SIMBOL

A	: Cross Sectional Area (m^2)
CoP	: Coefficient of Power
CoP ₀	: Coefficient of Power Turbin Tanpa Pengganggu
C _M	: Coefficient of Moment
C _{M0}	: Coefficient of Moment Turbin Tanpa Pengganggu
C _D	: Drag Coefficient
d	: Diameter Silinder Pengganggu (m)
D	: Diameter Sudu Turbin (m)
D ₀	: Diameter End Plate (m)
e	: Diameter Poros (m)
F _D	: Gaya Drag (N)
g	: Percepatan Gravitasi (m/s^2)
H	: Tinggi Turbin Angin Savonius (m)
L	: Lebar Turbin Angin Savonius (m)
m	: Massa Pemberat (kg)
P _m	: Mechanical Power (J/s)
P _w	: Teoretical Power (J/s)
r	: Jari-jari silinder penerima beban (m)
R	: Jari-jari turbin (m)
Re	: Reynolds Number
s	: Pembacaan massa neraca pegas (kg)
S	: Jarak pusat turbin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)
T _D	: Torsi Dinamis (N.m)
T _s	: Torsi Statis (N.cm)
U	: Kecepatan Aliran fluida (m/s)
y	: Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah angin (m)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dan seluruh negara dibelahan dunia tengah diacani oleh semakin menipisnya energi fosil. Peran energi fosil dalam konsumsi energi nasional masih sangatlah dominan terutama minyak bumi, gas alam, dan batu bara, diketahui bahwa minyak bumi, gas, dan batu bara adalah termasuk *Non Renewable Energy*. Dahulu Indonesia merupakan salah satu negara produsen minyak tertua di dunia dengan cadangan yang relatif kecil dibandingkan dengan kebutuhannya. Pada saat ini jumlah cadangan minyak terbukti sekitar 0,2% dari cadangan dunia, yaitu berada di kisaran 3,6 miliar barel dan sejak tahun 1995 produksi minyak bumi Indonesia terus mengalami penurunan dari 1,6 juta *barrel oil per day* menjadi hanya 786 ribu *barrel per day*. Sejak tahun 2004, Indonesia telah menjadi negara pengimpor minyak (**RUEN 2017**). Hal tersebut disebabkan karena kebutuhan minyak bumi, gas, batu bara yang terus meningkat baik dalam sektor transportasi, industri dan pembangkit listrik akibat populasi pertumbuhan penduduk yang tinggi sementara produksinya yang terus menerus menurun. Sebagai antisipasi terhadap kondisi tersebut, Pemerintah berkomitmen untuk membangun misi *Indonesia Clean Energy* serta meningkatkan pembangunan infrastruktur Energi Baru dan Terbarukan (EBT) untuk memenuhi konsumsi energi di Indonesia sesuai dengan target bauran energi sebesar 23% pada tahun 2025 yang sesuai dengan ketentuan Rancangan Umum Energi Nasional (**EBTKE 2019**). Potensi EBT yang dimiliki Indonesia adalah sekitar 443.208 MW namun pemanfaatan EBT baru mencapai 8.215,5 MW atau sekitar 2% dari total potensi yang ada (**RUEN, 2017**).

Salah satu Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang cocok diterapkan di Indonesia adalah Energi Angin. Energi angin merupakan salah satu energi alternatif yang sangat menjanjikan karena wilayah Indonesia yang berada disekitar daerah ekuator

dimana wilayah tersebut ditengarai memiliki potensi angin yang dapat dimanfaatkan untuk pengembangan energi terbarukan sebagai pembangkit listrik. Rata-rata kecepatan angin di Indonesia sangatlah rendah yaitu berkisar antara 3 m/s hingga 7 m/s. Potensi yang dimiliki Indonesia dengan kecepatan angin lebih dari 4 m/s adalah sebesar 60.647 MW sedangkan kapasitas turbin angin yang telah terpasang pada tahun 2016 di Indonesia hanya sebesar 3,1 MW (**RUEN 2017**). Untuk dapat memenuhi target sesuai Rencana Umum Energi Nasional maka dibutuhkan Turbin Angin untuk dapat mengkonversi energi kinetik angin menjadi energi listrik.

Turbin angin terdiri atas dua jenis yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Turbin Angin Sumbu Horizontal merupakan turbin angin yang memiliki poros yang sejajar dengan arah angin. TASH ini memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan, kelebihan dari turbin angin sumbu horizontal ini adalah rotor yang berada di puncak menara yang relatif tinggi sehingga dianggap dapat memperoleh kecepatan angin yang tinggi pula, kekurangannya yaitu turbin angin jenis ini membutuhkan biaya yang besar dan konstruksi yang sangat rumit. Sedangkan untuk Turbin Angin Sumbu Vertikal yaitu turbin angin dimana porosnya tegak lurus dengan arah datangnya angin. Turbin angin jenis ini memiliki kelebihan yaitu konstruksi yang mudah dibuat serta dapat menerima angin dari segala arah namun kekurangannya turbin angin ini memiliki efisiensi yang rendah. Salah satu tipe TASV yaitu tipe *Savonius*.

Turbin Angin tipe *Savonius* adalah termasuk Turbin Angin Sumbu Vertical (TASV). Turbin Angin *Savonius* ini dikembangkan oleh Insinyur asal Finlandia, Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1920 (**Akwa et al 2012**). Beberapa keuntungan dari Turbin Angin *Savonius* ini antara lain konstruksinya yang sederhana, rotor dapat menerima angin dari segala arah, tingkat keausan rendah pada komponen-komponen yang berputar, serta memiliki momen statik dan dinamik yang

tinggi (Akwa et al 2012). Rotor turbin angin *Savonius* terdiri dari setengah silinder yang berjumlah dua buah atau disebut *Returning Blade* dan *Advancing Blade*. *Returning Blade* memiliki bentuk yang cembung dimana bentuk tersebut memiliki *Drag Coefficient* yang kecil sedangkan *Advancing Blade* memiliki bentuk cekung dan memiliki *Drag Coefficient* yang lebih besar. Apabila angin mengenai *blade/sudu* tersebut maka akan timbul Gaya *Drag*. Turbin Angin *Savonius* ini dapat berputar akibat adanya gaya *drag* dari kedua *blade/sudu* tersebut dimana perbedaan *drag coefficient* dari sudu menghasilkan selisih gaya *drag* dan selisih gaya *drag* jika dikalikan dengan jari-jari turbin *Savonius* akan menghasilkan torsi. Torsi jika dikalikan dengan kecepatan *angular* dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Putaran dari rotor turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh generator. Dalam perumusan jika torsi dikalikan dengan kecepatan *angular* dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Namun, Turbin Angin *Savonius* ini memiliki efisiensi yang rendah sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi turbin angin *Savonius ini*.

Penelitian terdahulu untuk meningkatkan efisiensi Turbin Angin *Savonius* telah dilakukan oleh Altan et al (2008). Penelitian ini memperkenalkan penambahan penghalang pada rotor berupa dua plat datar atau disebut *Curtain Arrangement* bertujuan untuk meningkatkan unjuk kerja dari turbin angin *Savonius*. Penambahan penghalang ini ditempatkan di depan *Returning Blade* dan plat lainnya diletakkan didepan *Advancing Blade*. Pemasangan *Curtain* ini bertujuan pula untuk mencegah terjadinya torsi negatif. Torsi negatif ini menyebabkan *Savonius* tidak mempunyai *Self-Starting*. Dalam penelitian ini menggunakan empat variabel yaitu panjang dari *curtain blade* (l_1 dan l_2) dan variasi sudut *blade* (α dan β), dalam hal ini untuk panjang dari *curtain blade* terdapat tiga variasi yaitu *curtain 1*, *curtain 2*, dan *curtain 3* dimana *curtain 1* memiliki nilai panjang yang paling besar. Variasi sudut α yaitu 30° hingga 60° serta variasi sudut β yaitu 0° hingga 30° dengan kenaikan 5° .

Kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar 7 m/s dengan *Reynold Number* 1.5×10^5 dengan jarak *exit wind tunnel* dengan *Savonius Rotor* (L) sekitar 5 m. Penelitian ini menghasilkan bahwa nilai *Coefficient of Performance* (CoP) meningkat sebesar 38,5% dibandingkan dengan rotor tanpa penghalang. Kondisi optimum terjadi pada curtain dengan panjang l_1 sebesar 45 cm dan l_2 sebesar 52 cm dengan $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

Penelitian selanjutnya yaitu penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin *Savonius* dengan memvariasikan geometri dari turbin angin *Savonius*. Geometri turbin angin *Savonius* yang divariasikan dalam penelitian ini antara lain jumlah dari *blade*, jumlah *stage*, *overlap ratio*, *aspect ratio* dan ada atau tidaknya *end plate*. Jarak *exit wind tunnel* dengan *Savonius Rotor* sekitar 125 cm dengan kecepatan angin yang dihasilkan *wind tunnel* yaitu sekitar 0 hingga 13 m/s. Parameter dalam penelitian ini antara lain jumlah *blade* yaitu dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b); jumlah *stage* yaitu *single stage* (1st) dan *double stage* (2st); *overlap ratios* (β) yaitu 0, 0.2, 0.25, 0.3 dan 0.35; *aspect ratio* (α) yaitu 0.5, 1, 2, 4, dan 5. Blade dari *Savonius Rotor* terbuat dari bahan PVC dengan diameter yang berbeda yaitu 0.3, 0.2, 0.1 dan 0.8 sedangkan *End Plate* terbuat dari material kayu dengan ketebalan 2.5 mm dimana diameter dari *end plate* (D_o) 10% lebih besar dari diameter rotor turbin angin *Savonius*. *Shaft* yang digunakan terbuat dari besi dengan diameter 14 mm dan dengan panjang 62 cm. Hasil dari penelitian ini yaitu turbin angin *Savonius* dengan dua *blade* (2b) memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* yang menggunakan tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b), turbin angin *Savonius* dengan *end plate* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada turbin angin *Savonius* tanpa menggunakan *end plate*, turbin angin *Savonius* dengan *double stage rotor* memiliki performansi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* dengan *single*

stage rotor. Rotor turbin *Savonius* tanpa *overlap ratio* (β) lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan *overlap ratio* (β) serta dalam penelitian ini semakin meningkatnya nilai *aspect ratio* (α) maka semakin meningkat pula *Power Coefficient* dari turbin angin *Savonius*.

Penelitian selanjutnya yaitu penelitian yang dilakukan oleh **Mohamed et al (2010)**. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi turbin angin *Savonius* dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Pada penelitian ini Turbin Angin *Savonius* diberi pengganggu didepan *Returning Blade* berupa plat datar (*obstacle shielding*) dimana tujuan dari pemberian plat pengganggu tersebut agar Turbin Angin *Savonius* memiliki kemampuan *Self-Starting* yang baik serta performansi yang meningkat. Penelitian ini membandingkan rotor turbin angin *Savonius* dengan dua *blade* dan tiga *blade* dan dengan variasi sudut plat (β) serta speed ratio (λ). Hasil dari penelitian ini yaitu kondisi optimum untuk turbin angin *Savonius* dengan dua *blade* terjadi ketika sudut plat (β) sebesar 100.83° dengan λ sebesar 0.7, pada kondisi tersebut nilai *Coefficient of Performance* meningkat sebesar 27.3%. Dan untuk turbin angin *Savonius* dengan tiga *blade* kondisi optimum tercapai ketika sudut plat (β) sebesar 80.52° dan dengan λ sebesar 0.7 dan didapatkan nilai *Coefficient of Performance* meningkat sebesar 27.5%.

Penelitian untuk meningkatkan performa Turbin Angin *Savonius* dengan pemeberian silinder sirkular sebagai pengganggu aliran yang diletakkan didepan *Returning Blade* Turbin Angin *Savonius* dilakukan oleh **Muhammad Rizky Ramadhan (2019)**. Penelitian ini menggunakan dua buah sudu dengan dimensi yaitu, diameter sudu turbin (D) sebesar 167 mm; diameter end plate (D_o) sebesar 320 mm; tinggi rotor turbin (H) sebesar 298 mm; dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi yaitu sebagai berikut: diameter (d) sebesar 83 mm; tinggi (t) sebesar 500 mm. Selain itu, penelitian ini menggunakan variasi

rasio diameter pengganggu terhadap diameter silinder utama (d/D) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 dengan jarak dari titik pusat turbin angin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,6 serta variasi bilangan *Reynolds* sebesar 97.000 dan 136.000. Tujuan pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* yaitu untuk mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* turbin angin *savonius*. Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah penambahan silinder pengganggu didepan *Returning Blad* turbin angin *Savonius* denan jarak $S/D = 1,6$ pada seluruh d/D efektif dalam meningkatkan nilai *coefficient of power* maksimum di kedua variasi bilangan *Reynolds*. Pada *Reynold Number* 97.000 nilai *CoP* paling tertinggi terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 44,74%. Untuk *Reynolds Number* 136.000 nilai *CoP* maksimum tertinggi juga terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan *CoP* sebesar 40,48%.

Penelitian untuk meningkatkan performansi turbin angin *Savonius* dengan memberikan pengganggu didepan *Returning Blade* dengan metode simulasi juga telah dilakukan oleh **Gunawan Sakti (2018)**. Penelitian ini menggunakan pengganggu berupa silinder yang dipotong 65° pada kedua sisi. Silinder pengganggu yang digunakan ini disebut *I-65° type cylinder*. Silinder ini digunakan karena diduga dapat menurunkan gaya drag pada sisi *returning blade* turbin angin *Savonius*. Penelitian ini menggunakan metode secara numerik dan secara eksperimen dengan dua kondisi yaitu tanpa menggunakan silinder pengganggu dan dengan kondisi menggunakan silinder pengganggu. Penelitian ini menggunakan silinder pengganggu dengan diameter sebesar 88,5 mm. Konstruksi turbin angin *Savonius* dibuat dengan material *polyvinyl chloride plastics* dengan diameter sudu turbin sebesar 165,2 mm dengan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0.54. Rotor turbin angin yang digunakan memiliki tinggi (H) sebesar 294,4 mm dengan diameter poros sebesar 19 mm. Turbin angin *Savonius* pada penelitian ini diberi *endplate* dengan

diameter (D_o) sebesar 333,7 mm. Selain itu penelitian ini dilakukan dengan menggunakan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1.4 dengan kecepatan *free stream* aliran sebesar 5 m/s atau dengan *Reynolds Number* sebesar $9,9 \times 10^4$ berdasarkan panjang karakteristik $L = 2D - b$. Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah pemberian silinder pengganggu dengan tipe I-65° efektif dalam menunda titik separasi dan dapat mempersempit daerah *wake* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* menjadi menurun dan torsi dari turbin angin *Savonius* dapat meningkat. Turbin angin *Savonius* dengan pengganggu berupa silinder tipe I-65° dapat meningkatkan *Coefficient of Power* sebesar 23,61% dibandingkan tanpa menggunakan silinder pengganggu.

Dengan adanya beberapa kondisi yaitu kecepatan angin di Indonesia yang relatif rendah serta konstruksi yang mudah dibuat maka sangat cocok apabila turbin angin *Savonius* digunakan di Indonesia, namun kekurangan dari turbin angin ini adalah efisiensi yang tergolong rendah sehingga diperlukan beberapa penelitian dengan tujuan untuk meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius* tersebut. Dengan adanya beberapa penelitian tersebut pemberian penghalang berupa silinder sirkular didepan *Returning Blade* perlu untuk dilakukan dan diduga dapat meningkatkan performa dari Turbin Angin *Savonius*, maka dalam hal ini dilakukan sebuah penelitian yaitu pengaruh pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* terhadap peningkatan performa turbin angin *Savonius*. Penelitian ini menggunakan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin *Savonius* (d/D) yaitu sebesar 0.5. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah rasio jarak antara pusat sudu turbin *Savonius* dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin *Savonius* (S/D) yaitu sebesar 1.6 serta variasi kecepatan angin yaitu sebesar 3 m/s; 4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s. Dari penelitian tersebut diharapkan performa dari Turbin Angin *Savonius* dapat meningkat.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin Angin Savonius merupakan salah satu tipe dari Turbin Angin Sumbu Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*) dimana pada penelitian ini turbin angin tersebut terdiri dari dua *blade/sudu* yaitu *Returning Blade* dan *Advancing Blade* dimana *Returning Blade* memiliki *Drag Coefficient* yang kecil sedangkan *Advancing Blade* memiliki *Drag Coefficient* yang lebih besar. Apabila angin mengenai *blade/sudu* tersebut maka akan timbul Gaya *Drag*. Adanya perbedaan *Drag Coefficient* dari kedua *sudu* tersebut maka timbul selisih gaya *drag* dimana selisih gaya *drag* jika dikalikan dengan jari-jari turbin *Savonius* akan menghasilkan torsi. Torsi jika dikalikan dengan kecepatan *angular* dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Dalam hal ini untuk dapat menghasilkan daya turbin yang besar maka dipelukan selisih torsi yang besar pula. Untuk dapat menghasilkan selisih torsi yang besar maka selisih gaya *drag* yang dihasilkan *blade/sudu* juga harus besar, selisih gaya *drag* dapat diperbesar apabila gaya *drag* dari *Returning Blade* kecil. Dalam hal ini untuk memperkecil gaya *drag* dari *Returning Blade* maka diberikan sebuah silinder sirkular sebagai pengganggu aliran yang diletakkan didepan sisi *Returning Blade* turbin angin *Savonius*. Pemberian silinder sirkular tersebut diduga dapat menurunkan gaya *drag* disisi *Returning Blade* sehingga didapatkan selisih gaya *drag* yang besar dan torsi dari turbin akan naik serta menghasilkan daya turbin yang semakin besar pula. Hipotesa awal dari penelitian ini antara lain adalah:

1. Pengganggu berupa silinder diletakkan didepan *Returning Blade* yang tegak lurus dengan arah angin diduga dapat menurunkan tekanan pada sisi depan *Returning Blade* serta tekanan pada sisi belakang *Returning Blade* akan meningkat. Sehingga perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang *Returning Blade* akan menurun, Perbedaan tekanan yang menurun tersebut akan menghasilkan gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* yang kecil pula sehingga selisih gaya *drag* dari

kedua *blade*/sudu akan meningkat. Selisih dari gaya *drag* yang besar akan meningkatkan nilai torsi sehingga daya turbin akan meningkat pula.

2. *Shear Layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan jatuh pada permukaan *Returning Blade*, jatuhnya *shear layer* pada permukaan *Returning Blade* dapat mengganggu *Boundary Layer* sehingga dapat mempercepat terjadinya transisi aliran dari *Laminar* menjadi *Turbulent*. Hal tersebut menyebabkan titik separasi menjadi tertunda dan dapat memperkecil daerah *wake* sehingga gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* mengecil. Apabila gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* kecil maka akan menghasilkan selisih Gaya *Drag* dari kedua *blade*/sudu yang besar. Besarnya selisih Gaya *Drag* tersebut akan menghasilkan torsi yang besar begitu juga dengan daya turbin yang semakin meningkat.

3. Pemberian variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s; 4.4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s digunakan untuk mendapatkan titik optimum dimana pada titik optimum tersebut diduga akan mendapatkan performansi turbin angin *Savonius* yang paling terbaik. Dalam hal ini penambahan kecepatan angin akan meningkatkan nilai CoP hingga mencapai nilai maksimum pada kecepatan angin yang optimum pula. Setelah CoP turbin angin *Savonius* mencapai nilai maksimum dan apabila kecepatan angin tetap dinaikkan maka kecepatan angin tersebut akan menurunkan nilai CoP, hal tersebut disebabkan karena kerugian-kerugian yang terjadi juga semakin besar sehingga setelah mencapai titik optimum performansi turbin akan menurun.

Untuk dapat membuktikan hipotesa tersebut maka dilakukan penelitian dengan perbandingan diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin *Savonius* (d/D) sebesar 0.5. Dengan menggunakan perbandingan jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin *Savonius* (S/D) sebesar 1.6 dan variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s; 4.4 m/s; 5 m/s; 6

m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s. Pemberian variasi kecepatan angin tersebut diduga dapat mempengaruhi daerah *wake* yang terbentuk akibat dari penempatan silinder pengganggu yg diletakkan didepan *Returning Blade* Turbin Angin *Savonius*. Menurut **Incropera et al (2011)** ketika suatu fluida melewati sebuah silinder pejal dengan $Re_D \leq 2 \times 10^5$ maka *boundary layer* yang terbentuk adalah *laminar boundary layer*, pada penelitian ini besarnya *Reynold Number* berdasarkan diameter silinder pengganggu (Re_d) adalah sebesar $1,9 \times 10^4$ hingga $4,7 \times 10^4$. Dalam hal ini pemberian silinder pengganggu yang diletakkan didepan *Returning Blade* Turbin Angin *Savonius* dengan rasio $d/D = 0.5$, dapat menghasilkan $Re_d \leq 2 \times 10^5$ untuk semua kecepatan angin sehingga *boundary layer* yang terbentuk didepan silinder pengganggu adalah *laminar boundary layer* dan daerah *wake* yang terbentuk didepan *Returning Blade* membesar menyebabkan tekanan didepan *Returning Blade* akan turun sehingga Gaya *Drag* pada sisi *Returning Blade* turun dan selisih Gaya *Drag* dari kedua *blade* akan naik yang akan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* akan naik dan daya turbin akan semakin meningkat.

Penelitian yang serupa telah dilakukan sebelumnya, dimana telah didapatkan kondisi paling optimum terjadi pada S/D 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 namun yang membedakan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah pada variasi kecepatannya. Pada penelitian sebelumnya hanya menggunakan dua variasi bilangan Reynolds sedangkan pada penelitian ini memiliki variasi kecepatan yang mana memiliki range jauh lebih besar dari 3,8 m/s hingga 9 m/s sehingga diharapkan dapat memperoleh kondisi paling optimum pada kecepatan yang paling optimum. Pemilihan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin *Savonius* sebesar 1,6 berdasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh **Lee et al** pada tahun 2004. Dimana pada penelitian tersebut menyatakan bahwa jarak penempatan silinder pengganggu yang paling efektif dalam

menurunkan tekanan didepan silinder utama adalah ketika rasio L/D sebesar 1,5 hingga 2,5.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan beberapa Batasan Masalah antara lain sebagai berikut:

1. Aliran dianalisa sebagai Aliran Eksternal (*External Flow*)
2. Aliran yang mengalir adalah *Steady Flow, Incompressible Flow, dan Uniform Flow*
3. Analisa dilakukan dengan rasio perbandingan diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius (d/D) sebesar 0,5.
4. Perbandingan jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin *Savonius* (S/D) sebesar 1.6 dan variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s; 4.4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s.
5. Perpindahan panas diabaikan
6. Arah aliran udara dari depan silinder pengganggu

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh silinder pengganggu yang diletakkan didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* terhadap performa turbin angin tersebut dengan rasio perbandingan diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin angin *Savonius* (d/D) sebesar 0.5. Dengan menggunakan perbandingan jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin *Savonius* (S/D) sebesar 1.6 dan variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s; 4.4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s; dan 9 m/s. Variasi kecepatan tersebut digunakan untuk mendapatkan kecepatan paling optimum sehingga didapatkan performansi turbin angin *Savonius* yang optimum pula. Performansi turbin angin *Savonius* didapatkan dengan cara:

1. Mengukur torsi statis dan torsi dinamis turbin angin *Savonius*

2. Menghitung *Coefficient of Moment*
3. Menghitung *Coefficient of Performance*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah untuk memberikan referensi dalam upaya meningkatkan performansi Turbin Angin *Savonius* serta memberikan penjelasan mengenai pengaruh pemberian silinder pengganggu yang diletakkan didepan Returning Blade turbin angin *Savonius* terhadap kenaikan torsi statis, torsi dinamis, *Coefficient of Moment* dan *Coefficient of Performance*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah mekanisme yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Prinsip kerja dari turbin angin yaitu dengan mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik pada poros, energi mekanik tersebut menyebabkan poros berputar. Putaran dari poros tersebut ditransmisikan untuk memutar generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Turbin angin pada awalnya digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain sebagainya. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya. Namun saat ini turbin angin sudah banyak digunakan di beberapa wilayah negara selain Eropa untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, karena dalam waktu yang dekat ini seluruh wilayah di belahan dunia tengah diancam oleh semakin menipisnya cadangan energi *fossil* sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik. Turbin angin dipilih karena menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbarui yaitu Angin. Untuk dapat mengubah energi mekanik dari poros menjadi energi listrik diperlukan beberapa komponen turbin yaitu *rotor*, *gearbox*, dan beberapa *control system* penunjang lainnya (Erich 1965)

Angin yang mengenai sudu-sudu dari turbin akan menimbulkan gaya drag dimana gaya drag tersebut menyebabkan *rotor* dari turbin angin berputar namun dengan putaran yang relatif rendah. Putaran dari *rotor* ini akan ditransmisikan melalui *gearbox* sebelum masuk ke generator. Dalam hal ini *gearbox* berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada *rotor* turbin menjadi putaran tinggi. *Control system* yang digunakan pada turbin angin adalah sebuah *Brake System* dimana *Brake System* ini berfungsi untuk menjaga putaran yang dihasilkan oleh *gearbox* sebelum masuk ke generator. Putaran yang dihasilkan oleh *gearbox* harus dijaga karena generator memiliki titik kerja aman untuk menghasilkan energi listrik yang maksimal namun angin memiliki kecepatan yang berbeda-beda pada setiap

waktunya sehingga putaran poros yang dihasilkan juga berbeda-beda apabila putaran poros tidak dijaga maka diduga akan merusak generator. Generator pada turbin angin ini merupakan salah satu komponen terpenting dimana generator ini dapat merubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerja dari generator yaitu dengan menggunakan teori medan elektromagnetik dimana ketika poros generator mulai berputar maka akan timbul perubahan fluks, adanya perubahan fluks akan menghasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik agar dapat digunakan oleh masyarakat. Turbin angin terbagi menjadi dua macam berdasarkan posisi porosnya yaitu Turbin Angin Sumbu Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) dan Turbin Angin Sumbu Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*).

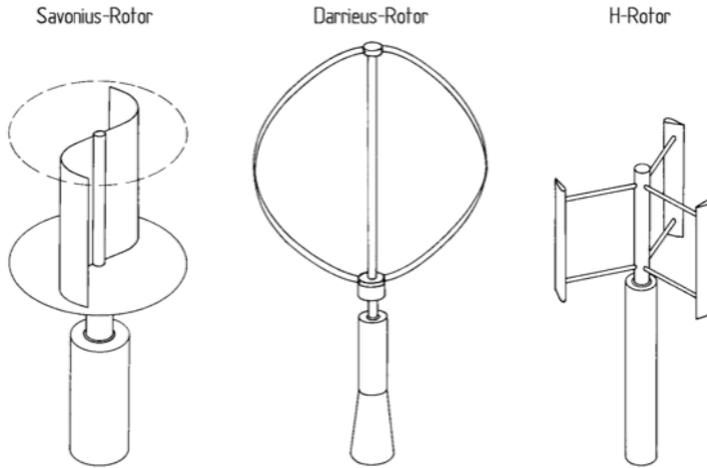
Turbin Angin Sumbu Horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) adalah salah satu tipe turbin angin yang memiliki poros sejajar dengan arah datangnya angin. Turbin angin ini memiliki rotor berbentuk *airfoil* dengan sudu berjumlah 2 atau 3 buah yang disusun membentuk baling-baling. Rotor turbin sebagian besar diletakkan diatas puncak Menara atau *Tower* yang relatif tinggi, hal tersebut disebabkan karena turbin jenis ini hanya dapat memperoleh angin dari satu arah saja sehingga dibutuhkan kecepatan angin yang paling besar untuk mendapatkan daya yang maksimal. Rotor yang diletakkan diatas Menara/*tower* diduga akan memperoleh kecepatan angin yang besar pula. Turbin Angin Sumbu Horizontal ini biasanya juga dilengkapi dengan *Control System* dan sebuah sensor angin yaitu *Anemometer*. *Anemometer* ini berfungsi untuk mendeteksi arah datangnya angin dimana *anemometer* ini akan memberikan sinyal pada *Control System* dan *Control System* ini akan menggerakkan rotor menuju ke arah datangnya angin dalam hal ini turbin angin tersebut membutuhkan mekanisme yaw agar sudu turbin dapat menyesuaikan arah angin. Semakin tinggi kecepatan angin yang diperoleh maka turbin angin tersebut bisa menghasilkan daya yang maksimal pula.



Gambar 2. 1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) (Mc Harg Jan, 2019)

Gambar 2.1 menunjukkan bentuk dari Turbin Angin Sumbu Horizontal yang berada di *Wind Farm* Australia. Kelebihan dari Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) ini adalah memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV). Selain itu kelebihan dari turbin angin jenis ini adalah rotor turbin yang diletakkan diatas Menara dapat memperoleh kecepatan angin yang besar pula sehingga daya yang dihasilkan turbin angin jenis ini juga semakin besar. Walaupun memiliki efisiensi yang tinggi namun turbin angin sumbu horizontal ini memiliki beberapa kekurangan antara lain yaitu pertama rotor yang diletakkan dipuncak Menara memiliki kesulitan pemasangan yang sangat tinggi karena membutuhkan derek yang tinggi serta membutuhkan operator yang terampil pula dalam pemasangannya. Yang kedua, komponen-komponen yang digunakan pada turbin ini juga relatif rumit dan harus diletakkan dipuncak Menara bersamaan dengan sudu turbin. Yang ketiga, diperlukan tower yang kokoh untuk dapat menopang sudu, transmisi, serta generator pada ketinggian

tertentu. Beberapa hal tersebut akan berujung pada biaya yang besar dalam pembuatan maupun pemasangan dari turbin angin sumbu horizontal ini.



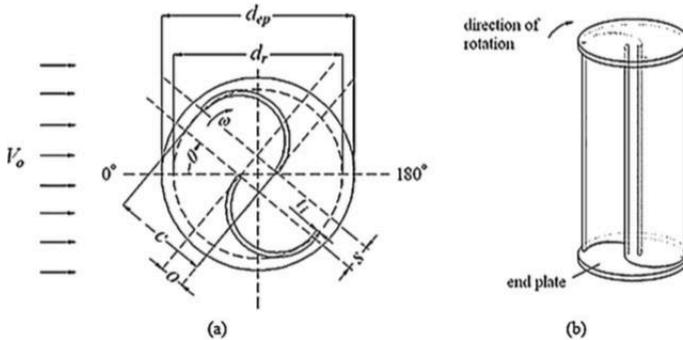
Gambar 2. 2 Rotor dari Vertical Axis Wind Turbine (Hau, Erich 2006)

Turbin Angin jenis lainnya yaitu Turbin Angin Sumbu Vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*). Rotor dari TASV terdiri dari tiga jenis yaitu *Savonius*, *Darrieus* dan H-Rotor dapat dilihat pada gambar 2.2. Disebut Turbin Angin Sumbu Vertikal karena poros dari turbin angin ini menghadap arah vertikal atau tegak lurus dengan arah datangnya angin. Turbin angin tipe ini memiliki konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dengan Turbin Angin Sumbu Horizontal. Karena poros yang tegak lurus dengan arah datangnya angin maka turbin angin ini dapat menerima angin dari segala arah serta mampu beroperasi pada kecepatan rendah sekalipun. Kelebihan dari Turbin Angin Sumbu Vertikal ini yaitu desain yang sederhana selain itu memungkinkan peletakan komponen-komponen penunjang seperti *gearbox* dan generator berada didasar tanah serta tidak memerlukan mekanisme *yaw* berbeda halnya dengan Turbin Angin

Sumbu Horizontal (**Erich 2006**). Dengan adanya kelebihan tersebut, turbin angin jenis ini tidak membutuhkan biaya yang besar. Selain kelebihan dari Turbin Angin Sumbu Vertikal diatas, turbin angin jenis ini juga memiliki beberapa kelemahan yaitu memiliki efisiensi yang rendah dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal, selain itu kekurangan dari turbin angin sumbu vertical ini memiliki *tip speed ratio* yang rendah serta kemampuan *self-starting* yang rendah pula (**Erich 2006**).

2.2 Turbin Angin Savonius

Turbin Angin Savonius merupakan salah satu tipe dari Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV) dimana rotor dari turbin angin ini tegak lurus dengan arah datangnya aliran angin. Turbin Angin *Savonius* ini dikembangkan oleh Insinyur asal Finlandia, Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1920 dan turbin angin *Savonius* ini dinilai memiliki biaya konstruksi yang rendah serta memiliki dampak terhadap lingkungan yang rendah pula (**Akwa et al 2012**). Beberapa keuntungan dari turbin angin tipe *Savonius* ini antara lain yaitu turbin angin *savonius* ini memiliki konstruksi yang sederhana sehingga biaya pembuatannya rendah, yang kedua yaitu turbin angin savonius ini dapat menerima angin dari segala arah serta dapat beroperasi dengan kecepatan angin yang rendah sekalipun. Yang ketiga, tingkat keausan rendah pada komponen-komponen yang berputar. Yang keempat yaitu memiliki momen statis dan momen dinamis yang tinggi (**Akwa et al 2012**). Turbin Angin *Savonius* dengan dua *blade* berbentuk setengah silinder lebih banyak digunakan. *Power Performance (C_p)* dari turbin angin *savonius* tersebut berkisar 15%, lebih rendah dibandingkan dengan turbin angin sumbu horizontal yaitu memiliki *Power Performance (C_p)* sekitar 45%, namun turbin angin *savonius* ini memiliki *self-starting* yang baik meskipun pada kecepatan angin yang rendah sekalipun (**Altan et al 2008**).



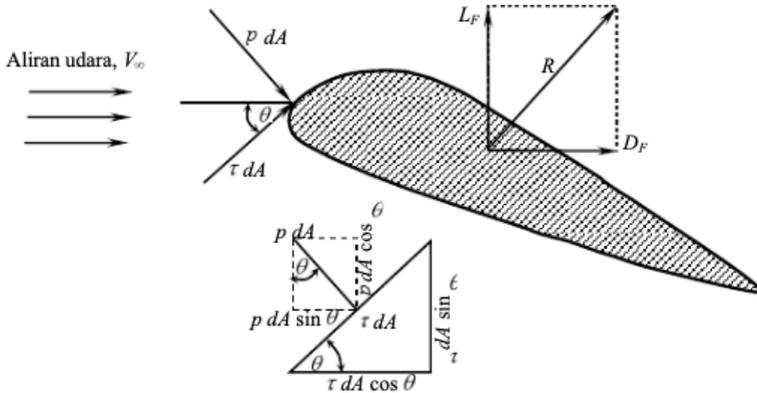
Gambar 2. 3 Rotor Turbin Angin Savonius (Akwa et al, 2012)

Gambar 2.3 diatas menunjukkan rotor turbin angin savonius dengan blade berjumlah dua buah. *Blade* Turbin Angin *Savonius* berbentuk setengah silinder yang terdiri dari dua buah dimana blade tersebut dipasang berlawanan arah dan membentuk huruf S jika dilihat dari atas. Gambar 2.3 diatas juga menjelaskan parameter-parameter yang digunakan pada rotor turbin angin savonius dengan dua buah sudu. Dimana t_i merupakan ketebalan sudu atau *bucket thickness*; c adalah *bucket chord*; o adalah *buckets overlap*; s adalah *buckets spacing*; d_r adalah diameter rotor dan d_{ep} adalah diameter *end plate*. Angin akan dialirkan dengan kecepatan V sehingga mengenai sudu turbin, angin yang mengenai sudu-sudu turbin tersebut akan berputar dengan kecepatan *angular* ω (Akwa 2012). Dua buah blade pada turbin angin Savonus sering disebut *Returning Blade* dan *Advancing Blade*. *Returning Blade* memiliki bentuk yang cembung dimana bentuk tersebut memiliki *Drag Coefficient* yang kecil sedangkan *Advancing Blade* memiliki bentuk cekung dan memiliki *Drag Coefficient* yang lebih besar. Apabila angin mengenai *blade/sudu* tersebut maka akan timbul Gaya *Drag*. Turbin Angin *Savonius* ini dapat berputar akibat adanya gaya *drag* dari kedua *blade/sudu* tersebut dimana perbedaan *drag coefficient* dari sudu menghasilkan selisih gaya *drag* dan selisih gaya *drag* jika dikalikan dengan jari-jari turbin *Savonius* akan menghasilkan torsi. Torsi jika dikalikan dengan kecepatan *angular* (ω) dari turbin akan

menghasilkan daya turbin. Putaran dari rotor turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh generator. Dalam perumusan jika torsi dikalikan dengan kecepatan *angular* dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Untuk memperoleh torsi yang besar maka salah satu caranya yaitu memperbesar selisih gaya drag dari kedua *blade*/sudu. Selisih gaya drag pada turbin *Savonius* dapat diperbesar dengan memperkecil gaya *drag* pada *Returning Blade*.

2.3 Gaya Drag

Sebuah benda yang dialiri fluida dengan aliran *viscous* akan menghasilkan gaya-gaya aerodinamika. Gaya-gaya aerodinamika pada sebuah benda terjadi karena dua sumber yaitu distribusi tekanan (P) pada permukaan benda serta distribusi tegangan geser atau *skin friction* (τ) pada permukaan benda (**Anderson, 2011**). Gaya-gaya aerodinamika terjadi akibat tekanan dan gaya geser pada permukaan sebuah benda terdiri dari Gaya *Drag* dan Gaya *Lift*. Gaya *Drag* atau juga disebut Gaya Hambat (F_D) adalah komponen gaya aerodinamika yang sejajar atau searah dengan arah aliran udara, sedangkan Gaya *Lift* (F_L) adalah komponen gaya aerodinamika yang tegak lurus dengan arah aliran udara (**Anderson, 2011**). Gaya hambat yang terjadi akibat distribusi tegangan geser atau *skin friction drag* (F_{Df}) adalah gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) sedangkan gaya hambat yang terjadi akibat adanya distribusi tekanan atau *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus atau normal terhadap permukaan benda yang timbul akibat adanya tekanan fluida. Resultan antara *skin friction drag* dan *pressure drag* disebut sebagai *total drag force* atau *net drag force*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut ini



Gambar 2. 4 Penguraian gaya-gaya Aerodinamika yang bekerja pada suatu airfoil (Anderson, 2011)

Berdasarkan gambar diatas dA merupakan elemen luasan pada suatu body yang dikenai gaya drag. Gaya hambat (*Drag Force*, F_D) adalah penjumlahan dari semua komponen gaya yang bekerja pada suatu *body* dalam arah yang sejajar dengan kecepatan aliran udara bebas. Jumlah komponen gaya geser yang searah aliran udara disebut gaya hambat gesekan (*Skin Friction Drag Force*, F_{Df}) yang dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{df} = \int \tau dA \cdot \cos \theta \quad (2.1)$$

Sedangkan jumlah komponen gaya tekan yang searah aliran udara disebut gaya hambat tekanan (*Pressure Drag Force*, F_{Dp}) dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$F_{dp} = \int p dA \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

Sehingga Gaya Hambat Total (*Total Drag Force*, F_D) yang bekerja pada suatu *body* yang searah dengan aliran udara dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_D = F_{Df} + F_{Dp}$$

$$F_D = \int \tau dA \cdot \cos \theta + \int p dA \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

Secara umum Gaya Drag Total juga dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (2.4)$$

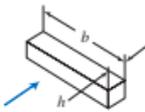
Dimana:

F_D	: Gaya Drag (<i>Net Drag Force</i> , N)
ρ	: Massa jenis fluida (kg/m ³)
V	: Kecepatan aliran fluida (m/s)
A	: <i>Frontal Area</i> (m ²)
C_D	: <i>Drag Coefficient</i>

2.4 Drag Coefficient

Drag Coefficient merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menunjukkan gaya drag suatu aliran fluida yang melintasi sebuah benda. Nilai *Drag Coefficient* (C_D) berbeda-beda yang dipengaruhi oleh geometri dari suatu benda yang dilewati oleh fluida tersebut. Turbin *Savonius* memiliki dua *blade* yang berbentuk seperti huruf S yang terdiri dari *Advancing Blade* dan *Returning Blade*. *Drag Coefficient* (C_D) yang dimiliki *Advancing Blade* lebih besar dibandingkan *Drag Coefficient* yang dimiliki *Returning Blade*. *Advancing Blade* yang digunakan serupa dengan *C-Section (Open Side Facing Flow)* dan *Returning Blade* yang digunakan serupa dengan *C-Section (Open Side Facing Downstream)*, hal tersebut dijelaskan oleh **Fox, Robert W dan Mc. Donald, Alan T** yang dapat dilihat pada tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Drag Coefficient untuk berbagai geometri benda dengan $Re \geq 1000$ (Fox, Robert W dan Mc. Donald, Alan T)

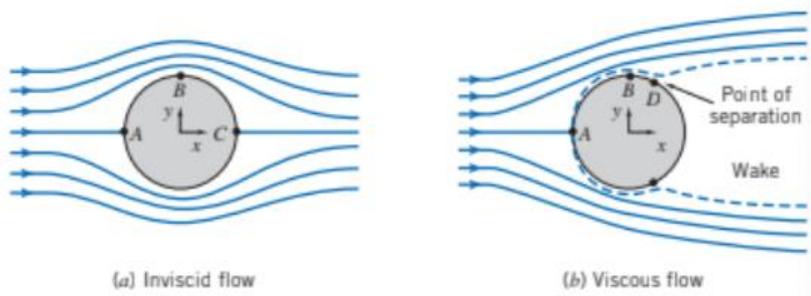
Object	Diagram		$C_D (Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$ $b/h = 1$	2.05 1.05
Disk			1.17
Ring			1.20 ^b
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

^aData from Hoerner [16].

^bBased on ring area.

Fluida merupakan zat yang terdiri dari molekul-molekul yang bergerak atau dapat dikatakan bahwa fluida dianggap sebagai satu kesatuan makroskopik. Fluida yang mengalir melalui suatu benda atau suatu permukaan dipengaruhi oleh kekentalan atau viskositasnya. Kekentalan atau viskositas suatu fluida adalah sifat yang menentukan besar daya tahannya terhadap gaya geser atau ukuran penolakan sebuah fluida terhadap perubahan bentuk dibawah tekanan *shear*. Aliran fluida jika dilihat berdasarkan pengaruh viskositasnya terbagi menjadi dua yaitu *Viscous Flow* dan *Inviscid Flow*. *Viscous Flow* atau aliran *viscous* adalah aliran dimana viskositas fluida sangat berpengaruh sehingga menghasilkan tegangan geser disekitar dinding atau permukaan yang

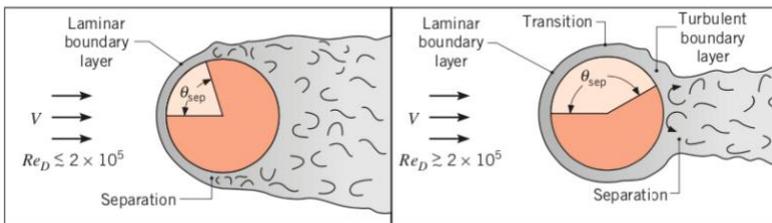
bersinggungan langsung dengan fluida atau dapat dikatakan bahwa $\tau_{yx} \neq 0$. Sedangkan *Inviscid Flow* atau aliran *inviscid* adalah aliran dimana viskositas fluida dianggap nol sehingga aliran fluida tersebut tidak terpengaruh tegangan geser atau dapat dikatakan bahwa $\tau_{yx} = 0$. Dalam aliran *inviscid*, viskositas fluida diasumsikan sama dengan nol namun dalam kenyataannya tidak ada fluida yang tidak memiliki viskositas. Aliran *viscous* dan aliran *inviscid* pada silinder sirkular pejal dapat dilihat pada gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2. 5 Aliran Viscous dan aliran Inviscid pada bola pejal (Fox, Robert W dan Mc. Donald, Alan T, 2011)

Gambar 2.5 (a) menunjukkan *inviscid flow* atau aliran *inviscid* yang melewati suatu silinder pejal. Aliran *inviscid* juga disebut sebagai aliran ideal dimana ketika fluida mengalir dan menabrak permukaan silinder pejal pada titik A, maka *boundary layer* tidak terbentuk sehingga tidak menimbulkan *wake*. Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa *streamline* yang terbentuk didepan dan dibelakan silinder yaitu simetri. Sedangkan pada gambar 2.5 (b) merupakan aliran *viscous* yang melewati suatu silinder pejal. Titik A adalah titik stagnasi dimana kondisi pada titik tersebut yaitu aliran fluida menabrak permukaan silinder pejal secara langsung sehingga menyebabkan kecepatan diperlambat hingga kecepatannya nol dan tekanannya maksimum. Dari titik A tersebut mulai terbentuk *boundary layer*, yaitu daerah batas yang memisahkan daerah *viscous* dan *inviscid*. Selanjutnya yaitu titik B, kondisi pada titik tersebut

yaitu terjadi peningkatan kecepatan fluida dan penurunan tekanan, pada titik ini momentum aliran yang digunakan untuk menggerakkan fluida semakin berkurang karena adanya tegangan geser yang arahnya berlawanan dengan arah aliran fluida. Dari titik B fluida mengalir menuju titik D, yaitu titik separasi. Pada titik D, momentum aliran fluida yang digunakan untuk menggerakkan fluida sudah tidak mampu melawan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* atau tekanan balik sehingga *boundary layer* terpecah. Akibat adanya titik separasi tersebut maka muncul daerah bertekanan rendah yang disebut dengan *wake*. Setelah melewati titik separasi, fluida akan tetap mengalir namun akibat adanya tekanan balik yang besar maka akan timbul *backflow*.



Gambar 2. 6 Pengaruh Reynold Number terhadap Titik Separasi (Incropera et al, 2011)

Terjadinya separasi ditunjukkan pada gambar 2.6 diatas dimana daerah *wake* timbul pada bagian belakang silinder pejal. Daerah *wake* adalah daerah bertekanan rendah yang muncul akibat adanya perbedaan tekanan antara *boundary layer* bagian atas dan *boundary layer* bagian bawah yang terseparasi atau terpisah. Aliran memiliki titik separasi yang berbeda-beda bergantung pada besarnya bilangan *Reynolds*. Semakin tinggi bilangan *Reynolds* maka semakin turbulen suatu aliran. Aliran turbulen memiliki titik separasi yang lebih jauh atau tertunda, hal tersebut disebabkan karena aliran turbulen memiliki momentum aliran yang lebih besar sehingga lebih mampu menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga

dapat memperlambat atau menunda terjadinya separasi sehingga daerah *wake* yang terbentuk akan semakin sempit. Semakin menyempitnya daerah *wake* maka gaya drag yang dihasilkan juga semakin kecil. Pada gambar 2.6 dijelaskan bahwa pada $Re_D \leq 2 \times 10^5$, *boundary layer* yang terbentuk adalah *boundary layer* laminar dan separasi terjadi pada $\theta \approx 80^\circ$ dan pada $Re_D \geq 2 \times 10^5$, *boundary layer transisi* yang akan terbentuk dan separasi tertunda hingga $\theta \approx 140^\circ$ (Incropera et al 2011).

2.6 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah suatu bilangan tak berdimensi yang dapat digunakan untuk mengkarakteristikan sebuah aliran apakah aliran tersebut *laminar* atau *turbulent*. Bilangan *Reynolds* merupakan perbandingan antara gaya inersia *body* terhadap gaya geser yang timbul akibat aliran fluida. Bilangan *Reynolds* dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini:

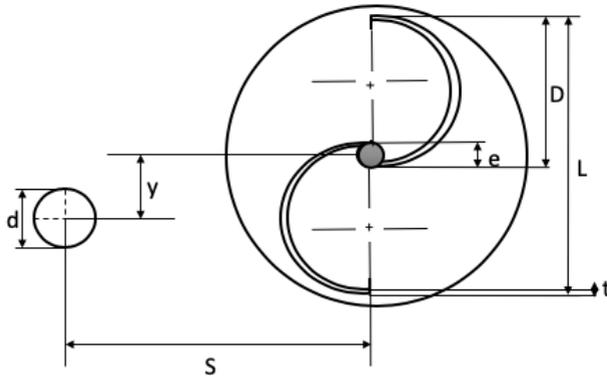
$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Geser}}$$

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \quad (2.5)$$

Dimana:

Re	: Bilangan Reynolds
ρ	: Massa jenis fluida (kg/m ³)
U	: Kecepatan Fluida (m/s)
L	: Panjang Karakteristik (m)
μ	: Viskositas dinamik (Ns/m ²)
ν	: Viskositas kinematik (m ² /s)

Pada penelitian ini panjang (L) yang digunakan pada penelitian ini adalah 2D-e-2t serta dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 7 Skema Turbin Angin Savonius Tampak Atas

Sehingga *Reynolds Number* pada penelitian ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Re = \frac{\rho U (2D - e - 2t)}{\mu} \quad (2.6)$$

Dimana:

- D : Diameter sudu turbin *Savonius* (m)
- e : Diameter poros (m)
- t : Ketebalan sudu turbin (m)

2.7 Daya Teoritis

Prinsip utama dari turbin angin adalah mengubah energi kinetik dari angin menjadi energi mekanik pada poros. Energi mekanik dari poros tersebut dihubungkan dengan generator listrik sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Secara teoritis energi mekanik dari poros turbin dihasilkan oleh energi kinetik yang berasal dari aliran udara. Besarnya energi kinetik dari udara dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

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

Dimana massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho U A \quad (2.8)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.8) ke persamaan (2.7) akan menghasilkan daya yang dihasilkan oleh angin secara teoritis yang dapat dituliskan sebagai berikut

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.9)$$

Dimana:

Ek	: Energi kinetik angin (Joule)
P_w	: Daya Angin (watt)
ρ	: Massa jenis udara (kg/m ³)
A	: Luas penampang (m ²)
U	: Kecepatan angin (m/s)

2.8 Torsi Statis

Torsi adalah suatu kekuatan atau gaya pada sumbu putar yang dapat menyebabkan benda bergerak melingkar atau berputar. Pada turbin angin *Savonius*, besarnya torsi yang dihasilkan pada poros bergantung pada gaya *drag* dari angin dan sudu turbin. Torsi statis dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$T_s = F_D \cdot R$$

Dimana R pada persamaan ini adalah jari-jari sudu turbin angin *Savonius*, dan R sebanding dengan L/2 sehingga,

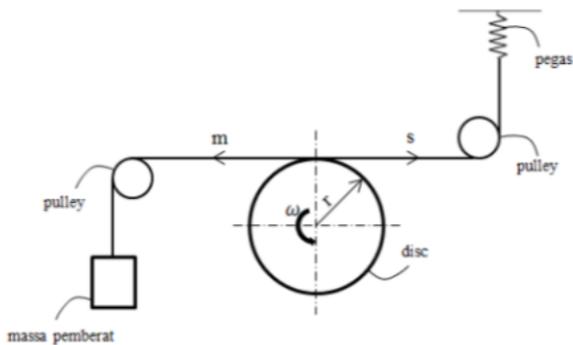
$$T_s = \frac{1}{4} C_D \rho A U^2 L \quad (2.10)$$

Dimana:

T_s	: Torsi yang dihasilkan dari putaran poros turbin <i>Savonius</i> (N.m)
R	: Jari-jari sudu turbin (m)
L	: Lebar turbin angin <i>Savonius</i> (m)

2.9 Torsi Dinamis

Torsi dinamis dapat disebut sebagai *Mechanical Torque* dimana pada turbin angin *Savonius* torsi dinamis diukur dengan menggunakan *Brake Dynamometer* yang diterapkan pada poros turbin angin *Savonius*. Skema yang digunakan dalam pengukuran torsi dinamis dapat dilihat pada gambar 2.7. Mekanisme *Brake Dynamometer* terdiri dari beberapa komponen yaitu *pulley*, benang *nylon*, *spring* atau pegas, serta massa pemberat. Berikut ini adalah mekanisme *Brake Dynamometer*:



Gambar 2. 8 Mekanisme Brake Dynamometer dalam pengukuran Torsi Dinamis

Torsi dinamis dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_D = F \cdot r \quad (2.11)$$

Dimana:

- F : Gaya yang bekerja pada poros turbin (N)
 r : Jari-jari silinder yang menerima beban (m)

Berdasarkan mekanisme dari *Brake Dynamometer* pada gambar 2.5, gaya yang bekerja pada poros turbin dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F = (m - s)g \quad (2.12)$$

Dimana:

- m : massa pemberat (kg)
 s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
 g : percepatan gravitasi (m/s²)

Sehingga didapatkan perumusan Torsi Dinamis dengan mensubstitusi persamaan (2.12) ke persamaan (2.11) sebagai berikut:

$$T_D = (m - s) g r \quad (2.13)$$

2.10 Daya Turbin Aktual (*Mechanical Power*)

Daya turbin aktual atau Mechanical Power pada turbin angin Savonius dihasilkan oleh torsi dinamis pada poros yang berputar dan kecepatan rotasinya. Daya turbin aktual dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini:

$$P_m = T_D \cdot \omega \quad (2.14)$$

Dimana T merupakan torsi dinamis atau mechanical torque dengan satuan N.m dan ω adalah kecepatan angular dari poros turbin dengan satuan rad/s. Kecepatan angular dapat dihitung dengan persamaan berikut dengan n dalam rumus dibawah merupakan putaran dari poros dalam satuan rpm:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.15)$$

2.11 Coefficient of Power

Coefficient of Power (CoP) adalah suatu parameter yang digunakan untuk menentukan performa yang dimiliki oleh Turbin Angin Savonius. *Coefficient of Power* merupakan perbandingan daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius terhadap daya yang

diberikan oleh angin, atau perbandingan antara daya aktual turbin dengan daya teoritisnya. Semakin besar nilai CoP maka semakin besar pula daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. CoP dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_m}{P_w} \quad (2.16)$$

$$CoP = \frac{T_D \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (2.17)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.15), maka rumus CoP dapat dituliskan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{2(m-s)gr\omega}{\rho A U^3} \quad (2.18)$$

Dimana :

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

2.12 Tip Speed Ratio dan Coefficient of Moment

Tip Speed Ratio (λ) adalah perbandingan antara kecepatan tangensial turbin terhadap kecepatan angin (Akwa et al 2012). Tip Speed Ratio dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U} \quad (2.19)$$

Dimana:

λ : Tip Speed Ratio

ω : Kecepatan sudut turbin (rad/s)

U : Kecepatan angin (m/s)

R : Jari-jari sudu turbin (m) = $\frac{L}{2}$

Dimana L merupakan lebar dari turbin angin Savonius, sehingga persamaan 2.19 menjadi:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot L}{2U} \quad (2.20)$$

Sedangkan *Coefficient of Moment* (C_M) adalah perbandingan antara torsi actual dengan torsi teoritisnya. Persamaan *Coefficient of Moment* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$C_M = \frac{T_D}{T_{Teoritis}} \quad (2.21)$$

Dimana Torsi Teoritis memiliki rumus sebagai berikut:

$$T_{Teoritis} = \frac{P_w}{\omega} = \frac{1}{2} \rho A U^2 R \quad (2.22)$$

Sehingga *Coefficient of Moment* dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$C_M = \frac{2.T_D}{\rho A U^2 R} \quad (2.23)$$

Dengan mensubstitusi $R = L/2$, maka persamaan 2.23 menjadi:

$$C_M = \frac{4.T_D}{\rho A U^2 L} \quad (2.24)$$

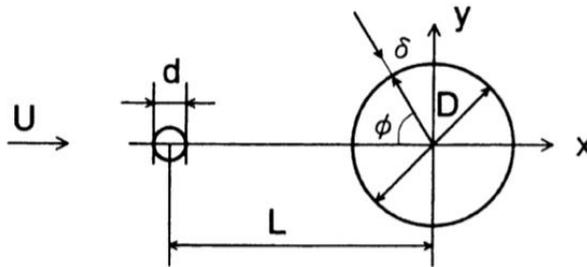
2.13 Penelitian Terdahulu

Dalam menunjang penelitian ini, dibutuhkan beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut antara lain sebagai berikut:

2.13.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu

Penelitian pemberian silinder pengganggu didepan silinder utama dilakukan oleh **Tsutsui & Igarashi (2002)**. Diameter silinder utama (D) sebesar 40 mm dan diameter silinder pengganggu (d) yang bervariasi sebesar 1 mm hingga 10 mm. Jarak antara pusat silinder utama dengan pusat silinder pengganggu (L) sebesar 50 mm hingga 120 mm. Pada penelitian ini, Reynold Number yang digunakan yaitu 1.5×10^4 hingga 6.2×10^4 dengan kecepatan free stream (U) yang

bervariasi dari 4 m/s hingga 24 m/s. Penelitian ini menggunakan low-speed wind tunnel dengan tinggi 400 mm, lebar sebesar 150 mm dan panjang sebesar 800 mm. Distribusi tekanan disekitar silinder utama dan silinder pengganggu diukur dengan menggunakan manometer. Gambar 2.8 berikut ini adalah geometri dari benda uji yang dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi. Hasil dari penelitian yang telah dilakukan oleh Tsutsui & Igarashi menyatakan bahwa terjadi penurunan nilai *pressure drag coefficient* seiring dengan meningkatnya *Reynold Number* dan d/D serta seiring dengan menurunnya L/D .

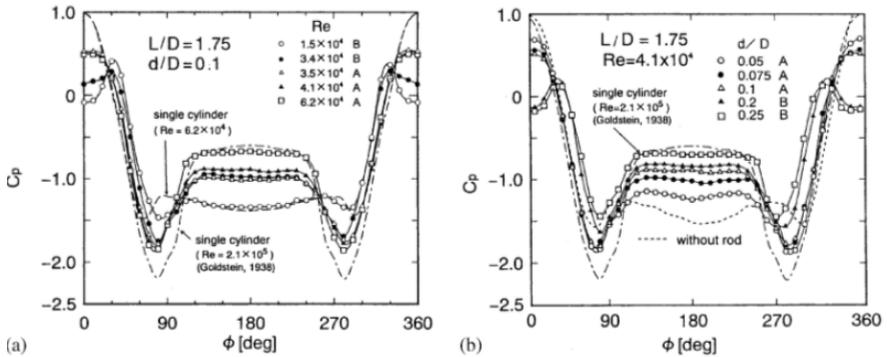


Gambar 2. 9 Geometri Benda Uji (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Pada gambar 2.10 (a) percobaan dilakukan dengan variasi Bilangan *Reynolds* yang dilakukan pada $L/D = 1.75$ dan $d/D = 0.1$. Dapat dilihat bahwa grafik tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_p maksimum yaitu sebesar 1 yang terjadi pada titik stagnasi dengan $\phi = 0^\circ$ dan nilai C_p minimum terjadi pada ϕ sekitar $70-80^\circ$ kemudian nilai C_p naik seiring dengan bertambahnya nilai ϕ dan setelah mencapai titik separasi nilai C_p mulai konstan pada $\phi = 110-180^\circ$ dengan nilai C_p berkisar antara -1.3 hingga -1.4. Sedangkan untuk grafik dengan silinder pengganggu, pada titik stagnasi dengan $\phi = 0^\circ$ nilai Pressure Coefficient (C_p) maksimum pada sisi depan silinder sirkular utama menurun hingga 0.5 seiring dengan menurunnya bilangan *Reynolds*, selain itu nilai C_p minimum terjadi pada $\phi = 70-$

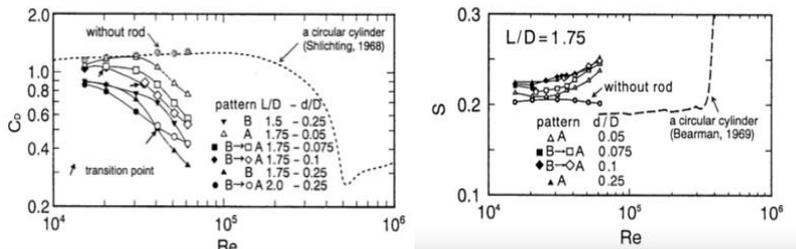
90° dan nilai C_p meningkat setelah mencapai titik separasi, pada grafik dapat terlihat bahwa titik separasi mundur pada θ sekitar 115-120° serta grafik dengan penambahan silinder pengganggu berada diatas grafik tanpa silinder pengganggu. Dalam hal ini dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu didepan silinder utama dengan variasi bilangan *Reynolds* yang semakin meningkat dapat memundurkan titik separasi dan *wake* semakin menyempit serta tekanan dibelakang silinder akan meningkat.

Sedangkan pada grafik 2.10 (b) percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder sirkular utama yang dilakukan pada L/D sebesar 1.75 dan pada bilangan *Reynold* konstan sebesar 4.1×10^4 . Dapat dilihat pada grafik bahwa nilai C_p akan meningkat seiring dengan bertambahnya d/D . Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan nilai d/D maka akan semakin memundurkan titik separasi dan *wake* yang terjadi juga akan semakin mengecil. Grafik distribusi *pressure coefficient* pada silinder sirkular dijelaskan pada gambar 2.10 (a) dan (b) berikut ini.



Gambar 2. 10 Grafik Distribusi Pressure Coefficient (C_p) pada silinder sirkular (a) Pengaruh variasi bilangan Reynolds (b) Pengaruh variasi d/D (Tsutsui & Igarashi, 2002)

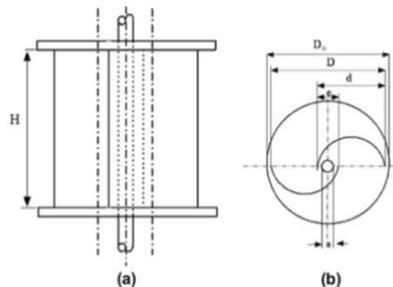
Pada gambar 2.11 berikut ini didapatkan kondisi optimum penurunan harga *pressure drag coefficient* (C_D) diperoleh pada $d/D = 0.25$; $L/D = 2$ untuk $Re < 4.1 \times 10^4$ dan diperoleh C_D sebesar 73% dibandingkan dengan silinder tanpa silinder pengganggu. Sedangkan penurunan *total pressure drag coefficient* (C_{Dt}) didapatkan $L/D = 1.75$ pada $Re \geq 4.1 \times 10^4$ serta didapatkan C_{Dt} sebesar 63% dibandingkan dengan silinder tanpa pengganggu.



Gambar 2. 11 (a) Strouhal Number (b) Pressure Drag Coefficient (C_D) (Tsutsui & Igarashi, 2002)

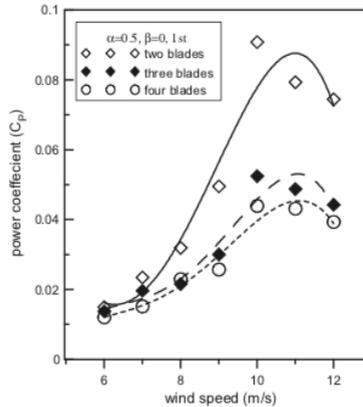
2.13.2 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Variasi Geometri

Penelitian dengan tujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan memvariasikan geometrinya dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**. Geometri turbin angin *Savonius* yang divariasikan dalam penelitian ini antara lain jumlah dari *blade*, jumlah *stage*, *overlap ratio*, *aspect ratio* dan ada atau tidaknya *end plate*. Jarak *exit wind tunnel* dengan *Savonius Rotor* sekitar 125 cm dengan kecepatan angin yang dihasilkan *wind tunnel* yaitu sekitar 0 hingga 13 m/s. Parameter dalam penelitian ini antara lain jumlah *blade* yaitu dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b); jumlah *stage* yaitu *single stage* (1st) dan *double stage* (2st); *overlap ratios* (β) yaitu 0, 0.2, 0.25, 0.3 dan 0.35; *aspect ratio* (α) yaitu 0.5, 1, 2, 4, dan 5. Blade dari Savonius Rotor terbuat dari bahan PVC dengan diameter yang berbeda yaitu 0.3, 0.2, 0.1 dan 0.8 sedangkan *End Plate* terbuat dari material kayu dengan ketebalan 2.5 mm dimana diameter dari *end plate* (D_o) 10% lebih besar dari diameter rotor turbin angin *Savonius*. *Shaft* yang digunakan terbuat dari besi dengan diameter 14 mm dan dengan panjang 62 cm. Skematika turbin angin *Savonius* yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.12 berikut ini



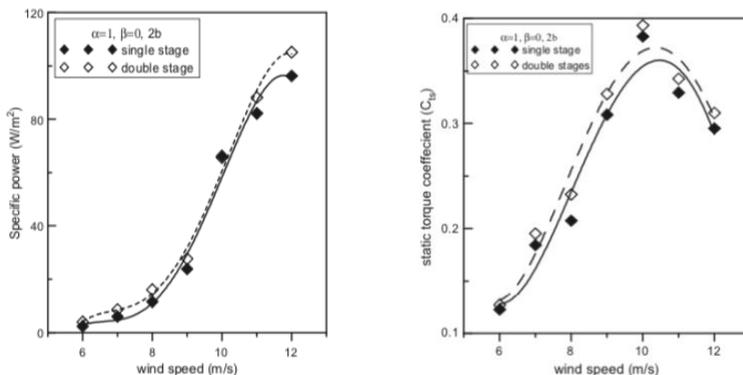
Gambar 2. 12 Skematika single-stage rotor turbin angin Savonius (a) elevation view; (b) plan view (Mahmoud et al, 2010)

Dari penelitian yang dilakukan didapatkan beberapa hasil yang dijelaskan pada grafik-grafik dibawah ini. Berikut ini merupakan pengaruh jumlah blade/ sudu dari turbin angin *Savonius* terhadap performanya:



Gambar 2. 13 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power (CoP) terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga dan Empat Sudu (Mahmoud et al, 2010)

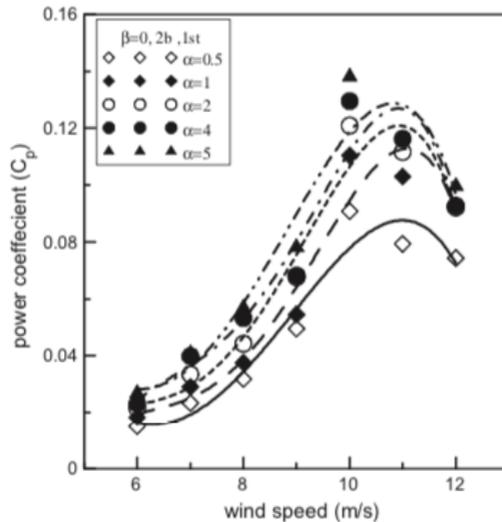
Gambar 2.13 diatas ini menunjukkan grafik hubungan antara *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin *Savonius* dengan dua, tiga dan empat sudu dengan *aspect ratio* sebesar 0.5, *overlap ratio* sebesar 0 dan untuk *single-stage rotor*. Dari grafik terlihat jelas bahwa *coefficient of power* yang paling tinggi didapat pada turbin angin *Savonius* dengan jumlah *blade* sebanyak dua buah. Hasil dari penelitian ini digambarkan dengan grafik pada gambar 2.14 berikut ini:



Gambar 2. 14 Grafik Hubungan antara Specific Power dan Static Torque Coefficient terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius untuk Single Stage dan Double Stages (Mahmoud et al, 2010)

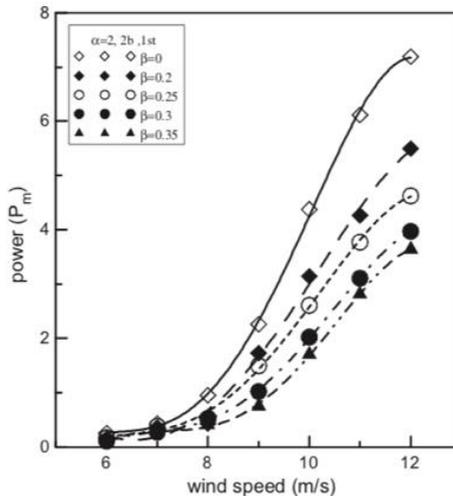
Hal tersebut disebabkan karena total gaya drag pada sudu turbin angin *Savonius* yang berjumlah dua lebih besar dibandingkan dengan tuga dan empat sudu. Selanjutnya yaitu penjelasan mengenai pengaruh jumlah *stage* terhadap performansi turbin angin *Savonius*. Gambar 2.14 diatas merupakan grafik hasil penelitian yang dilakukan untuk *single stage rotor* dan *double stages rotor* turbin angin *Savonius* dengan *aspect ratio* sebesar 1 dan *overlap ratio* sebesar 0 dengan turbin yang menggunakan dua sudu (2b). Dari grafik terlihat bahwa grafik *double stages rotor* berada sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan grafik *single stage rotor*. Hal ini menunjukkan bahwa *specific power* yang dihasilkan turbin angin *Savonius* dengan *double stages rotor* lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* yang menggunakan *single stage rotor* dan grafik hubungan *Static Torque Coefficient* untuk *double stage rotor* juga berada diatas grafik *single stage rotor* hal ini mengindikasikan bahwa *static torque coefficient* untuk *double stages rotor* lebih tinggi dibandingkan dengan static torque

untuk *single stage rotor*. Hasil penelitian selanjutnya yaitu mengenai pengaruh dari *overlap ratio* yang digambarkan pada gambar 2.15 dibawah ini.



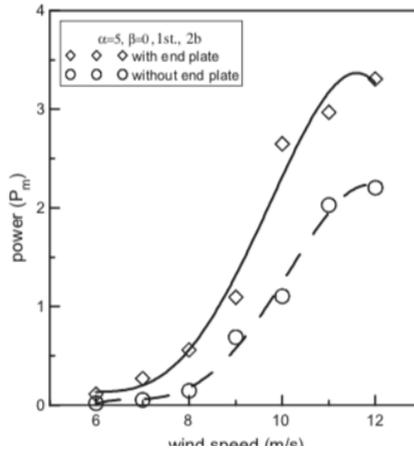
Gambar 2. 15 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio (Mahmoud et al, 2010)

Pada penelitian ini variasi *aspect ratio* yang digunakan yaitu antara 0.5 hingga 5 lebih tepatnya yaitu 0.5: 1; 2; 4; dan 5. Grafik 2.15 menunjukkan hubungan antara *coefficient of power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin *Savonius* dengan *overlap ratio* sebesar 0 untuk dua sudu turbin (2b) dan *single stage rotor*. Hasil dari grafik tersebut adalah turbin angin *Savonius* dengan *aspect ratio* sebesar 5 memiliki nilai *coefficient of power* yang paling tinggi. Selain itu, dari grafik juga dapat disimpulkan bahwa nilai *coefficient of power* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya *aspect ratio*. Hasil dari penelitian ini yang selanjutnya yaitu pengaruh *overlap ratio* terhadap performa turbin angin *Savonius*. Grafik hasil percobaan tersebut digambarkan pada gambar 2.16 dibawah ini:



Gambar 2. 16 Grafik Hubungan antara Mechanical Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio (Mahmoud et al, 2010)

Pada penelitian ini variasi *overlap ratio* yang digunakan yaitu antar 0 hingga 0.35 dimana lebih tepatnya yaitu 0; 0.2; 0.25; 0.3; dan 0.35. Grafik pada gambar 2.16 mengilustrasikan hubungan antara *Mechanical Power* terhadap kecepatan angin pada turbin angin *Savonius* dengan *aspect ratio* sebesar 2 dengan menggunakan sudu berjumlah dua buah dan untuk *single stage rotor*. Dari grafik tersebut terlihat jelas bahwa turbin angin dengan *overlap ratio* sebesar 0 memiliki *mechanical power* yang paling tinggi dibandingkan dengan *overlap ratio* sebesar 0.2; 0.25; 0.3; dan 0.35. Penelitian ini juga meneliti mengenai pengaruh pemberian end plate pada turbin angin *Savonius*. Hasil pada penelitian tersebut dijelaskan oleh grafik pada gambar 2.17 dibawah ini:



Gambar 2. 17 Grafik Hubungan Mechanical Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan ada atau tidak adanya End Plate (Mahmoud et al, 2010)

Pada penelitian ini spesifikasi turbin angin *Savonius* yang dipakai yaitu turbin angin dengan dua *blade*/sudu dan untuk *single stage rotor* dengan *aspect ratio* sebesar 5 dan *overlap ratio* sebesar 0. Dari grafik terlihat bahwa grafik dengan menggunakan *endplate* memiliki nilai *mechanical power* yang lebih tinggi karena grafiknya berada diatas grafik tanpa menggunakan *endplate*.

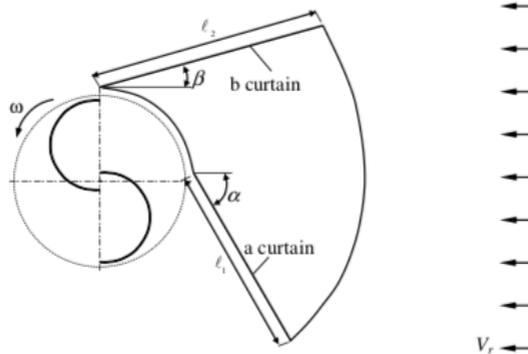
Penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al dengan adanya berbagai variasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Beberapa kesimpulan yang didapatkan pada penelitian ini yaitu, turbin angin *Savonius* dengan dua *blade* (2b) memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* yang menggunakan tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b), turbin angin *Savonius* dengan *end plate* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada turbin angin *Savonius* tanpa menggunakan *end plate*, turbin angin *Savonius* dengan *double stage rotor* memiliki performansi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* dengan *single stage rotor*. Rotor turbin *Savonius* tanpa *overlap ratio* (β) lebih baik jika dibandingkan dengan menggunakan *overlap ratio* (β) serta dalam penelitian ini semakin meningkatnya

nilai *aspect ratio* (α) maka semakin meningkat pula *Power Coefficient* dari turbin angin *Savonius*.

2.13.3 Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Plat Datar

Penelitian dengan menggunakan pengganggu aliran berupa plat datar untuk meningkatkan efisiensi Turbin Angin *Savonius* dilakukan oleh **Altan et al (2008)**. Penelitian ini memperkenalkan penambahan penghalang pada rotor berupa dua plat datar atau disebut *Curtain Arrangement* bertujuan untuk meningkatkan unjuk kerja dari turbin angin *Savonius*. Penambahan penghalang ini ditempatkan di depan *Returning Blade* dan plat lainnya diletakkan didepan *Advancing Blade*. Pemasangan *Curtain* ini bertujuan pula untuk mencegah terjadinya torsi negatif. Torsi negatif ini menyebabkan *Savonius* tidak mempunyai *Self-Starting*. Dalam penelitian ini menggunakan empat variabel yaitu panjang dari *curtain blade* (l_1 dan l_2) dan variasi sudut *blade* (α dan β), dalam hal ini untuk panjang dari curtain blade terdapat tiga variasi yaitu *curtain 1*, *curtain 2*, dan *curtain 3* dimana *curtain 1* memiliki nilai panjang yang paling besar. Variasi sudut α yaitu 30° hingga 60° serta variasi sudut β yaitu 0° hingga 30° dengan kenaikan 5° . Kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar 7 m/s dengan *Reynold Number* 1.5×10^5 dengan jarak *exit wind tunnel* dengan *Savonius Rotor* (L) sekitar 5 m.

Skema pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.18 dibawah ini:



Gambar 2. 18 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Plat Datar Pengganggu (Altan et al, 2008)

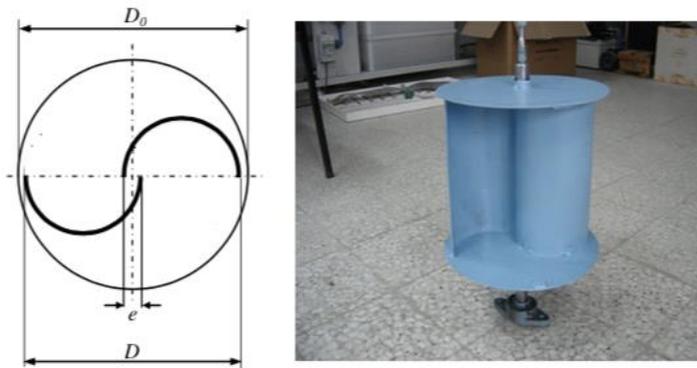
Variasi-variasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2. 2 Variasi Panjang Plat Pengganggu (ℓ_1) dan Plat Pengarah (ℓ_2) (Altan et al, 2008)

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

Geometri turbin angin *Savonius* pada penelitian ini digambarkan pada gambar 2.19 dibawah ini. Diameter rotor (D) dan ketinggian rotor (H) yang digunakan yaitu sebesar 32 cm dan berdasarkan pada nilai optimum dari rasio e/d sebesar 0.15; *gap distance* (e) sebesar 2.6 cm. Ketebalan dari blade turbin angin *Savonius* pada penelitian ini yaitu sebesar 2 mm dengan dua *end plate* pada sisi atas dan

bawah yang terbuat dari lembaran baja dengan ketebalan 4 mm dengan *plate diameter* (D_0) sebesar 35.2 cm. Poros dari rotor turbin angin *Savonius* disuport pada bagian atas dan bawah dengan menggunakan *ball bearing* dengan tujuan untuk meminimalisir gaya gesek. Berikut ini merupakan geometri turbin angin *Savonius* pada penelitian Altan et al.

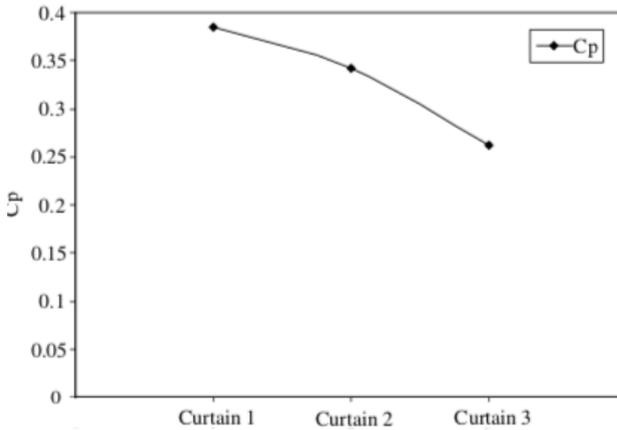


Gambar 2. 19 Geometri Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008)

Pada penelitian ini untuk panjang curtain yang berbeda untuk ketiga *curtain arrangement* yang telah dituliskan pada tabel 2.2 diatas menghasilkan nilai *power coefficient* yang berbeda, dimana nilai *power coefficient* tertinggi terjadi pada *curtain 1*. Gambar 2.20 dan tabel 2.3 dibawah ini merupakan grafik yang menunjukkan nilai *power coefficient* yang paling tinggi didapat pada *curtain 1*.

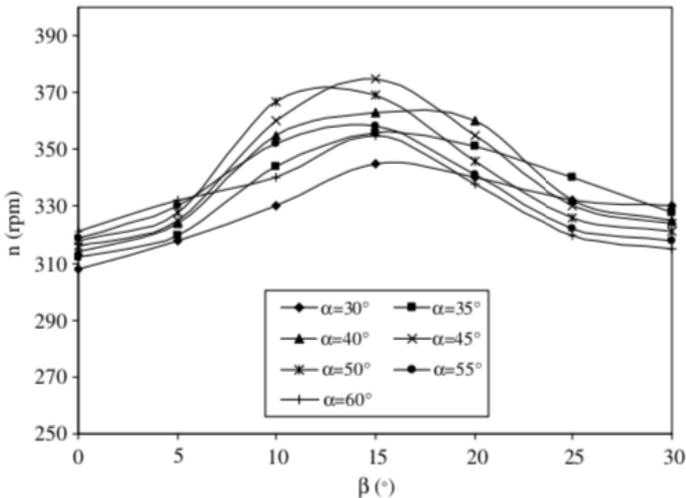
Tabel 2. 3 Hasil Power Coefficient pada curtain 1,2, dan 3
(Sumber: Altan et al, 2008)

Type of curtain arrangement	C_p
Curtain 1	0.38533
Curtain 2	0.34154
Curtain 3	0.26273



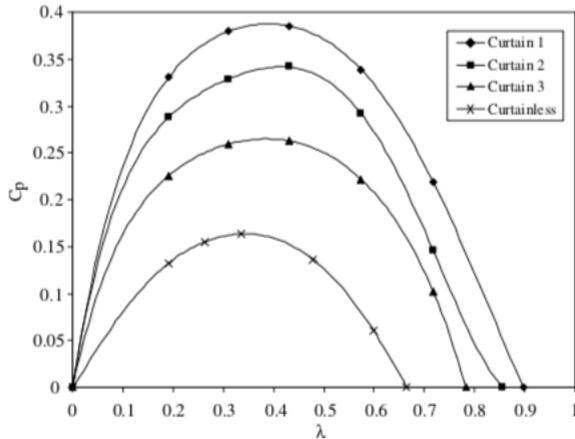
Gambar 2. 20 Pengaruh panjang Curtain terhadap Power Coefficient pada Rotor Turbin Angin Savonius (Altan et al, 2008)

Selain pengaruh panjang curtain terhadap *power coefficient* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*, *curtain angle* atau variasi sudut *blade* (α dan β) juga dapat dipengaruhi oleh *rotational speed* pada rotor turbin angin *savonius*. *Curtain angle* paling optimum pada penelitian ini untuk *Curtain 1* didapatkan ketika $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Hal tersebut dibuktikan pada gambar grafik 2.20 dibawah ini:



Gambar 2. 21 Pengaruh Rotational Speed (n) terhadap Besar Sudut Plat atau Curtain Angle (α dan β) pada Curtain 1 (Altan et al, 2008)

Sedangkan gambar 2.22 dibawah ini merupakan grafik pengaruh panjang plat pengganggu terhadap nilai *coefficient of performance* (CoP) dengan variasi *tip speed ratio* (λ). Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai *coefficient of performance* tanpa plat pengganggu adalah sebesar 0.16 sedangkan pada penelitian ini dengan penambahan plat pengganggu menggunakan curtain 1 adalah yang paling optimum yaitu plat datar dengan l_1 sebesar 45 cm dan l_2 sebesar 52 cm dengan *curtain angle* $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dari penelitian ini didapatkan bahwa nilai *coefficient of performance* (CoP) dengan menggunakan plat pengganggu meningkat hingga mencapai 38.5%.

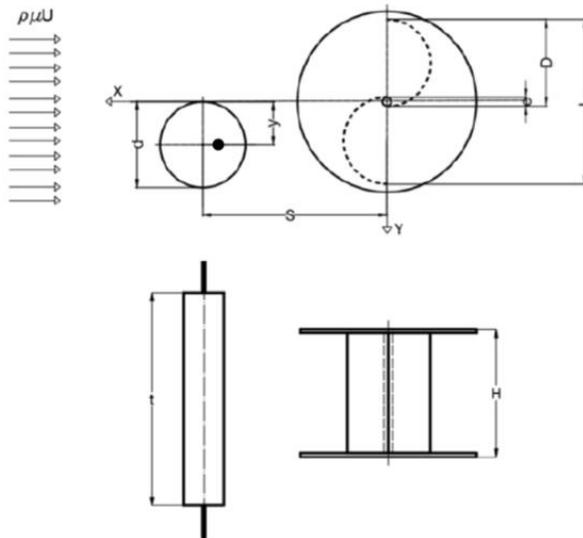


Gambar 2. 22 Pengaruh Panjang Plat Pengganggu Terhadap CoP dengan Variasi Tip Speed Ratio $\alpha=45^\circ$ dan $\beta=15$ (Altan et al, 2008)

2.13.4 Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

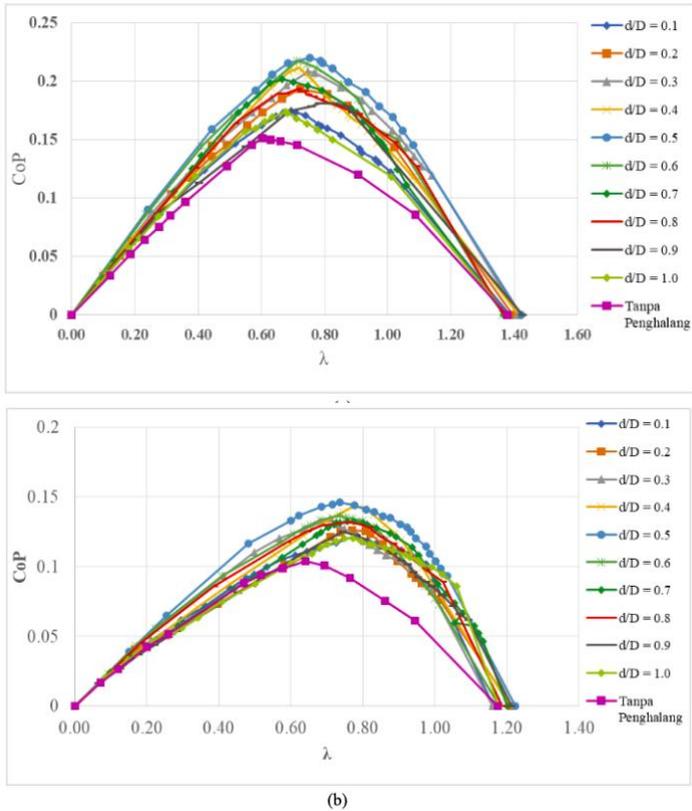
Penelitian untuk meningkatkan performa Turbin Angin Savonius dengan pemeberian silinder sirkular sebagai pengganggu aliran yang diletakkan didepan Returning Blade Turbin Angin Savonius dilakukan oleh **Muhammad Rizky Ramadhan (2019)**. Penelitian ini menggunakan dua buah sudu dengan dimensi yaitu, diameter sudu turbin (D) sebesar 167 mm; diameter end plate (D_0) sebesar 320 mm; tinggi rotor turbin (H) sebesar 298 mm; dan diameter poros (b) sebesar 19 mm. Silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi yaitu sebagai berikut: diameter (d) sebesar 83 mm; tinggi (t) sebesar 500 mm. Selain itu, penelitian ini menggunakan variasi rasio diameter pengganggu terhadap diameter silinder utama (d/D) sebesar 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 dengan jarak dari titik pusat turbin angin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,6 serta variasi bilangan *Reynolds* sebesar 97.000 dan 136.000. Tujuan pemberian silinder pengganggu didepan returning blade yaitu

untuk mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* turbin angin *savonius*. Skema pengujian pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.23 berikut ini:



Gambar 2. 23 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius
(Ramadhan, M Rizky 2019)

Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah penambahan silinder pengganggu didepan Returning Blad turbin angin Savonius dengan jarak $S/D = 1,6$ pada seluruh d/D efektif dalam meningkatkan nilai coefficient of ower maksimum di kedua variasi bilangan Reynolds. Pada Reynold Number 97.000 nilai CoP paling tertinggi terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan sebesar 44,74%. Untuk Reynolds Number 136.000 nilai CoP maksimum tertinggi juga terletak pada $d/D = 0,5$ dengan kenaikan CoP sebesar 40,48%. Berikut ini merupakan hasil dari penelitian yang telah dilakukan.

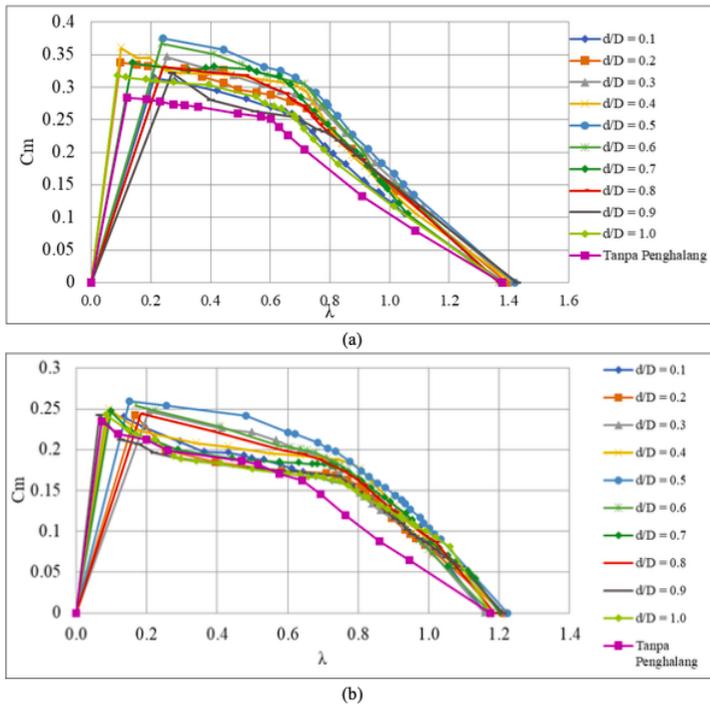


Gambar 2. 24 Grafik Perbandingan Coefficient of Power turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (CoP) dan tanpa silinder pengganggu (CoPo) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan $S/D = 1,6$ dan variasi $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9;$

Berdasarkan grafik diatas menunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan menggunakan silinder pengganggu pada kedua bilangan Reynolds memiliki nilai CoP yang lebih tinggi daripada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu di seluruh variasi d/D sehingga dapat dikatakan bahwa pemberian silinder pengganggu

pada jarak $S/D = 1,6$ efektif meningkatkan CoP turbin. Dari seluruh variasi d/D , nilai CoP maksimum tertinggi terjadi di $Re = 9,7 \times 10^4$ pada variasi $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,22 atau 22% pada TSR 0,64 dengan kenaikan sebesar 44,74% dari sebelum diberi penghalang. Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ nilai CoP maksimum tertinggi juga terjadi di $d/D = 0,5$ yaitu sebesar 0,146 atau 14,6% pada TSR 0,74 dengan kenaikan sebesar 40,38% dari sebelum diberi penghalang. Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa penambahan silinder pengganggu di depan returning blade turbin dapat menurunkan gaya drag pada returning blade sehingga selisih gaya drag antara advancing blade dan returning blade meningkat yang menyebabkan daya turbin meningkat. Serta didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Igarashi pada tahun 2002 bahwa pemberian silinder pengganggu di depan sebuah silinder dapat menurunkan gaya drag yang diterima oleh silinder tersebut.

Pada gambar 2.25 dibawah ini merupakan grafik nilai Coefficient of Moment (C_m) terhadap fungsi Tip Speed Ratio (λ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Reynold Number sebesar 97.000 dan 136.000. Analisa nilai coefficient of moment terhadap TSR ini dilakukan dengan bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dan $13,6 \times 10^4$ dan variasi ukuran silinder pengganggu d/D antara 0,1 sampai 1,0.

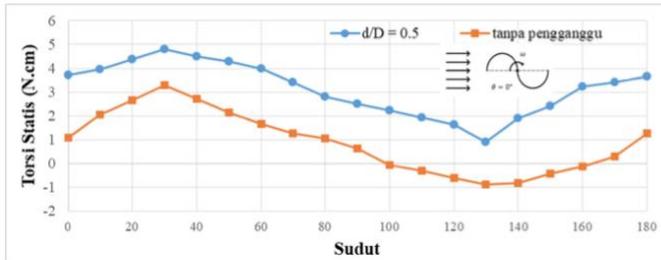


Gambar 2. 25 Grafik Perbandingan Coefficient of Moment turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (C_m) dan tanpa silinder pengganggu (C_{m0}) terhadap Fungsi Tip Speed Ratio (λ) dengan $d/D = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$; dan $1,0$ pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$

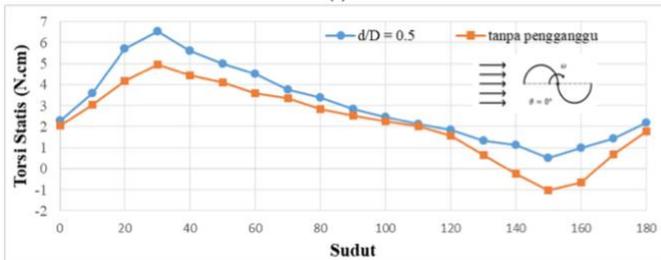
Dari gambar 2.25 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa grafik coefficient of moment terhadap tip speed ratio (TSR) memiliki trendline yang cenderung turun hingga mencapai tip speed ratio (TSR) maksimum pada nilai coefficient of moment minimum. Torsi dinamis maksimum didapat saat turbin angin Savonius diberikan beban maksimum, akibatnya disaat tersebut

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

Pada gambar 2.26 dibawah ini menunjukkan grafik nilai torsi statis (T_s) terhadap fungsi sudut (θ) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada Reynolds Number sebesar 97.000 dan 136.000.



(a)



(b)

Gambar 2. 26 Grafik Perbandingan Torsi Statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (T_s) dan tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) terhadap Fungsi Sudut (θ) dengan $d/D = 0,5$; $S/D = 1,6$; pada (a) $Re = 9,7 \times 10^4$ dan (b) $Re = 13,6 \times 10^4$ (Ramadhan, M.Rizky 2019)

Pada gambar 2.26 (a) dan (b) dapat dilihat bahwa kedua grafik membentuk grafik sinusoidal. Dari gambar 4.7 (a) dapat dilihat penambahan silinder pengganggu dengan ukuran $d/D = 0,5$ pada $Re = 9,7 \times 10^4$ efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 3,28 N.cm menjadi 4,79 N.cm pada sudut 30° serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum yaitu dari -0,9 N.cm menjadi 0,91 N.cm pada sudut 130°. Lalu pada $Re = 13,6 \times 10^4$ seperti pada gambar 4.7 (b)

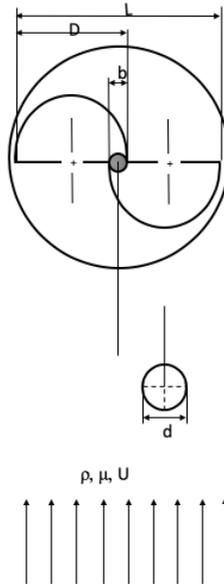
pemberian silinder pengganggu juga efektif menaikkan nilai torsi statis maksimum yaitu dari 4,96 N.cm menjadi 6,52 N.cm pada sudut 30° serta efektif juga untuk menaikkan nilai torsi statis minimum dari -1,04 N.cm menjadi 0,52 N.cm pada sudut 150°.

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

2.13.5 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Pemberian Pengganggu Didepan Returning Blade dengan Metode Simulasi

Penelitian untuk meningkatkan performa Turbin Angin Savonius dengan pemberian silinder sirkular sebagai pengganggu aliran yang diletakkan didepan Returning Blade Turbin Angin Savonius dilakukan oleh **Arnoldus Adro Pradhito (2017)**. Penelitian ini menggunakan dua buah sudu dengan dimensi yaitu, diameter sudu turbin (D) sebesar 101,6 mm; tinggi rotor turbin (H) sebesar 300 mm. Silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini memiliki dimensi yaitu sebagai berikut: diameter (d) sebesar 52 mm; tinggi (t) sebesar 500 mm. Selain itu, penelitian ini menggunakan variasi rasio diameter pengganggu terhadap diameter silinder utama (d/D) sebesar 0,5 dengan jarak dari titik pusat turbin angin sampai titik pusat silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,5 sampai dengan 2,4 serta variasi bilangan *Reynolds* sebesar 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 . Tujuan pemberian silinder pengganggu didepan returning blade yaitu untuk mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* turbin angin *savonius*. Penelitian ini menggunakan dua metode yaitu eksperimen serta metode simulasi yang dilakukan dengan

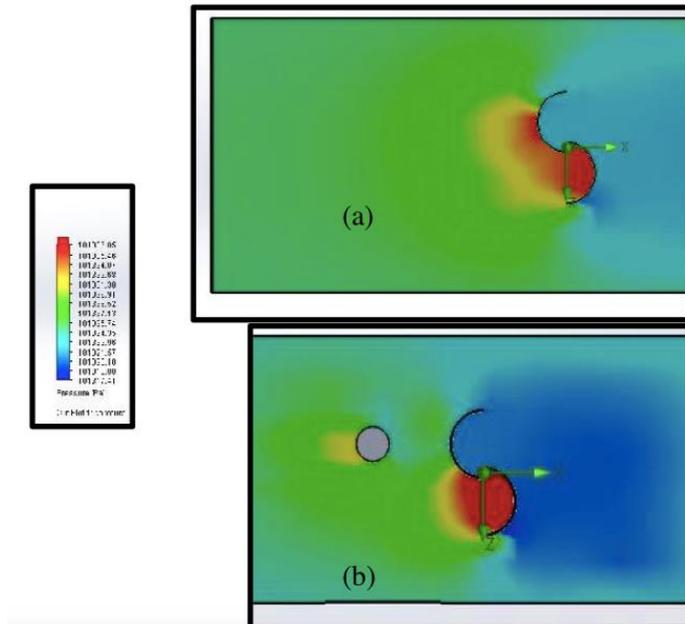
menggunakan software Solid Works. Skema pengujian pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.27 berikut ini:



Gambar 2. 27 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius
(Pradhito, Arnoldus A 2017)

Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah untuk semua bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini didapatkan jarak pusat returning blade turbin angin Savonius paling efektif adalah pada jarak $S/D = 1,7$ ditandai dengan nilai puncak (peak value) dari putaran, torsi statis dan Coefficient of Power turbin angin Savonius berpengganggu pada jarak S/D tersebut dan kondisi paling optimum didapat pada Reynolds Number sebesar 6×10^4 dengan kenaikan Coefficient of Power sebesar 5,31 kali lipat. Berikut ini

merupakan hasil yang didapatkan pada penelitian ini dengan metode simulasi.

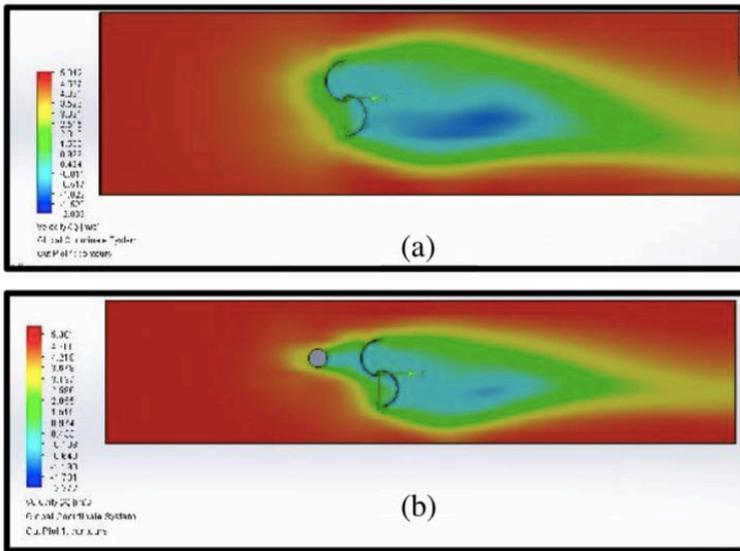


Gambar 2. 28 a) Distribusi Tekanan Pada Sudu Turbin Angin Savonius Tanpa Diberikan Silinder Pengganggu (b) Menunjukkan Distribusi Tekanan Pada Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak Optimal S/D 1,7 (Pradhito, Arnoldus A 2017)

Gambar 2.28 (a) menunjukkan distribusi tekanan pada sudu turbin angin savonius tanpa diberikan silinder pengganggu, dan 2.28 (b) menunjukkan distribusi tekanan pada turbin angin savonius setelah diberikan silinder pengganggu pada jarak optimal S/D 1,7. Setiap simulasi dilakukan pada bilangan

Reynolds dengan CoP optimum yaitu $Re = 6,0 \times 10^4$. Terlihat bahwa pada gambar 2.28 (a) nilai tekanan pada masing-masing sudu menunjukkan nilai yang tinggi. Sementara pada gambar 2.28 (b) terlihat secara kontras penurunan nilai tekanan pada sudu *returning blade*. Hal ini menjelaskan bahwa penempatan silinder pengganggu efektif menurunkan tekanan pada *returning blade* sehingga selisih tekanan pada kedua sudu bertambah.

Gambar 2.29 (a) dibawah ini menunjukkan distribusi kecepatan pada sudu turbin angin savonius tanpa diberikan silinder pengganggu, dan gambar 2.29 (b) menunjukkan distribusi kecepatan pada turbin angin savonius setelah diberikan silinder pengganggu pada jarak dengan CoP optimum yaitu $Re = 6,0 \times 10^4$. Terlihat bahwa pada gambar 4.15 (a) nilai kecepatan pada masing-masing sudu menunjukkan nilai yang berbeda dengan nilai kecepatan pada sudu *returning* lebih besar sebagai penyebab turbin berputar. Sementara pada gambar 4.15 (b) terlihat secara kontras penurunan nilai kecepatan pada sudu *returning blade*. Hal ini menjelaskan bahwa penempatan silinder pengganggu efektif mengganggu *shear boundary layer* -menurunkan Koefisien drag (C_d)- pada *returning blade* dan juga mengarahkan aliran menuju sudu *advancing*. Sehingga selisih kecepatan pada kedua sudu bertambah.

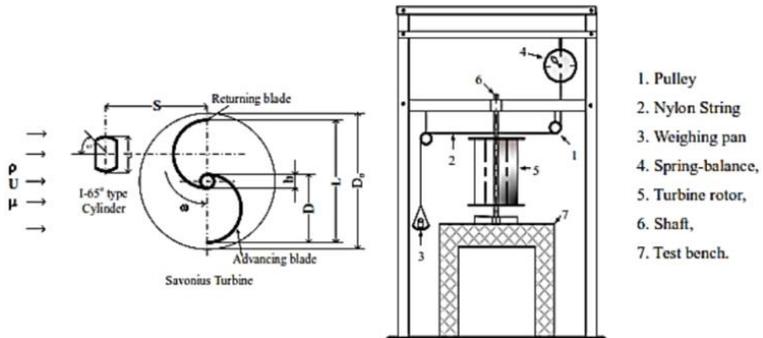


Gambar 2. 29 a) Distribusi Tekanan Pada Sudu Turbin Angin Savonius Tanpa Diberikan Silinder Pengganggu (b) Menunjukkan Distribusi Tekanan Pada Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu Pada Jarak Optimal S/D 1,7 (Pradhito, Arnoldus A 2017)

Pada gambar 2.29 (b) terjadi attachment aliran pada sudu *returning* setelah aliran diganggu oleh silinder. Hal ini diharapkan terjadi, dengan mengharapkan bahwa aliran yang menabrak sudu *returning* (*reattach*) memiliki kecepatan yang lebih besar sehingga dapat mengganggu *shear boundary layer* dan menurunkan nilai *coefficient drag*. Perbandingan antara luasan penampang tubin dan luasan penampang wind tunnel mencapai 18% dimana memberikan *blockage effect*. Dari penelitian yang dilakukan **Takeda (1992)**, *blockage effect* dapat mempengaruhi titik *reattachment*. Sehingga pada penelitian yang dilakukan Retno, terjadi keadaan dimana aliran yang terpecah oleh silinder

pengganggu mengalami *reattachment* yang prematur sehingga tidak memberikan dampak yang signifikan

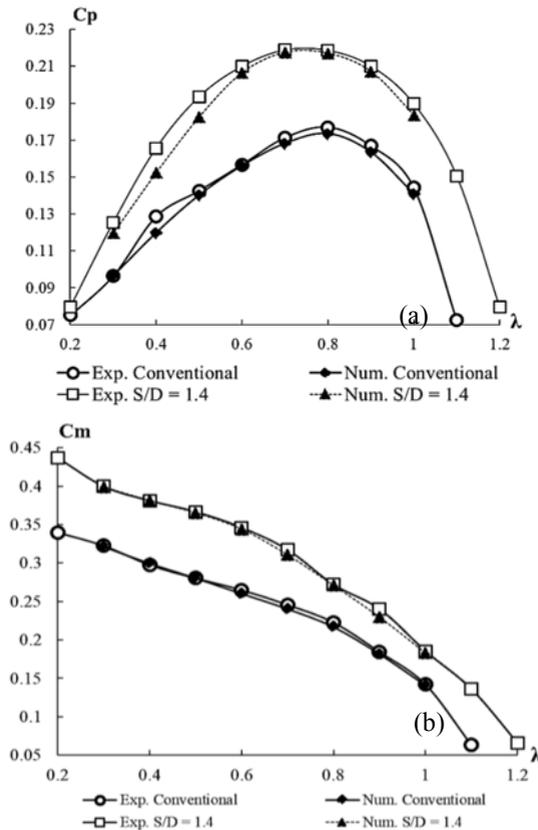
2.13.6 Penelitian Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius dengan Metode Simulasi



Gambar 2. 30 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius (Sakti, 2018)

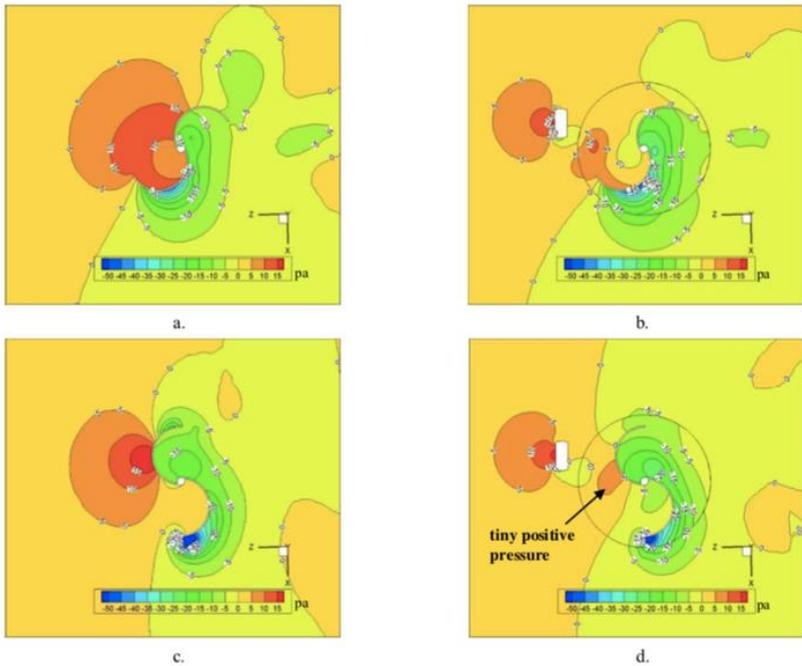
Penelitian untuk meningkatkan performansi turbin angin *Savonius* dengan memberikan pengganggu didepan *Returning Blade* dengan metode simulasi juga telah dilakukan oleh **Gunawan Sakti (2018)**. Penelitian ini menggunakan pengganggu berupa silinder yang dipotong 65° pada kedua sisi. Silinder pengganggu yang digunakan ini disebut *I-65° type cylinder*. Silinder ini digunakan karena diduga dapat menurunkan gaya drag pada sisi *returning blade* turbin angin *Savonius*. Penelitian ini menggunakan metode secara numerik dan secara eksperimen dengan dua kondisi yaitu tanpa menggunakan silinder pengganggu dan dengan kondisi menggunakan silinder pengganggu. Penelitian ini menggunakan silinder pengganggu dengan diameter sebesar 88,5 mm. Konstruksi turbin angin *Savonius* dibuat dengan material *polyvinyl chloride plastics* dengan diameter sudu turbin sebesar 165,2 mm dengan rasio

diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0.54. Rotor turbin angin yang digunakan memiliki tinggi (H) sebesar 294,4 mm dengan diameter poros sebesar 19 mm. Turbin angin Savonius pada penelitian ini diberi *endplate* dengan diameter (D_o) sebesar 333,7 mm. Selain itu penelitian ini dilakukan dengan menggunakan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1.4 dengan kecepatan *free stream* aliran sebesar 5 m/s atau dengan *Reynolds Number* sebesar $9,9 \times 10^4$ berdasarkan panjang karakteristik $L = 2D - b$. Metode numerik pada penelitian ini menggunakan *software CFD* dan *Ansys Fluent version 19.1* untuk menganalisis aliran pada turbin angin *Savonius*. Skema penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.30 diatas. Kesimpulan akhir dari penelitian ini adalah pemberian silinder pengganggu dengan tipe I-65° efektif dalam menunda titik separasi dan dapat mempersempit daerah *wake* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* menjadi menurun dan torsi dari turbin angin *Savonius* dapat meningkat. Turbin angin *Savonius* dengan pengganggu berupa silinder tipe I-65° dapat meningkatkan *Coefficient of Power* sebesar 23,61% dibandingkan tanpa menggunakan silinder pengganggu. Hasil dari eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini juga dibandingkan dengan metode numerik dan menghasilkan nilai yang tidak jauh berbeda dengan gap sebesar 4,52%. Silinder pengganggu dengan tipe I-65° juga efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin *Savonius* dengan nilai minimum sebesar 0,3 Ncm pada posisi *blade* 150°. Hasil penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.31 berikut ini.

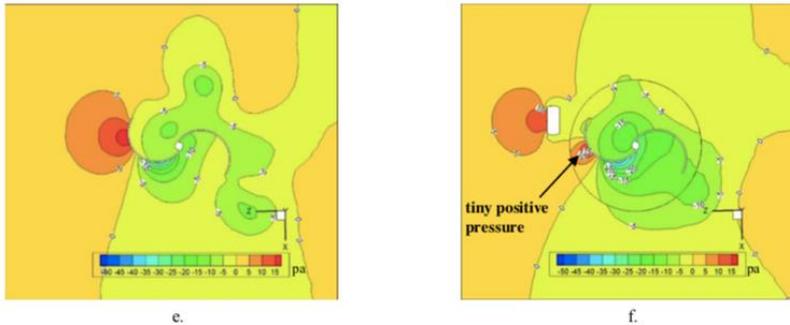


Gambar 2. 31 Grafik (a) Perbandingan Power Coefficient dan grafik (b) Coefficient of Moment dengan dan tanpa menggunakan pengganggu pada Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ (Sakti, 2018)

Gambar 2.31 (a) diatas merupakan hasil *Power Coefficient* untuk eksperimen dan numerik pada turbin angin *Savonius* dengan dan tanpa menggunakan pengganggu pada Reynlod Number $9,9 \times 10^4$. Grafik diatas merupakan grafik *Power Coefficient* (C_p) fungsi TSR dan *Coefficient of Moment* (C_m) fungsi TSR. Terlihat jelas bahwa turbin angin dengan silinder pengganggu tipe I-65° memiliki nilai *Power Coefficient* yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* konvensional atau tanpa menggunakan pengganggu. Nilai *Power Coefficient* paling maksimum turbin angin *Savonius* dengan silinder tipe I-65° didapat pada TSR 0,8 dengan nilai C_p sebesar 23,61%. Hasil dari Analisa numerik menyatakan bahwa nilai *power coefficient* paling maksimum adalah sebesar 25,32%. Sedangkan pada grafik 2.31 (b) merupakan hasil *coefficient of moment* untuk eksperimen dan numerik pada turbin angin *Savonius* dengan dan tanpa menggunakan pengganggu. Dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu dengan tipe I-65° menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* yang lebih tinggi dibandingkan turbin angin konvensional tanpa menggunakan silinder pengganggu tipe I-65°. Selain itu penelitian ini juga memberikan penjelasan mengenai *pressure distribution* dan *velocity distribution* yang terjadi pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Hasil analisa numerik pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 32 Perbandingan distribusi tekanan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder tipe I-65 pada TSR 0,8; $S/D = 1,4$ dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ (a) & (b) pada sudut 30° , dan (c) dan (d) pada sudut 90° (Sakti, 2018)



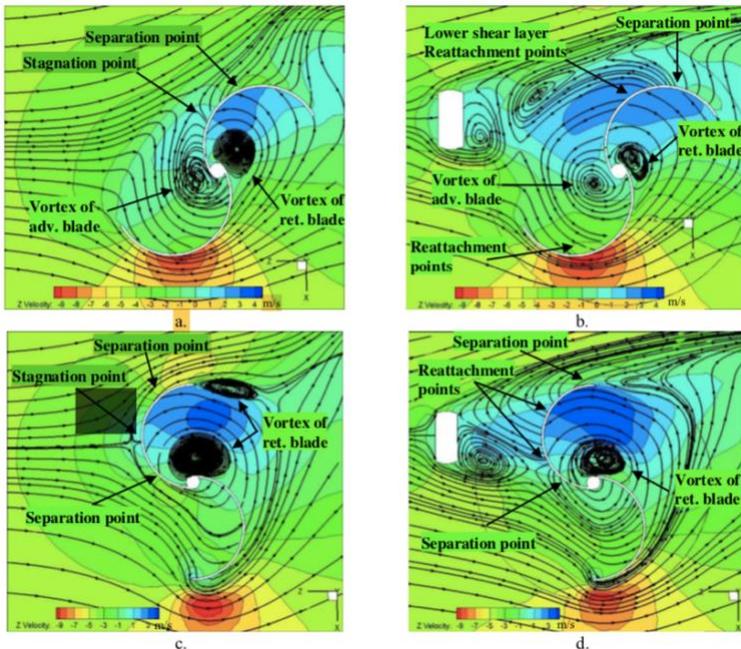
Gambar 2. 33 (a) dan (b) Perbandingan distribusi tekanan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder tipe I-65 pada TSR 0,8; $S/D = 1,4$ dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada 150° (Sakti, 2018)

Gambar 2.32 (a) merupakan turbin angin *Savonius* konvensional dengan posisi sudu 30° dan gambar 2.32 (b) merupakan turbin angin *Savonius* dengan silinder tipe I-65 $^\circ$ dengan posisi sudu 30° . Pada grafik (a) terlihat bahwa turbin angin *Savonius* konvensional pada sudut 30° memiliki nilai tekanan sebesar +10 pa dan terjadi pada sisi depan *returning blade* dan *advancing blade*, ketika silinder tipe I-65 $^\circ$ diletakkan didepan *returning blade* turbin angin *Savonius*, sisi *upstream* pada kedua *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade* menurun hingga +5 pa, dan pada waktu yang sama sisi *downstream returning blade* memiliki tekanan yang relatif *steady* seperti tanpa dipengaruhi silinder pengganggu. Adanya silinder pengganggu tersebut menyebabkan perbedaan tekanan pada sisi depan dan belakang *returning blade* sehingga dapat mereduksi gaya *drag* pada *returning blade* dan dapat meningkatkan torsi turbin angin *Savonius*. Hasil yang serupa juga didapat pada

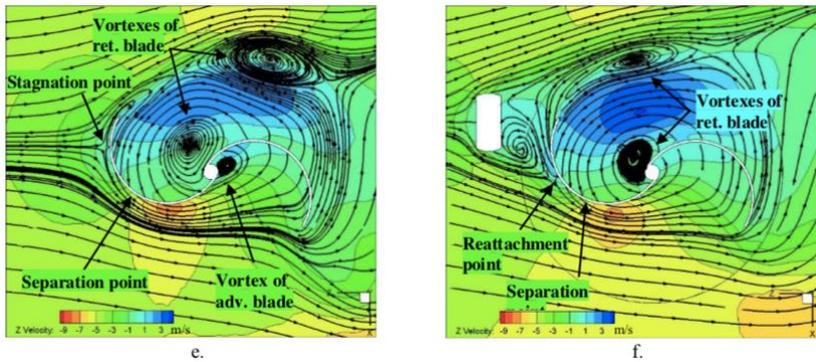
turbin angin pada posisi sudut 90° dan 150° , namun pada sudut 90° dan 150° kurang efektif dalam menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga menghasilkan nilai torsi yang lebih rendah dibandingkan pada sudut 30° hasil tersebut dapat yang dilihat pada grafik 2.33 (a) dan (b). Dalam hal ini pemberian silinder pengganggu tipe I- 65° efektif dalam menurunkan tekanan didepan *returning blade* turbin angin *Savonius* sehingga gaya *drag* pada sisi *returning blade* akan menurun dan selisih torsi dari kedua *blade* akan meningkat. Gambar 2.33 dibawah ini menjelaskan mengenai distribusi kecepatan aliran yang melewati turbin angin *Savonius* baik dengan silinder pengganggu maupun tanpa silinder pengganggu tipe I- 65° dengan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ dan pada tip speed ratio sebesar 0,8.

Gambar 2.34 (a) menunjukkan karakteristik aliran pada turbin angin *savonius* konvensional ketika $\theta = 30^\circ$ dimana titik stagnasi terjadi pada titik dipermukaan *returning blade*. Pada gambar 2.34 (b) menunjukkan bahwa pemberian silinder tipe I- 65° membentuk dua *shear layer* yaitu *upper shear layer* dan *lower shear layer* dimana *lower shear layer* jatuh pada permukaan *returning blade* dan relatif bergeser dari titik stagnasi turbin *savonius* konvensional. Pergerakan tersebut menyebabkan titik separasi menjadi tertunda dan dapat mereduksi luasan *wake* yang terbentuk dibelakang *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* turun yang menyebabkan torsi meningkat. Pada gambar 2.34 (c) dan (d) menunjukkan karakteristik aliran pada turbin angin *savonius* pada sudut $\theta = 90^\circ$. Pada turbin angin *savonius* konvensional, titik stagnasi berada tepat ditengah permukaan *returning blade*, dan dapat dilihat

pada gambar tersebut bahwa titik separasi pada kedua kondisi tersebut berada didekat titik stagnasi. Dalam hal ini peningkatan torsi dari turbin angin savonius pada posisi sudut $\theta = 90^\circ$ tidak sebesar ketika turbin angin Savonius berada pada sudut $\theta = 30^\circ$. Hal serupa juga terjadi ketika turbin angin Savonius berada pada sudut $\theta = 150^\circ$ dimana peningkatan torsi turbin angin Savonius tidak sebesar ketika turbin angin Savonius berada pada sudut $\theta = 30^\circ$, hal tersebut dapat dilihat pada grafik 2.35 (e) dan (f) dibawah ini.



Gambar 2. 34 Perbandingan distribusi kecepatan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder pengganggu tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada sudut (a) dan (b) 30° , (c) dan (d) 90° (Sakti, 2018)

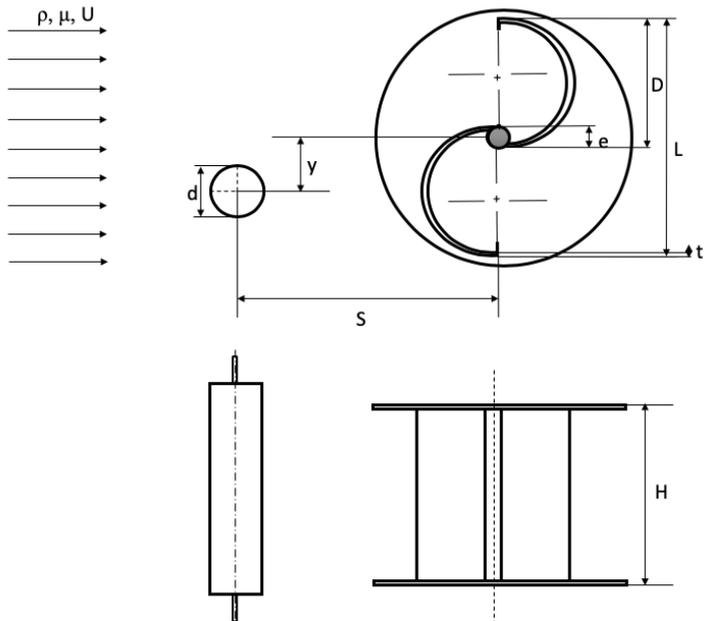


Gambar 2. 35 Perbandingan distribusi kecepatan pada turbin angin konvensional dengan turbin angin dengan silinder pengganggu tipe I-65 pada TSR 0,8; S/D = 1,4 dan Reynolds Number sebesar $9,9 \times 10^4$ pada sudut 150° (Sakti, 2018)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter yang Diukur

Parameter-parameter yang diperlukan untuk melakukan penelitian ini antara lain adalah, kecepatan fluida (U), densitas fluida (ρ), viskositas fluida (μ), diameter sudu turbin angin Savonius (D), diameter silinder pengganggu (d), diameter poros (e), jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat returning blade (S), kecepatan putaran turbin angin Savonius (S), putaran sudu turbin angin Savonius (ω) dan tinggi rotor turbin angin Savonius (H). Parameter-parameter pengujian dan skema penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Skema Penelitian Turbin Angin Savonius

Dimana:

U = kecepatan aliran udara (m/s)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

μ = viskositas udara (Ns/m^2)

D = diameter sudu turbin angin *Savonius* (m)

d = diameter silinder pengganggu (m)

e = diameter poros (m)

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

H = tinggi rotor turbin angin *Savonius* (m)

D_0 = diameter *end plate* (m)

ω = putaran sudu turbin angin *Savonius* (rad/s)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi dilakukan untuk dapat mengetahui parameter-parameter apa saja yang mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu yang memiliki diameter tertentu. Analisa dimensi dilakukan dengan metode Analisa *Buckingham Phi Theorem*.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Analisa dimensi untuk *Coefficient of Power* dilakukan dengan metode sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi Daya atau *Power*

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

Dimana jumlah parameter (n) = 10

Parameter-parameter tersebut antara lain adalah sebagai berikut:

P = *Power* (J/s)

ρ = Massa jenis udara (kg/m^3)

μ = Viskositas udara (Ns/m^2)

U = Kecepatan udara (m/s)

D = Diameter sudu Turbin Angin *Savonius* (m)

d = Diameter silinder pengganggu (m)

- S = Jarak antara pusat silibder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
 H = Tinggi turbin angin *Savonius* (m)
 e = Diameter poros (m)
 ω = Putaran sudu turbin angin *Savonius* (rad/s)
- Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis, Grup dimensi primer yang dipilih adalah massa (M), panjang (L), dan waktu (t)
 - Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih

Tabel 3. 1 Dimensi Primer Parameter CoP

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

- Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan. Parameter berulang yang dipilih yaitu ρ , U, dan D
 Jumlah parameter berulang (m) = r = 3
- Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang dihasilkan dari Analisa dimensi ini adalah = n – m = 10 – 3 = 7. Sehingga dari Analisa ini akan didapatkan 7 grup bilangan tanpa dimensi antara lain:

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

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

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

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

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

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

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

Dari Analisa dimensi diatas diperoleh grup bilangan tanpa dimensi sebagai berikut:

- π_1 = *Coefficient of Power*
- π_2 = Bilangan *Reynolds*
- π_3 = Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin *Savonius*
- π_4 = Rasio jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin *Savonius*
- π_5 = Rasio diameter poros dengan diameter turbin angin *Savonius*
- π_6 = Rasio tinggi turbin angin *Savonius* terhadap diameter turbin angin *Savonius*
- π_7 = *Tip Speed Ratio*

Sehingga hubungan antara grup bilangan tak berdimensi adalah sebagai berikut:

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

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

Pada penelitian ini terdapat variabel tetap dan variabel yang divariasikan, variabel tetap antara lain adalah $\frac{d}{D}, \frac{e}{D}, \frac{H}{D}$ dan $\frac{S}{D}$ sedangkan variabel yang divariasikan antara lain adalah $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}$. Variabel yang divariasikan tersebut digunakan untuk mengatuhi seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* Turbin Angin *Savonius*, sehingga hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Dimana nilai D pada *Reynolds Number* diatas sebanding dengan nilai L sehingga hubungan bilangan tak berdimensi dapat dituliskan sebagai berikut ini:

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

atau

$$CoP = f_4 (Re, TSR)$$

3.2.2 Analisa Dinensi untuk *Coefficient of Moment*

Analisa dimensi untuk *Coefficient of Moment* dilakukan dengan metode sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *Moment*

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

Dimana jumlah parameter (n) = 10

Parameter-parameter tersebut antara lain adalah sebagai berikut:

- | | |
|--------|--|
| M | = <i>Moment</i> (J) |
| ρ | = Massa jenis udara (kg/m ³) |
| μ | = Viskositas udara (Ns/m ²) |

- U = Kecepatan udara (m/s)
 D = Diameter sudu Turbin Angin *Savonius* (m)
 d = Diameter silinder pengganggu (m)
 S = Jarak antara pusat silibder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
 H = Tinggi turbin angin *Savonius* (m)
 e = Diameter poros (m)
 ω = Putaran sudu turbin angin *Savonius* (rad/s)
- Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisis, Grup dimensi primer yang dipilih adalah massa (M), panjang (L), dan waktu (t)
 - Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih

Tabel 3. 2 Dimensi Primer Parameter CM

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

- Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan. Parameter berulang yang dipilih yaitu ρ , U, dan D
 Jumlah parameter berulang (m) = r = 3
- Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang dihasilkan dari Analisa dimensi ini adalah = n – m = 10 – 3 = 7. Sehingga dari Analisa ini akan didapatkan 7 grup bilangan tanpa dimensi antara lain:

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

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

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

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

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

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

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

Dari Analisa dimensi diatas diperoleh grup bilangan tanpa dimensi sebagai berikut:

- π_1 = *Coefficient of Moment*
- π_2 = *Bilangan Reynolds*
- π_3 = Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin *Savonius*
- π_4 = Rasio jarak antara pusat turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin *Savonius*
- π_5 = Rasio diameter poros dengan diameter turbin angin *Savonius*
- π_6 = Rasio tinggi turbin angin *Savonius* terhadap diameter turbin angin *Savonius*
- π_7 = *Tip Speed Ratio*

Sehingga hubungan antara grup bilangan tak berdimensi adalah sebagai berikut:

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

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

Pada penelitian ini terdapat variabel tetap dan variabel yang divariasikan, variabel tetap antara lain adalah $\frac{d}{D}, \frac{e}{D}, \frac{H}{D}$ dan $\frac{S}{D}$ sedangkan variabel yang divariasikan antara lain adalah $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}$. Variabel yang divariasikan tersebut digunakan untuk mengatuhi seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Moment* Turbin Angin *Savonius*, sehingga hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Dimana nilai D pada *Reynolds Number* diatas sebanding dengan nilai L sehingga hubungan bilangan tak berdimensi dapat dituliskan sebagai berikut ini:

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

atau

$$C_M = f_4 (Re, TSR)$$

3.3 Peralatan

Pada penelitian ini terdapat berbagai macam peralatan yang dibutuhkan untuk menunjang suatu penelitian agar didapatkan hasil yang baik. Berikut ini merupakan peralatan-peralatan yang digunakan pada penelitian ini:

3.3.1 Axial Fan

Axial Fan pada penelitian ini digunakan sebagai sumber aliran udara dimana kecepatan angin yang dihasilkan digunakan untuk menguji performa turbin angin *Savonius*. *Axial Fan* yang digunakan adalah tipe CKE SPV-18. Gambar dan spesifikasi *axial fan* pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2 dan tabel 3.3 dibawah ini:



Gambar 3. 2 Axial Fan

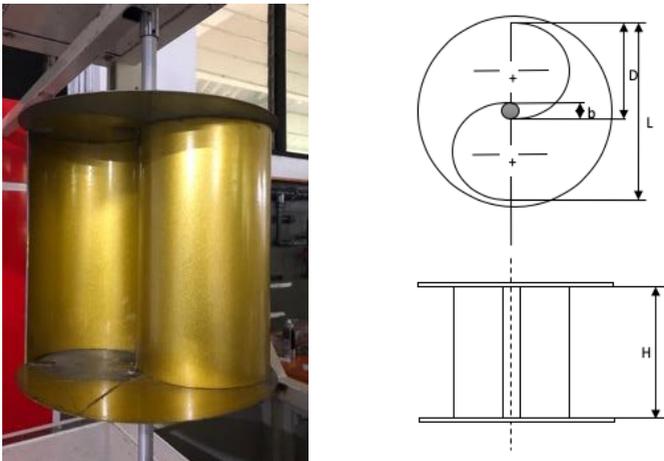
Tabel 3. 3 Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18

SPESIFIKASI	
<i>Diameter</i>	18 inch/ 450 mm
<i>Speed</i>	2850 rpm
<i>Air Flow</i>	4413 CFM
<i>Power</i>	1700 Watt

<i>Static Pressure</i>	520 Pa
<i>Phase</i>	1
<i>Voltage</i>	220-240

3.3.2 Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini menggunakan Turbin Angin *Savonius* dan dengan pengganggu berupa silinder sirkular. Gambar dan spesifikasi turbin angin *Savonius* dapat dilihat pada gambar 3.3 dan tabel 3.4 dibawah ini:



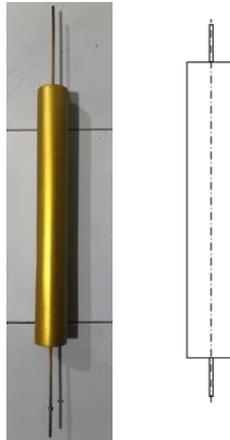
Gambar 3. 3 Skema Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 4 Spesifikasi Sudu Turbin Angin Savonius

SPESIFIKASI	
Diameter sudu turbin (D)	167 mm
Tinggi turbin (H)	298 mm
Lebar turbin ($L = 2D - e - 2t$)	309 mm
Diameter poros (e)	19 mm
Diameter <i>endplate</i> (D_o)	320 mm

Tebal <i>endplate</i>	1 mm
Tebal sudu turbin (x)	3 mm
Massa total turbin	1,546 kg
MATERIAL	
Sudu Turbin	Pipa PVC
<i>Endplate</i>	Aluminium Cladding 2024

Berikut ini merupakan gambar dan tabel spesifikasi silinder pengganggu yang digunakan pada penelitian ini:



Tabel

Gambar 3. 4 Skema Silinder Pengganggu
Spesifikasi Silinder Pengganggu

3. 5

SPESIFIKASI	
Diameter Silinder Pengganggu (d)	83 mm
Tinggi (h)	500 mm
Rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius (d/D)	0,5
Rasio jarak pusat turbin angin Savonius dengan pusat	1,6 & 1,7

silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D)	
--	--

3.3.3 Penyangga Turbin Angin Savonius

Penelitian ini menggunakan sebuah penyangga yang digunakan sebagai tempat peletakan rotor Turbin Angin Savonius dan peletakan silinder pengganggu. Skema dari penyangga turbin angin Savonius ditunjukkan pada gambar berikut ini



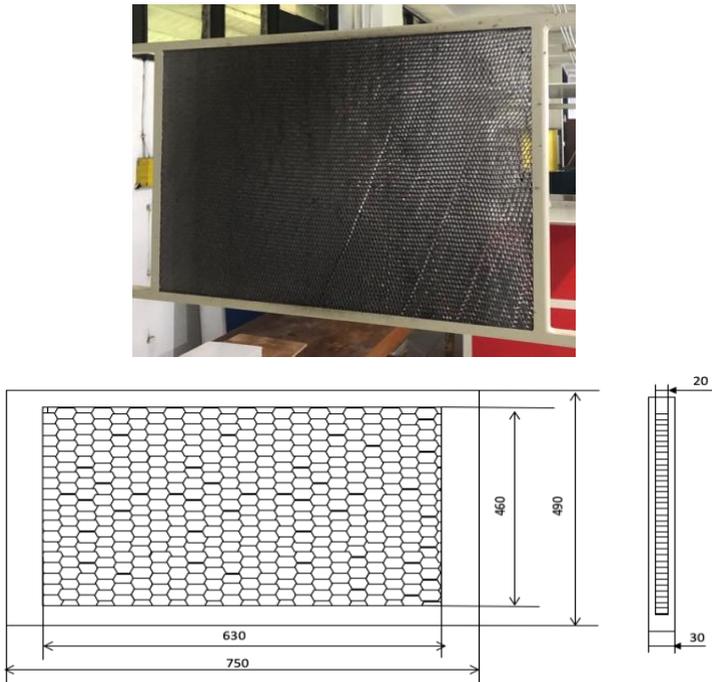
Gambar 3. 5 Instalasi Peralatan Penelitian

Keterangan:

1. Axial Fan
2. Honeycomb
3. Voltage Regulator
4. Penyangga Turbin Angin Savonius & Silinder Pengganggu
5. Silinder Pengganggu
6. Rotor Turbin Angin Savonius
7. Neraca Pegas

3.3.4 Honeycomb

Pada penelitian ini honeycomb berfungsi untuk membuat aliran angin yang berasal dari *Axial Fan* menuju benda uji menjadi aliran angin yang uniform. Skema dari *Honeycomb* dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. 6 Skema Honeycomb

Spesifikasi *honeycomb* yang digunakan dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3. 6 Spesifikasi Honeycomb

SPEKIFIKASI	
Panjang sisi frame	750 mm
Panjang sisi honeycomb	630 mm
Tinggi honeycomb	460 mm
Tinggi frame	490 mm
Tebal frame	30 mm
Tebal honeycomb	20 mm
Meshing size	0,0248 lubang/mm ²

3.3.5 Alat Ukur

Dalam menunjang penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*.

a. Tachometer

Tachometer adalah sebuah alat ukur yang dirancang untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan tipe Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA Seri HHT12. Gambar dan tabel spesifikasi dari tachometer dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3. 7 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3. 7 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 to 40 °C

b. Anemometer

Anemometer adalah sebuah alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Dalam penelitian ini, tipe anemometer yang digunakan yaitu **Omega HHT141 Digital Anemometer**. Pada anemometer pengukuran kecepatan angin dapat dilakukan dalam berbagai satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, km/h dan meter/s sedangkan pengukuran suhu udara dapat diukur dalam satuan °F dan °C.

Anemometer yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 3. 8 Digital Anemometer tipe Omega HHF141

Spesifikasi Digital Anemometer tipe Omega HHF141 dapat dilihat pada tabel 3.8 dibawah ini:

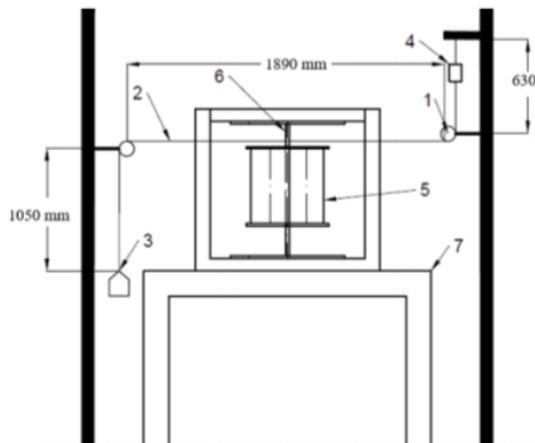
Tabel 3. 8 Spesifikasi Digital Anemometer tipe Omega HHF141

Spesifikasi	
Accuracy	AP275: +/- 1.0% of reading +/- 1 digit AP100: +/- 0.5% of F.S +0.75% of reading +1 digit
Resolution	0.01 m/sec
Display	0.5 inch LCD, 4 digits
Air Flow	
Range	Resolution
AP100	1.5 to 35.00 m/sec

2,5 inch	0.2 to 40.0 m/sec
Temperature	
Operating Type	Temperature
Instrument	0° to 50°C
Probes	-20 to 100°C

c. Brake Dynamometer

Brake Dynamometer merupakan suatu alat ukur yang dibuat secara manual yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis. Nilai torsi dinamis dari turbin angin *Savonius* tidak bisa didapatkan secara langsung melainkan dengan menggunakan perhitungan selisih massa pemberat dan nilai yang terbaca dari neraca pegas kemudian dikalikan dengan jari-jari sudu turbin. Skema *Brake Dynamometer* dapat dilihat pada gambar sebagai berikut:



Gambar 3. 9 Skematika Brake Dynamometer

Keterangan:

1. *Pulley*
2. Benang
3. Massa Pemberat
4. Neraca Pegas
5. Turbin Angin *Savonius*
6. *Disk*
7. Meja Penyangga

d. Torque Meter

Torque Meter adalah sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari poros Turbin Angin *Savonius*. *Torque Meter* yang digunakan pada penelitian ini adalah *Torque Meter* dengan tipe **LUTRON model TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm. Gambar dan Spesifikasi dari torque meter yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini:



Gambar 3. 10 Torque Meter LUTRON Model TQ-8800

Tabel 3. 9 Spesifikasi Torque Meter LUTRON Model TQ-8800

Display Unit/ Resolution				
Unit	Max Range	High Resolution	Low Resolution	Overload 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

e. Voltage Regulator

Voltage Regulator pada penelitian ini digunakan sebagai pengatur besar keluaran tenaga yang dibutuhkan. Tipe *voltage regulator* yang digunakan pada penelitian ini adalah **Voltage Regulator model TDGC 2J-3**. Gambar dan spesifikasi *voltage regulator* dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini:



Gambar 3. 11 Voltage Regulator

Tabel 3. 10 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC 2J-3

Spesifikasi	
Model	TDGC 2J-3
Input	110/220 V
Output	0 – 250 V
Frequency	50-60 Hz
I Max	4.8/12 A
Capacity	2 KVA

f. Neraca Pegas

Neraca Pegas pada penelitian ini berfungsi untuk mengukur nilai S dalam satuan gram yang digunakan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis pada *brake dynamometer*. Gambar serta spesifikasi dari neraca pegas yang digunakan dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini:



Gambar 3. 12 Neraca Pegas

Tabel 3. 11 Spesifikasi Neraca Pegas

Spesifikasi	
Merk	Nagata
Kapasitas Maksimal	3 kg
Ketelitian	10 gram

3.4 Langkah Pengukuran

Prosedur dan langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini dijelaskan dan dibahas secara runtut pada sub-bab prosedur serta flowchart penelitian dibawah ini:

3.4.1 Prosedur Penelitian Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis

Prosedur penelitian untuk mendapatkan data nilai torsi dinamis pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan peralatan-peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji yaitu turbin angin *Savonius* tanpa pengganggu pada *test section* didepan *axial fan*.
3. Melakukan pengukuran suhu lingkungan sekitar dengan menggunakan Termometer
4. Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin yang dibutuhkan.
5. Mengukur kecepatan angin awal dengan menggunakan Anemometer sesuai dengan data penelitian yaitu sebesar 3.8 m/s.
6. Setelah mendapatkan kecepatan angin yang *steady* dan *uniform*, kemudian mengukur putaran poros turbin angin *Savonius* tanpa beban dan tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan *Tachometer*
7. Mengukur torsi dinamis tanpa beban dan tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan *Brake Dynamometer*.

8. Menambahkan massa pemberat awal sebesar 6,2 gram, kemudian untuk kecepatan yang lebih tinggi kenaikan pembebanan sebesar 12,4 gram
9. Mengukur kecepatan putaran poros dengan *Tachometer*
10. Mengukur nilai massa yang terbaca pada neraca pegas untuk mendapatkan perhitungan nilai torsi dinamis.
11. Mengulangi langkah 8 hingga 10 hingga turbin angin *Savonius* berhenti berputar.
12. Mengulangi langkah 5 hingga 11 dengan mengubah kecepatan angin sebesar 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s.
13. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio jarak pusat Turbin Angin *Savonius* dengan pusat silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin *Savonius* (S/D) sebesar 1,6
14. Mengulangi langkah 5 hingga 11 dengan mengubah kecepatan angin sebesar 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s.
15. Mematikan *axial fan*.
16. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik putaran (n) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) dan fungsi kecepatan angin, grafik *Coefficient of Power* (CoP) dan *Coefficient of Moment* (C_M) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ).

3.4.2 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis

Prosedur penelitian untuk mendapatkan data nilai torsi statis pada poros Turbin Angin *Savonius* pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

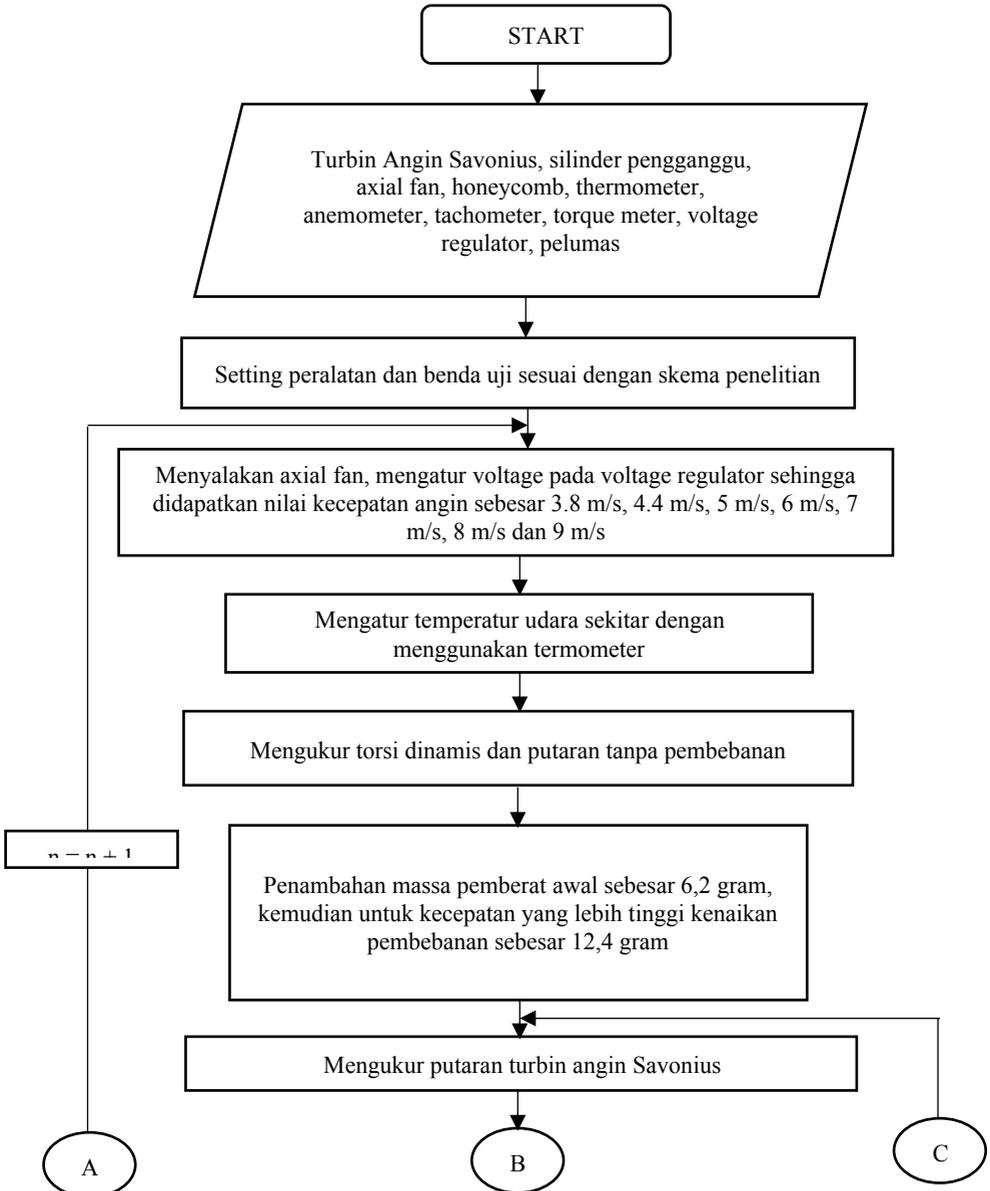
1. Menyiapkan peralatan-peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang benda uji yaitu turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu pada test section didepan *axial fan*.
3. Menentukan variasi sudut Turbin Angin *Savonius* (θ) sebesar 0°

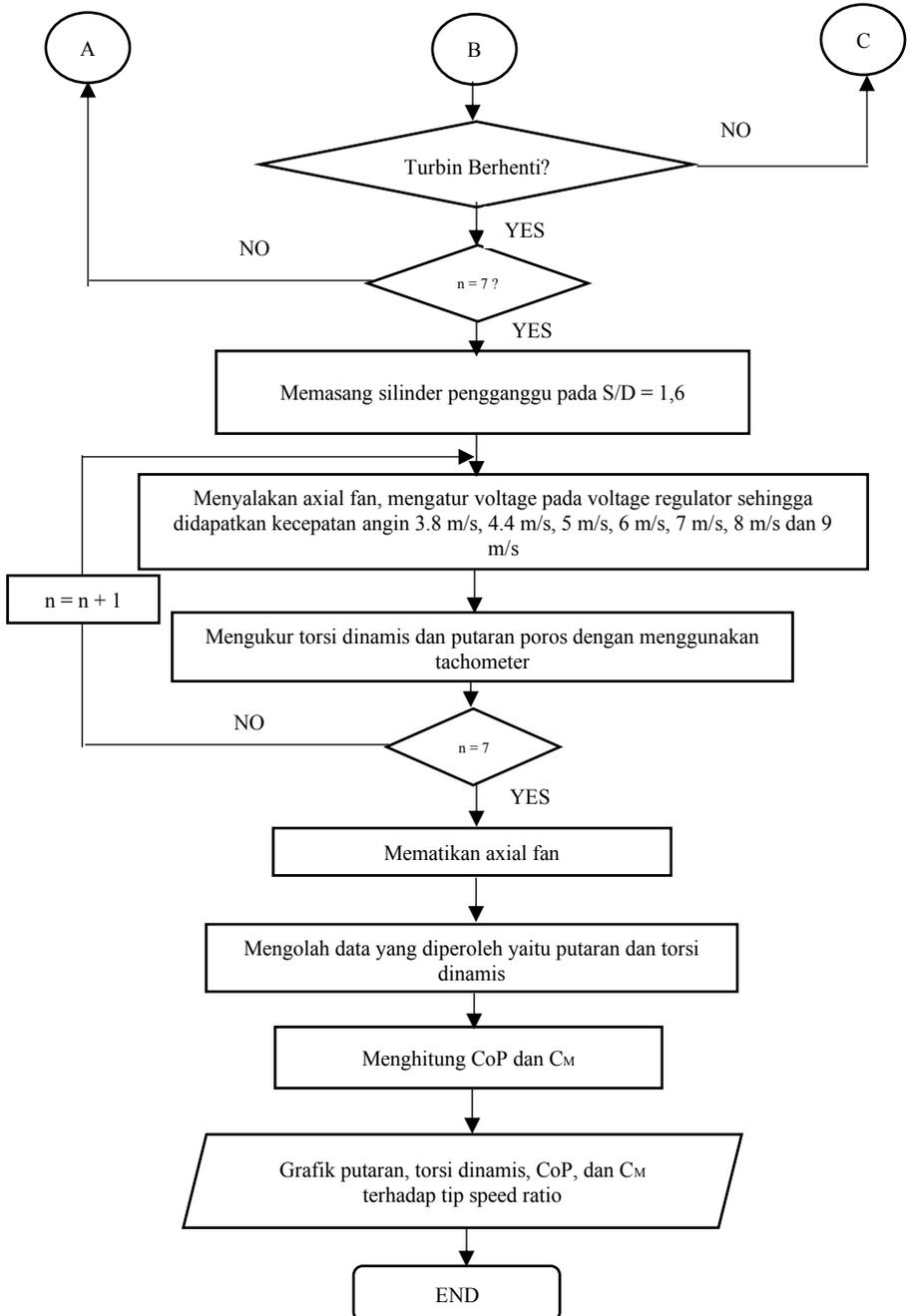
4. Menyalakan axial fan dengan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan voltage regulator sehingga didapatkan nilai kecepatan sesuai dengan kecepatan angin yang dibutuhkan.
5. Mengukur kecepatan angin awal dengan menggunakan Anemometer sesuai dengan data penelitian yaitu sebesar 3.8 m/s.
6. Melakukan pengukuran torsi statis tanpa silinder pengganggu dengan menggunakan torque meter.
7. Mematikan axial fan.
8. Mengulangi langkah 3 hingga 7 dengan mengubah variasi sudut Turbin Angin Savonius (θ) untuk $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan 10° setiap pengamatan.
9. Mengulangi langkah 3 hingga 8 dengan mengubah kecepatan angin sebesar 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s.
10. Meletakkan silinder pengganggu dengan mengatur rasio jarak pusat Turbin Angin Savonius dan silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) sebesar 1,6
11. Menentukan variasi sudut turbin angin Savonius (θ) sebesar 0° .
12. Menyalakan axial fan dan mengatur besar frekuensi yang diperlukan dengan menggunakan voltage regulator sehingga didapatkan nilai kecepatan angin yang dibutuhkan.
13. Mengukur kecepatan angin awal dengan menggunakan Anemometer sesuai dengan data penelitian yaitu sebesar 3.8 m/s.
14. Melakukan pengukuran torsi statis dengan menggunakan silinder pengganggu dengan menggunakan torque meter.
15. Mematikan axial fan.
16. Mengulangi langkah 11 hingga 15 dengan mengubah variasi sudut Turbin Angin Savonius (θ) untuk $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan kenaikan 10° setiap pengamatan.

17. Mengulangi langkah 11 sampai dengan 16 dengan mengubah kecepatan angin sebesar 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s.
18. Mengolah data yang diperoleh (torsi statis) dan melakukan plotting grafik torsi statis (T_s) dan torsi statis tanpa silinder pengganggu (T_{s0}) sebagai fungsi sudut (θ).

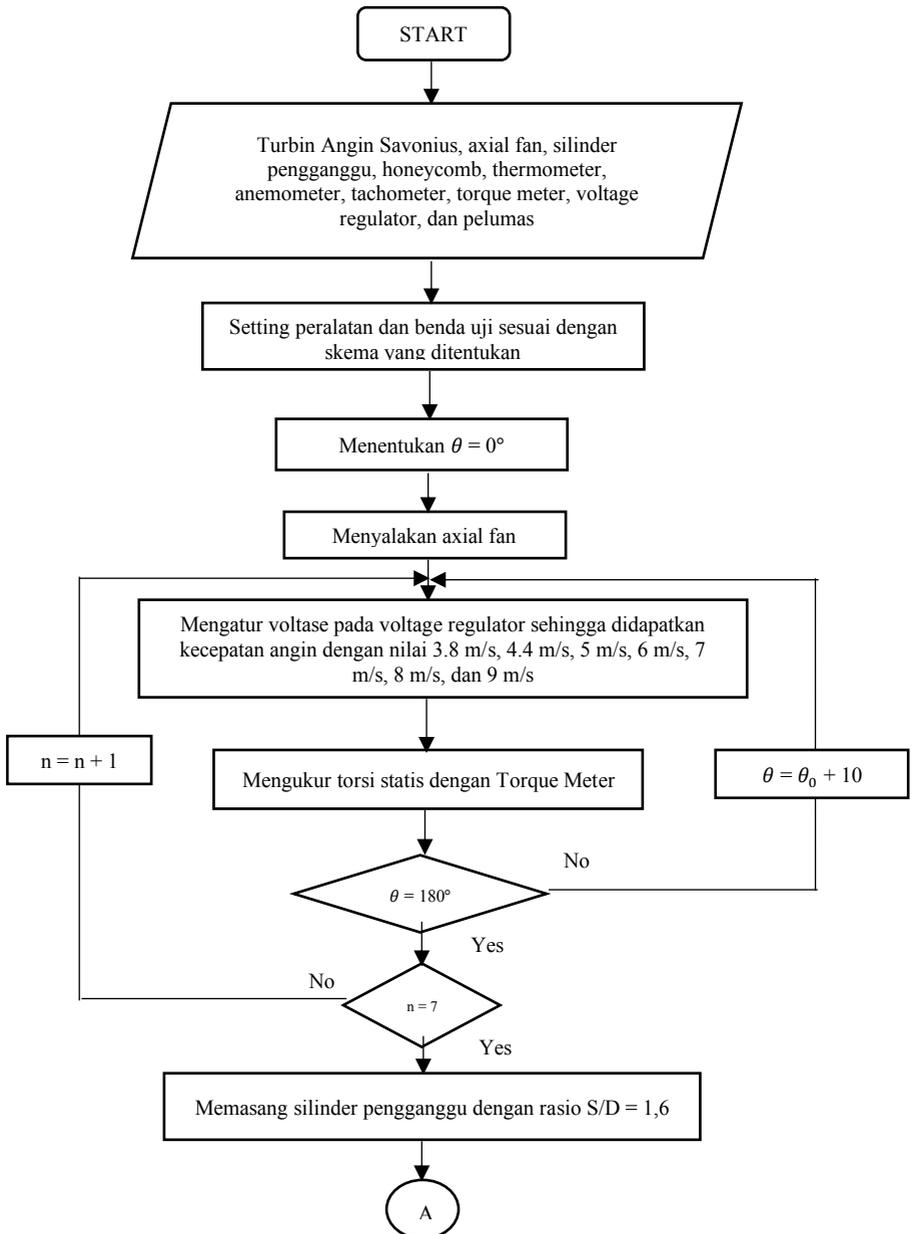
3.4.3 Flowchart Penelitian

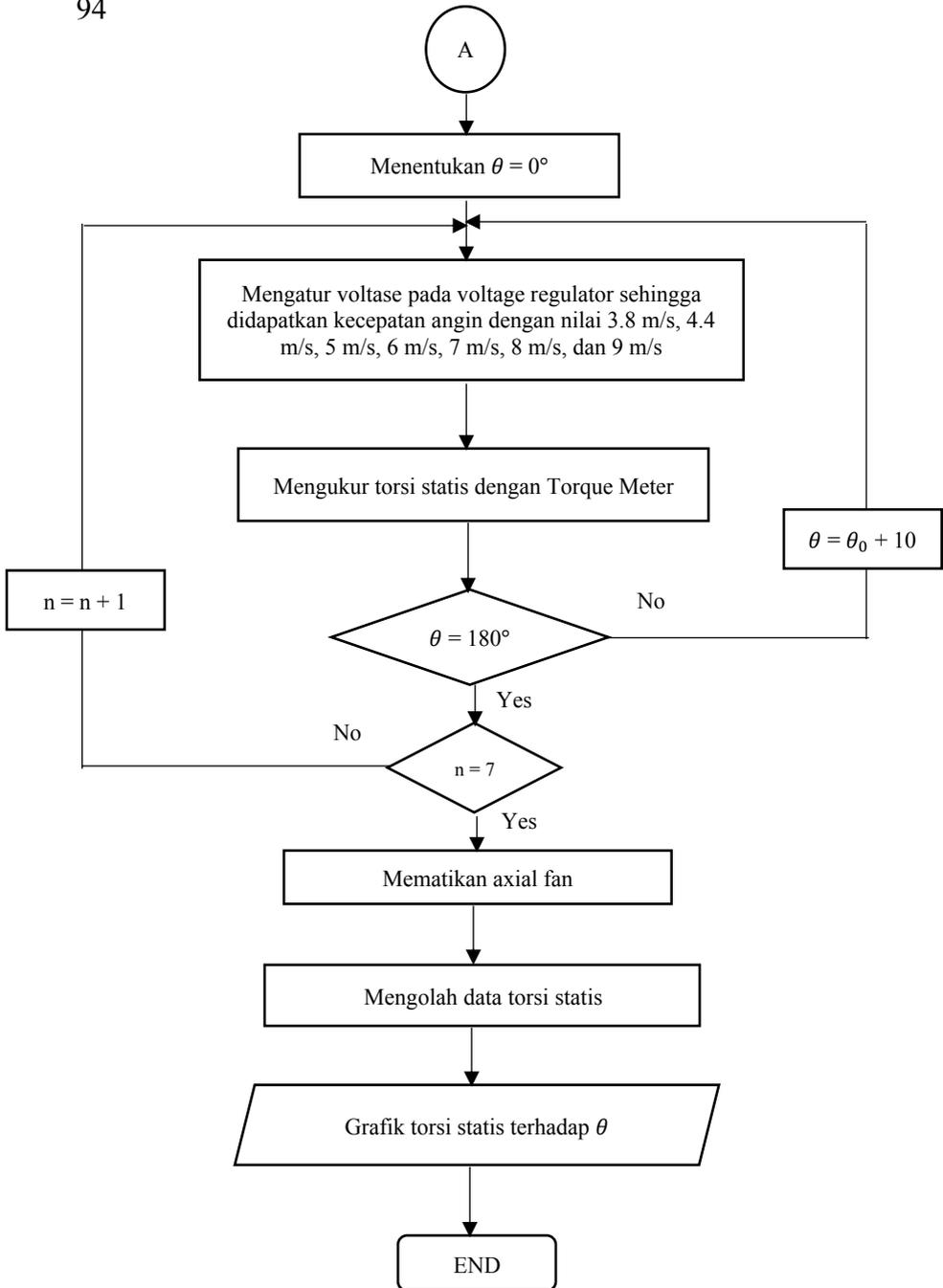
a. Flowchart Penelitian Menentukan Putaran dan Torsi Dinamis





b. Flowchart Menentukan Torsi Statis





3.5 Perhitungan *Uncertainty*

Pada penelitian ini perhitungan *uncertainty* perlu untuk dilakukan dimana tujuan dari perhitungan *uncertainty* ini adalah untuk mengetahui angka ketidakpastian suatu pengukuran atau eksperimen. Perhitungan *uncertainty* dilakukan pada semua parameter penelitian. Salah satu analisa perhitungan *uncertainty* ini dilakukan pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s. Untuk perhitungan *uncertainty* yang lebih detail dapat dilihat pada lampiran. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *uncertainty* pada titik maksimum *Coefficient of Power*.

1. Perhitungan *Uncertainty* pada Pembacaan *Tip Speed Ratio* (λ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

a. *Uncertainty* pada pembacaan kecepatan sudut (ω)

$$u_{\omega} = \pm \{[u_n]^2\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{188} = 0,00053191$$

b. *Uncertainty* pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{1}{154,5} = 0,0064725$$

c. *Uncertainty* pada pembacaan kecepatan angin (U)

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

Kemudian nilai u_{ω}, u_R, u_U disubstitusikan pada persamaan 3.1 sehingga perhitungan *uncertainty* pada pembacaan *tip speed ratio* adalah sebagai berikut:

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

$$u_{\lambda} = \pm \{ (0,00053191)^2 + (0,0064725)^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\lambda} = \pm 0,0068$$

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

2. Perhitungan *Uncertainty* pada Pembacaan *Coefficient of Moment (C_M)*

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

$$u_{CM} = \pm \{ (0,05513)^2 + (-0,00351)^2 + (-2 \cdot (0,002))^2 + (-0,004662)^2 + (-0,00647)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 0,0558$$

$$u_{CM} = \pm 5,58\%$$

3. Perhitungan *Uncertainty* pada Pembacaan *Coefficient of Power (CoP)*

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

$$u_{CoP} = \pm \{[0,0558]^2 + [0,0068]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0562$$

$$u_{CoP} = \pm 5,62\%$$

4. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan *Reynolds Number* (Re)

a. Perhitungan Uncertainty Pada Pembacaan Massa Jenis (ρ)

$$\rho \times T = C$$

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

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

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

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

$$u_\rho = u_T = \frac{0,1}{28,5} = 0,0035$$

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

b. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan Viskositas (μ)

Pada Temperatur = 28,5°

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

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

$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\Delta\mu}{\Delta T} = 5 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$$

Maka,

$$u_{\mu} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \delta T) = \frac{1}{0,000018575 \frac{Ns}{m^2}} \times 5 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2} \times (\pm 0,5^{\circ}C)$$

$$u_{\mu} = 1,344 \times 10^{-3} = 0,01344$$

Sehingga, Uncertainty Reynolds Number adalah sebagai berikut:

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

$$u_{Re} = \pm \{ (0,00351)^2 + (0,002)^2 + (0,0032362)^2 + (0,01344)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 0,014$$

$$u_{Re} = \pm 1,4\%$$

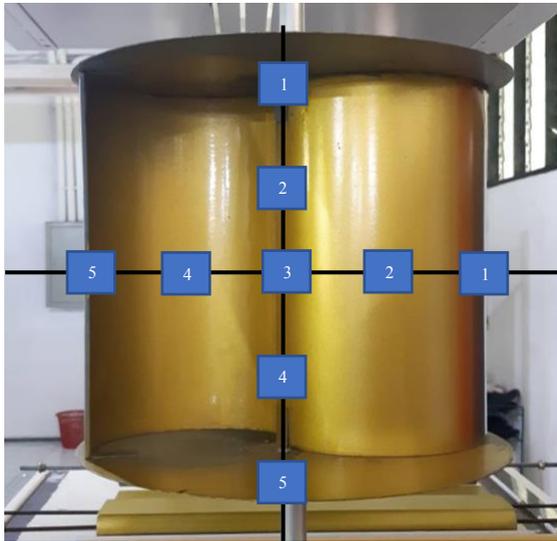
Berikut ini merupakan tabel nilai uncertainty yang didapatkan pada kecepatan 5 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan rasio $d/D = 0,5$ dan rasio $S/D = 1,6$.

Tabel 3. 12 Hasil Perhitungan *Uncertainty* Pengukuran Pada Kecepatan 5 m/s

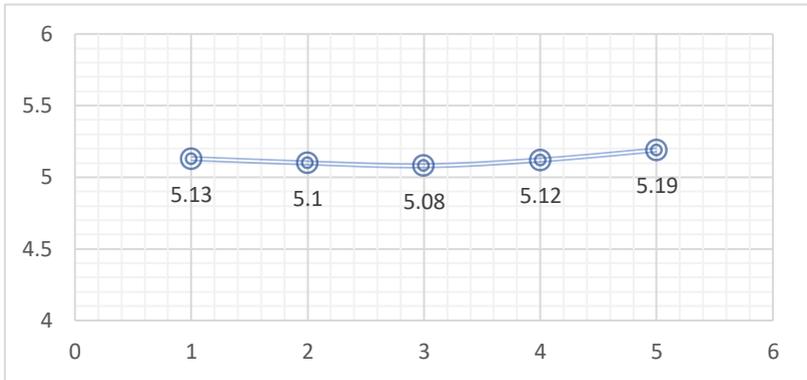
PARAMETER	UNCERTAINTY
Tip Speed Ratio (λ)	0,68%
Coefficient of Power (CoP)	5,62%
Coefficient of Moment (C_M)	5,58%
Reynolds Number	1,4%

3.6 Pengujian Uniformity Kecepatan

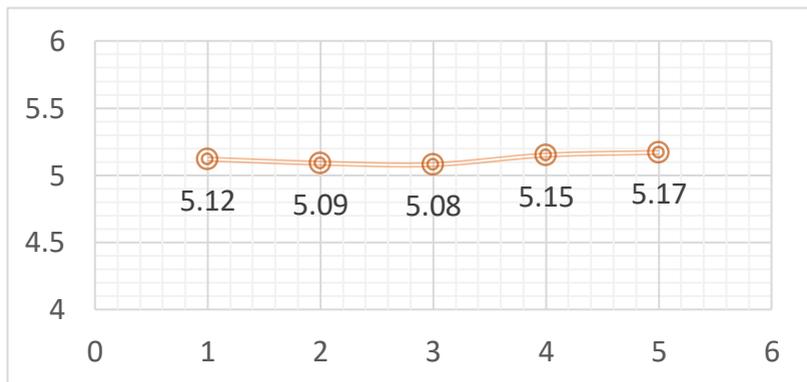
Pada penelitian yang dilakukan pengujian uniformity kecepatan penting untuk dilakukan. Uniformity Test bertujuan untuk mengamati keseragaman aliran pada titik-titik tertentu pada turbin angin Savonius. Dalam penelitian pemasangan honey comb di depan axial fan berfungsi untuk menyeragamkan aliran. Uji uniformity dilakukan pada sisi upstream turbin dengan melakukan pengukuran aliran fluida pada 5 titik vertical dan 5 titik horizontal pada turbin angin Savonius. Berikut ini adalah data hasil pengukuran uniformity test pada kecepatan angin sebesar 5 m/s



Gambar 3. 13 Posisi Pengambilan Data Uji Uniformity



Gambar 3. 14 Hasil Uniformity Test Pada Posisi Horizontal



Gambar 3. 15 Hasil Uniformity Test Pada Posisi Vertical

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Data

Pada penelitian ini pengambilan data menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan asumsi bahwa udara mengalir dalam keadaan aliran *steady* dan aliran *incompressible* yang memiliki nilai standar atau acuan sebagai berikut:

1. Temperatur udara dalam kondisi standar (T_{std}) = 15 °C = 288,2 K
2. Temperatur udara pada saat penelitian (T_p) = 28,5 °C = 301,5 K
3. Tekanan absolut udara dalam kondisi standar (P_{std}) = $1,01325 \times 10^5$ Pa
4. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = 1,225 kg/m³

Pada penelitian ini terdapat beberapa perhitungan yang dilakukan antara lain sebagai berikut:

4.1.1 Perhitungan Massa Jenis Udara (ρ)

Perhitungan massa jenis udara dilakukan dengan menggunakan rumus *Boyle – Gay Lusac* mengenai pemuaian gas sebagai berikut:

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

Dimana $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan 4.1 menjadi:

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

Dimana:

P_1 = Tekanan udara absolut pada keadaan standar = $1,01325 \times 10^5$ (Pa)

P_2 = Tekanan udara absolut pada saat penelitian (Pa)

- T_1 = Temperatur udara pada keadaan standar = 288,2 (K)
 T_2 = Temperatur udara pada saat penelitian = 301,5 (K)
 ρ_1 = Massa jenis udara pada keadaan standar = 1,225
 (kg/m³)
 ρ_2 = Massa jenis udara pada saat penelitian (kg/m³)

Karena 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 penelitian ini adalah sebagai berikut:

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

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

$$\rho_2 = 1,1707 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4.1.2 Perhitungan Viskositas Udara (μ)

Perhitungan viskositas udara pada penelitian ini menggunakan persamaan *Sutherland* sebagai berikut:

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

Dimana konstanta *Sutherland* yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 b &= 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m s K}^{\frac{1}{2}}} \\
 S &= 110,4 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Konstanta-konstanta tersebut disubstitusi pada persamaan 4.4 sehingga didapatkan nilai viskositas udara pada penelitian adalah sebagai berikut:

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

$$\mu = 1,86 \times 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}$$

4.1.3 Perhitungan *Reynolds Number*

Berdasarkan perhitungan-perhitungan properti udara diatas maka perhitungan *Reynolds Number* pada kecepatan 3,8 m/s dapat dihitung berdasarkan rumus 2.5 sebagai berikut:

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

Dimana data-data yang digunakan untuk perhitungan Reynlods Number adalah sebagai berikut:

L = Panjang Karakteristik = Lebar turbin angin *Savonius* = 2D – e – 2t

L = (2 x 167 mm) – 19 mm – (2 x 3 mm)

L = 309 mm = 0,309 m

μ = 1,86 x 10⁻⁵ Ns/m²

ρ = 1,1707 kg/m³

Dengan mensubstitusi nilai panjang karakteristik diatas pada persamaan 2.5 maka didapatkan nilai *Reynolds Number* pada kecepatan 3,8 m/s adalah sebagai berikut:

$$Re = \frac{1,1707 \frac{kg}{m^3} \times 3,8 \frac{m}{s} \times 0,309 m}{1,86 \times 10^{-5} \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re = 73922$$

$$Re \approx 74000$$

4.1.4 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (λ)

Tip Speed Ratio pada kecepatan 3,8 m/s untuk putaran tanpa silinder pengganggu dihitung dengan menggunakan rumus 2.18 sebagai berikut:

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

Dimana:

n = Putaran poros turbin angin *Savonius* (rpm) = 136,4 rpm
maka,

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

$$\omega = \frac{2\pi \times 136,4 \text{ rpm}}{60} = 14,278 \text{ rad/s}$$

R = Jari-jari turbin angin *Savonius* = L/2

R = $\frac{309 \text{ mm}}{2} = 154,4 \text{ mm} = 0,1544 \text{ m}$

U = Kecepatan angin = 3,8 m/s

Maka, *tip speed ratio* pada kecepatan 3,8 m/s tanpa silinder pengganggu adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{14,278 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1544 \text{ m}}{3,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$\lambda = 0,581$$

4.1.5 Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP)

Berdasarkan rumus 2.17 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Power* pada kecepatan angin 3,8 m/s tanpa silinder pengganggu maka dilakukan perhitungan dengan rumus 2.17 sebagai berikut:

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

Dimana data-data yang digunakan dalam perhitungan *Coefficient of Power* adalah sebagai berikut:

A = Luas penampang turbin angin *Savonius* yang tegak lurus dengan arah aliran = L x H (m²)

H = Ketinggian rotor turbin angin *Savonius* (m) = 0,298 m

L = Lebar turbin angin *Savonius* = 0,309 m

Maka,

A = (0,309 m x 0,298 m) = 0,092 m²

r = Jari-jari silinder yang menerima beban = 12,69 mm = 0,01269 m

ω = Kecepatan sudut turbin angin *Savonius* = 14,278 rad/s

m = Massa pembebanan = 36,4 kg

s = Massa yang terbaca pada neraca pegas = 90 gr = 0,09 kg

Berdasarkan nilai diatas maka hasil *Coefficient of Power* pada kecepatan 3,8 m/s tanpa menggunakan silinder pengganggu adalah sebagai berikut:

CoP

$$= \frac{|36,4 \text{ kg} - 0,09 \text{ kg}| \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,01268 \text{ m} \times 14,278 \text{ rad/s}}{\frac{1}{2} \times 1,1707 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,092 \text{ m}^2 \times \left(3,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3}$$

$$CoP = 0,0323$$

$$CoP = 3,23\%$$

4.1.6 Perhitungan *Coefficient of Moment* (C_M)

Berdasarkan rumus 2.24 untuk mendapatkan nilai *Coefficient of Moment* pada kecepatan angin 3,8 m/s tanpa silinder pengganggu maka dilakukan perhitungan dengan rumus 2.24 sebagai berikut dimana nilai C_M merupakan perbandingan Torsi Dinamis dengan Torsi Teoritisnya:

$$C_M = \frac{4.T_D}{\rho A U^2 L}$$

Dimana:

T_D = Torsi Dinamis = $|m - s| g \cdot r$

T_D = $|36,4 \text{ kg} - 0,09 \text{ kg}| \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,01269 \text{ m}$

T_D = 0,0067 Nm

L = Lebar turbin angin *Savonius* = 0,309 m

A = Luas penampang turbin angin *Savonius* = 0,092 m²

ρ = massa jenis udara = 1,1707 kg/m³

Berdasarkan nilai diatas maka hasil *Coefficient of Moment* pada kecepatan 3,8 m/s tanpa menggunakan silinder pengganggu adalah sebagai berikut:

$$C_M = \frac{4 \times 0,0067 \text{ Nm}}{1,1707 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,092 \text{ m}^2 \times (3,8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,309 \text{ m}}$$

$$C_M = 0,0556$$

1.1.7 Perhitungan Static Torque Coefficient (C_{Ts})

Perhitungan Static Torque Coefficient merupakan perbandingan antara Torsi Statis dengan Torsi Teoritisnya. Static Torque Coefficient pada kecepatan angin 3,8 m/s tanpa silinder pengganggu pada sudut 30 dihitung dengan rumus berikut ini:

$$C_{Ts} = \frac{4 T_s}{\rho U^2 A L}$$

Dimana:

$$T_s = 1,76 \text{ Ncm}$$

Maka,

$$C_{Ts} = \frac{4 \cdot 1,76 \text{ Ncm}}{1,171 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times (3,8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \times 0,092 \text{ m}^2 \times 0,309 \text{ m}}$$

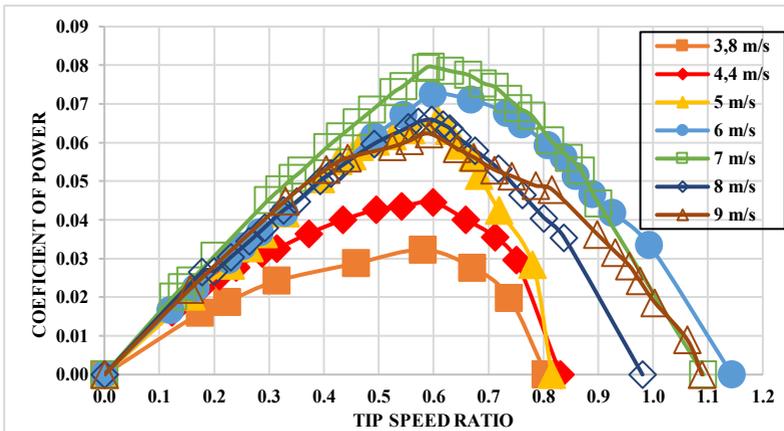
$$C_{Ts} = 0,146$$

4.2 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada penelitian ini performa turbin angin *Savonius* tanpa menggunakan silinder pengganggu perlu untuk ditampilkan untuk dapat dibandingkan dengan performa turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu yang diletakkan didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius*. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui peningkatan performa yang dihasilkan turbin angin *Savonius* dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* dengan memvariasikan kecepatan anginnya. Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5. Analisa yang dilakukan pada penelitian ini meliputi analisa *Coefficient of Power* sebagai fungsi TSR, *Coefficient of Moment* sebagai fungsi TSR, serta Torsi Statis untuk mengetahui kemampuan *self-starting* turbin angin *Savonius*.

4.2.1 Analisa Grafik Nilai *Coefficient of Power* (CoP₀) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.1 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP₀ turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap fungsi TSR. Pengambilan data pada grafik berikut ini dilakukan pada kecepatan angin 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s



Gambar 4. 1 Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa grafik CoP₀ terhadap TSR memiliki *trendline* grafik *parabolic* terbuka kebawah dimana nilai CoP₀ naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai CoP₀ turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum ditandai dengan turbin angin Savonius yang berhenti berputar. Nilai CoP pada grafik 4.1 bervariasi dari 0 hingga 0,0724 dan nilai TSR bervariasi dari 0 hingga 1,144. Pada grafik terlihat jelas bahwa kondisi paling optimum turbin angin Savonius tanpa silinder

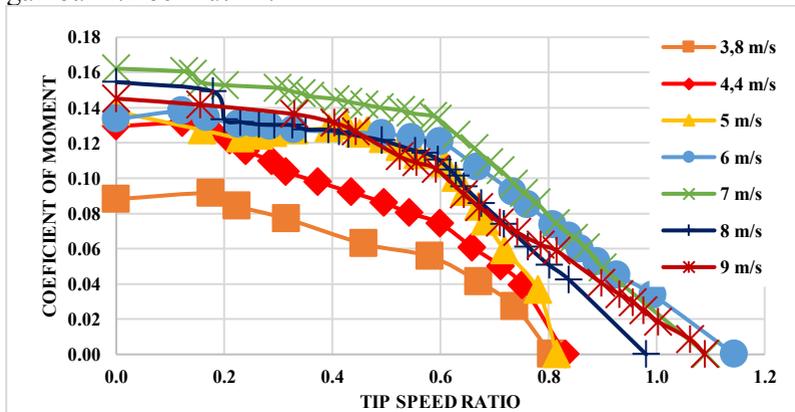
pengganggu terjadi pada kecepatan 7 m/s pada $TSR = 0,596$ dengan nilai CoP maksimum sebesar 0,0797 atau setara dengan 7,97%. Untuk kecepatan 3,8 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,0323 pada $TSR = 0,581$, untuk kecepatan angin 4,4 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,0445 dengan nilai $TSR = 0,599$. Sedangkan untuk kecepatan 5 m/s, 6 m/s, 8 m/s dan 9 m/s nilai CoP maksimum berturut-turut sebesar 0,066; 0,0724; 0,0660 dan 0,0623 dengan nilai TSR berturut-turut sebesar 0,608; 0,599; 0,596; dan 0,592.

Berdasarkan grafik diatas pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa grafik Coefficient of Power berbentuk parabolic, hal tersebut disebabkan karena *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum dengan pembebanan tertentu kemudian setelah mencapai titik maksimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Selain itu nilai *Coefficient of Power* yang semakin menurun pada TSR yang semakin kecil disebabkan karena pada TSR kecil merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan maksimum, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan. Dari ketujuh grafik diatas menunjukkan bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin tidak menjamin nilai *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* akan semakin meningkat. Dapat dilihat bahwa turbin angin *Savonius* kurang efektif dioperasikan pada kecepatan angin yang terlalu rendah karena pada kecepatan yang terlalu rendah kurang efektif dalam meningkatkan gaya drag selain itu turbin angin *Savonius* juga kurang efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* pada kecepatan angin yang terlalu tinggi karena pada kecepatan angin yang terlalu tinggi losses yang terjadi juga semakin besar. Turbin angin *Savonius* tanpa menggunakan

silinder pengganggu pada penelitian ini memiliki nilai CoP maksimum pada kecepatan 7 m/s dengan nilai CoP sebesar 0,0797 pada TSR 0,596 dimana grafik untuk kecepatan 7 m/s berada diatas grafik kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s sedangkan grafik untuk kecepatan 8 m/s dan 9 m/s berada dibawah grafik kecepatan 7 m/s.

4.2.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_{M0}) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin *Savonius* Tanpa Silinder Pengganggu

Analisa *Coefficient of Moment* dilakukan pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dengan variasi kecepatan sebesar 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s dan 9 m/s. Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut ini.



Gambar 4. 2 Grafik *Coefficient of Moment* (C_{M0}) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada Turbin Angin *Savonius* Tanpa Silinder Pengganggu

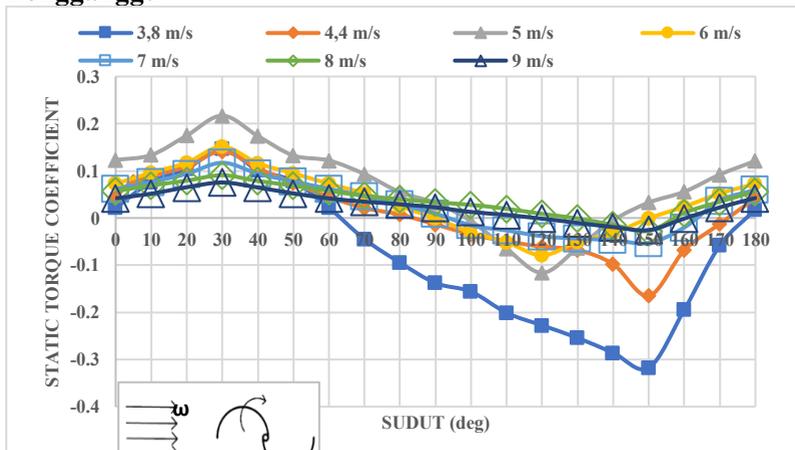
Gambar 4.2 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_{M0}) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) untuk masing-masing

kecepatan sebesar 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s. Nilai *Coefficient of Moment* bervariasi dari 0 hingga 0,1622 dengan nilai TSR yang bervariasi juga dari 0 hingga 1,144. Berdasarkan gambar 4.2 *trendline* grafik C_M terus mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya TSR. Nilai *Coefficient of Moment* paling maksimal dicapai pada kecepatan angin sebesar 7 m/s dengan nilai C_M sebesar 0,1622 yang terjadi pada $TSR = 0$. Sedangkan untuk kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 8 m/s dan 9 m/s memiliki nilai C_M maksimal pada kecepatan tersebut secara berturut-turut adalah sebesar 0,0985; 0,1313; 0,1379; 0,1381; 0,1546; dan 0,1618 pada nilai TSR secara berturut-turut sebesar 0,175; 0,123; 0; 0,121; 0; dan 0.

Berdasarkan grafik diatas pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = (| m - s | g \cdot r)$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil begitu juga sebaliknya. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana

torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R$). Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar. Namun pada penelitian ini hal tersebut terjadi pada kecepatan paling optimum saja yaitu pada kecepatan 7 m/s. Sehingga untuk turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu lebih efektif bekerja pada kecepatan 7 m/s atau pada kecepatan medium.

4.2.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut *Blade* (θ) Turbin Angin *Savonius* Tanpa Silinder Pengganggu



Gambar 4. 3 Grafik *Static Torque Coefficient* (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut *Blade* (θ) Turbin Angin *Savonius* Tanpa Silinder Pengganggu

Analisa grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut *blade* dilakukan pada turbin angin *Savonius* tanpa

menggunakan silinder pengganggu dengan variasi kecepatan sebesar 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Gambar 4.3 merupakan grafik *Static Torque Coefficient* (C_{Ts}) turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi posisi sudut blade. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai C_{Ts} maksimum dan minimum yang berbeda pada setiap variasi kecepatannya. Nilai *Static Torque Coefficient* (C_{Ts}) bervariasi dari -0,3175 hingga 0,217.

Dari ketujuh grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° . Pada kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180° sedangkan untuk kecepatan 5 m/s dan 6 m/s, setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 120° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180° . Untuk semua variasi kecepatan nilai *Static Torque Coefficient* maksimal terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan *Static Torque Coefficient* bernilai negative berada pada kisaran sudut 70° hingga 160° dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimal dari 3,8 m/s hingga 9 m/s secara berturut-turut sebesar 0,146; 0,141; 0,217; 0,151; 0,117; 0,091; dan 0,075 . Pada kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s nilai *Static Torque Coefficient* minimal terjadi pada sudut 150° dengan nilai *Static Torque Coefficient* secara berturut-turut sebesar -0,317; -0,165; -0,053; -0,027; dan -0,026 sedangkan pada kecepatan 5 m/s dan 6 m/s nilai *Static Torque Coefficient* minimum terjadi pada sudut 120° dengan nilai *Static Torque Coefficient* secara berturut-turut sebesar -0,116 dan -0,079. Pada

kecepatan 5 m/s dan 6 m/s memiliki nilai posisi sudut blade paling minimum pada sudut 120° .

Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang didapat pada penelitian ini adalah pada kecepatan 5 m/s dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,217 yang terjadi pada posisi sudut blade sebesar 30° dan nilai torsi statis minimum terjadi pada kecepatan 3,8 m/s dengan nilai sebesar -0,317 yang terjadi pada posisi sudut *blade* sebesar 150° . Hal tersebut disebabkan karena peningkatan torsi statis pada kecepatan angin 5 m/s lebih besar dibandingkan dengan kenaikan kecepatan angin sebagai fungsi kuadrat, sedangkan pada kecepatan angin lainnya, peningkatan torsi statis tidak sebanding dengan kenaikan kecepatan angin sebagai fungsi kuadrat sehingga nilai *Static Torque Coefficient* menurun. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin *Savonius* memiliki torsi statis yang paling tinggi sehingga turbin angin *Savonius* memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin *Savonius* dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin *Savonius* menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal, sedangkan pada sudut 120° untuk kecepatan 5 m/s dan 6 m/s dan pada sudut 150° pada kecepatan 3,8 m/s, 4,4 m/s, 7 m/s, 8 m/s dan 9 m/s nilai *Static Torque Coefficient* adalah negatif atau dapat dikatakan turbin angin *Savonius* pada sudut tersebut memiliki nilai torsi statis paling negatif sehingga dapat dikatakan turbin angin *Savonius* tidak mempunyai kemampuan *self-starting* pada posisi sudut tersebut sehingga membutuhkan gaya eksternal untuk dapat memutar turbin, hal tersebut disebabkan karena gaya *drag* yang diterima oleh *advancing blade* lebih kecil dibandingkan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*.

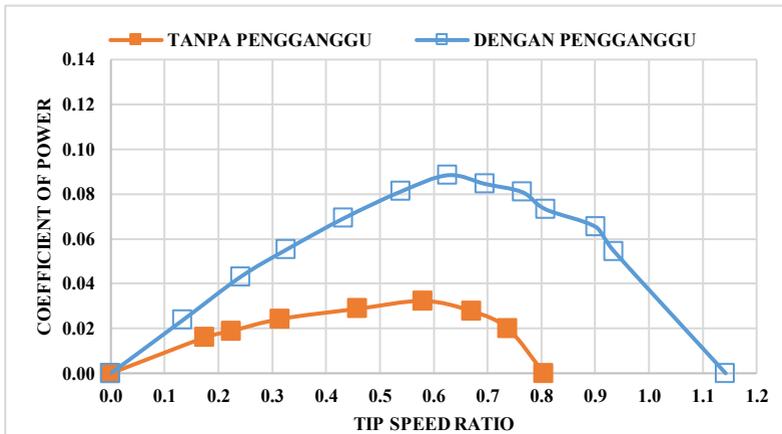
4.3 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

Analisa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemberian silinder pengganggu yang diletakkan didepan returning blade turbin angin Savonius terhadap performa turbin dengan memvariasikan kecepatannya. Analisa pada penelitian ini dilakukan dengan variasi kecepatan angin sebesar 3.8 m/s, 4.4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, dan 9 m/s dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5. Analisa yang dilakukan pada penelitian ini meliputi analisa *Coefficient of Power* sebagai fungsi TSR, *Coefficient of Moment* sebagai fungsi TSR, serta Torsi Statis untuk mengetahui kemampuan *self-starting* turbin angin *Savonius*.

4.3.1 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 3,8 m/s

4.3.1.1 Analisa Grafik *Coefficient of Power (CoP)* Terhadap *Tip Speed Ratio (λ)* Pada Kecepatan 3,8 m/s

Gambar 4.4 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 3,8 m/s.



Gambar 4. 4 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 3,8 m/s

Berdasarkan gambar 4.4 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu, nilai CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling

maksimum dimana pada TSR tertentu tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 3,8 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum kemudian setelah mencapai titik maksimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.4 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

Berdasarkan grafik 4.4 yaitu pada kecepatan angin 3,8 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan

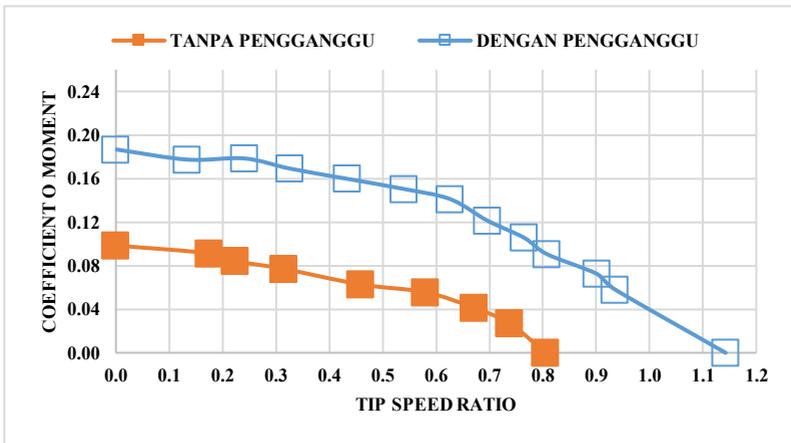
silinder pengganggu yaitu sebesar 0,0884 pada TSR 0,626 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai Coefficient of Power maksimal sebesar 0,0323 pada TSR 0,581 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0561. Nilai TSR paling maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu juga berbeda, pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu TSR maksimum sebesar 0,805 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum sebesar 1,143 hal tersebut disebabkan karena pemasangan silinder pengganggu menyebabkan putaran poros turbin semakin meningkat.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya drag yang dihasilkan oleh *Returning*

Blade menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.1.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 3,8 m/s

Gambar 4.5 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 3,8 m/s



Gambar 4. 5 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 3,8 m/s

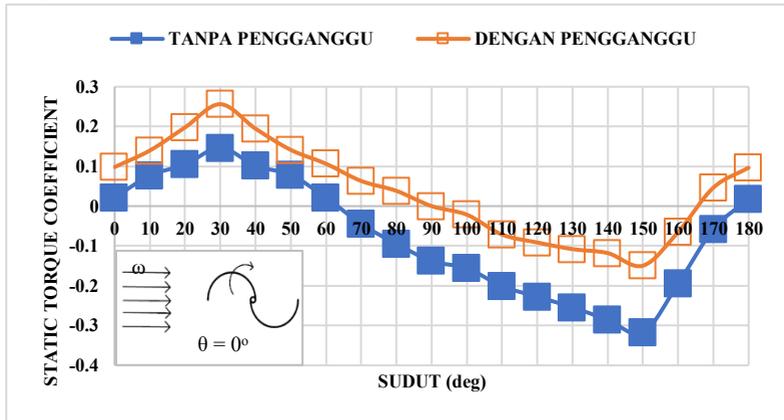
Gambar 4.5 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan 3,8 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,0985 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M maksimum sebesar 0,1867 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.5 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of*

Moment juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R$). Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin *Savonius* juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.1.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 3,8 m/s



Gambar 4. 6 Grafik *Static Torque Coefficient* (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 3,8 m/s

Gambar 4.6 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,317 hingga 0,256 dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu pada kecepatan 3,8 m/s sebesar 0,256 dan nilai torsi statis

minimal sebesar $-0,150$. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar $0,146$ sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar $-0,317$. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 150° .

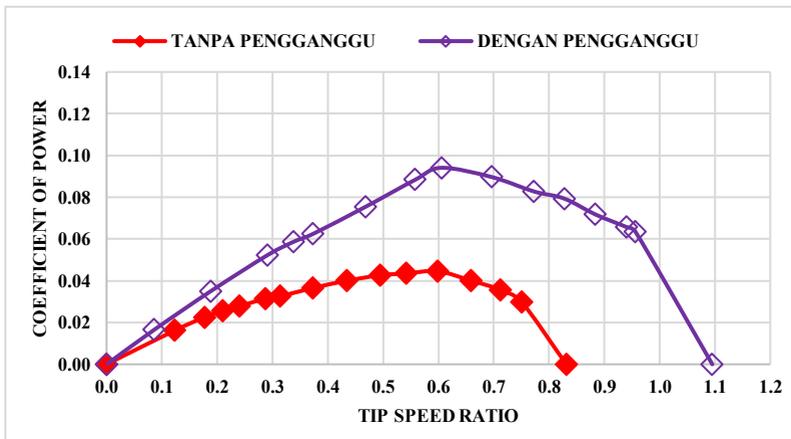
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180° . Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar $1,6$ dengan rasio d/D sebesar $0,5$ pada kecepatan $3,8$ m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin *Savonius* memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin *Savonius* dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin *Savonius* menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 150° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* yang paling negatif hal tersebut disebabkan

karena torsi statis yang dihasilkan pada sudut tersebut bernilai negatif yang artinya pada sudut tersebut turbin angin Savonius tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga masih membutuhkan gaya eksternal dalam memutar turbin.

4.3.2 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 4,4 m/s

4.3.2.1 Analisa Grafik *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 4,4 m/s

Gambar 4.7 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 4,4 m/s



Gambar 4. 7 Grafik Nilai *Coefficient of Power* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 4,4 m/s.

Berdasarkan gambar 4.7 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 4,4 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum tertentu kemudian setelah mencapai titik maksimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.7 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya

maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

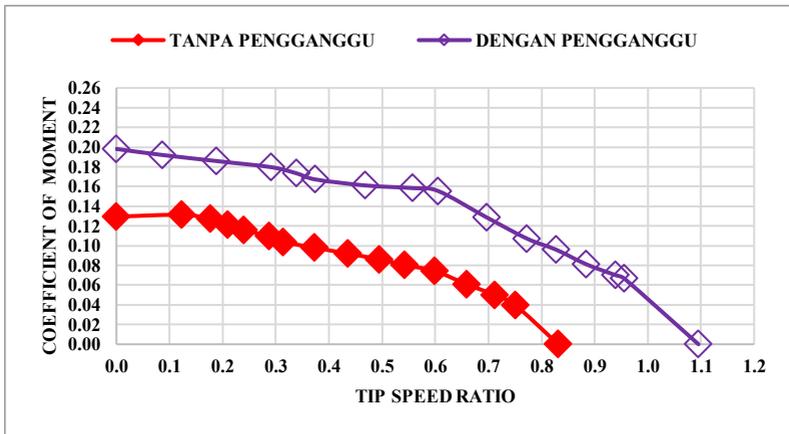
Berdasarkan grafik 4.7 yaitu pada kecepatan angin 4,4 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,0941 pada TSR 0,605 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai *Coefficient of Power* maksimal sebesar 0,0445 pada TSR 0,559 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0496. Nilai TSR paling maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu juga berbeda, pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu TSR maksimum sebesar 0,831 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum sebesar 1,095 hal tersebut disebabkan karena pemasangan silinder pengganggu menyebabkan putaran poros turbin semakin meningkat.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh

pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya *drag* yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya *drag* dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.2.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 4,4 m/s

Gambar 4.8 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 4,4 m/s



Gambar 4. 8 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 4,4 m/s

Gambar 4.5 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan 4,4 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR

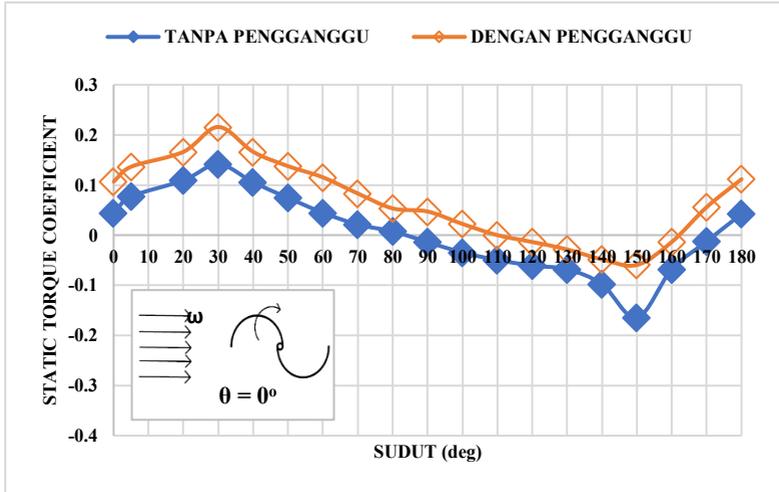
= 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1295 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1981 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.8 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R)$. Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar

kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin Savonius juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.2.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 4,4 m/s



Gambar 4. 9 Grafik *Static Torque Coefficient* Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 4,4 m/s

Gambar 4.9 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,165 hingga 0,216 dengan nilai *Static Torque Coefficient*

maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 4,4 m/s sebesar 0,216 dan nilai torsi statis minimal sebesar -0,06. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1414 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,165. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 150°.

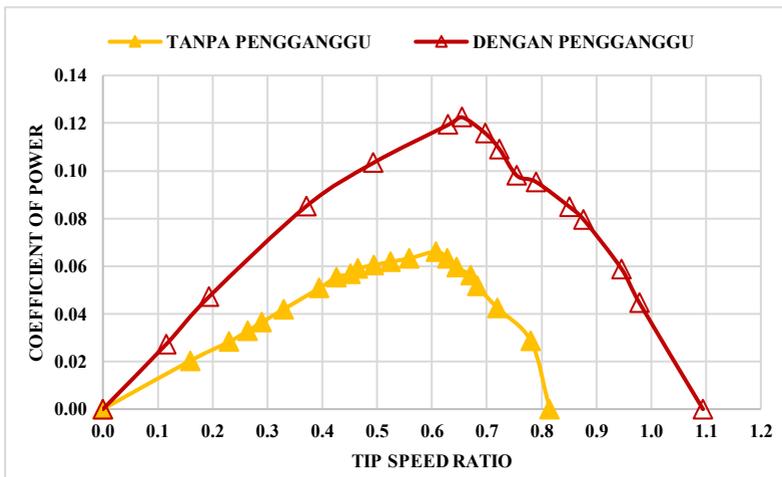
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180°. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 4,4 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin Savonius memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin Savonius dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin Savonius menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan

gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 150° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* yang paling negatif hal tersebut disebabkan karena torsi statis yang dihasilkan pada sudut tersebut bernilai negatif yang artinya pada sudut tersebut turbin angin Savonius tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga masih membutuhkan gaya eksternal dalam memutar turbin.

4.3.3 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 5 m/s

4.3.3.1 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 5 m/s

Gambar 4.10 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 5 m/s



Gambar 4. 10 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.10 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian

setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 5 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum kemudian setelah mencapai titik maksimal nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.10 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

Berdasarkan grafik 4.10 yaitu pada kecepatan angin 5 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan

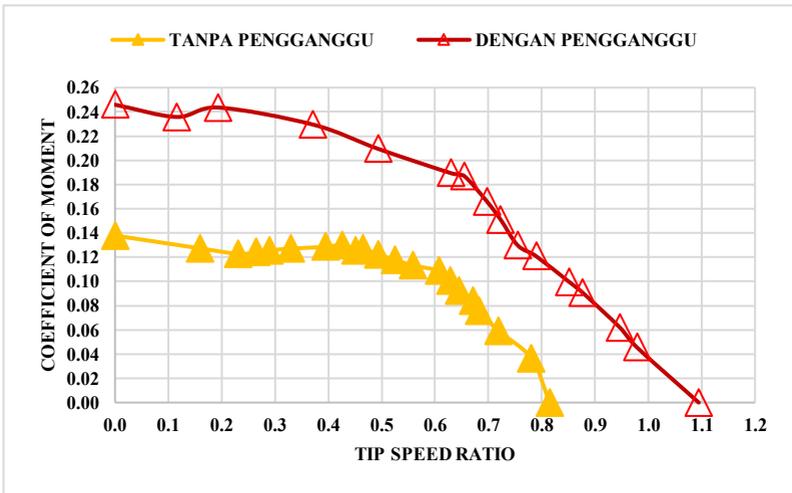
dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai Coefficient of Power maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,1225 pada TSR 0,655 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai Coefficient of Power maksimal sebesar 0,0661 pada TSR 0,608 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0564. Nilai TSR paling maksimum pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu juga berbeda, pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu TSR maksimum sebesar 0,815 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum sebesar 1,094 hal tersebut disebabkan karena pemasangan silinder pengganggu menyebabkan putaran poros turbin semakin meningkat.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga

dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya *drag* yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya *drag* dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.3.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment (C_M) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 5 m/s*

Gambar 4.11 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 5 m/s



Gambar 4. 11 Grafik Coefficient of Moment Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 5 m/s

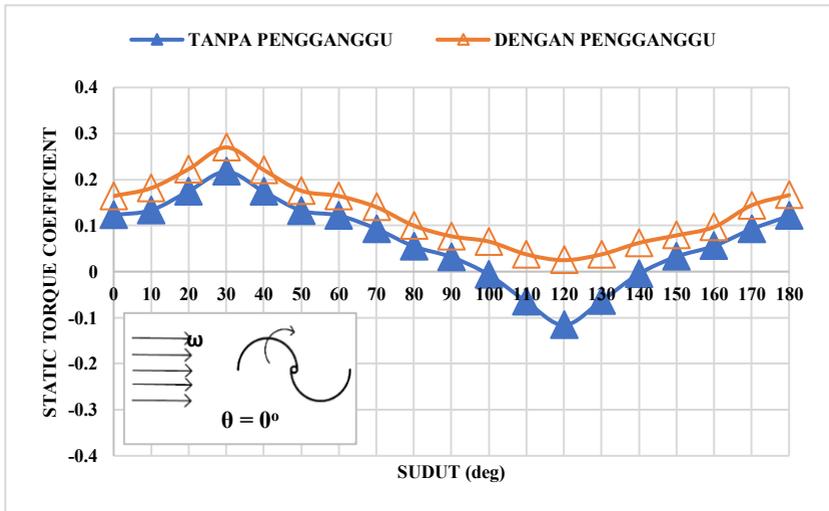
Gambar 4.11 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan 5 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1379 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,2459 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.11 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| \cdot g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun

setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R$). Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin *Savonius* juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.3.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 5 m/s



Gambar 4. 12 Grafik *Static Torque Coefficient* (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 5 m/s

Gambar 4.12 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan

silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,116 hingga 0,2698 dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s sebesar 0,2698 dan nilai torsi statis minimal sebesar -0,025. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,217 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,116. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 120°.

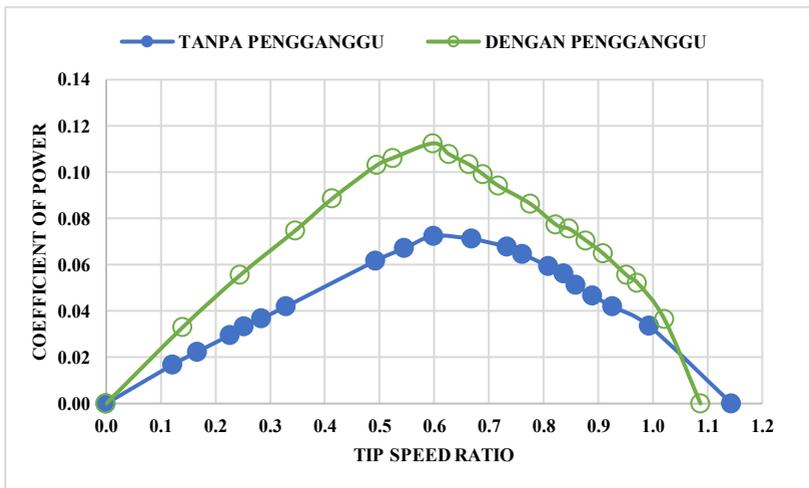
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 120° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180°. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 5 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin Savonius memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin Savonius dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin Savonius

menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 120° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* yang paling negatif hal tersebut disebabkan karena torsi statis yang dihasilkan pada sudut tersebut bernilai negatif yang artinya pada sudut tersebut turbin angin Savonius tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga masih membutuhkan gaya eksternal dalam memutar turbin.

4.3.4 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 6 m/s

4.3.4.1 Analisa Grafik *Coefficient of Power (CoP)* Terhadap *Tip Speed Ratio (λ)* Pada Kecepatan 6 m/s

Gambar 4.13 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 6 m/s



Gambar 4. 13 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.13 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 5 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum kemudian setelah mencapai titik maksimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.13 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya

maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

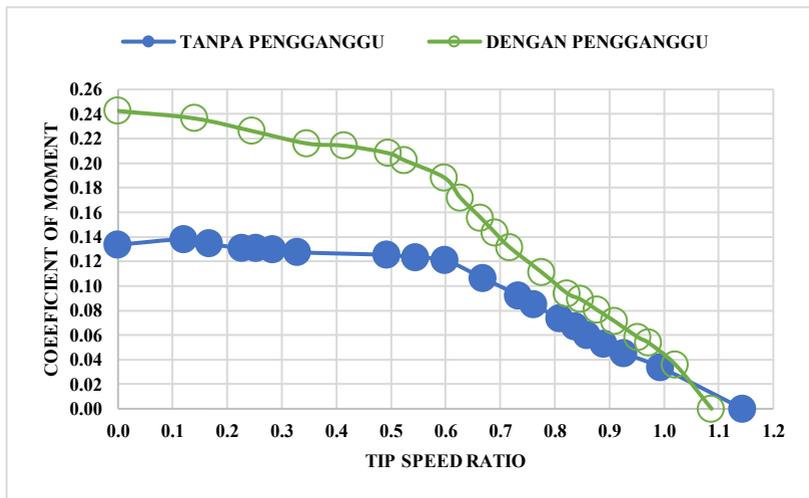
Berdasarkan grafik 4.13 yaitu pada kecepatan angin 6 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,1125 pada TSR 0,598 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai *Coefficient of Power* maksimal sebesar 0,0724 pada TSR 0,599 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0401.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya drag yang dihasilkan oleh *Returning*

Blade menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.4.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 6 m/s

Gambar 4.14 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 6 m/s



Gambar 4. 14 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 6 m/s

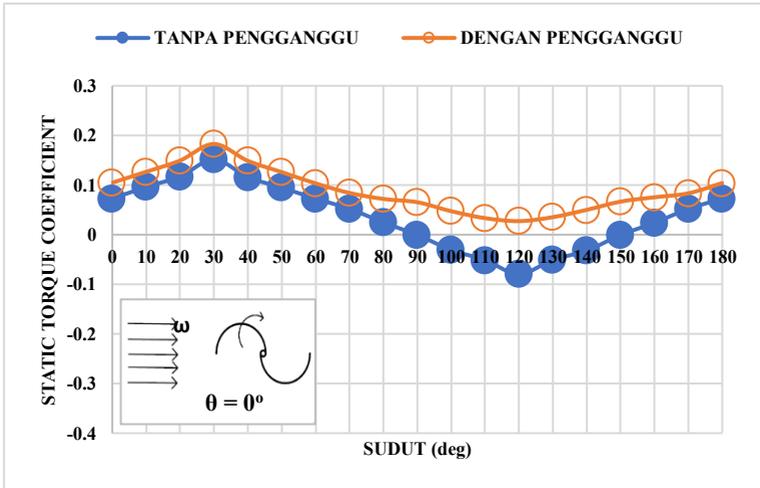
Gambar 4.14 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan 6 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1335 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,2425 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.13 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of*

Moment juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus ($\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R$). Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin *Savonius* juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.4.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 6 m/s



Gambar 4. 15 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 6 m/s

Gambar 4.15 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,079 hingga 0,1827 dengan nilai *Static Torque Coefficient*

maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s sebesar 0,1827 dan nilai torsi statis minimal sebesar 0,027. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,1514 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,079. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 120°.

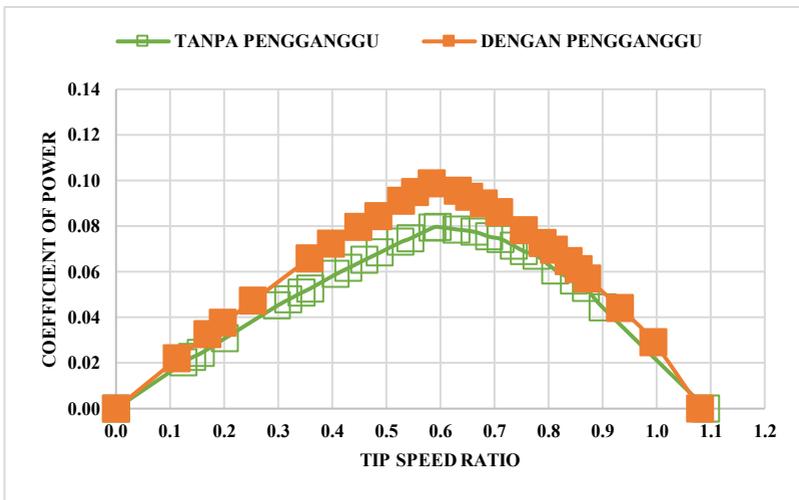
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 120° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180°. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 6 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin Savonius memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin Savonius dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin Savonius menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan

gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 120° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* minimum turbin angin Savonius bernilai positif yang artinya pada sudut tersebut nilai torsi statisnya bernilai positif sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif dalam meningkatkan Torsi Statis dan juga meningkatkan kemampuan *self-starting* pada semua posisi sudut blade.

4.3.5 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 7 m/s

4.3.5.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 7 m/s

Gambar 4.16 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 7 m/s



Gambar 4. 16 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 7

Berdasarkan gambar 4.16 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai

CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 7 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimal kemudian setelah mencapai titik maksimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.16 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

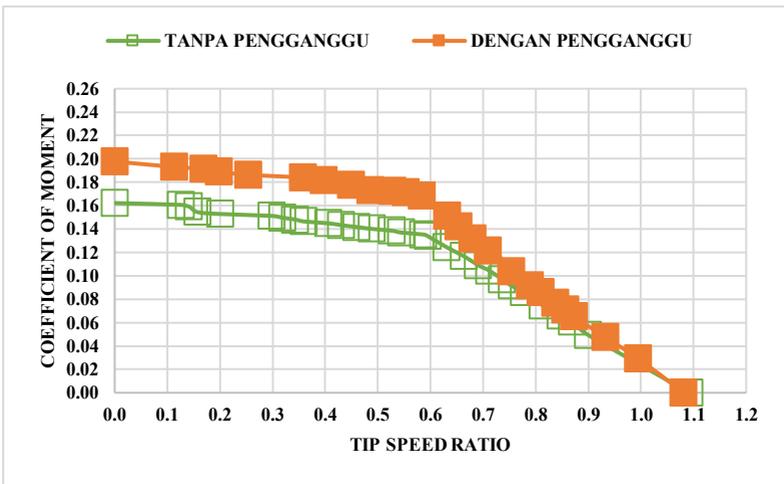
Berdasarkan grafik 4.16 yaitu pada kecepatan angin 7 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai

Coefficient of Power maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,0986 pada TSR 0,585 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai Coefficient of Power maksimal sebesar 0,0797 pada TSR 0,596 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0189.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya drag yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.5.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 7 m/s

Gambar 4.17 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 7 m/s



Gambar 4. 17 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 7 m/s

Gambar 4.17 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan 7 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius

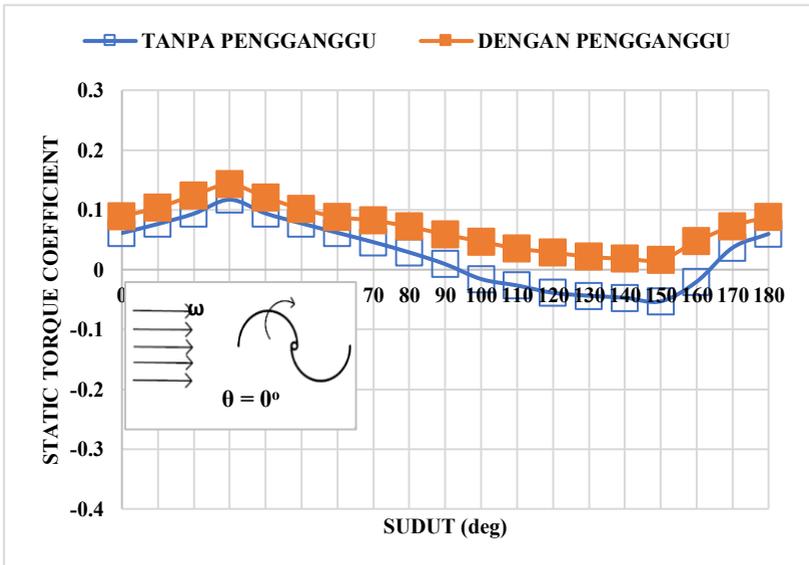
berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1622 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1977 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M maksimum turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.17 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot R)$.

Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin Savonius juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.5.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 7 m/s



Gambar 4. 18 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 7 m/s

Gambar 4.18 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada

turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,053 hingga 0,1426 dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s sebesar 0,1426 dan nilai torsi statis minimal sebesar 0,017. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,117 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,053. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 150° .

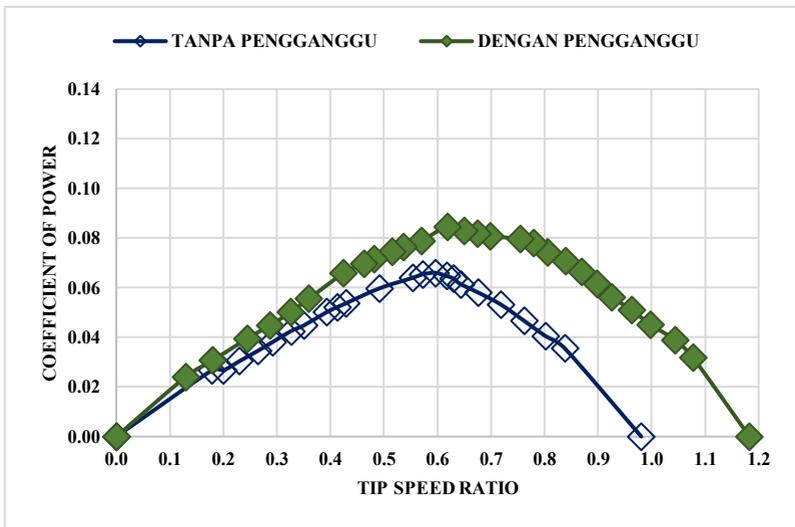
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180° . Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 7 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin Savonius memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin Savonius dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut

disebabkan karena *advancing blade* turbin angin *Savonius* menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 10° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* minimum turbin angin *Savonius* bernilai positif yang artinya pada sudut tersebut nilai torsi statisnya bernilai positif sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif dalam meningkatkan Torsi Statis dan juga meningkatkan kemampuan *self-starting* pada semua posisi sudut blade.

4.3.6 Analisa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 8 m/s

4.3.6.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) Pada Kecepatan 8 m/s

Gambar 4.19 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 8 m/s



Gambar 4. 19 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 8

Berdasarkan gambar 4.19 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai

CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 8 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi paling optimum pada TSR tertentu kemudian setelah mencapai titik optimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.19 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

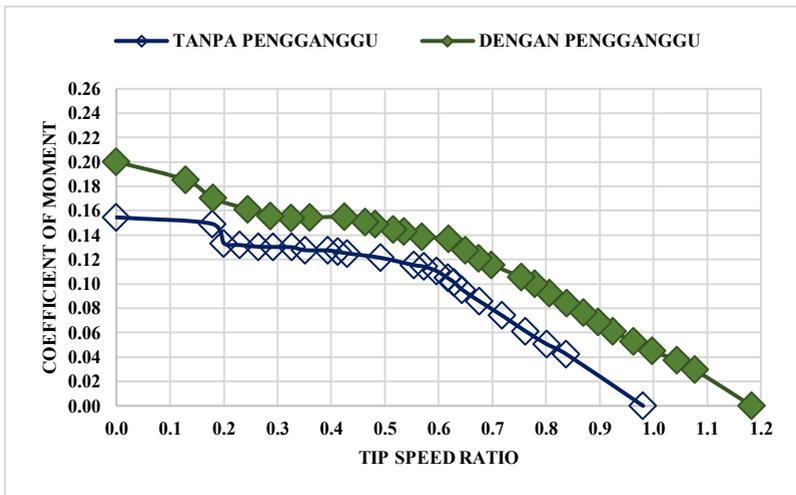
Berdasarkan grafik 4.19 yaitu pada kecepatan angin 8 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai

Coefficient of Power maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,0845 pada TSR 0,619 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai Coefficient of Power maksimal sebesar 0,0660 pada TSR 0,596 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0185.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya drag yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.6.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 8 m/s

Gambar 4.20 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 8 m/s.



Gambar 4. 20 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 8 m/s

Gambar 4.20 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan 8 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius

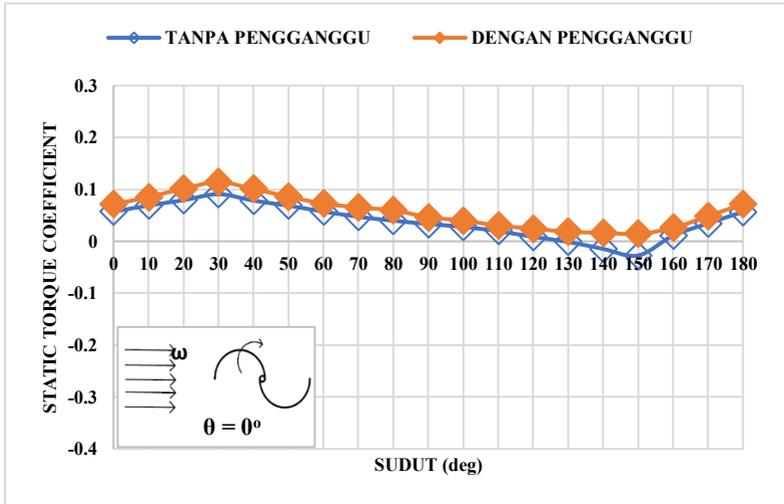
berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1546 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,2001 pada TSR 0. Dalam hal ini nilai C_M maksimum turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.

Berdasarkan grafik 4.20 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_2 \cdot R)$.

Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M maksimum yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin Savonius juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.6.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 8 m/s



Gambar 4. 21 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 8 m/s

Gambar 4.21 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan

silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi dari -0,027 hingga 0,114 dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 8 m/s sebesar 0,114 dan nilai torsi statis minimal sebesar 0,014. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,091 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,027. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 150° .

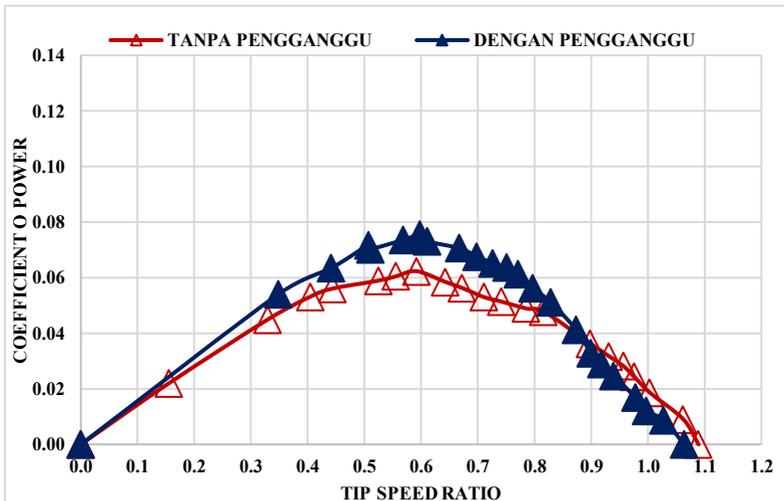
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180° . Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 8 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin Savonius memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin Savonius dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin Savonius

menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade* sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 10° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* minimum turbin angin Savonius bernilai positif yang artinya pada sudut tersebut nilai torsi statisnya bernilai positif sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif dalam meningkatkan Torsi Statis dan juga meningkatkan kemampuan *self-starting* pada semua posisi sudut blade.

4.3.7 Analisa Grafik Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Kecepatan 9 m/s

4.3.7.1 Analisa Grafik Coefficient of Power (CoP) Terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada Kecepatan 9 m/s

Gambar 4.22 dibawah ini merupakan grafik nilai CoP turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 9 m/s



Gambar 4. 22 Grafik Nilai Coefficient of Power Terhadap Tip Speed Ratio Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin 9 m/s

Berdasarkan gambar 4.22 dapat terlihat bahwa grafik CoP terhadap *tip speed ratio* pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu memiliki *trendline* grafik yang parabolic terbuka kebawah dimana nilai CoP naik kemudian

setelah mencapai nilai maksimum pada nilai TSR tertentu nilai CoP turun hingga mencapai nilai TSR dengan beban paling maksimum dimana nilai maksimum tersebut menunjukkan *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin Savonius baik tanpa silinder pengganggu maupun dengan silinder pengganggu. Pada kecepatan 9 m/s, grafik nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada lebih tinggi dibandingkan grafik turbin angin tanpa silinder pengganggu. Bentuk grafik yang parabolic pada masing-masing kecepatan menunjukkan bahwa *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* dengan silinder pengganggu akan meningkat hingga mencapai kondisi maksimum pada TSR optimum kemudian setelah mencapai titik optimum nilai CoP akan menurun hingga mencapai TSR pada beban yang paling maksimal. Pada gambar 4.22 juga dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai TSR maksimum yang lebih ke kanan atau lebih besar, hal tersebut disebabkan karena TSR maksimum merupakan kondisi ketika turbin angin Savonius tanpa pembebanan, dengan pemberian silinder pengganggu maka putaran poros turbin angin Savonius semakin meningkat dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga kecepatan sudut poros turbin (ω) akan meningkat. Selain itu nilai *Coefficient of Power* juga semakin menurun pada TSR yang semakin kecil pula, hal tersebut disebabkan karena pada TSR yang semakin menurun merupakan kondisi ketika turbin angin *Savonius* diberi pembebanan yang semakin bertambah, pembebanan tersebut dapat menurunkan nilai *coefficient of power* karena semakin besar pembebanan maka putaran turbin angin juga semakin menurun, karena putaran yang menurun tersebut tidak sebanding dengan kecepatan anginnya maka nilai *Coefficient of Power* akan menurun seiring dengan bertambahnya pembebanan.

Berdasarkan grafik 4.22 yaitu pada kecepatan angin 9 m/s, turbin angin dengan silinder pengganggu memiliki nilai *Coefficient of Power* maksimal yang lebih besar dibandingkan

dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu. Nilai Coefficient of Power maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu sebesar 0,0754 pada TSR 0,598 sedangkan pada turbin angin tanpa silinder pengganggu nilai Coefficient of Power maksimal sebesar 0,0623 pada TSR 0,592 dengan kenaikan CoP sebesar 0,0131.

Dapat disimpulkan bahwa nilai CoP maksimal turbin angin Savonius dengan pemberian silinder pengganggu didepan *Returning Blade* meningkat dibandingkan dengan nilai CoP turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu sehingga peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya drag yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat

dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

4.3.7.2 Analisa Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) Terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 9 m/s

Gambar 4.23 dibawah ini merupakan grafik nilai C_M turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu terhadap fungsi TSR dengan rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6 dan rasio diameter pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5 pada kecepatan 9 m/s



Gambar 4. 23 Grafik *Coefficient of Moment* Terhadap *Tip Speed Ratio* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 9 m/s

Gambar 4.23 merupakan grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan 9 m/s pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Berdasarkan grafik diatas terlihat bahwa trendline dari kedua grafik membentuk parabolic dimana nilai C_M

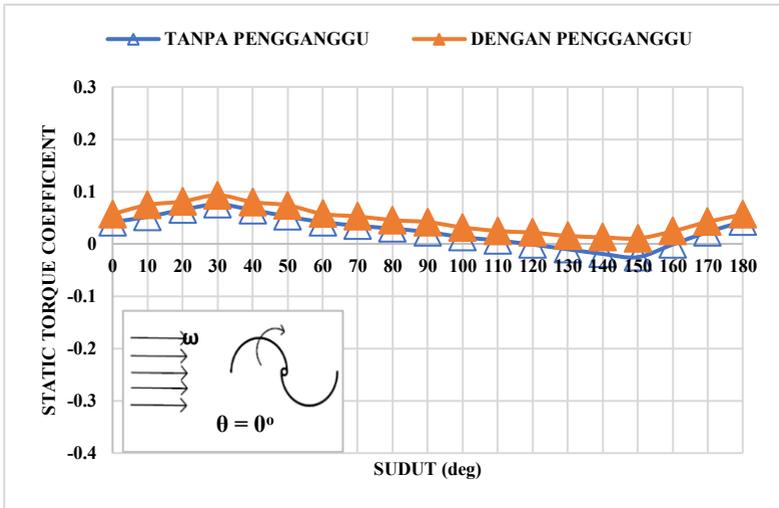
akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai TSR. Nilai TSR maksimum mengindikasikan turbin angin Savonius berputar tanpa pembebanan sedangkan TSR minimum mengindikasikan turbin angin Savonius berhenti berputar akibat adanya pembebanan yang paling maksimum. Sehingga pada TSR = 0 mengindikasikan turbin angin memiliki torsi dinamis yang paling maksimal. Pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1452 pada TSR 0 sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai C_M sebesar 0,1519 pada TSR 0.

Berdasarkan grafik 4.23 pada masing-masing kecepatan nilai C_M akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya TSR. Hal tersebut dikarenakan massa yang diberikan pada *Brake Dynamometer* kecil sehingga pembacaan nilai s pada neraca pegas juga semakin kecil dan menyebabkan putaran turbin angin *Savonius* menjadi lebih cepat dan TSR meningkat. Pembacaan nilai s pada neraca pegas berpengaruh terhadap Torsi Dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius*. Torsi dinamis pada penelitian ini memiliki rumus yaitu $T_D = |m - s| g \cdot r$ dimana torsi dinamis ini berbanding lurus dengan selisih dari nilai massa pemberat dengan massa yang terbaca pada neraca pegas. Apabila selisih dari kedua massa kecil maka torsi dinamis yang dihasilkan akan kecil pula, sedangkan torsi dinamis berbanding lurus dengan nilai *Coefficient of Moment*, sehingga semakin besar TSR maka nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin kecil. Sama halnya dengan nilai *Coefficient of Power* yang menurun setelah mencapai kecepatan paling optimum, nilai *Coefficient of Moment* juga demikian. Nilai *Coefficient of Moment* naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, namun setelah mencapai kecepatan angin yang optimum, nilai *Coefficient of Moment* turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Dalam hal ini C_M merupakan perbandingan antara torsi *actual* dengan torsi teoritisnya, dimana torsi *actual* turbin angin *Savonius* adalah torsi dinamis dan torsi teoritisnya memiliki rumus $(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot R)$. Dalam hal ini nilai C_M berbanding terbalik dengan kecepatan

angin pangkat dua, sehingga semakin besar kecepatan angin maka semakin kecil nilai C_M namun pada penelitian ini semakin besar kecepatan angin juga diimbangi dengan semakin meningkatnya nilai torsi dinamis sehingga nilai *Coefficient of Moment* yang dihasilkan juga semakin besar.

Nilai C_M yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dalam hal ini peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Moment*. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga torsi dinamis turbin angin Savonius juga meningkat. Meningkatnya torsi dinamis tersebut menghasilkan nilai *Coefficient of Moment* juga meningkat.

4.3.7.3 Analisa Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Fungsi Posisi Sudut Blade (θ) Pada Kecepatan 9 m/s



Gambar 4. 24 Grafik Static Torque Coefficient (C_{Ts}) Terhadap Posisi Sudut Blade Turbin Angin Savonius Tanpa dan Dengan Silinder Pengganggu Pada Kecepatan 9 m/s

Gambar 4.24 diatas merupakan grafik *Static Torque Coefficient* sebagai fungsi posisi sudut blade dilakukan pada turbin angin *Savonius* dengan menggunakan silinder pengganggu dengan variasi posisi sudut blade dari 0° hingga 180° dengan kenaikan 10° setiap sudutnya. Pengukuran torsi statis turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menggunakan alat *Torque Meter* yang dipasang pada poros turbin angin *Savonius* dalam keadaan turbin angin tidak berputar atau diam. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *trendline* grafik membentuk *sinusoidal* dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum yang berbeda pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Nilai *Static Torque Coefficient* bervariasi

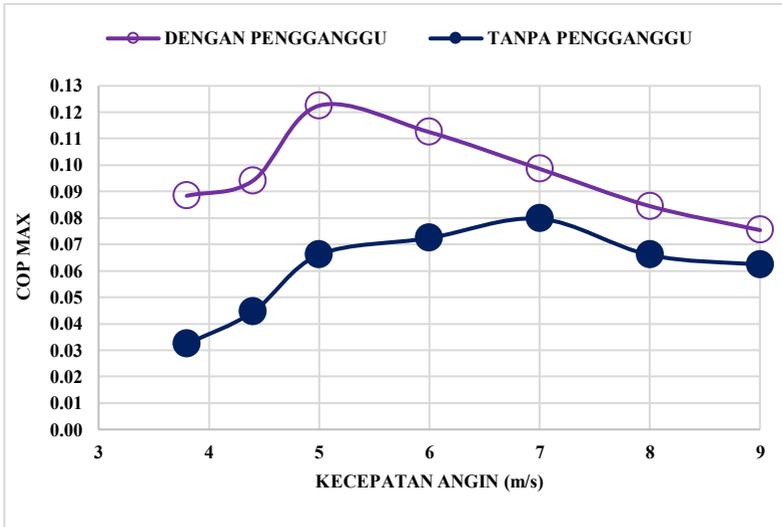
dari -0,025 hingga 0,093 dengan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu pada kecepatan 9 m/s sebesar 0,093 dan nilai torsi statis minimal sebesar 0,01. Sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu memiliki nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,075 sedangkan nilai torsi statis minimum sebesar -0,025. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 30° sedangkan nilai *Static Torque Coefficient* minimum pada kedua grafik terjadi ketika posisi sudut blade 150°.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Static Torque Coefficient* meningkat hingga sudut 30° kemudian setelah mencapai sudut 30° nilai *Static Torque Coefficient* mengalami penurunan hingga posisi sudut *blade* berada pada sudut 150° dan naik kembali hingga posisi sudut *blade* sebesar 180°. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada diatas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 pada kecepatan 9 m/s efektif dalam meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* dimana nilai *Static Torque Coefficient* sebanding dengan nilai torsi statis turbin angin Savonius dimana turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu memiliki nilai torsi statis yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Dalam penelitian ini telah didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum yang terjadi pada posisi sudut *blade* 30° dan dapat dikatakan bahwa pada sudut tersebut turbin angin *Savonius* memiliki nilai torsi statis paling maksimum sehingga turbin angin Savonius tersebut memiliki kemampuan *self-starting* yang baik dan dapat dikatakan juga bahwa turbin angin *Savonius* dapat berputar dengan sendirinya tanpa diberikan gaya eksternal untuk bisa memutar turbin. Hal tersebut disebabkan karena *advancing blade* turbin angin *Savonius* menerima gaya *drag* yang lebih besar dibandingkan dengan

returning blade sehingga turbin dapat berputar tanpa diberikan gaya eksternal. Sedangkan pada sudut 10° memiliki nilai *Static Torque Coefficient* minimum turbin angin Savonius bernilai positif yang artinya pada sudut tersebut nilai torsi statisnya bernilai positif sehingga dapat disimpulkan bahwa pemberian silinder pengganggu efektif dalam meningkatkan Torsi Statis dan juga meningkatkan kemampuan *self-starting* pada semua posisi sudut blade.

4.3.8 Analisa Grafik CoP Max Terhadap Kecepatan Angin Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan Angin

Analisa grafik CoP Max terhadap tujuh kecepatan angin dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Variasi kecepatan yang digunakan yaitu 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s dan 9 m/s. Silinder pengganggu diletakkan dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dan rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,5. Grafik perbandingan COP_{max} terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius tanpa dan dengan silinder pengganggu dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 25 Grafik Perbandingan Coefficient of Power Maksimal (COP_{max}) Terhadap Kecepatan Angin Pada Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu

Berdasarkan grafik 4.25 tersebut dapat dilihat bahwa kedua grafik memiliki trendline parabolic dimana grafik turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu berada di atas grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dengan nilai CoP_{max} turbin angin Savonius dengan pengganggu sebesar 0,1225 pada kecepatan angin 5 m/s, sedangkan pada turbin angin Savonius tanpa menggunakan silinder pengganggu nilai CoP_{max} sebesar 0,0797 pada kecepatan angin 7 m/s. Pada grafik turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu, trendline grafiknya meningkat dari kecepatan 3,8 m/s hingga 7 m/s kemudian menurun pada kecepatan 8 m/s dan 9 m/s. Sedangkan pada turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu trendline grafiknya meningkat dari kecepatan 3,8 m/s hingga 5 m/s kemudian menurun pada kecepatan 6 m/s hingga 9 m/s. Grafik tersebut menunjukkan bahwa terjadi pergeseran nilai CoP dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu ke turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yaitu pada turbin tanpa silinder pengganggu nilai CoP max berada pada kecepatan 7 m/s sedangkan pada turbin dengan silinder pengganggu berada pada kecepatan 5 m/s.

Namun secara keseluruhan pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak S/D sebesar 1,6 dengan rasio d/D sebesar 0,5 efektif dalam meningkatkan nilai Coefficient of Power turbin angin Savonius. Hal tersebut disebabkan karena pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* dapat menurunkan tekanan didepan *returning blade* sehingga dapat menyebabkan gaya drag pada *returning blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* menyebabkan selisih gaya drag dari kedua *blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua *blade* juga meningkat. Meningkatnya selisih torsi tersebut menghasilkan daya turbin angin yang meningkat pula sehingga nilai *Coefficient of Power* meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin Savonius dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning*

Blade sehingga dapat mengganggu *boundary layer* *Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya *drag* yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya *drag* dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

Dari kedua grafik diatas menunjukkan bahwa semakin meningkatnya kecepatan angin tidak menjamin nilai *Coefficient of Power* turbin angin Savonius akan semakin meningkat. Dapat dilihat bahwa turbin angin Savonius kurang efektif dioperasikan pada kecepatan angin yang terlalu rendah dan juga pada kecepatan angin yang terlalu tinggi. Kondisi tersebut disebabkan karena semakin meningkatnya kecepatan angin maka losses yang dihasilkan juga semakin besar. Dalam penelitian ini losses yang berkaitan adalah kerugian-kerugian mekanis yaitu adanya gesekan pada *bearing*, dimana pada kondisi kerugian-kerugian mekanis paling minimum akan menghasilkan nilai CoP paling optimum. Hal tersebut diperkuat dengan penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud et al (2012) pada grafik *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin dimana grafik tersebut menunjukkan bahwa grafik CoP terhadap fungsi kecepatan angin mempunyai grafik parabolic dimana nilai CoP akan naik hingga mencapai titik paling optimum pada kecepatan angin tertentu kemudian nilai CoP turun setelah mencapai kondisi optimumnya.

4.3.9 Tabel Perbandingan Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada Variasi Kecepatan

Tabel 4. 1 Perbandingan nilai CoP dan TSR Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu pada $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$

U	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		ΔCoP
	CoP _{max}	TSR	CoP _{max}	TSR	
3,8 m/s	0,0323	0,581	0,0884	0,626	+0,0561
4,4 m/s	0,0445	0,599	0,0941	0,605	+0,0496
5 m/s	0,0661	0,608	0,1225	0,655	+0,0564
6 m/s	0,0724	0,599	0,1125	0,598	+0,0401
7 m/s	0,0797	0,596	0,0986	0,585	+0,0189
8 m/s	0,0660	0,596	0,0845	0,619	+0,0185
9 m/s	0,0623	0,592	0,0754	0,598	+0,0131

Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai Coefficient of Moment Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu

U	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu		ΔC_M
	C _{M0} max	TSR	C _M max	TSR	
3,8 m/s	0,0985	0	0,1867	0	+0,0954
4,4 m/s	0,1313	0,123	0,1981	0	+0,0668
5 m/s	0,1379	0	0,2459	0	+0,1186
6 m/s	0,1381	0,121	0,2425	0	+0,1418
7 m/s	0,1622	0	0,1977	0	+0,037

8 m/s	0,1546	0	0,2001	0	+0,0509
9 m/s	0,1417	0,156	0,1519	0	+0,0134

Tabel 4. 3 Perbandingan Nilai Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dan Dengan Silinder Pengganggu

U	Tanpa Silinder Pengganggu		Dengan Silinder Pengganggu	
	T _{S0max}	T _{S0min}	T _{Smax}	T _{Smin}
3,8 m/s	1,76	-3,82	3,08	-1,8
4,4 m/s	2,28	-2,66	3,48	-0,96
5 m/s	4,52	-2,42	5,62	0,52
6 m/s	4,54	-2,38	5,48	0,82
7 m/s	4,78	-2,16	5,82	0,68
8 m/s	4,84	-1,46	6,08	0,76
9 m/s	5,08	-1,72	6,28	0,7

4.4 Analisa Perbandingan Grafik CoP Max/CoP₀ Max Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu dengan Penelitian M. Rizky Ramadhan pada Tahun 2019

Penelitian peningkatan performa turbin angin *Savonius* dengan pemberian silinder pengganggu didepan returning blade telah dilakukan sebelumnya oleh M. Rizky Ramadhan pada tahun 2019 dengan spesifikasi turbin yang sama dengan penelitian yang dilakukan saat ini. Dimana rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,6. Namun perbedaan dengan penelitian yang dilakukan oleh M. Rizky Ramadhan terletak pada variasinya. Pada penelitian M. Rizky terdapat dua variasi yaitu variasi rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,1 hingga 1 dan variasi kecepatannya sebesar 97000 dan 136000 atau pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s. Sedangkan pada penelitian yang saya lakukan memiliki *range* variasi kecepatan yang lebih luas yaitu sebesar 3,8 m/s hingga 9 m/s dengan *Reynolds Number* sebesar 74000 hingga 175000. Penelitian M. Rizky Ramadhan menghasilkan

kesimpulan bahwa pada S/D 1,6 kondisi paling optimal terjadi pada d/D sebesar 0,5 dan CoP paling optimal terjadi pada *Reynolds Number* sebesar 97000 dengan nilai CoP maksimal sebesar 22%. Pada subbab ini akan dilakukan analisa perbandingan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang dihasilkan oleh M. Rizky Ramadhan dengan penelitian yang saya lakukan pada bilangan *Reynolds* 97000 dan 136000. Tabel perbandingan hasil penelitian yang dilakukan oleh M. Rizky Ramadhan dan penelitian saya dapat dilihat pada tabel 4.4 dibawah ini:

Tabel 4. 4 Perbandingan Hasil Penelitian M. Rizky Ramadhan dan Penelitian Festy Merbasari

Penelitian	Re 97000				Re 136000			
	CoP _{0max}	CoP _{max}	CoP _{0max} / CoP _{max}	ΔCoP (%)	CoP _{0max}	CoP _{max}	CoP _{0max} / CoP _{max}	ΔCoP (%)
Rizky	0,1520	0,220	1,447	44,73%	0,1040	0,1460	1,404	40,4%
Festy	0,1040	0,1225	1,853	85,33%	0,0797	0,0986	1,2371	23,71%
Perbedaan relatif CoP _{0max} / CoP _{max}	21,9%				13,5%			

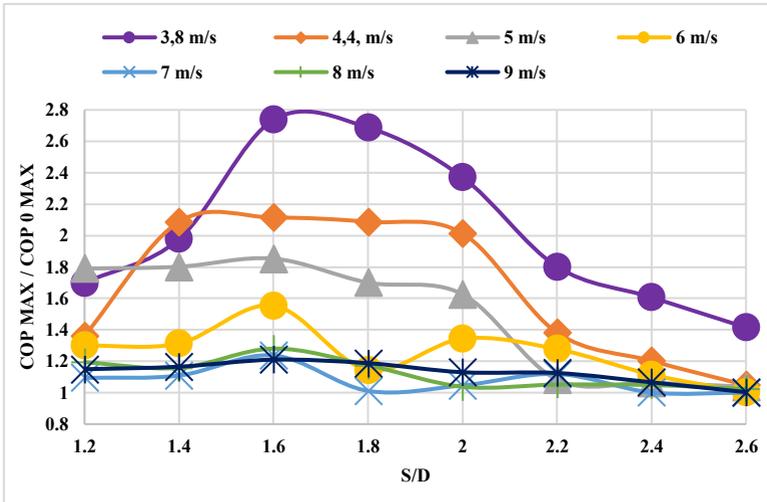
Berdasarkan data tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang dicapai pada penelitian saya pada kecepatan 5 m/s dengan Reynlods Number 97000 adalah sebesar 1,853 dengan kenaikan CoP 85,33% sedangkan pada kecepatan 7 m/s dengan Reynolds Number 136000 nilai CoP_{max}/CoP_{0max} sebesar 1,1117 dengan kenaikan CoP 11,17%. Sedangkan pada penlitian yang dilakukan oleh M. Rizky Ramadhan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} terbesar juga dicapai pada *Reynolds Number* 97000 dengan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} sebesar 1,4474 dengan kenaikan CoP 44,737% dan nilai minimumnya dicapai pada *Reynolds Number* 136000 dengan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} sebesar 1,40385 dengan kenaikan CoP 40,39%. Dengan perbedaan relatif penelitian saya dengan

penelitian M.Rizky Ramadhan sebesar 21,9% pada Reynolds Number 97000 dan 13,5% pada Reynolds Number 136000.

Dari tabel 4.4 diatas menunjukkan bahwa semakin meningkatnya *Reynolds Number* tidak menjamin turbin angin *Savonius* yang diberi silinder pengganggu dapat menghasilkan kenaikan *Coefficient of Power* yang lebih besar, hal tersebut dibuktikan bahwa semakin besar *Reynolds Number* maka semakin mengecil pula nilai perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} sehingga dengan meningkatnya *Reynolds Number* justru tidak efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power*. Selain itu, berdasarkan tabel tersebut terlihat adanya perbedaan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} pada penelitian M. Rizky dan CoP_{max}/CoP_{0max} pada penelitian saya. Turbin angin *Savonius* yang saya gunakan dengan yang digunakan oleh M. Rizky Ramadhan pada tahun 2019 memiliki spesifikasi yang sama namun dalam penelitian yang saya lakukan pada tahun 2020 ini menghasilkan nilai CoP_{max} dan nilai CoP_{0max} yang berbeda. Perbedaan *Coefficient of Power* yang dihasilkan disebabkan karena karakteristik turbin pada penelitian saya dan penelitian yang dilakukan M. Rizky Ramadhan berbeda. Perbedaan karakteristik turbin angin *Savonius* disebabkan karena *bearing* yang digunakan pada penelitian saya tidak segera diganti sehingga dapat menimbulkan gesekan yang besar yang menyebabkan *Coefficient of Power* untuk turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu mengalami penurunan. Selain itu kualitas *bearing* yang digunakan memiliki kualitas yang buruk sehingga *bearing* memiliki umur pakai yang pendek dan menimbulkan gesekan atau *losses* yang besar dan dapat menurunkan *Coefficient of Power*. Oleh sebab itu, penggunaan *bearing* dengan kualitas yang baik sangat penting untuk dapat mempertahankan nilai *Coefficient of Power* pada turbin angin *Savonius* dengan spesifikasi dan dimensi yang sama.

4.5 Analisa Grafik CoP_{max} / CoP_{0max} Terhadap Fungsi S/D Turbin Angin Savonius untuk Tujuh Variasi Reynolds Number

Analisa grafik CoP_{max}/CoP_{0max} terhadap S/D bertujuan untuk mengetahui kenaikan performa turbin angin Savonius setelah diberikan silinder pengganggu pada tiap-tiap posisi S/D. Grafik yang dihasilkan pada gambar berikut ini merupakan gabungan penelitian yang dilakukan oleh Bagas Ramadhan Ananto, Suksmatatya Paramesti, Elza Lisdarina, Vega Nabila Arif, Dionisius Jeremia, Michael Lawrence, Afiyah Shuhufam dan saya sendiri. Variasi S/D yang digunakan adalah 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; dan 2,6 dengan variasi kecepatan sebesar 3,8 m/s, 4,4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s dan 9 m/s. Berdasarkan hasil penelitian untuk nilai perbandingan CoP_{max}/CoP_{0max} yang mendekati nilai 1 mulai terjadi pada S/D 2,2 hingga S/D 2,6. Selain itu nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang mendekati 1 juga mulai terjadi pada kecepatan 7 m/s hingga 9 m/s sehingga pada kondisi tersebut kurang efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* turbin angin Savonius. Grafik CoP_{max}/CoP_{0max} terhadap fungsi S/D pada masing-masing kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.26 berikut ini:



Gambar 4. 26 Grafik CoP_{max}/CoP_{0max} Terhadap Fungsi S/D Turbin Angin Savonius pada Tujuh Variasi Kecepatan Angin

Dalam hal ini pemberian silinder pengganggu yang diletakkan didepan Returning Blade menyebabkan kenaikan *coefficient of power* dari turbin dibuktikan dengan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang lebih dari satu ($CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$). Nilai $CoP_{max}/CoP_{0max} > 1$ terjadi pada semua S/D pada semua variasi kecepatan angin sehingga kehadiran silinder pengganggu dapat meningkatkan performance turbin angin Savonius. Berdasarkan grafik diatas pada kecepatan angin yang rendah peningkatan *Coefficient of Power* semakin besar. Pada semua variasi kecepatan peningkatan CoP tertinggi terjadi pada S/D 1,6. Dimana pada S/D 1,6 pada semua variasi kecepatan terjadi kenaikan CoP secara berturut-turut pada kecepatan 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s dan 9 m/s yaitu sebesar 173,7%; 111,5%; 85,4%; 55,4% 23,7%; 28%; dan 21%. Sedangkan pada kecepatan 7 m/s hingga 9 m/s nilai CoP_{max}/CoP_{0max} mendekati 1

pada semua variasi S/D. Pada kecepatan 7 m/s kenaikan CoP sebesar 0% dan terjadi pada S/D 2,6. Dalam hal ini pemberian silinder pengganggu pada kecepatan angin yang rendah menghasilkan kenaikan *Coefficient of Power* yang besar, hal tersebut disebabkan karena dengan adanya silinder pengganggu tersebut dapat menurunkan tekanan didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* secara signifikan sehingga selisih gaya *drag* pada *Returning Blade* turbin angin *Savonius* menurun dan menyebabkan selisih gaya *drag* pada kedua blade yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik sehingga selisih torsi yang dihasilkan meningkat dan daya turbin angin *Savonius* meningkat sehingga nilai *Coefficient of Power* juga meningkat. Selain itu, peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer* *Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya *drag* yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya *drag* dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua *blade* juga akan meningkat dan daya turbin angin *Savonius* meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat. Sedangkan pada kecepatan 7 m/s hingga 9 m/s pemberian silinder pengganggu kurang efektif dalam menurunkan tekanan didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius*, sehingga selisih gaya *drag* pada *Returning Blade* tidak menurun secara signifikan, selain itu pada kecepatan tersebut kerugian mekanis juga semakin meningkat.

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan juga bahwa pemberian silinder pengganggu dengan rasio jarak pusat silinder

pengganggu dengan diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) yang semakin jauh menghasilkan nilai CoP_{max}/CoP_{0max} yang cenderung mendekati 1. Hal tersebut disebabkan karena pemasangan silinder pengganggu pada jarak yang terlalu jauh tersebut menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu tidak jatuh pada permukaan *returning blade* melainkan jatuh pada permukaan *advancing blade* sehingga pemasangan silinder pengganggu dengan jarak yang jauh kurang efektif dalam mengganggu boundary layer pada returning blade sehingga kurang efektif juga dalam menurunkan tekanan didepan *Returning Blade*. Selain itu kesimpulan lain yang didapat yaitu peletakan silinder pengganggu pada jarak S/D sebesar 1,6 efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* untuk ketujuh variasi kecepatan. Peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* pada rasio S/D 1,6 efektif untuk menurunkan tekanan didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* sehingga selisih gaya *drag* pada *Returning Blade* turbin angin *Savonius* menurun dan menyebabkan selisih gaya *drag* pada kedua blade yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik sehingga selisih torsi yang dihasilkan meningkat dan daya turbin angin *Savonius* meningkat sehingga nilai *Coefficient of Power* juga meningkat. Peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* turbin angin *Savonius* dengan rasio jarak S/D 1,6 juga menyebabkan *shear layer* dari silinder pengganggu jatuh pada permukaan *Returning Blade* sehingga dapat mengganggu *boundary layer* *Returning Blade* sehingga dapat mempercepat transisi aliran dari *laminar* menjadi *turbulent* sehingga aliran tersebut mempunyai momentum aliran yang besar untuk dapat menahan tegangan geser dan *adverse pressure gradient* sehingga dapat memundurkan titik separasi dan *wake* yang dihasilkan menyempit sehingga gaya *drag* yang dihasilkan oleh *Returning Blade* menjadi menurun. Menurunnya gaya *drag* pada sisi *Returning Blade* menyebabkan selisih gaya *drag* dari kedua *blade* yaitu *Advancing Blade* dan *Returning Blade* menjadi naik dan menyebabkan selisih torsi dari kedua

blade juga akan meningkat dan daya turbin angin Savonius meningkat pula dan nilai *Coefficient of Power* meningkat.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa yang dilakukan pada penelitian peningkatan performa Turbin Angin Savonius dengan peletakan silinder pengganggu didepan *Returning Blade* Turbin Angin Savonius dengan rasio jarak silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (S/D) = 1,6; rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter sudu turbin (d/D) = 0,5 dengan variasi kecepatan angin sebesar 3,8 m/s; 4,4 m/s; 5 m/s; 6 m/s; 7 m/s; 8 m/s dan 9 m/s didapatkan beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ efektif dalam meningkatkan *Coefficient of Power* pada semua variasi kecepatan. *Coefficient of Power* yang paling tertinggi terletak pada kecepatan angin 5 m/s dengan nilai CoP maksimum sebesar 0,1225 atau sebesar 12,25%.
2. Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* pada semua variasi kecepatan. Nilai *coefficient of moment* tertinggi terletak pada kecepatan 5 m/s dengan nilai C_M maksimum sebesar 0,2358 atau sebesar 23,58%
3. Pemberian silinder pengganggu didepan *returning blade* turbin angin Savonius dengan rasio $S/D = 1,6$ dan $d/D = 0,5$ pada semua variasi kecepatan efektif dalam meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada setiap posisi sudut blade.
4. Berdasarkan perbandingan hasil penelitian yang dilakukan bersama delapan mahasiswa dengan variasi S/D yang berbeda setiap mahasiswa yaitu sebesar 1,2;

1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4 dan 2,6 didapatkan kesimpulan bahwa rasio S/D paling optimum terletak pada $S/D = 1,6$ dibuktikan dengan nilai CoP maksimum paling tinggi dibandingkan dengan S/D lainnya.

5.2 Saran

Adapun saran-saran yang dapat diberikan untuk penelitian yang dilakukan selanjutnya agar bias lebih baik lagi:

1. Menggunakan bearing dengan kualitas yang paling baik agar dapat mengurangi gesekan yang dapat mengurangi performa turbin
2. Membersihkan dan melumasi bearing sebelum melakukan pengambilan data
3. Menggunakan neraca pegas yang memiliki ketelitian lebih kecil dan kapasitas yang lebih besar agar pengambilan data lebih akurat
4. Memberikan jeda waktu beberapa saat setiap pengambilan data agar axial fan tidak mengalami over heating terutama untuk kecepatan angin yang tinggi

DAFTAR PUSTAKA

1. Akwa, J.V., Vielmo, H.A., dan Petry, A.P. 2012. ***“A Review On The Performance of Savonius Wind Turbines”***. Brazil: Renewable and Sustainable Energy Review 16 (2012) 3054 – 3064.
2. Alamin, F.A. 2019. ***“Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder Sirkular Didepan Returning Blade Turbin: Studi Kasus $d/D = 0,5$; $y/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; $2,1$; $2,2$; $2,4$; $2,6$; $2,8$; Bilangan Reynolds = 96000, 134000, 173000”***. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
3. Altan, B.D., Atilgan, M., dan Ozdamar, A. 2008. ***“An Experimental Study On Improvement of a Savonius Rotor Performance With Curtaining”***. Turkey: Experimental Thermal and Fluid Science 32 (2008) 1673 - 1679.
4. Anderson, J.D. 2011. ***“Fundamentals of Aerodynamics 5th Edition”***. USA: The McGraw Hill Inc.
5. Dewan Energi Nasional. 2017. ***“Rencana Umum Energi Nasional 2017”***. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
6. Direktorat Jendral Energi Bar Terbarukan dan Konservasi Energi. 2019. ***“2500 MW PLTB Dibangun Hingga Tahun 2025”***. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
7. Fox, R.W., Mc.Donald, A.T., Pritchard, P.J., dan Leylegian J.C. 2011. ***“Introduction to Fluid Mechanics 8th Edition”***. USA: John Willey dan Sons Inc..

8. Hau, Erich. 2006. *“Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics 2nd Edition”*. Jerman: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
9. Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., dan Lavine, A.S. 2011. *“Fundamental of Heat and Mass Transfer 7th Edition”*. USA: John Willey dan Son Inc..
10. Mahmoud, N.H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., dan Nasef, M.H. 2010. *“An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance”*. Alexandria Engineering Jurnal 51, 19 – 25.
11. Mc. Harg, Jan. 2019. *“Texas A&M Aerospace Engineering Researchers are Contributing to Renewable Energy Solutions with a National Science Foundation Grant”*. Texas: Texas A&M University College of Engineering.
12. Mohamed, M.H., Janiga, G., Pap, E., dan Thevenin, D. 2010. *“Optimizing of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding The Returning Blade”*. Jerman: Renewable Energy 35, 2618 – 2626.
13. Oktaviani, K., Supriadi, A., Kencono, A.W., Prasetyo, B.E., dan Anggreani, D. 2016. *“Prakiraan Penyediaan dan Pemanfaatan Eenergi Skenario Optimalisasi EBT Daerah”*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
14. Ramadhan, M. Rizky. 2019. *“Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Ukuran Diameter Silinder Didepan Sisi Returning Blade Terhadap Kinerja Turbin Angin Savonius”*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

15. Rustam, J.A. 2017. **“Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius: Studi Kasus $d/D = 0,5$; $S/D = 2,0$; Bilangan Reynolds = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
16. Sakti, G., Yuwono, T., Widodo, W.A. 2018. **“Experimental and Numerical Investigation of 65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance”**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
17. Tsutsui, T., Igarashi, T. 2002. **“Drag Reduction of a Circular Cylinder in An Air Stream”**. Jepang: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, 527 – 541.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN-LAMPIRAN

A. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

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

T (°C)	V (m/s)	n	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	r (m)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	Td (Nm)	CoP	CM
28,5	3,8	189	19,803	0	0	0,0127	0,092	1,17	0,805	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	3,8	173	18,148	24	50	0,0127	0,092	1,17	0,738	0,0032	0,0199	0,0270
28,5	3,8	158	16,503	30,2	70	0,0127	0,092	1,17	0,671	0,0050	0,0277	0,0413
28,5	3,8	136	14,278	36,4	90	0,0127	0,092	1,17	0,581	0,0067	0,0323	0,0556
28,5	3,8	108	11,284	39,5	100	0,0127	0,092	1,17	0,459	0,0075	0,0288	0,0627
28,5	3,8	74	7,741	45,7	120	0,0127	0,092	1,17	0,315	0,0092	0,0242	0,0770
28,5	3,8	53	5,505	48,8	130	0,0127	0,092	1,17	0,224	0,0101	0,0188	0,0842
28,5	3,8	41	4,303	51,9	140	0,0127	0,092	1,17	0,175	0,0110	0,0160	0,0913
28,5	3,8	0	0,000	55	140	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0106	0,0000	0,0881

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

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
28,5	4,4	226	23,673	0	0	0,0127	0,092	1,17	0,831	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	4,4	204	21,385	19	70	0,0127	0,092	1,17	0,751	0,0063	0,0296	0,0394
28,5	4,4	194	20,267	25,2	90	0,0127	0,092	1,17	0,712	0,0081	0,0357	0,0501
28,5	4,4	179	18,770	31,4	110	0,0127	0,092	1,17	0,659	0,0098	0,0401	0,0608
28,5	4,4	163	17,051	43,8	140	0,0127	0,092	1,17	0,599	0,0120	0,0445	0,0744
28,5	4,4	147	15,438	56,2	160	0,0127	0,092	1,17	0,542	0,0129	0,0435	0,0803
28,5	4,4	135	14,099	68,6	180	0,0127	0,092	1,17	0,495	0,0139	0,0426	0,0861
28,5	4,4	118	12,391	81	200	0,0127	0,092	1,17	0,435	0,0148	0,0400	0,0920
28,5	4,4	102	10,630	93,4	220	0,0127	0,092	1,17	0,373	0,0158	0,0365	0,0979
28,5	4,4	85	8,943	105,8	240	0,0127	0,092	1,17	0,314	0,0167	0,0326	0,1038
28,5	4,4	78	8,184	118,2	260	0,0127	0,092	1,17	0,287	0,0177	0,0315	0,1097
28,5	4,4	65	6,845	130,6	280	0,0127	0,092	1,17	0,240	0,0186	0,0278	0,1155
28,5	4,4	57	5,980	143	300	0,0127	0,092	1,17	0,210	0,0195	0,0255	0,1214
28,5	4,4	48	5,041	155,4	320	0,0127	0,092	1,17	0,177	0,0205	0,0225	0,1273
28,5	4,4	33	3,502	180,2	350	0,0127	0,092	1,17	0,123	0,0211	0,0161	0,1313
28,5	4,4	0	0,000	192,6	360	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0208	0,0000	0,1295

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

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
28,5	5	252	26,376	0	0	0,0127	0,092	1,17	0,815	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	5	241,4	25,267	19	80	0,0127	0,092	1,17	0,781	0,0076	0,0285	0,0365
28,5	5	222,4	23,278	31,4	130	0,0127	0,092	1,17	0,719	0,0123	0,0425	0,0590
28,5	5	211,2	22,106	43,8	170	0,0127	0,092	1,17	0,683	0,0157	0,0516	0,0756
28,5	5	207,4	21,708	50	190	0,0127	0,092	1,17	0,671	0,0174	0,0562	0,0838
28,5	5	199,4	20,871	56,2	210	0,0127	0,092	1,17	0,645	0,0191	0,0594	0,0921
28,5	5	194,4	20,347	62,4	230	0,0127	0,092	1,17	0,629	0,0209	0,0631	0,1004
28,5	5	188	19,677	68,6	250	0,0127	0,092	1,17	0,608	0,0226	0,0661	0,1086
28,5	5	172,8	18,086	81	270	0,0127	0,092	1,17	0,559	0,0235	0,0633	0,1132
28,5	5	162,4	16,998	93,4	290	0,0127	0,092	1,17	0,525	0,0245	0,0618	0,1177
28,5	5	152,8	15,993	105,8	310	0,0127	0,092	1,17	0,494	0,0254	0,0604	0,1223
28,5	5	143,8	15,051	118,2	330	0,0127	0,092	1,17	0,465	0,0264	0,0590	0,1268
28,5	5	139,6	14,611	130,6	340	0,0127	0,092	1,17	0,451	0,0261	0,0566	0,1254
28,5	5	131,8	13,795	143	360	0,0127	0,092	1,17	0,426	0,0270	0,0554	0,1300
28,5	5	122	12,769	155,4	370	0,0127	0,092	1,17	0,395	0,0267	0,0507	0,1285

28,5	5	102	10,676	167,8	380	0,0127	0,092	1,17	0,330	0,0264	0,0419	0,1271
28,5	5	89,6	9,378	180,2	390	0,0127	0,092	1,17	0,290	0,0261	0,0364	0,1256
28,5	5	81,8	8,562	192,6	400	0,0127	0,092	1,17	0,265	0,0258	0,0329	0,1242
28,5	5	71,2	7,452	205	410	0,0127	0,092	1,17	0,230	0,0255	0,0283	0,1228
28,5	5	49,2	5,150	217,4	430	0,0127	0,092	1,17	0,159	0,0265	0,0203	0,1273
28,5	5	0	0,000	229,8	460	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0287	0,0000	0,1379

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

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
28,5	6	424	44,424	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,144	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	6	369	38,582	19	100	0,0127	0,092	1,17	0,993	0,0101	0,0335	0,0337
28,5	6	344	35,978	31,4	140	0,0127	0,092	1,17	0,926	0,0135	0,0418	0,0452
28,5	6	330	34,554	43,8	170	0,0127	0,092	1,17	0,890	0,0157	0,0467	0,0525
28,5	6	319	33,363	56,2	200	0,0127	0,092	1,17	0,859	0,0179	0,0514	0,0598
28,5	6	311	32,509	68,6	230	0,0127	0,092	1,17	0,837	0,0201	0,0562	0,0671
28,5	6	300	31,402	93,4	270	0,0127	0,092	1,17	0,809	0,0220	0,0594	0,0734
28,5	6	282	29,567	105,8	310	0,0127	0,092	1,17	0,761	0,0254	0,0647	0,0849
28,5	6	272	28,492	118,2	340	0,0127	0,092	1,17	0,734	0,0276	0,0677	0,0922
28,5	6	248	25,972	124,4	380	0,0127	0,092	1,17	0,669	0,0318	0,0711	0,1063
28,5	6	222	23,262	149,2	440	0,0127	0,092	1,17	0,599	0,0362	0,0724	0,1209
28,5	6	202	21,185	174	470	0,0127	0,092	1,17	0,546	0,0368	0,0671	0,1231
28,5	6	181	183	183	500	0,0127	0,092	1,17	0,492	0,0375	0,0617	0,1253
28,5	6	123	121	120	530	0,0127	0,092	1,17	0,329	0,0381	0,0419	0,1274
28,5	6	105	104	105	560	0,0127	0,092	1,17	0,284	0,0388	0,0368	0,1296
28,5	6	96	96	92	610	0,0127	0,092	1,17	0,253	0,0392	0,0331	0,1310

28,5	6	85	84	85	640	0,0127	0,092	1,17	0,227	0,0391	0,0296	0,1306
28,5	6	63	61	61	680	0,0127	0,092	1,17	0,167	0,0402	0,0224	0,1344
28,5	6	44	44	46	720	0,0127	0,092	1,17	0,121	0,0413	0,0167	0,1381
28,5	6	0	0	0	740	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0400	0,0000	0,1335

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

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
28,5	7	473	49,485	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,092	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	7	390	40,797	19	180	0,0127	0,092	1,17	0,900	0,0200	0,0443	0,0492
28,5	7	376	39,394	31,4	230	0,0127	0,092	1,17	0,869	0,0247	0,0528	0,0607
28,5	7	367	38,403	43,8	260	0,0127	0,092	1,17	0,848	0,0269	0,0560	0,0661
28,5	7	352	36,864	56,2	300	0,0127	0,092	1,17	0,814	0,0304	0,0606	0,0745
28,5	7	337	35,282	68,6	350	0,0127	0,092	1,17	0,779	0,0350	0,0670	0,0860
28,5	7	327	34,196	81	380	0,0127	0,092	1,17	0,755	0,0372	0,0690	0,0914
28,5	7	319	33,384	93,4	410	0,0127	0,092	1,17	0,737	0,0394	0,0713	0,0967
28,5	7	308	32,256	118,2	460	0,0127	0,092	1,17	0,712	0,0426	0,0743	0,1044
28,5	7	299	31,296	143	500	0,0127	0,092	1,17	0,691	0,0444	0,0753	0,1091
28,5	7	287	30,063	167,8	550	0,0127	0,092	1,17	0,664	0,0476	0,0775	0,1168
28,5	7	273	28,576	192,6	600	0,0127	0,092	1,17	0,631	0,0507	0,0785	0,1245
28,5	7	258	26,984	242,2	680	0,0127	0,092	1,17	0,596	0,0545	0,0797	0,1338
28,5	7	254	26,562	267	710	0,0127	0,092	1,17	0,586	0,0551	0,0794	0,1354
28,5	7	236	24,696	291,8	740	0,0127	0,092	1,17	0,545	0,0558	0,0746	0,1369
28,5	7	228	23,884	316,6	770	0,0127	0,092	1,17	0,527	0,0564	0,0730	0,1385
28,5	7	211	22,133	341,4	800	0,0127	0,092	1,17	0,489	0,0571	0,0685	0,1401
28,5	7	199	20,837	366,2	830	0,0127	0,092	1,17	0,460	0,0577	0,0652	0,1417
28,5	7	186	19,497	391	860	0,0127	0,092	1,17	0,430	0,0584	0,0617	0,1433
28,5	7	176	18,422	415,8	890	0,0127	0,092	1,17	0,407	0,0590	0,0589	0,1449
28,5	7	156	16,292	440,6	920	0,0127	0,092	1,17	0,360	0,0597	0,0527	0,1465
28,5	7	149	15,564	465,4	950	0,0127	0,092	1,17	0,344	0,0603	0,0509	0,1481

28,5	7	138	14,478	490,2	980	0,0127	0,092	1,17	0,320	0,0610	0,0478	0,1497
28,5	7	129	13,529	515	1010	0,0127	0,092	1,17	0,299	0,0616	0,0452	0,1512
28,5	7	87	9,122	539,8	1040	0,0127	0,092	1,17	0,201	0,0623	0,0308	0,1528
28,5	7	68	7,150	564,6	1070	0,0127	0,092	1,17	0,158	0,0629	0,0244	0,1544
28,5	7	61	6,423	589,4	1110	0,0127	0,092	1,17	0,142	0,0648	0,0225	0,1591
28,5	7	54	5,695	614,2	1140	0,0127	0,092	1,17	0,126	0,0655	0,0202	0,1607
28,5	7	0	0,000	639	1170	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0661	0,0000	0,1622

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

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
28,5	8	485	50,782	0	0	0,0127	0,092	1,17	0,981	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	8	415	43,390	19	200	0,0127	0,092	1,17	0,838	0,0225	0,0355	0,0423
28,5	8	396	41,492	43,8	260	0,0127	0,092	1,17	0,801	0,0269	0,0405	0,0506
28,5	8	377	39,457	68,6	330	0,0127	0,092	1,17	0,762	0,0325	0,0466	0,0611
28,5	8	355	37,190	93,4	410	0,0127	0,092	1,17	0,718	0,0394	0,0532	0,0741
28,5	8	334	34,997	143	510	0,0127	0,092	1,17	0,676	0,0457	0,0580	0,0859
28,5	8	318	33,331	192,6	600	0,0127	0,092	1,17	0,644	0,0507	0,0613	0,0953
28,5	8	311	32,583	217,4	650	0,0127	0,092	1,17	0,629	0,0539	0,0637	0,1012
28,5	8	305	31,961	242,2	690	0,0127	0,092	1,17	0,617	0,0557	0,0647	0,1048
28,5	8	295	30,864	267	740	0,0127	0,092	1,17	0,596	0,0589	0,0660	0,1106
28,5	8	283	29,641	291,8	780	0,0127	0,092	1,17	0,572	0,0608	0,0654	0,1142
28,5	8	274	28,692	316,6	810	0,0127	0,092	1,17	0,554	0,0614	0,0640	0,1154
28,5	8	243	25,465	391	910	0,0127	0,092	1,17	0,492	0,0646	0,0597	0,1214
28,5	8	213	22,249	465,4	1000	0,0127	0,092	1,17	0,430	0,0666	0,0537	0,1251
28,5	8	204	21,364	490,2	1030	0,0127	0,092	1,17	0,413	0,0672	0,0521	0,1263
28,5	8	195	20,362	515	1060	0,0127	0,092	1,17	0,393	0,0678	0,0501	0,1275

28,5	8	174	18,179	614,2	1160	0,0127	0,092	1,17	0,351	0,0679	0,0448	0,1277
28,5	8	161	16,893	663,8	1220	0,0127	0,092	1,17	0,326	0,0692	0,0424	0,1301
28,5	8	145	15,132	763	1320	0,0127	0,092	1,17	0,292	0,0693	0,0381	0,1303
28,5	8	131	13,709	862,2	1420	0,0127	0,092	1,17	0,265	0,0694	0,0345	0,1305
28,5	8	114	11,916	986,2	1550	0,0127	0,092	1,17	0,230	0,0702	0,0304	0,1319
28,5	8	99	10,366	1110,2	1680	0,0127	0,092	1,17	0,200	0,0709	0,0267	0,1333
28,5	8	88	9,249	1172,2	1810	0,0127	0,092	1,17	0,179	0,0794	0,0266	0,1492
28,5	8	0	0,000	1239,2	1900	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,0823	0,0000	0,1546

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

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
28,5	9	606	63,445	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,089	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	9	591	61,885	24	70	0,0127	0,092	1,17	1,062	0,0057	0,0090	0,0085
28,5	9	558	58,447	39,5	140	0,0127	0,092	1,17	1,003	0,0125	0,0186	0,0186
28,5	9	543	56,834	55	190	0,0127	0,092	1,17	0,976	0,0168	0,0243	0,0250
28,5	9	532	55,727	70,5	230	0,0127	0,092	1,17	0,957	0,0199	0,0282	0,0295
28,5	9	519	54,272	86	270	0,0127	0,092	1,17	0,932	0,0229	0,0317	0,0340
28,5	9	500	52,342	101,5	320	0,0127	0,092	1,17	0,899	0,0272	0,0363	0,0404
28,5	9	454	47,524	132,5	450	0,0127	0,092	1,17	0,816	0,0395	0,0479	0,0587
28,5	9	437	45,773	163,5	500	0,0127	0,092	1,17	0,786	0,0419	0,0489	0,0622
28,5	9	413	43,222	225,5	600	0,0127	0,092	1,17	0,742	0,0466	0,0514	0,0692
28,5	9	396	41,398	256,5	660	0,0127	0,092	1,17	0,711	0,0502	0,0530	0,0746
28,5	9	374	39,183	287,5	740	0,0127	0,092	1,17	0,673	0,0563	0,0563	0,0836
28,5	9	358	37,465	318,5	810	0,0127	0,092	1,17	0,643	0,0612	0,0584	0,0908
28,5	9	329	34,481	380,5	950	0,0127	0,092	1,17	0,592	0,0709	0,0623	0,1053
28,5	9	310	32,403	411,5	1000	0,0127	0,092	1,17	0,556	0,0733	0,0605	0,1088
28,5	9	292	30,569	442,5	1050	0,0127	0,092	1,17	0,525	0,0756	0,0589	0,1123
28,5	9	247	25,845	566,5	1250	0,0127	0,092	1,17	0,444	0,0851	0,0560	0,1263

28,5	9	225	23,567	659,5	1370	0,0127	0,092	1,17	0,405	0,0884	0,0531	0,1313
28,5	9	184	19,234	752,5	1490	0,0127	0,092	1,17	0,330	0,0918	0,0450	0,1363
28,5	9	87	9,080	783,5	1550	0,0127	0,092	1,17	0,156	0,0954	0,0221	0,1417
28,5	9	0	0,000	814,5	1600	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,1414	0,0000	0,1452

Tabel A. 8 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

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

170°	-0,7	-0,2	1,92	1,56	1,5	1,84	1,52
180°	0,22	0,68	2,52	2,18	2,44	3,02	2,86

B. Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu

Tabel B. 1 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 3,8 m/s

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
28,5	3,8	268	28,101	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,143	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	3,8	220	23,009	24	80	0,01269	0,092	1,17	0,935	0,0070	0,0543	0,0581
28,5	3,8	212	22,176	30,2	100	0,01269	0,092	1,17	0,902	0,0087	0,0652	0,0724
28,5	3,8	190	19,866	42,6	130	0,01269	0,092	1,17	0,808	0,0109	0,0732	0,0906
28,5	3,8	180	18,812	58,1	160	0,01269	0,092	1,17	0,765	0,0127	0,0808	0,1056
28,5	3,8	164	17,114	82,9	200	0,01269	0,092	1,17	0,696	0,0146	0,0845	0,1214
28,5	3,8	147	15,406	113,9	250	0,01269	0,092	1,17	0,626	0,0169	0,0884	0,1411
28,5	3,8	127	13,266	144,9	290	0,01269	0,092	1,17	0,539	0,0181	0,0811	0,1504
28,5	3,8	102	10,651	175,9	330	0,01269	0,092	1,17	0,433	0,0192	0,0692	0,1598
28,5	3,8	77	8,025	206,9	370	0,01269	0,092	1,17	0,326	0,0203	0,0552	0,1691
28,5	3,8	57	5,927	237,9	410	0,01269	0,092	1,17	0,241	0,0214	0,0430	0,1784
28,5	3,8	31	3,291	268,9	440	0,01269	0,092	1,17	0,134	0,0213	0,0237	0,1774
28,5	3,8	0	0,000	299,9	480	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0224	0,0000	0,1867

Tabel B. 2 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 4,4 m/s

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
28,5	4,4	298	31,191	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,095	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	4,4	260	27,226	24	110	0,01269	0,092	1,17	0,956	0,0107	0,0636	0,0665
28,5	4,4	256	26,762	39,5	130	0,01269	0,092	1,17	0,940	0,0113	0,0658	0,0700
28,5	4,4	240	25,170	55	160	0,01269	0,092	1,17	0,884	0,0131	0,0718	0,0812
28,5	4,4	225	23,567	86	210	0,01269	0,092	1,17	0,828	0,0154	0,0794	0,0959
28,5	4,4	210	22,007	101,5	240	0,01269	0,092	1,17	0,773	0,0172	0,0828	0,1071
28,5	4,4	190	19,835	163,5	330	0,01269	0,092	1,17	0,696	0,0207	0,0897	0,1288
28,5	4,4	165	17,241	179	380	0,01269	0,092	1,17	0,605	0,0250	0,0941	0,1554

28,5	4,4	152	15,891	185,2	390	0,01269	0,092	1,17	0,558	0,0255	0,0884	0,1584
28,5	4,4	128	13,350	231,7	440	0,01269	0,092	1,17	0,469	0,0259	0,0755	0,1611
28,5	4,4	102	10,640	293,7	510	0,01269	0,092	1,17	0,374	0,0269	0,0625	0,1673
28,5	4,4	92	9,639	355,7	580	0,01269	0,092	1,17	0,338	0,0279	0,0587	0,1735
28,5	4,4	79	8,289	417,7	650	0,01269	0,092	1,17	0,291	0,0289	0,0523	0,1796
28,5	4,4	51	5,368	479,7	720	0,01269	0,092	1,17	0,189	0,0299	0,0350	0,1858
28,5	4,4	23	2,448	541,7	790	0,01269	0,092	1,17	0,086	0,0309	0,0165	0,1920
28,5	4,4	0	0,000	603,7	820	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0269	0,0000	0,1981

Tabel B. 3 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 5 m/s

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
28,5	5	338	35,419	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,094	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	5	303	31,672	24	100	0,01269	0,092	1,17	0,979	0,0095	0,0445	0,0455
28,5	5	293	30,625	36,4	140	0,01269	0,092	1,17	0,946	0,0129	0,0587	0,0620
28,5	5	271	28,386	48,8	200	0,01269	0,092	1,17	0,877	0,0188	0,0794	0,0905
28,5	5	263	27,548	73,6	240	0,01269	0,092	1,17	0,851	0,0207	0,0848	0,0996
28,5	5	244	25,560	98,4	300	0,01269	0,092	1,17	0,790	0,0251	0,0954	0,1207
28,5	5	233	24,429	123,2	340	0,01269	0,092	1,17	0,755	0,0270	0,0980	0,1298
28,5	5	224	23,403	148	400	0,01269	0,092	1,17	0,723	0,0314	0,1091	0,1509
28,5	5	216	22,566	172,8	450	0,01269	0,092	1,17	0,697	0,0345	0,1158	0,1660

28,5	5	202	21,185	197,6	510	0,01269	0,092	1,17	0,655	0,0389	0,1225	0,1871
28,5	5	195	20,389	203,8	520	0,01269	0,092	1,17	0,630	0,0394	0,1193	0,1894
28,5	5	153	15,972	250,3	600	0,01269	0,092	1,17	0,494	0,0435	0,1034	0,2094
28,5	5	115	12,016	296,8	680	0,01269	0,092	1,17	0,371	0,0477	0,0852	0,2295
28,5	5	60	6,259	343,3	750	0,01269	0,092	1,17	0,193	0,0506	0,0471	0,2436
28,5	5	36	3,747	436,3	830	0,01269	0,092	1,17	0,116	0,0490	0,0273	0,2358
28,5	5	0	0,000	529,3	940	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0474	0,0000	0,2459

Tabel B. 4 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D =1,6 Pada Kecepatan 6 m/s

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
28,5	6	403,3761	42,220	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,087	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	6	378,997	39,668	24	110	0,01269	0,092	1,17	1,021	0,0107	0,0365	0,0358
28,5	6	360,5616	37,739	61,2	190	0,01269	0,092	1,17	0,972	0,0160	0,0521	0,0536
28,5	6	353,2076	36,969	79,8	220	0,01269	0,092	1,17	0,952	0,0175	0,0555	0,0583
28,5	6	337,2907	35,303	98,4	270	0,01269	0,092	1,17	0,909	0,0214	0,0649	0,0714
28,5	6	325,6048	34,080	117	310	0,01269	0,092	1,17	0,878	0,0240	0,0704	0,0803
28,5	6	314,2212	32,888	135,6	350	0,01269	0,092	1,17	0,847	0,0267	0,0755	0,0892
28,5	6	305,4568	31,971	154,2	380	0,01269	0,092	1,17	0,823	0,0281	0,0773	0,0939
28,5	6	288,0288	30,147	172,8	440	0,01269	0,092	1,17	0,776	0,0333	0,0863	0,1111
28,5	6	265,866	27,827	203,8	520	0,01269	0,092	1,17	0,717	0,0394	0,0942	0,1315
28,5	6	255,9935	26,794	234,8	580	0,01269	0,092	1,17	0,690	0,0430	0,0990	0,1436
28,5	6	246,2217	25,771	265,8	640	0,01269	0,092	1,17	0,664	0,0466	0,1033	0,1556
28,5	6	232,8233	24,369	296,8	710	0,01269	0,092	1,17	0,627	0,0514	0,1078	0,1718
28,5	6	222,0441	23,241	327,8	780	0,01269	0,092	1,17	0,598	0,0563	0,1125	0,1881
28,5	6	194,5421	20,362	343,3	830	0,01269	0,092	1,17	0,524	0,0606	0,1061	0,2024
28,5	6	183,5614	19,213	349,5	850	0,01269	0,092	1,17	0,495	0,0623	0,1030	0,2081
28,5	6	153,7424	16,092	365	880	0,01269	0,092	1,17	0,414	0,0641	0,0887	0,2142

28,5	6	128,4566	13,445	380,5	900	0,01269	0,092	1,17	0,346	0,0647	0,0748	0,2160
28,5	6	91,0821	9,533	396	940	0,01269	0,092	1,17	0,245	0,0677	0,0555	0,2262
28,5	6	51,7935	5,421	411,5	980	0,01269	0,092	1,17	0,140	0,0708	0,0330	0,2364
28,5	6	0	0,000	427	1010	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0838	0,0000	0,2425

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
28,5	7	468,05	48,989	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,081	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	7	430,57	45,067	24	120	0,01269	0,092	1,17	0,995	0,0120	0,0292	0,0293
28,5	7	403,67	42,252	55	210	0,01269	0,092	1,17	0,933	0,0193	0,0442	0,0474
28,5	7	377,78	39,542	86	300	0,01269	0,092	1,17	0,873	0,0266	0,0571	0,0654
28,5	7	370,63	38,793	117	350	0,01269	0,092	1,17	0,856	0,0290	0,0610	0,0712
28,5	7	362,47	37,939	148	400	0,01269	0,092	1,17	0,837	0,0314	0,0645	0,0770
28,5	7	350,78	36,716	179	460	0,01269	0,092	1,17	0,810	0,0350	0,0696	0,0859
28,5	7	342,02	35,799	210	510	0,01269	0,092	1,17	0,790	0,0373	0,0724	0,0917
28,5	7	326,61	34,185	241	580	0,01269	0,092	1,17	0,755	0,0422	0,0782	0,1036
28,5	7	306,96	32,129	303	700	0,01269	0,092	1,17	0,709	0,0494	0,0860	0,1213
28,5	7	294,67	30,843	318,5	750	0,01269	0,092	1,17	0,681	0,0537	0,0897	0,1318
28,5	7	283,19	29,641	365	830	0,01269	0,092	1,17	0,654	0,0579	0,0929	0,1421
28,5	7	273,92	28,671	396	890	0,01269	0,092	1,17	0,633	0,0615	0,0955	0,1509
28,5	7	253,07	26,488	458	1010	0,01269	0,092	1,17	0,585	0,0687	0,0986	0,1687
28,5	7	239,67	25,086	520	1080	0,01269	0,092	1,17	0,554	0,0697	0,0947	0,1711
28,5	7	228,59	23,926	566,5	1130	0,01269	0,092	1,17	0,528	0,0701	0,0909	0,1722
28,5	7	210,55	22,039	613	1180	0,01269	0,092	1,17	0,486	0,0706	0,0843	0,1732
28,5	7	194,44	20,352	659,5	1240	0,01269	0,092	1,17	0,449	0,0723	0,0797	0,1774
28,5	7	172,17	18,021	706	1300	0,01269	0,092	1,17	0,398	0,0739	0,0722	0,1815
28,5	7	155,05	16,229	768	1370	0,01269	0,092	1,17	0,358	0,0749	0,0659	0,1839

28,5	7	110,02	11,516	830	1440	0,01269	0,092	1,17	0,254	0,0759	0,0474	0,1864
28,5	7	85,944	8,996	892	1510	0,01269	0,092	1,17	0,199	0,0769	0,0375	0,1888
28,5	7	73,452	7,688	954	1580	0,01269	0,092	1,17	0,170	0,0779	0,0325	0,1913
28,5	7	48,972	5,126	1078	1710	0,01269	0,092	1,17	0,113	0,0787	0,0218	0,1931
28,5	7	0	0,000	1233	1800	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,0706	0,0000	0,1977

Tabel B. 5 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu $S/D = 1,6$ Pada Kecepatan 7 m/s

Tabel B. 6 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 8 m/s

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 (N.m)	CoP	CM
28,5	8	585,2	61,251	0	0	0,01269	0,092	1,17	1,183	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	8	533	55,787	24	150	0,01269	0,092	1,17	1,077	0,0157	0,0318	0,0295
28,5	8	516,2	54,029	70,5	230	0,01269	0,092	1,17	1,043	0,0199	0,0389	0,0373
28,5	8	493,8	51,684	117	310	0,01269	0,092	1,17	0,998	0,0240	0,0451	0,0451
28,5	8	476,2	49,842	163,5	390	0,01269	0,092	1,17	0,963	0,0282	0,0510	0,0530
28,5	8	457,6	47,895	210	470	0,01269	0,092	1,17	0,925	0,0324	0,0563	0,0608
28,5	8	444	46,472	256,5	550	0,01269	0,092	1,17	0,897	0,0365	0,0616	0,0687
28,5	8	430,2	45,028	303	630	0,01269	0,092	1,17	0,870	0,0407	0,0665	0,0765
28,5	8	415	43,437	349,5	710	0,01269	0,092	1,17	0,839	0,0449	0,0707	0,0843
28,5	8	398,8	41,741	396	790	0,01269	0,092	1,17	0,806	0,0490	0,0743	0,0922
28,5	8	385,6	40,359	442,5	870	0,01269	0,092	1,17	0,779	0,0532	0,0779	0,1000
28,5	8	373,2	39,062	489	940	0,01269	0,092	1,17	0,754	0,0561	0,0796	0,1055
28,5	8	345,4	36,152	535,5	1030	0,01269	0,092	1,17	0,698	0,0616	0,0808	0,1157
28,5	8	334	34,959	582	1100	0,01269	0,092	1,17	0,675	0,0645	0,0818	0,1212
28,5	8	321,4	33,640	644	1190	0,01269	0,092	1,17	0,650	0,0680	0,0830	0,1277
28,5	8	306	32,028	706	1290	0,01269	0,092	1,17	0,619	0,0727	0,0845	0,1366
28,5	8	281,8	29,495	768	1360	0,01269	0,092	1,17	0,570	0,0737	0,0789	0,1385

28,5	8	265,2	27,758	830	1440	0,01269	0,092	1,17	0,536	0,0759	0,0765	0,1427
28,5	8	255	26,690	892	1510	0,01269	0,092	1,17	0,515	0,0769	0,0745	0,1446
28,5	8	238,2	24,932	954	1590	0,01269	0,092	1,17	0,481	0,0792	0,0716	0,1488
28,5	8	229	23,969	1016	1660	0,01269	0,092	1,17	0,463	0,0802	0,0697	0,1506
28,5	8	210	21,980	1078	1740	0,01269	0,092	1,17	0,424	0,0824	0,0657	0,1549
28,5	8	178	18,631	1140	1800	0,01269	0,092	1,17	0,360	0,0822	0,0556	0,1544
28,5	8	161	16,851	1202	1860	0,01269	0,092	1,17	0,325	0,0819	0,0501	0,1539
28,5	8	142	14,863	1264	1930	0,01269	0,092	1,17	0,287	0,0829	0,0447	0,1558
28,5	8	121	12,665	1310,5	2000	0,01269	0,092	1,17	0,245	0,0858	0,0394	0,1613
28,5	8	89	9,315	1372,5	2100	0,01269	0,092	1,17	0,180	0,0906	0,0306	0,1702
28,5	8	64	6,699	1458,5	2250	0,01269	0,092	1,17	0,129	0,0985	0,0240	0,1852
28,5	8	0	0,000	1544,5	2400	0,01269	0,092	1,17	0,000	0,1065	0,0000	0,2001

Tabel B. 7 Data Penelitian Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D = 1,6 Pada Kecepatan 9 m/s

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
28,5	9	592,2	61,984	0	0	0,0127	0,092	1,17	1,064	0,0000	0,0000	0,0000
28,5	9	572,2	59,890	24	70	0,0127	0,092	1,17	1,028	0,0057	0,0087	0,0085
28,5	9	555,2	58,111	55	120	0,0127	0,092	1,17	0,998	0,0081	0,0120	0,0120
28,5	9	544,2	56,960	86	180	0,0127	0,092	1,17	0,978	0,0117	0,0170	0,0174
28,5	9	522,8	54,720	148	290	0,0127	0,092	1,17	0,939	0,0177	0,0247	0,0262
28,5	9	511,2	53,506	210	380	0,0127	0,092	1,17	0,919	0,0212	0,0289	0,0314
28,5	9	500,6	52,396	272	470	0,0127	0,092	1,17	0,899	0,0246	0,0329	0,0366
28,5	9	486	50,868	334	590	0,0127	0,092	1,17	0,873	0,0319	0,0413	0,0473
28,5	9	461,2	48,272	396	730	0,0127	0,092	1,17	0,829	0,0416	0,0512	0,0617
28,5	9	443,6	46,430	458	840	0,0127	0,092	1,17	0,797	0,0476	0,0563	0,0706
28,5	9	429	44,902	520	950	0,0127	0,092	1,17	0,771	0,0535	0,0613	0,0795
28,5	9	418,2	43,772	582	1040	0,0127	0,092	1,17	0,751	0,0570	0,0636	0,0847
28,5	9	404,2	42,306	644	1130	0,0127	0,092	1,17	0,726	0,0605	0,0652	0,0898
28,5	9	388,6	40,673	706	1230	0,0127	0,092	1,17	0,698	0,0652	0,0676	0,0969
28,5	9	371,6	38,894	768	1340	0,0127	0,092	1,17	0,668	0,0712	0,0706	0,1057
28,5	9	340,4	35,629	954	1600	0,0127	0,092	1,17	0,612	0,0804	0,0730	0,1194

28,5	9	332,6	34,812	1047	1730	0,0127	0,092	1,17	0,598	0,0850	0,0754	0,1262
28,5	9	316,6	33,137	1140	1840	0,0127	0,092	1,17	0,569	0,0871	0,0736	0,1294
28,5	9	284,6	29,788	1326	2070	0,0127	0,092	1,17	0,511	0,0926	0,0703	0,1375
28,5	9	282,2	29,537	1585	2350	0,0127	0,092	1,17	0,507	0,0952	0,0717	0,1414
28,5	9	245,8	25,727	1743	2520	0,0127	0,092	1,17	0,442	0,0967	0,0634	0,1436
28,5	9	194	20,305	1941	2780	0,0127	0,092	1,17	0,349	0,1044	0,0541	0,1551
28,5	9	0	0,000	2139	3000	0,0127	0,092	1,17	0,000	0,2663	0,0000	0,1519

Tabel B. 8 Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Silinder Pengganggu S/D 1,6 Pada Semua Variasi Kecepatan

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

140°	-1,42	-0,78	1,3	1,5	0,74	0,88	0,84
150°	-1,8	-0,96	1,64	2	0,68	0,76	0,7
160°	-0,78	-0,22	2,02	2,26	1,94	1,38	1,62
170°	0,56	0,9	3	2,5	2,98	2,58	2,84
180°	1,16	1,8	3,46	3,12	3,62	3,84	3,78

Sudut	Static Torque Coefficient (Cts0)						
	3,8 m/s	4,4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0,02161181	0,0433988	0,12290936	0,07268403	0,06123912	0,05701362	0,04178776
10	0,07647256	0,07687787	0,13347188	0,09602293	0,07642642	0,06901648	0,05156787
20	0,10473416	0,10911697	0,17476174	0,11736136	0,09357337	0,0791439	0,06520076
30	0,14629533	0,14135608	0,21701183	0,15136949	0,11708919	0,09077168	0,07527724
40	0,10140926	0,10539707	0,17380151	0,11602771	0,09406328	0,07839372	0,06460802
50	0,07813501	0,07439793	0,13251165	0,09468928	0,07740624	0,06864139	0,05216061
60	0,02161181	0,04463876	0,12194913	0,07268403	0,06172903	0,05738871	0,04149139
70	-0,0448861	0,02107941	0,09314225	0,05201242	0,04605182	0,04726129	0,03467495
80	-0,0947595	0,00743979	0,05473307	0,02467256	0,02890486	0,0397595	0,02904397
90	-0,1379831	-0,0136396	0,03168757	-0,0006668	0,00930835	0,03338297	0,0225239

100	-0,15627	-0,034719	-0,0067216	-0,030674	-0,0156772	0,02775663	0,01274378
110	-0,2011561	-0,0495986	-0,0652956	-0,0513456	-0,0264553	0,01950466	0,00652008
120	-0,2277552	-0,0607583	-0,1161878	-0,0793523	-0,0387031	0,00862706	-0,0014818
130	-0,2543544	-0,0681981	-0,0633751	-0,0506788	-0,0436023	-0,0011253	-0,0103728
140	-0,2859409	-0,0979573	-0,0048011	-0,0320076	-0,0470316	-0,0146285	-0,0192639
150	-0,3175274	-0,1649154	0,0326478	-0,0006668	-0,0529106	-0,0273815	-0,0254876
160	-0,1945063	-0,0681981	0,0556933	0,02400573	-0,0200864	0,0108776	-0,0011855
170	-0,0581856	-0,0123997	0,09218202	0,05201242	0,03674347	0,03450824	0,0225239
180	0,01828692	0,04215883	0,1209889	0,07268403	0,05976938	0,05663853	0,04238049

Tabel B. 9 Static Torque Coefficient Turbin Angin Tanpa Silinder Pengganggu

Tabel B. 10 Static Torque Coefficient Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

Sudut	Static Torque Coefficient (Cts)						
	3,8 m/s	4,4 m/s	5 m/s	6 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	0,09808437	0,10663704	0,16419922	0,10469167	0,08916415	0,07126702	0,05690248
10	0,13964554	0,13639621	0,18148335	0,12669693	0,10386154	0,08514534	0,07438814
20	0,19783118	0,16615539	0,22277321	0,14936901	0,12443788	0,10127419	0,08090821
30	0,25601683	0,21575401	0,26982445	0,18271031	0,14256466	0,11402723	0,09305926
40	0,19450629	0,16615539	0,22085275	0,14870218	0,12100849	0,1008991	0,07972274
50	0,14130799	0,13763618	0,17572197	0,1260301	0,10141198	0,08589552	0,0737954
60	0,1063966	0,1153168	0,16419922	0,10335802	0,08818433	0,07276738	0,05719885
70	0,06317298	0,08307769	0,14019348	0,08402007	0,08230537	0,06526559	0,05245697
80	0,03823628	0,05331852	0,09986385	0,0720172	0,0720172	0,05963924	0,04534416
90	0	0,04711869	0,07681835	0,06534894	0,05878955	0,04651111	0,04149139

100	-0,0216118	0,02231938	0,0652956	0,04734464	0,04703164	0,0397595	0,03141491
110	-0,0714852	0	0,03744894	0,0333413	0,03527373	0,03038226	0,02459847
120	-0,0914346	-0,0136396	0,02496596	0,02733986	0,02890486	0,02438082	0,02133843
130	-0,1080591	-0,0285192	0,03744894	0,03534177	0,02155617	0,01837939	0,01511472
140	-0,1180337	-0,0483587	0,06241491	0,05001195	0,01812678	0,01650394	0,01244742
150	-0,1496202	-0,0595183	0,07873881	0,06668259	0,01665704	0,0142534	0,01037285
160	-0,0648354	-0,0136396	0,09698316	0,07535133	0,04752155	0,02588118	0,02400573
170	0,04654851	0,05579845	0,1440344	0,08335324	0,07299703	0,04838656	0,04208413
180	0,09642192	0,1115969	0,16611968	0,10402485	0,08867424	0,0720172	0,05601338

C. Perhitungan Uncertainty

Pada penelitian ini perhitungan *uncertainty* perlu untuk dilakukan dimana tujuan dari perhitungan *uncertainty* ini adalah untuk mengetahui angka ketidakpastian suatu pengukuran atau eksperimen. Perhitungan *uncertainty* dilakukan pada semua parameter penelitian. Salah satu analisa perhitungan *uncertainty* ini dilakukan pada turbin angin *Savonius* tanpa silinder pengganggu dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s. Berikut ini merupakan contoh perhitungan *uncertainty* pada titik maksimum *Coefficient of Power*.

1. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan Tip *Speed Ratio* (λ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Uncertainty pada pembacaan kecepatan sudut (ω)

$$u_{\omega} = \pm \{ [u_n]^2 \}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{188} = 0,00053191$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{1}{154,5} = 0,0064725$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan angin (U)

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

Kemudian nilai u_ω, u_R, u_U disubstitusikan pada persamaan 3.1 sehingga perhitungan *uncertainty* pada pembacaan *tip speed ratio* adalah sebagai berikut:

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

$$u_\lambda = \pm \{ (0,00053191)^2 + (0,0064725)^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 0,0068$$

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

2. Perhitungan Uncertainty Pada Pembacaan Torsi Dinamis (T_D)

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

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

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

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

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

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

Maka:

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

- Uncertainty pada pembacaan neraca pegas (s-m)

$$u_{(m-s)} = \pm \frac{10}{181,4} = \pm 0,0551$$

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

$$u_{(r)} = \pm \frac{0.01}{12,7} = \pm 0,00079$$

$$U_{TD} = \pm \left\{ [0,04]^2 + [0,00079]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_{TD} = \pm 0,040$$

$$U_{TD} = \pm 4, \%$$

3. Perhitungan Uncertainty Pada Pembacaan Massa Jenis (ρ)

$$\rho \times T = C$$

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

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

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

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

$$u_{\rho} = u_T = \frac{0,1}{28,5} = 0,0035$$

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

4. Perhitungan Uncertainty Pada Pembacaan Luas (A)

$$A = L \times H$$

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

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

$$dA = H + L$$

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

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

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

$$U_A = \pm \{[0,00323]^2 + [0,00336]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$U_A = \pm 0,0047$$

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

5. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan Coefficient of Moment (CM)

$$u_{CM} = \pm \{u_{Td}^2 + (-u_\rho)^2 + (-2 \cdot u_U)^2 + (-u_A)^2 + (-U_R)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm \{ (0,05513)^2 + (-0,00351)^2 + (-2 \cdot 0,002)^2 + (-0,004662)^2 + (-0,00647)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CM} = \pm 0,0558$$

$$u_{CM} = \pm 5,58\%$$

6. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan Coefficient of Power (CoP)

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

$$u_{CoP} = \pm \{ (0,0558)^2 + (0,0068)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = \pm 0,0562$$

$$u_{CoP} = \pm 5,62\%$$

7. Perhitungan Uncertainty Pada Pembacaan Viskositas (μ)

Pada Temperatur = 28,5°

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

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

$$\frac{d\mu}{dT} = \frac{\Delta \mu}{\Delta T} = 5 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$$

Maka,

$$\begin{aligned} u_{\mu} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mu}{\partial T} (\pm \delta T) \\ &= \frac{1}{0,000018575 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}} \times 5 \times 10^{-5} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \times (\pm 0,5^{\circ}\text{C}) \end{aligned}$$

$$u_{\mu} = 1,344 \times 10^{-3} = 0,01344$$

8. Perhitungan Uncertainty pada Pembacaan Reynolds Number (Re)

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

$$u_{Re} = \pm \{ (0,00351)^2 + (0,002)^2 + (0,0032362)^2 + (0,01344)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 0,014$$

$$u_{Re} = \pm 1,4\%$$

BIODATA PENULIS



Festy Merbasari Mahardina merupakan anak pertama dari dua bersaudara kelahiran Surabaya, 9 Mei 1997. Penulis memulai jenjang Pendidikan sekolah dasar di SDN Pucang Anom Sidoarjo (2004 – 2010) kemudai melanjutkan Pendidikan ke jenjang sekolah menengah pertama di SMP Negeri 6 Sidoarjo (2010 – 2013) serta melanjutkan Pendidikan ke jenjang sekolah menengah atas di SMA Negeri 4 Sidoarjo (2013 – 2016). Setelah menjalani Pendidikan selama dua belas tahun (2004 – 2016), penulis melanjutkan Pendidikan ke jenjang perkuliahan tahap Sarjana (S1) di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2016 hingga 2020.

Semasa perkuliahan penulis aktif berpartisipasi dalam berbagai kegiatan akademik maupun non akademik. Pada kegiatan non akademik, penulis berpartisipasi dalam kepanitiaan yang diselenggarakan oleh pihak departemen Teknik Mesin seperti Mechanical City 2017. Pada kegiatan akademik, penulis juga aktif menjadi Asisten Praktikum Mekanika Fluida Dasar I pada tahun ajaran 2018/2019 serta menjadi Asisten Praktikum Mekanika Fluida Dasar II pada tahun ajaran 2018/2019. Selain itu kegiatan akademik lainnya yang pernah diikuti adalah menjadi Grader Mata Kuliah Mekanika Fluida Dasar II pada periode semester genap 2018-2019 serta menjadi Grader Mata Kuliah Mekanika Fluida Dasar II pada periode semester gasal 2019/2020.

Sehubungan dengan hasil penelitian yang dilakukan, berbagai macam kritik dan saran dapat disampaikan untuk penulis melalui e-mail festymerbasari.mahardika@yahoo.co.id