

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI EKSPERIMEN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS
DENGAN PENEMPATAN SILINDER DI SAMPING
ADVANCING BLADE DAN DI DEPAN *RETURNING BLADE***

“Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan *Returning Blade* Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”

M. Rifqi Putra Naufal
NRP 0211184000035

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
NIP 196001291987011001

PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022



TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI EKSPERIMEN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER DI SAMPING *ADVANCING BLADE* DAN DI DEPAN *RETURNING BLADE*

“Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan *Returning Blade* Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”

M. Rifqi Putra Naufal
NRP 0211184000035

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
NIP 196001291987011001

PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022



FINAL PROJECT - TM184835

EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE WITH CYLINDRICAL DISTURBANT ON THE SIDE OF ADVANCING BLADE AND IN FRONT OF RETURNING BLADE

“Case Study for Configuration with Cylindrical Disturbant On the Side of Advancing Blade With Distance $Y/D = 1.82$ and In Front Of Returning Blade With Distance $S/D = 1.82$ ”

M. Rifqi Putra Naufal
NRP 0211184000035

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
NIP 196001291987011001

PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2022

LEMBAR PENGESAHAN

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

“Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan *Returning Blade* Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : M. Rifqi Putra Naufal

NRP. 0211184000035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
2. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.



SURABAYA

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE WITH CYLINDRICAL DISTURBANT ON THE SIDE OF ADVANCING BLADE AND IN FRONT OF RETURNING BLADE

*"Case Study for Configuration with Cylindrical Disturbant On the Side of Advancing Blade
With Distance $Y/D = 1.82$ and In Front Of Returning Blade With Distance $S/D = 1.82$ "*

FINAL PROJECT

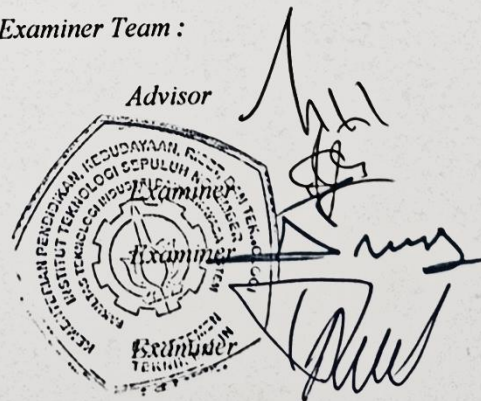
*Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember*

By : M. Rifqi Putra Naufal

NRP. 0211184000070

Approved by Final Project Examiner Team :

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
2. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.



SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama mahasiswa / NRP : M. Rifqi Putra Naufal/ 0211184000035
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing/NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA / 196001291987011001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul

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

“Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan *Returning Blade* Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”



adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

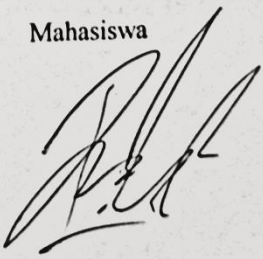
Surabaya, 19 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA)
NIP. 196001291987011001

Mahasiswa


M. Rifqi Putra Naufal
NRP. 0211184000035

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : M. Rifqi Putra Naufal/ 0211184000035
Department : Mechanical Engineering
Advisor/NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA / 196001291987011001

Hereby declare that the Final Project with the title of

EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE WITH CYLINDRICAL DISTURBANT ON THE SIDE OF ADVANCING BLADE AND IN FRONT OF RETURNING BLADE

*“Case Study for Configuration with Cylindrical Disturbant On the Side of Advancing Blade
With Distance $Y/D = 1.82$ and In Front Of Returning Blade With Distance $S/D = 1.82$ ”*

is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 19 July 2022

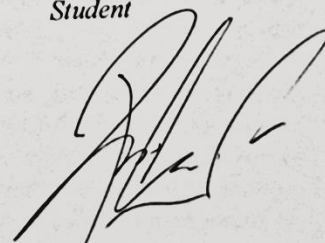
Acknowledged

Advisor



(Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA)
NIP. 196001291987011001

Student



M. Rifqi Putra Naufal
NRP. 0211184000035

**STUDI EKSPERIMEN KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN
PENENPATAN SILINDER DI SAMPING *ADVANCING BLADE* DAN DI DEPAN
*RETURNING BLADE***

“Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping Advancing Blade Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan Returning Blade Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”

Nama Mahasiswa : M. Rifqi Putra Naufal
NRP : 021184000035
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Energi angin yang dimiliki Indonesia diidentifikasi memiliki potensi sekitar 978 MW. Pada beberapa wilayah Indonesia, telah dilakukan beberapa kali penelitian dan pengukuran potensi energi angin oleh LAPAN dan BMKG. Berdasarkan pengukuran, potensi kecepatan angin pada dataran rata-rata adalah sekitar 3 m/s dan 7 m/s. Potensi energi angin terbesar berada pada wilayah Sidrap dan Jeneponto di Sulawesi Selatan memiliki potensi menghasilkan listrik kurang lebih sebesar 200 MW. Saat ini kedua wilayah tersebut telah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA). Selain Sidrap dan Jeneponto, beberapa wilayah yang memiliki potensi antara lain adalah Sukabumi (170 MW), Garut (150 MW), Lebak dan Padeglang (masing-masing 150 MW), dan Lombok (100 MW). Turbin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Banyak penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius ini. Penelitian ini dilakukan dalam upaya meningkatkan lebih jauh performa turbin angin Savonius dengan penempatan silinder di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade*.

Turbin angin Savonius yang digunakan memiliki 2 sudu turbin dengan diameter sudu (D) 165.2 mm, tinggi turbin (H) 295 mm dengan dua *end plates* pada bagian atas dan bawah dengan tebal (t) 1 mm dengan diameter *end plates* (D_0) 320 mm, diameter poros (b) sebesar 19 mm. Pada penelitian ini silinder pengganggu berbentuk silinder dengan diameter 88,8 sehingga diperoleh rasio dengan diameter sudu $d/D = 0.5$ dengan variasi kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s dengan dua konfigurasi yaitu pertama penempatan silinder di samping *advancing blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan kedua penempatan silinder di samping *advancing blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan silinder di depan *returning blade* pada jarak $Y/D = 1,82$. Penelitian dilakukan menggunakan sumber angin dari *axial fan* yang ditambahkan *honeycomb* pada bagian depannya dengan tujuan agar aliran yang mengalir adalah aliran *uniform*. Pengaturan kecepatan *axial fan*, diatur dengan menggunakan *voltage regulator* kemudian kecepatan aliran udara diukur menggunakan *anemometer*, pengukuran kecepatan turbin menggunakan *tachometer*, dan pengukuran torsi statis dan dimanis menggunakan *torquemeter* dan *brake dynamometer*.

Hasil penelitian yang didapatkan adalah peletakan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ efektif pada kecepatan angin 4 m/s dan 5 m/s, dimana peningkatan tertinggi terjadi pada kecepatan 5 m/s sebesar 3,5% terhadap nilai *coefficient of power* konvensional dan 2,24% terhadap nilai *coefficient of moment* konvensional. Kemudian peletakan silinder di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan di depan *returning blade* dengan jarak $S/D = 1,82$ efektif pada seluruh kecepatan, dimana peningkatan tertinggi terjadi pada kecepatan 5 m/s sebesar 31,75% terhadap nilai *coefficient of power* konvensional dan pada kecepatan 6 m/s sebesar 11,2% terhadap nilai *coefficient of moment* konvensional.

Peletakan silinder di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan di depan *returning blade* dengan jarak $S/D = 1,82$ memperbaiki kemampuan *self starting* tetapi masih belum mampu memberikan kemampuan *self starting*.

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

**EXPERIMENTAL STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE
WITH CYLINDRICAL DISTURBANT ON THE SIDE OF ADVANCING BLADE
AND IN FRONT OF RETURNING BLADE**

“Case Study for Configuration with Cylindrical Disturbant On the Side of Advancing Blade
With Distance $Y/D = 1.82$ and In Front Of Returning Blade With Distance $S/D = 1.82$ ”

Name of Student : M. Rifqi Putra Naufal
NRP : 0211184000035
Department : Mechanical Engineering
Supervisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRACT

Indonesia's wind energy is identified as having a potential of around 978 MW. In several regions of Indonesia, research and measurement of wind energy potential has been carried out several times by LAPAN and BMKG. Based on the measurements, the potential wind speed on the average plain is about 3 m/s and 7 m/s. The greatest potential for wind energy is in the Sidrap and Jeneponto areas in South Sulawesi, which have the potential to generate electricity of approximately 200 MW. Currently, the two areas have built the Teanga Angin Power Plant (PLTA). Besides Sidrap and Jeneponto, several areas that have potential include Sukabumi (170 MW), Garut (150 MW), Lebak and Padeglang (150 MW each), and Lombok (100 MW). The Savonius turbine is a vertical axis wind turbine (VAWT). Many studies have been carried out by previous researchers to improve the performance of this Savonius wind turbine. This research was conducted in an effort to further improve the performance of the Savonius wind turbine with adding cylindrical Disturbant on the side of advancing blade and in front of returning blade.

The Savonius wind turbine used has 2 turbine blades with a blade diameter (D) of 165.2 mm, a turbine height (H) of 295 mm with two end plates on the top and bottom with a thickness (t) of 1 mm and a diameter of end plates (D_0) of 320 mm. , the diameter of the shaft (b) is 19 mm. In this study the intruder cylinder is cylindrical with a diameter of 88.8 so that the ratio of the blade diameter $d/D = 0.5$ with variations in wind speed 4, 5, 6, and 7 m/s with two configurations is obtained, namely the first placement of the cylinder next to the advancing blade at a distance of $S/D = 1.82$ and both cylinders are placed next to the advancing blade at a distance of $S/D = 1.82$ and the cylinder in front of the returning blade at a distance of $Y/D = 1.82$. The research was conducted using a wind source from an axial fan with honeycomb added to the front with the aim that the flow is uniform. Axial fan speed regulation, regulated using a voltage regulator then air flow velocity was measured using an anemometer, turbine speed measurement using a tachometer, and static and sweet torque measurements using a torquemeter and brake dynamometer.

The results obtained are the placement of the disrupting cylinder next to the advancing blade with a distance of $Y/D = 1.82$ effective at wind speeds of 4 m/s and 5 m/s, where the highest increase occurs at a speed of 5 m/s at 3.5% to the value of the conventional coefficient of power and 2.24% to the value of the conventional coefficient of moment. Then the placement of the cylinder beside the advancing blade with a distance of $Y/D = 1.82$ and in front of the returning blade with a distance of $S/D = 1.82$ is effective at all speeds, where the highest increase occurs at a speed of 5 m/s at 31.75% against the value of the conventional coefficient

of power and at a speed of 6 m/s of 11.2% against the value of the conventional coefficient of moment. Placing the cylinder beside the advancing blade with a distance of $Y/D = 1.82$ and in front of the returning blade with a distance of $S/D = 1.82$ improves the self starting ability but is still unable to provide self starting capability.

Keywords: Savonius wind turbine, Cylindrical Disturbant, Static Torque, Coefficient of Power, Coefficient of Moment.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucap puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufiq, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul Studi Eksperimen Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Dan di Depan *Returning Blade* “Studi Kasus Untuk Konfigurasi Penempatan Silinder di Samping *Advancing Blade* Pada Jarak $Y/D = 1,82$ dan di Depan *Returning Blade* Pada Jarak $S/D = 1,82$ ”

Penulisan laporan kerja praktik ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan motivasi yang kuat dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah membantu dan mendukung baik dalam proses pengerjaan tugas akhir ini, antara lain :

1. Bapak Ibu tercinta dan Keluarga yang senantiasa memberi dukungan dan doa hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
3. Rekan satu bimbingan tugas akhir penulis Ando, Dhia Fairuz, Dhau Fara, Farhan, Kornelius Chandra, Murti, dan Alzamora yang dalam susah senang menyelesaikan tugas akhir bersama.
4. Keluarga M61 yang banyak memberikan pengalaman dan pembelajaran berharga selama di Departemen Teknik Mesin.
5. Laboratorium Mekanika Fluida dan Mesin Turbo atas bantuan, semangat dan hiburannya dalam pengerjaan dan penulisan Tugas Akhir.
6. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin ITS yang baik dan ramah.
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	viii
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Turbin Angin.....	5
2.2 Turbin angin Savonius	6
2.3 Bilangan Reynolds	7
2.4 Gaya <i>Drag</i>	8
2.5 Perhitungan Torsi.....	9
2.6 Perhitungan Daya.....	10
2.6.1 Daya Teoritis Turbin	10
2.6.2 Daya Aktual Turbin	10
2.7 <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	11
2.8 <i>Coefficient of Moment (Cm)</i> dan <i>Coefficient of Static Torque (Cts)</i>	12
2.9 <i>Tip Speed Ratio</i>	12
2.10 Penelitian Terdahulu	13
2.10.1 <i>An Experimental Study on Improvement of A Savonius Rotor Performance with Curtaining</i> (Atlan et. al., 2008)	13
2.10.2 <i>A Numerical Study of Savonius Water Turbine Performance Disturbed by Circular Cylinder in Front of Turbine</i> (Setiawan, et al., 2020)	16
2.10.3 <i>Numerical Study of a Circular Cylinder Effect on the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance at the Side of the Advancing Blade with Horizontal Distance Variations</i> (Setiawan, et al., 2019)	19
2.10.4 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius (Putro, 2017) .	22
2.10.5 <i>Numerical Study of the Stagger Angle Effect of a Circular Cylinder Installed in Front of Returning Blade Toward the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance</i> (Setiawan, et al., 2018)	24
2.11 Perbandingan Penelitian	25
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Parameter yang Diukur	27
3.2 Analisis Dimensi	28
3.3 Peralatan.....	31
3.3.1 Turbin Angin Savonius.....	31

3.3.2	<i>Axial Fan</i> dan <i>Voltage Regulator</i>	32
3.3.3	Silinder Pengganggu.....	33
3.3.4	<i>Frame</i> Turbin Angin Savonius	34
3.3.5	<i>Honeycomb</i>	34
3.3.6	Alat Ukur	34
3.5	Prosedur Penelitian	38
3.5.1	Prosedur Penelitian Penentuan Putaran Serta Torsi Dinamis.....	38
3.5.2.	Prosedur Penelitian Penentuan Torsi Statis	39
3.6	<i>Flowchart</i> Penelitian.....	40
3.6.1	<i>Flowchart</i> Pengambilan Data Kecepatan Sudut dan Torsi Dinamis	40
3.6.2	<i>Flowchart</i> Pengambilan Data Torsi Statis.....	43
3.7	Uji Uniformity	45
3.8	Perhitungan <i>Uncertainty</i>	48
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Contoh Perhitungan	53
4.1.1	Perhitungan <i>Reynolds Number</i>	53
4.1.2	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i>	54
4.1.3	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	54
4.1.4	Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	55
4.2	Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dengan Variasi Kecepatan 4, 5, 6, 7 m/s.....	55
4.2.1	Analisis Putaran Turbin Angin Tanpa Silinder Pengganggu.....	55
4.2.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin Tanpa Silinder Pengganggu.....	56
4.2.3	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	57
4.2.4	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	58
4.2.5	Analisis <i>Static Torque Coefficient</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu	59
4.3	Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu di Samping <i>Advancing Blade</i> pada Variasi Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s pada Variasi Jarak Y/D = 1,82 60	
4.3.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu.....	61
4.3.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu.....	64
4.3.3	Analisis <i>Static Torque Coefficient</i> Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu	68
4.4	Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu di Samping <i>Advancing Blade</i> dan di Depan <i>Reutrning Blade</i> pada Variasi Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s pada Variasi Jarak Y/D = 1,82 dan S/D = 1,82	71
4.4.1	Analisis Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Terhadap Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2	72

4.4.2	Analisis Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (CM) Terhadap <i>Fungsi Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2	76
4.4.3	Analisis <i>Static Torque Coefficient</i> Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2.....	80
4.5	Analisis Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power maximum</i> (CoP) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu Terhadap Variasi Jarak.....	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		87
5.1	Kesimpulan	87
5.2	Saran	87
Daftar Pustaka		89
Lampiran.....		90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin Angin Horizontal (Hyams, 2012)	5
Gambar 2.2 Turbin Angin Vertikal (Casini, 2016)	6
Gambar 2.3 Konstruksi Turbin Angin Savonius: (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas (Mahmoud, et al., 2012)	6
Gambar 2.4 Turbin Angin Savonius pada Pearl River Tower (Casini, 2016).....	7
Gambar 2.5 Skema Turbin Angin Savonius.....	8
Gambar 2.6 Gaya Drag yang Timbul Pada Flat Plate Ketika Dialiri Fluida (Pritchard & Leylegian, 2011).....	8
Gambar 2.7 Free Body Diagram (FBD) Brake Dynamometer.....	11
Gambar 2.8 Grafik Hubungan CoP dan Tip Speed Ratio Beberapa Jenis Turbin (Pritchard & Leylegian, 2011).....	13
Gambar 2.9 Skema dan dimensi turbin angin Savonius (Altan, et al., 2008).....	14
Gambar 2.10 Susunan tirai pada turbin angin Savonius (Altan, et al., 2008)	14
Gambar 2.11 Skema percobaan turbin angin Savonius dengan tirai (Altan, et al., 2008).....	15
Gambar 2.12 Hasil percobaan turbin angin Savonius menggunakan tirai (Altan, et al., 2008)	15
Gambar 2.13 Gambar Skematik dari Sudu (Setiawan, et al., 2020).....	16
Gambar 2.14 Simulasi Domain yang Akan Digunakan pada Penelitian (Setiawan, et al., 2020)	17
Gambar 2.15 Coefficient of Torque Sebagai Fungsi TSR (Setiawan, et al., 2020)	17
Gambar 2.16 Coefficient of Power Sebagai Fungsi TSR (Setiawan, et al., 2020).....	18
Gambar 2.17 Velocity Pathline untuk d/D dari 0.5 (Setiawan, et al., 2020).....	18
Gambar 2.18 Skema percobaan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Setiawan, et al., 2019)	19
Gambar 2.19 Pembuatan grid menggunakan software ANSYS 17.0 (Setiawan, et al., 2019).	20
Gambar 2.20 Hasil verifikasi nodes (Setiawan, et al., 2019)	21
Gambar 2.21 Hasil simulasi percobaan koefisien torsi (kiri) dan koefisien daya (kanan) (Setiawan, et al., 2019)	21
Gambar 2.22 Skema alat penelitian (Putro, 2017).....	22
Gambar 2.23 Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan 9×10^4 (Putro, 2017)	22
Gambar 2.24 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan 9×10^4 (Putro, 2017).....	23
Gambar 2.25 Skema Simulasi Pengaruh Sudut (Setiawan, et al., 2018).....	24
Gambar 2.26 Hasil Simulasi Pengaruh Sudut Silinder Pengganggu Terhadap Turbin Angin Savonius (Setiawan, et al., 2018)	25
Gambar 3.1 Skema Penelitian	27
Gambar 3.2 Skema Turbin Angin Savonius.....	32
Gambar 3.3 Axial Fan CKE SF-45H.....	32
Gambar 3.4 <i>Voltage regulator</i>	33
Gambar 3.5 Skema <i>Silinder Pengganggu</i>	33
Gambar 3.6 Skema <i>Frame Turbin</i>	34
Gambar 3.7 Skema <i>Honeycomb</i>	34
Gambar 3.8 Tachometer OMEGA Seri HHT12.....	35

Gambar 3.9 Anemometer Omega HHF-141A.....	35
Gambar 3.10 Skema Brake Dynamometer	36
Gambar 3.11 Masa Pemberat.....	37
Gambar 3.12 Neraca Pegas.....	37
Gambar 3.13 Torquemeter LUTRON TQ-8800.....	38
Gambar 3.14 <i>Flowchart</i> Pengambilan Data Kecepatan Sudut dan Torsi Dinamis	43
Gambar 3.15 <i>Flowchart</i> Pengambilan Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius	45
Gambar 3.16 Posisi Titik Pengambilan Keseragaman Kecepatan Aliran Angin	46
Gambar 3.17 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 4 m/s	46
Gambar 3.18 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 5 m/s	47
Gambar 3.19 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 6 m/s	47
Gambar 3.20 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 7 m/s	48
Gambar 4.1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi Kecepatan Angin	56
Gambar 4.2 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi Kecepatan Angin	56
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Pada Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s.....	57
Gambar 4.4 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Pada Pada Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s.....	58
Gambar 4.5 Grafik <i>Static Torque Coefficient</i> turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CTS) sebagai fungsi posisi angular sudu(θ)	59
Gambar 4.6 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 4 m/s	61
Gambar 4.7 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 5 m/s	62
Gambar 4.8 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 6 m/s	63
Gambar 4.9 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 7 m/s	64
Gambar 4.10 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 4 m/s	65
Gambar 4.11 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 5 m/s	66
Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 6 m/s	67
Gambar 4.13 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada kecepatan angin 7 m/s	67
Gambar 4.14 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 4 m/s.....	68

Gambar 4.15 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 5 m/s.....	69
Gambar 4.16 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 6 m/s.....	70
Gambar 4.17 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 7 m/s.....	71
Gambar 4.18 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 4 m/s.....	72
Gambar 4.19 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 5 m/s.....	73
Gambar 4.20 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 6 m/s.....	74
Gambar 4.21 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 7 m/s.....	75
Gambar 4.22 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 4 m/s	76
Gambar 4.23 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 5 m/s	77
Gambar 4.24 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 6 m/s	78
Gambar 4.25 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Tip Speed Ratio (λ) pada kecepatan angin 7 m/s	79
Gambar 4.26 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 4 m/s.....	80
Gambar 4.27 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 5 m/s.....	81
Gambar 4.28 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 6 m/s.....	82
Gambar 4.29 Grafik <i>Static Torque</i> turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 7 m/s.....	83
Gambar 4.30 Grafik Perbandingan <i>Coefficient Of Power</i> Antara Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu di Samping <i>Advancing Blade</i> Terhadap Variasi Jarak dan Kecepatan	84
Gambar 4.31 Grafik Perbandingan <i>Coefficient Of Power</i> Antara Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu di Samping <i>Advancing Blade</i> dan di Depan <i>Returning Blade</i> Terhadap Variasi Jarak dan Kecepatan	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Data Koefisien Drag pada Objek yang Berbeda (Pritchard & Lylegian, 2011)	9
Tabel 2.2 Variasi panjang tirai pada turbin angin Savonius (Altan, et al., 2008)	14
Tabel 2.3 Hasil koefisien daya akibat pengaruh panjang tirai (Altan, et al., 2008)	15
Tabel 2.4 Hasil Perhitungan dari <i>Input</i> RPM dan TSS (Setiawan, et al., 2020)	17
Tabel 2.5 NTS dan TSS menggunakan fulida air (Setiawan, et al., 2019).....	20
Tabel 2.6 Perbedaan rata-rata koefisien torsi eksperimen dan numerikal (Setiawan, et al., 2019)	21
Tabel 2.7 Perbandingan <i>Coefficient Power</i> pada Variasi Sudut yang Berbeda. (Setiawan, et al., 2018).....	25
Tabel 2.8 Perbandingan Penelitian Terdahulu.....	25
Tabel 3.1 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter.....	28
Tabel 3.2 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter.....	30
Tabel 3.3 Spesifikasi Axial Fan CKE SF-45H.....	32
Tabel 3.4 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC2.....	33
Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12.....	35
Tabel 3.6 Spesifikasi Anemometer Omega HHF-141A.....	36
Tabel 3.7 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA C-5.....	37
Tabel 3.8 Spesifikasi Torquemeter LUTRON TQ-8800.....	38
Tabel 3.9 Hasil <i>Uncertainty</i> CoP,CM, dan Re pada Turbin Angin Konvensional pada Kecepatan 5 m/s	52
Tabel 4.1 Bilangan Reynolds pada Tiap Kecepatan.....	54
Tabel 1 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 4,5 m/s.....	90
Tabel 2 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 5 m/s.....	90
Tabel 3 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 6 m/s.....	91
Tabel 4 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 7 m/s.....	91
Tabel 5 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 4,5 m/s.....	92
Tabel 6 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 5 m/s.....	92
Tabel 7 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 6 m/s.....	93
Tabel 8 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 7 m/s.....	93
Tabel 9 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 4,5 m/s.....	94
Tabel 10 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 5 m/s.....	94
Tabel 11 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 6 m/s.....	95
Tabel 12 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 7 m/s.....	95
Tabel 13 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konvensional.....	96
Tabel 14 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konfigurasi 1.....	97
Tabel 15 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konfigurasi 2.....	98

DAFTAR SIMBOL

A	: <i>Cross Sectional Area</i> (m ²)
b	: Diameter Poros (mm)
t	: Tebal <i>Blade</i> (mm)
L	: Diameter Turbin Angin Savonius (mm)
D	: Diameter <i>Blade</i> (mm)
D_o	: Diameter <i>End Plates</i> (mm)
H	: Tinggi <i>Blade</i> (mm)
C_D	: <i>Coefficient Drag</i>
C_M	: <i>Coefficient of Moment</i>
CoP	: <i>Coefficient of Power</i>
C_{TS}	: <i>Coefficient of Static Torque</i>
F_D	: Gaya <i>Drag</i> (N)
P	: Tekanan (N/m ²)
T	: Torsi Putaran Poros (N-m)
T_D	: Torsi Dinamis (N-m)
T_S	: Torsi Statis (N-m)
E_k	: Energi Kinetik (Joule)
P_w	: Daya Aliran Angin (Watt)
P_T	: Daya Turbin Angin (Watt)
ρ	: Massa Jenis Fluida (Kg/m ³)
U	: Kecepatan Aliran Angin (m/s)
Re	: Bilangan Reynolds
τ	: Tegangan Geser (N/m ²)
μ	: Viskositas Dinamis Fluida (N.s)
\dot{m}	: <i>Mass Flow Rate</i> (Kg/s)
ω	: Kecepatan Sudut Turbin yang Diukur dengan <i>Tachometer</i> (rad/s)
s	: Massa yang Terbaca Pada Neraca Pegas (Kg)
g	: Percepatan Gravitasi (m/s ²)
n	: Kecepatan Putaran Turbin Angin Savonius (rpm)
λ	: <i>Tip Speed Ratio</i>
l	: <i>Turbine Gap</i>
ϕ	: Sudut Aliran Angin (°)
θ	: Posisi Turbin (°)
Y	: Jarak Antara Vertikal Poros Turbin Terhadap Poros Silinder Pengganggu (mm)
S	: Jarak Antara Horizontal Poros Turbin Terhadap Poros Silinder Pengganggu (mm)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi angin yang dimiliki Indonesia diidentifikasi memiliki potensi sekitar 978 MW. Pada beberapa wilayah Indonesia, telah dilakukan beberapa kali penelitian dan pengukuran potensi energi angin oleh LAPAN dan BMKG. Berdasarkan pengukuran, potensi kecepatan angin pada dataran rata-rata adalah sekitar 3 m/s dan 7 m/s. Potensi energi angin terbesar berada pada wilayah Sidrap dan Jeneponto di Sulawesi Selatan memiliki potensi menghasilkan listrik kurang lebih sebesar 200 MW. Saat ini kedua wilayah tersebut telah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA). Selain Sidrap dan Jeneponto, beberapa wilayah yang memiliki potensi antara lain adalah Sukabumi (170 MW), Garut (150 MW), Lebak dan Padeglang (masing-masing 150 MW), dan Lombok (100 MW) (Prasetyo, et al., 2019).

Turbin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Turbin angin ini diciptakan pada tahun 1920 oleh Sigurd Johannes Savonius. Konstruksi dasar kincir angin Savonius adalah plat tabung yang dipotong dua dan disambung membentuk huruf S dengan dua buah sudu setengah silinder yaitu sudu depan dan sudu belakang. Turbin angin Savonius menggunakan gaya *drag* yang berbeda yang muncul pada sudu yang bergerak maju mundur untuk menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Semakin besar perbedaan gaya hambat maka daya yang dihasilkan turbin akan semakin besar. Instalasi pembangkit listrik tenaga angin Savonius ini memiliki kekurangan yaitu kurang efisien dibandingkan instalasi pembangkit listrik tenaga angin jenis lainnya. Berdasarkan kelemahan tersebut, terdapat beberapa penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius (Casini, 2016).

Beberapa penelitian mengenai peningkatan efisiensi turbin angin Savonius telah banyak dilakukan. Penelitian dilakukan oleh **Altan et. al. (2008)** dengan menggunakan dua buah plat. Plat pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dan plat pengarah di samping *advancing blade*. Supaya aliran yang terbentuk bersifat uniform, rotor turbin angin Savonius diletakkan pada jarak sekitar 5 m terhadap luaran terowongan angin. Beberapa percobaan telah dilakukan baik dengan pengganggu dan tanpa pengganggu. Pada penelitian ini juga diteliti pengaruh variasi pada variabel panjang plat dan besar sudut plat. Percobaan dilakukan pada kecepatan angin 7 m/s. Berdasarkan penelitian diperoleh nilai optimum sudu plat pengganggu pada α sebesar 45° dan β sebesar 15° dengan nilai *coefficient of power* (COP) tertinggi pada tipe plat pengganggu sepanjang 45 cm dan plat pengarah sepanjang 52 cm.

Penelitian selanjutnya untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius oleh **Setiawan et. al. (2020)** mengenai pengaruh silinder sirkular yang dipasang pada bagian depan turbin dengan sudut 0° dan jarak S terhadap pusat turbin. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh bahwa silinder yang diletakkan pada bagian depan turbin angin Savonius menciptakan daerah *wake* pada bagian belakang silinder yang mempengaruhi performa turbin angin. Daerah *wake* ini mengurangi torsi statis pada *advancing blade* namun tidak memberikan dampak pada *returning blade*. Hal ini menyebabkan nilai torsi positif pada turbin berkurang sehingga performa turbin angin Savonius berkurang.

Setiawan et. al. (2019) melakukan studi numerik terhadap efek dari silinder pengganggu terhadap performa turbin air Savonius pada sisi *advancing blade* dengan variasi jarak horizontal. Simulasi numerikal menggunakan 2D CFD yang dilakukan dengan menggunakan ANSYS 17 dan penyelesaian persamaan U-RANS *incompressible* dengan pendekatan analisis transien menggunakan *mesh* bergerak. Pada simulasi ini kenaikan sudut sudah ditentukan 1° tiap rotasi. Simulasi ini juga dilakukan menggunakan iterasi hingga 150 iterasi dimana performa turbin tiap 1° dilakukan iterasi sebanyak 150 kali. Berdasarkan simulasi yang dilakukan dengan variasi jarak horizontal silinder pengganggu terhadap turbin dan diameter sudu (X/D) dari 0;

0,5; 1,0; 1,5; dan 2,0; ditemukan bahwa terdapat peningkatan koefisien torsi dan koefisien daya. Peningkatan maksimum terjadi pada rasio $X/D = 0,5$. Terdapat peningkatan koefisien daya sebesar 17,31% pada *tip speed ratio* (TSR) dari 0,9 dibandingkan tanpa penghalang.

Selanjutnya dilakukan penelitian dengan menggunakan silinder pengganggu sebagai upaya peningkatan efisiensi turbin Savonius. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Putro (2017)** silinder pengganggu diletakkan di depan *returning blade*. Model turbin Savonius yang digunakan memiliki diameter sudu turbin (D) = 60 mm dan tinggi (H) = 80 mm, dengan overlap (b) = 14 mm, dan silinder pengganggu dengan diameter (d) = 12 mm dan panjang = 280 mm dengan variasi perbandingan $S/D = 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0$ dan 2,1. Pada penelitian ini dilakukan variasi bilangan Reynolds yaitu 60000, 75000 dan 90000. Nilai koefisien performansi tertinggi pada penelitian ini diperoleh dengan menggunakan $Re = 60000$. Nilai koefisien performansi tertinggi untuk setiap bilangan Reynolds yang digunakan adalah pada konfigurasi $S/D = 1,4$ yaitu penempatan silinder bersirkulasi sebagai objek interferensi hingga 84 mm dari pusat pisau kembali. Pada konfigurasi $S/D = 1,4$ dengan $Re = 6 \times 10^4$, koefisien performansi yang dihasilkan adalah 1,059%; dengan $Re = 7,5 \times 10^4$, koefisien performansi yang dihasilkan adalah 0,827%; dengan $Re = 9 \times 10^4$, nilai koefisien performansi yang dihasilkan adalah 0,690%. Untuk setiap bilangan Reynolds yang digunakan, nilai koefisien performansi selalu meningkat dari $S/D = 1,2$ menjadi $S/D = 1,4$. Kemudian nilai koefisien kinerja yang dihasilkan mengalami penurunan dari $S/D = 1,4$ menjadi $S/D = 2,1$.

Kemudian penelitian oleh **Setiawan et. al.** pada tahun 2018 mengenai studi numerikal pengaruh variasi sudut pada bagian depan *returning blade*. Variasi yang digunakan adalah sudut $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, \text{ dan } 90^\circ$ dengan variasi rasio diameter silinder terhadap diameter sudu 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; dan 0,9. Dimana nilai C_p tertinggi diperoleh pada d/D senilai 0,7. Berdasarkan hasil simulasi adalah silinder pengganggu sebagai kontrol pasif dengan variasi posisi memiliki dampak yang signifikan terhadap performa turbin angin Savonius konvensional. Dimana pada sudut $30^\circ, 60^\circ, \text{ dan } 90^\circ$ terdapat peningkatan sebesar 6,40%; 29,84%; dan 11,52%. dibandingkan turbin angin Savonius konvensional.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius yang sesuai untuk digunakan di Indonesia dengan peletakan silinder pengganggu disamping sudu *advancing turbin* dengan jarak Y terhadap pusat turbin dan dengan menambahkan lagi satu silinder didepan sudu *returning turbin* dengan jarak S terhadap pusat turbin.

1.2 Perumusan Masalah

Turbin Savonius merupakan turbin tipe vertikal axis wind turbin yang pada penelitian ini, turbin Savonius memiliki 2 jenis sudu yang berbeda yaitu *returning blade* dan *advancing blade*. Turbin angin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag* yang timbul pada *advancing blade* dan *returning blade*. Gaya *drag* yang dihasilkan pada sisi *returning blade* lebih kecil daripada sisi *advancing blade*, sehingga torsi yang dihasilkan oleh *returning blade* lebih kecil jika dibandingkan dengan *advancing blade*. Adanya perbedaan gaya *drag* pada kedua *blade* perlu dimaksimalkan agar mampu untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius. Pada penelitian ini terdapat dua variasi penelitian, yang pertama adalah dengan meletakkan silinder pengganggu di samping sudu *advancing turbin* dengan jarak $Y/D = 1,82$ terhadap pusat turbin dan kedua dengan menambahkan silinder pengganggu satu lagi di depan sudu *returning turbin* dengan jarak $S/D = 1,82$. Hipotesa awal penelitian ini adalah:

1. Hipotesa pertama, pada topik A penempatan silinder di samping *advancing blade* pada jarak tertentu akan menimbulkan efek *nozzle* pada bagian samping *advancing blade*. Efek *nozzle* akan meningkatkan *attached velocity* pada *attached flow zone* sehingga tekanan

akan berkurang pada permukaan cembung *advancing blade*. Dampaknya, daya yang dihasilkan oleh turbin akan meningkat. Tetapi, apabila jarak penempatan silinder terlalu jauh, silinder diduga tidak berpengaruh seperti dua obyek yang berdiri sendiri dan saling tidak mempengaruhi.

2. Hipotesis kedua, pada topik B dengan silinder pengganggu pada bagian samping *advancing blade* dan depan *returning blade*, penempatan silinder sirkular di depan *returning blade* diduga menyebabkan tekanan bagian *returning blade* turun sehingga *pressure drag* pada *returning blade* akan menurun dan diduga meningkatkan torsi positif sehingga daya turbin bertambah. Di samping itu *Shear layer* yang terlepas dari silinder sirkular jatuh pada permukaan *returning blade* diduga mengganggu *boundary layer* pada permukaan *returning blade*. Hal ini diduga akan meningkatkan kecepatan transisi *boundary layer* dari *laminar* menuju *turbulent* yang akan menunda separasi sehingga *wake* yang timbul pada bagian belakang *returning blade* akan menyempit. Penyempitan *wake* akan menyebabkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang dan torsi positif turbin meningkat sehingga daya turbin juga akan meningkat. Kemudian pengaruh silinder pengganggu pada bagian samping sudu *advancing* turbin angin Savonius akan menimbulkan efek *nozzle* pada sisi samping *advancing blade* yang diduga akan meningkatkan daya dengan meningkatkan *attached velocity* pada *attached flow zone*. Sehingga diduga dengan pemasangan silinder di depan *returning blade* dan di samping *advancing blade* akan meningkatkan performa turbin angin Savonius.
3. Hipotesa ketiga, pada penelitian yang telah dilakukan oleh **Mahmoud, et al.** pada tahun 2012 setelah mencapai kecepatan optimum, performa turbin akan menurun seiring dengan meningkatnya rugi-rugi pada turbin angin Savonius. Variasi kecepatan ini bertujuan untuk mendapatkan kecepatan optimum pada penelitian ini. Pengaruh variasi kecepatan yang semakin tinggi pada turbin yang diberi silinder pengganggu pada bagian depan *returning blade* dan samping *advancing blade* diduga akan meningkatkan torsi dari turbin angin tanpa adanya penurunan pada kecepatan tertentu. Hal ini dikarenakan semakin besar kecepatan aliran angin maka kecepatan yang ditimbulkan oleh efek *nozzle* akan semakin besar, kemudian pengaruh silinder pada bagian depan *returning blade* berdasarkan penelitian yang telah dilakukan **Putro et. al.** pada tahun 2017, didapat hasil bahwa penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan semua variasi kecepatan efektif dalam peningkatan *coefficient of moment* maksimum turbin angin.
4. Dalam penelitian terdahulu yang dilakukan oleh **Yuwono, et al.** pada tahun 2020, didapatkan bahwa jarak silinder pengganggu di depan *returning blade* sebesar $S/D = 1,8$ diperoleh hasil yang kurang efektif pada kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s. Penelitian ini digunakan jarak yang sama untuk silinder pengganggu di samping *advancing blade* sebesar $Y/D = 1,82$ dan silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan jarak $S/D = 1,82$ dengan dugaan penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* mampu membantu peningkatan performa turbin angin Savonius yang mulanya kurang efektif menjadi lebih efektif.

1.3 Batasan Masalah

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

1. Analisis aliran adalah *external flow*.
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *steady flow*, *incompressible flow*, dan *uniform flow* pada sisi *upstream*.

3. Analisis dilakukan pada dua variasi, yang pertama dengan meletakkan silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin dengan jarak Y terhadap pusat turbin. Kedua, dengan menambahkan lagi satu silinder di depan sudu *returning* turbin dengan jarak S terhadap pusat turbin.
4. Variasi jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (S/D) yang digunakan sebesar 1,82 dan (Y/D) sebesar 1,82. Serta variasi kecepatan angin masuk 4, 5, 6, dan 7 m/s.
5. *Aspect ratio* $H/L = 1$; $d/D = 0,5$.
6. Analisis arah aliran udara yaitu pada aliran satu arah.
7. Perpindahan panas yang terjadi dapat diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh penempatan silinder pengganggu pada turbin angin Savonius dengan ukuran $d/D = 0,5$ pada dua kondisi. Pertama ditempatkan di samping sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan rasio $Y/D = 1,82$. Kedua, silinder pengganggu ditempatkan di samping sudu *advancing* turbin dengan rasio $Y/D = 1,82$ dan di depan sudu *returning* turbin angin Savonius dengan dengan rasio $S/D = 1,82$ dengan variasi kecepatan aliran angin sebesar 4, 5, 6, dan 7 m/s terhadap performa turbin angin Savonius dengan cara :

1. Menghitung *Coefficient of Moment* (C_m) dari turbin angin Savonius.
2. Menghitung *Coefficient of Power* (C_p) dari turbin angin Savonius.
3. Mengukur torsi statis dari turbin angin Savonius.
4. Mengukur torsi dinamis turbin angin Savonius.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

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

BAB II DASAR TEORI

2.1 Turbin Angin

Energi angin merupakan energi terbaru yang sering digunakan pada industri skala besar. Sebagai pertimbangan, energi yang dapat dihasilkan oleh turbin angin kecil adalah 1,4 - 20 kW dari *rated power*. Turbin angin dapat dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan disposisi sumbu rotasi: horizontal atau vertikal.

2.1.1 Turbin Angin Horizontal

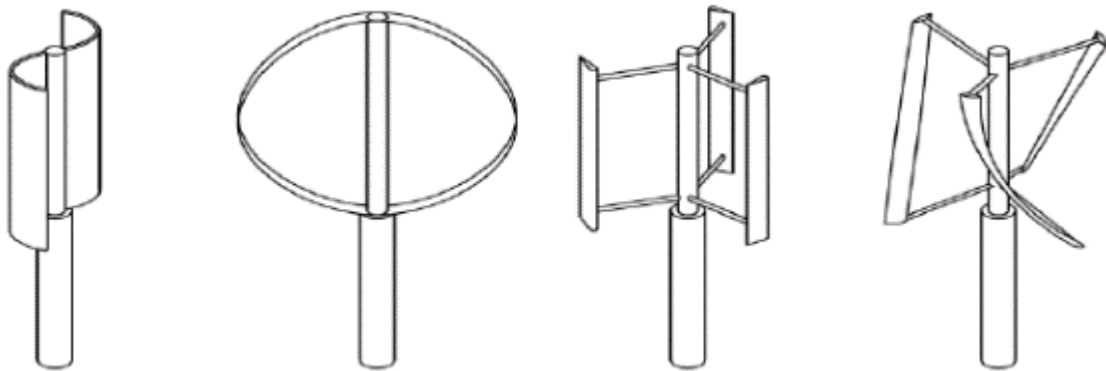
Turbin angin horizontal merupakan mesin angin yang umum digunakan. Gambar 2.1 menunjukkan turbin angin horizontal atau *horizontal axis wind turbines* (HWATs) memiliki sumbu rotasi horizontal ke tanah dan hampir sejajar dengan aliran angin dan mengandalkan aerodinamika pada sudunya yang disambungkan pada rotor. HWATs dapat diposisikan secara *Upwind* atau *Downwind*. HWATs biasanya terdiri dari dua sampai tiga sudu dengan kecepatan ujung sudu yang tinggi. Turbin dengan motor *Upwind* memerlukan *yaw* atau baling-baling ekor untuk membantu mengarahkan ke arah angin sementara mesin *Downwind* memiliki bilah yang berbentuk kerucut yang memungkinkan turbin untuk berorientasi sendiri. Salah satu kelemahan yang ditemukan pada *Downwind* rotor adalah mereka cenderung untuk “Walk” ketika dibariskan dengan angin pada kondisi kecepatan rendah.



Gambar 2.1 Turbin Angin Horizontal (*Hyams, 2012*)

2.1.2 Turbin Angin Vertikal

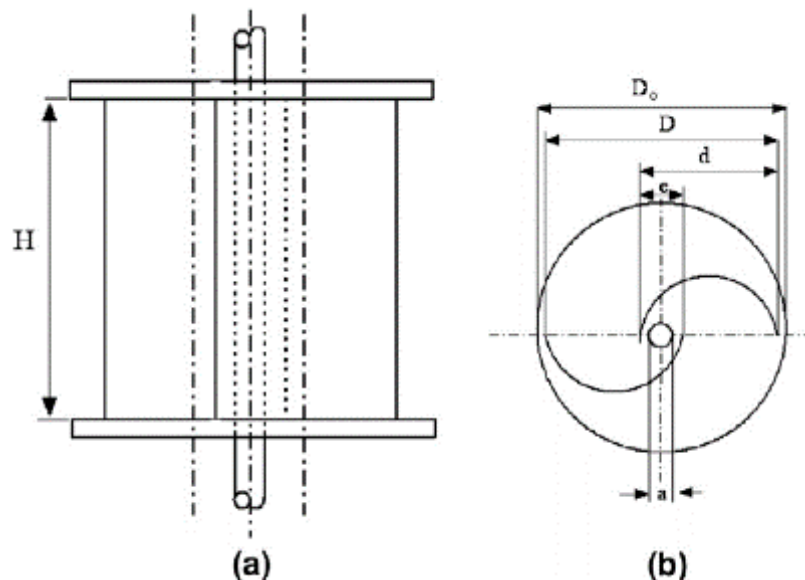
Turbin angin vertikal atau *Vertical axis wind turbine* (VAWT) merupakan jenis turbin yang memiliki poros utamanya berada tegak lurus dengan arah aliran angin seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2. Turbin VAWT memiliki beberapa kelebihan dibandingkan jenis HAWT diantaranya karena karakteristik VAWT yang dapat bergerak tanpa tergantung dengan arah angin. Selain itu, karena VAWT memiliki sumbu putar vertikal sehingga dalam posisi pemasangan transmisi beserta generatornya dapat ditempatkan pada tanah sehingga memudahkan dalam melakukan perawatan serta mengurangi berat dari VAWT itu sendiri.



Gambar 2.2 Turbin Angin Vertikal (Casini, 2016)

2.2 Turbin angin Savonius

Turbin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Turbin angin ini diciptakan pada tahun 1920 oleh Sigurd Johannes Savonius. Gambar 2.3 menunjukkan konstruksi dasar kincir angin Savonius adalah pelat tabung yang dipotong dua dan disambung membentuk huruf S dengan dua buah sudu setengah silinder yaitu sudu depan dan sudu belakang. Turbin angin Savonius menggunakan gaya *drag* yang berbeda yang muncul pada sudu yang bergerak maju mundur untuk menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Semakin besar perbedaan gaya hambat maka daya yang dihasilkan turbin akan semakin besar. Instalasi pembangkit listrik tenaga angin Savonius ini memiliki kekurangan yaitu kurang efisien dibandingkan instalasi pembangkit listrik tenaga angin jenis lainnya. Berdasarkan kelemahan tersebut, terdapat beberapa penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius.



Gambar 2.3 Konstruksi Turbin Angin Savonius: (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas (Mahmoud, et al., 2012)

Berdasarkan cara kerja turbin angin Savonius yang mengandalkan gaya *drag* angin. Kinerja turbin angin Savonius dibatasi oleh kecepatan tangensial dari sudu, yang secara logika tidak mungkin melebihi kecepatan angin yang mendorong sudu. Walaupun ketika dibandingkan dengan Darrieus atau Gorlov, turbin angin Savonius lebih cepat untuk memulai perputaran

karena kedua turbin tersebut karena Darrieus atau Gorlov memerlukan kecepatan yang lebih tinggi untuk menghasilkan performa terbaik.



Gambar 2.4 Turbin Angin Savonius pada Pearl River Tower (Casini, 2016)

Gambar 2.4 menunjukkan turbin angin Savonius yang dipasang pada Pearl River Tower dimana beberapa keunggulan yang dimiliki oleh turbin angin Savonius adalah turbin ini sangat mudah untuk dilakukan perawatan, murah dalam pembuatan karena material yang digunakan mudah untuk ditemukan dan harganya terjangkau. Dalam operasinya, turbin angin Savonius dapat bekerja pada kecepatan angin rendah dan dari segala arah sehingga sangat mudah berputar. Namun turbin ini memiliki kelemahan dimana efisiensi yang dimiliki turbin sangatlah rendah dibandingkan jenis turbin lainnya.

2.3 Bilangan Reynolds

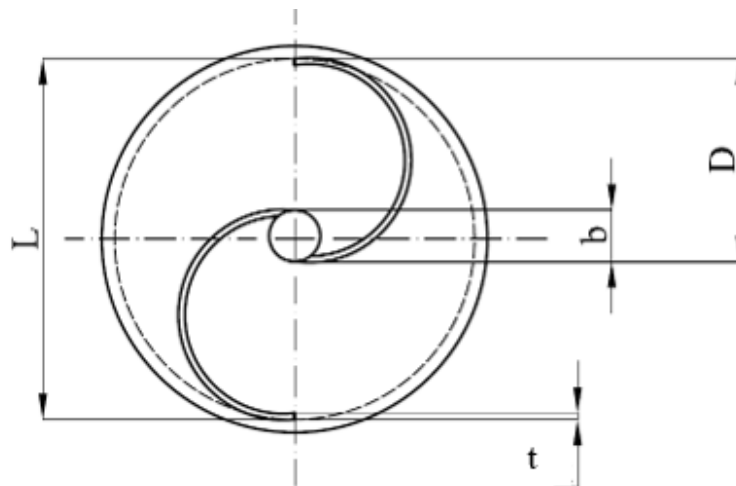
Bilangan Reynolds adalah perbandingan antara gaya inersia terhadap tegangan geser yang ditimbulkan fluida yang memiliki viskositas. Bilangan Reynolds merupakan angka yang tidak berdimensi yang digunakan untuk mendefinisikan suatu aliran pada *boundary layer* tertentu. Terbagi menjadi dua kategori yaitu aliran laminar atau turbulen:

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Tegangan Geser}} = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

- Re = bilangan Reynolds
- P = tekanan (N/m²)
- τ = tegangan geser (N/m²)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m³)
- U = kecepatan aliran fluida (m/s)
- L = panjang karakteristik aliran (m)
- μ = viscositas dinamis fluida (N.s)

Pada penelitian ini panjang karakteristik (*L*) yang digunakan adalah $2D-b-2t$, dimana *D* adalah diameter sudu turbin, *b* adalah diameter poros turbin, *t* adalah tebal dari sudu turbin, dan *H* adalah tinggi dari turbin. Gambar 2.5 menunjukkan skema bentuk turbin angin Savonius yang digunakan pada percobaan kali ini.



Gambar 2.5 Skema Turbin Angin Savonius

Sehingga rumus bilangan Reynolds pada penelitian ini berubah menjadi:

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

2.4 Gaya Drag

Drag merupakan komponen dari sebuah gaya yang bekerja pada *body* yang bekerja secara berlawanan terhadap arah dari pergerakan. Gaya *drag* (F_D) merupakan fungsi dari diameter (d), kecepatan fluida (U), massa jenis fluida (ρ), dan viskositas fluida (μ). Yang dapat dituliskan dalam sebuah rumus fungsi:

$$F_D = f_1(d, U, \mu, \rho) \dots\dots\dots (2.3)$$

Dalam perhitungan gaya *drag*, perlu juga dipertimbangkan bentuk komponen dan koefisien *drag*. Koefisien *drag* merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menunjukkan besarnya gaya *drag* yang melintasi suatu benda melalui aliran fluida. Sehingga gaya *drag* dapat dirumuskan juga menjadi:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

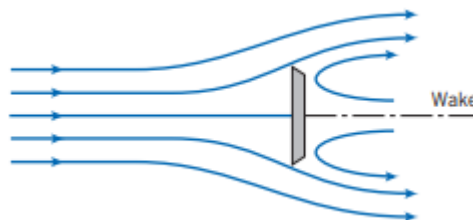
F_D = Gaya *drag* (N)

C_D = Koefisien *drag*

ρ = Massa jenis fluida (Kg/m^3)

U = Kecepatan aliran (m/s)

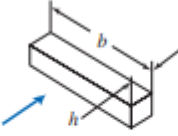




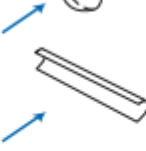

A = Cross sectional area (m^2)



Gambar 2.6 Gaya *Drag* yang Timbul Pada *Flat Plate* Ketika Dialiri Fluida (Pritchard & Leylegian, 2011)

Gambar 2.6 menunjukkan ilustrasi gaya drag pada flat plate. Koefisien Drag (C_D) bergantung pada objek yang dilewati aliran fluida, berikut adalah nilai koefisien drag pada beberapa objek yang berbeda yang ditunjukkan pada tabel 2.1 di bawah.

Tabel 2.1 Data Koefisien Drag pada Objek yang Berbeda (Pritchard & Leylegian, 2011)

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

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

2.5 Perhitungan Torsi

Torsi adalah gaya yang bekerja pada benda dan memiliki kecenderungan untuk memutar suatu benda terhadap sumbu putar tertentu. Torsi dipengaruhi oleh besarnya gaya yang dihasilkan dan jarak gaya tersebut terhadap sumbu putarnya. Pada peneletian kali ini, gaya yang bekerja pada benda adalah gaya drag yang timbul akibat pengaruh aliran angin. Sehingga perumusan torsi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \dots\dots\dots (2.5)$$

$$T = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana:

T : Torsi yang dihasilkan oleh putaran poros turbin (N.m)

F_D : Gaya drag

R : Jari-jari turbin angin Savonius (m) = $L/2 = (2D-b -2t)/2$, mengacu pada gambar 2.5

ρ : Massa jenis fluida (kg/m^3)

U : Kecapatn aliran fluida (m/s)

C_D : Koefisien *drag*
 A : *Cross-sectional area* (m^2)

2.6 Perhitungan Daya

Prinsip kerja turbin angin adalah mengkonversikan energi aliran angin menjadi energi mekanik. Energi mekanik kemudian dikonversikan menjadi hitungan daya yang menjadi indikator performa turbin angin Savonius. Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin Savonius merupakan torsi yang dihasilkan oleh poros turbin dan kecepatan putar yang berbeda bergantung dengan kecepatan angin.

Dalam perhitungan daya turbin angin Savonius, terdapat dua daya, yang pertama daya teoritis turbin dan daya aktual turbin angin Savonius.

2.6.1 Daya Teoritis Turbin

Secara Teoritis, daya turbin adalah daya yang dihasilkan oleh udara akibat laju alirannya. Laju aliran udara tersebut akan menimbulkan energi kinetik yang dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , adalah:

$$m = \dot{m} \cdot t \dots\dots\dots (2.8)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \dots\dots\dots (2.9)$$

Maka dengan substitusi persamaan 2.11 ke 2.10 kemudian 2.9 maka akan diperoleh daya teoritis turbin adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \dots\dots\dots (2.10)$$

Dengan nilai A dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$A = L \cdot H = (2D - b - 2t) \cdot H \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

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

2.6.2 Daya Aktual Turbin

Daya aktual turbin dapat juga dikatakan sebagai daya rotor turbin. Merupakan besaran daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius ketika bekerja. Daya rotor yang timbul akibat torsi dinamis yang diukur menggunakan *Brake dynamometer* dan kecepatan putaran turbin diukur dengan *tachometer*. Maka persamaan dari daya aktual yang dihasilkan oleh rotor turbin adalah sebagai berikut:

$$P_T = T_d \cdot \omega \dots\dots\dots (2.12)$$

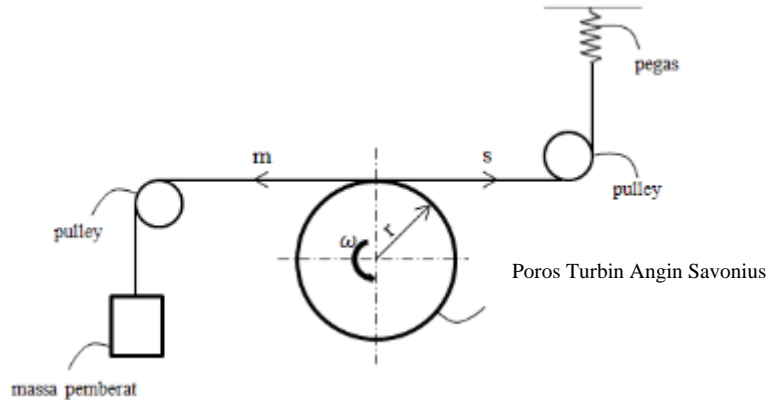
Dimana:

P_T : daya aktual pada rotor turbin (Watt)

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

ω : kecepatan sudut turbin yang diukur dengan menggunakan *tachometer* (rad/s)

Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis (T_D), maka digunakan mekanisme brake dynamometer yang diterapkan pada poros turbin angin Savonius. Namun, *brake dynamometer* tidak dapat menunjukkan nilai torsi dinamis secara langsung. Pengukuran yang dilakukan pada *brake dynamometer* adalah pengukuran massa pemberat yang diberikan serta pembacaan pada neraca pegas. Skema mekanisme *brake dynamometer* dapat dilihat pada gambar 2.7 di bawah.



Gambar 2.7 Free Body Diagram (FBD) Brake Dynamometer

Berdasarkan penelitian **Mahmoud, et al. (2012)** dapat dipelajari bahwa mekanisme pengukuran dilakukan dengan massa pemberat yang diberikan pada turbin angin Savonius dan pembacaan pemberat pada neraca pegas menunjukkan bahwa gaya yang bekerja dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = |m - s|.g \dots\dots\dots (2.13)$$

Besarnya kecepatan putaran turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan rumus sberikut

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \dots\dots\dots (2.14)$$

Pengalihan gaya dengan putaran turbin angin Savonius maka diperoleh daya aktual turbin:

$$P_T = (m - s).g.r.\frac{\pi n}{30} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

- F : Gaya yang bekerja pada poros turbin (N)
- r : Jari-jari poros turbin yang menerima beban (m)
- m : Massa pemberat (kg)
- s : Massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
- g : Percepatan gravitas bumi (m/s^2)
- n : Kecepatan putaran turbin angin Savonius (rpm)

2.7 Coefficient of Power (CoP)

Coefficient of Power (CoP) adalah suatu perbandingan daya yang dihasilkan secara teoritis atau daya kinetik yang dihasilkan oleh energi kinetik aliran angin dengan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius secara aktual atau daya rotor turbin angin Savonius. CoP dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$CoP = \frac{P_T}{P_W} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$CoP = \frac{(m-s).g.r.n}{15.\rho.A.V^3} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana:

- P_T : daya turbin angin (Watt)
- P_W : daya aliran angin (Watt)
- r : Jari-jari poros silinder yang menerima beban (m)
- m : massa pemberat
- s : massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
- g : percepatan gravitas (m/s^2)
- n : kecepatan putaran turbin angin Savonius (rpm)
- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- A : cross sectional section (m^2)

Nilai CoP memili rentang antara 0 hingga 1, yang berarti daya yang dihasilkan oleh rotor turbin angin Savonius tidak akan melebihi daya kinetik aliran angin. Hal ini terjadi karena adanya rugi-rugi ketika proses konversi energi kinetik menjadi energi putar rotor turbin angin Savonius sehingga daya turbin lebih rendah daripada daya aliran angin.

2.8 Coefficient of Moment (Cm) dan Coefficient of Static Torque (Cts)

Parameter selanjutnya yang diukur selanjutnya adalah *coefficient of moment* (Cm). Dimana Cm ini merupakan nilai yang menunjukkan perbandingan antara torsi dinamis turbin angin dengan torsi teoritis dari aliran angin. Pada penelitian ini, turbin angin Savonius digunakan sehingga parameter geometri merupakan turbin angin Savonius tersebut. Sehingga diperoleh rumus sebagai berikut:

$$Cm = \frac{T_d}{\frac{1}{2}.\rho .A .R .U^2} \dots\dots\dots (2.18)$$

Cts sendiri merupakan rasio torsi yang dihasilkan oleh sudu turbin angin, ketika turbin angin berada pada posisi statis terhadap torsi teoritis akibat adanya gaya *drag*. Persamaan C_{TS} dapat dirumuskan melalui persamaan berikut,

$$C_{TS} = \frac{T_S}{\frac{1}{2}.\rho .A .U^2 .R} \dots\dots\dots (2.19)$$

2.9 Tip Speed Ratio

Hubungan antara kecepatan angin dan laju rotasi dari rotor dapat didefinisikan dengan faktor tak berdimensi yang bernama *tip speed ratio* (TSR) atau λ . Pemilihan *tip speed ratio* pada suatu turbin angin bergantung pada beberapa faktor (Ragheb, 2014). Secara umum *tip speed ratio* yang tinggi juga akan menghasilkan putaran poros yang lebih tinggi dan dibutuhkan untuk peningkatan efisiensi dari generator elektrik, namun *tip speed ratio* yang tinggi juga akan menimbulkan kerugian antara lain:

1. Munculnya erosi pada bagian ujung bilah.
2. Munculnya suara bising baik pada rentang yang bisa didengar ataupun tidak.
3. Vibrasi yang berlebihan.

4. Kelebihan kecepatan akan membuat sisten turbin “runaway” yang akan menimbulkan kegagalan turbin yang cukup serius.

Tip speed ratio (λ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega.R}{U} \dots\dots\dots (2.20)$$

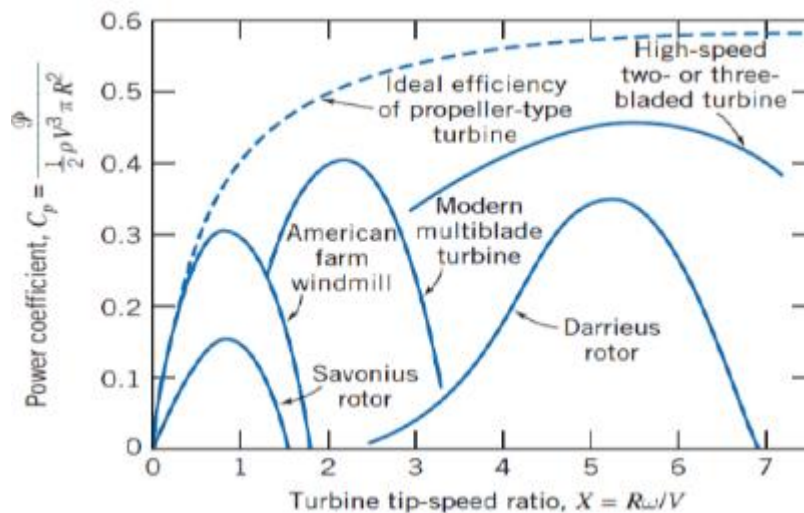
Dimana:

R : Jari turbin angin Savonius (m) = $\frac{L}{2} = \frac{2D-b-2t}{2}$, mengacu pada gambar 2.5

U : kecepatan aliran angin (m/s)

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

Setiap jenis turbin angin memiliki karakteristik masing-masing mengenai hubungan antara *coefficient of Power* dan *tip speed ratio* yang dimiliki. Gambar 2.8 menunjukkan beberapa hubungan antara CoP dan *Tip Speed Ratio* dari beberapa jenis turbin.



Gambar 2.8 Grafik Hubungan *CoP* dan *Tip Speed Ratio* Beberapa Jenis Turbin (Pritchard & Lylegian, 2011)

Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan karakteristik dari berbagai jenis turbin. Bentuk kurva masing-masing turbin hampir sama, dimana CoP semakin meningkat seiring meningkatnya *Tip Speed Ratio*. Namun, pada *Tip Speed Ratio* tertentu nilai CoP akan mulai turun. Pada gambar 2.8 terlihat bahwa turbin angin Savonius memiliki rasio *coefficient of power* dan *tip speed ratio* yang paling kecil daripada lainnya. Semakin kecil nilai *tip speed ratio* maka kerja dari turbin angin Savonius tersebut juga akan semakin lebih awal.

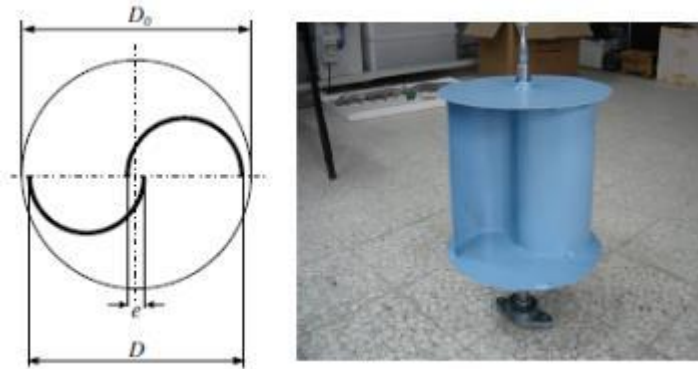
2.10 Penelitian Terdahulu

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

2.10.1 An Experimental Study on Improvement of A Savonius Rotor Performance with Curtaining (Atlan et. al., 2008)

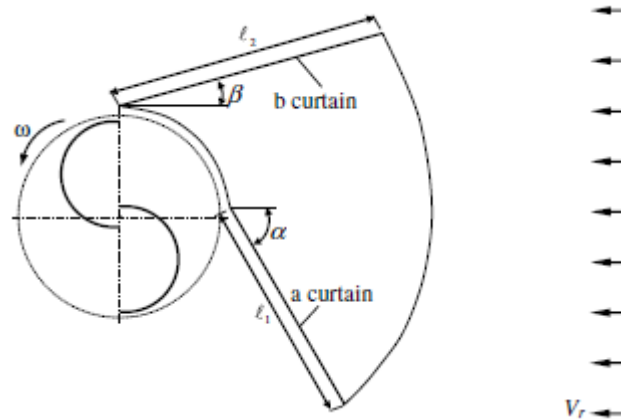
Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **Atlan et. al.** tahun 2008 dengan menggunakan model turbin angin konvensional dua sudu. Desain pada penelitian ini disesuaikan dengan dimensi dari lorong angin peneliti. Pada penelitian sebelumnya mengenai desain dari turbin

angin Savonius, diperoleh rasio *overlap* (e/d) adalah sebesar 0.15 yang mana digunakan pada penelitian ini. Gambar 2.9 menunjukkan skema dan dimensi yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 2.9 Skema dan dimensi turbin angin Savonius (Altan, et al., 2008)

Penelitian menggunakan tirai untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius dilakukan oleh peneliti. Susunan tirai yang digunakan menggunakan lembaran plat yang disusun sedemikian rupa untuk mengarahkan udara ke arah sudu sehingga diharapkan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius bisa lebih besar. Gambar 2.10 adalah susunan tirai yang diterapkan oleh peneliti.



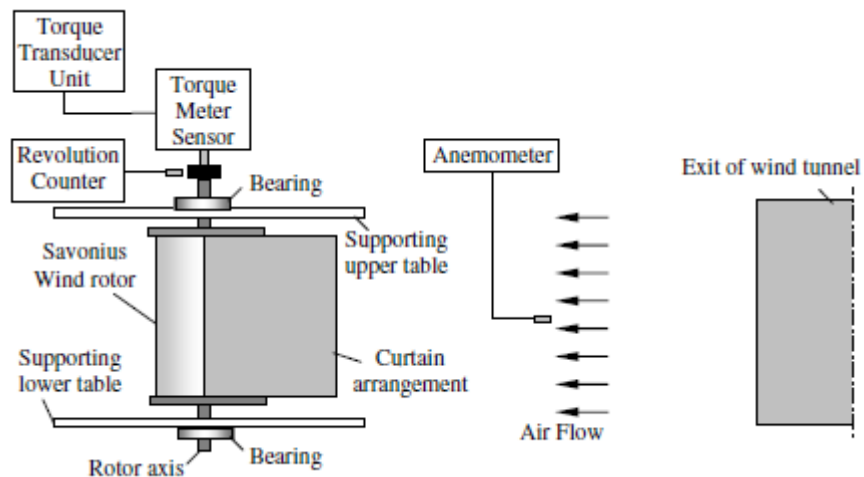
Gambar 2.10 Susunan tirai pada turbin angin Savonius (Altan, et al., 2008)

Peneliti juga menggunakan variasi sudut α dan β pada tirai agar didapatkan hasil yang maksimal. Terdapat tiga variasi sudut yang dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Variasi panjang tirai pada turbin angin Savonius (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

Dalam penelitian, supaya angin yang ditimbulkan bersifat *uniform flow*, rotor turbin angin Savonius diletakkan sejauh kurang lebih 5 m dari luaran lorong angin yang susunan skema percobaan dapat dilihat pada gambar 2.11 di bawah.



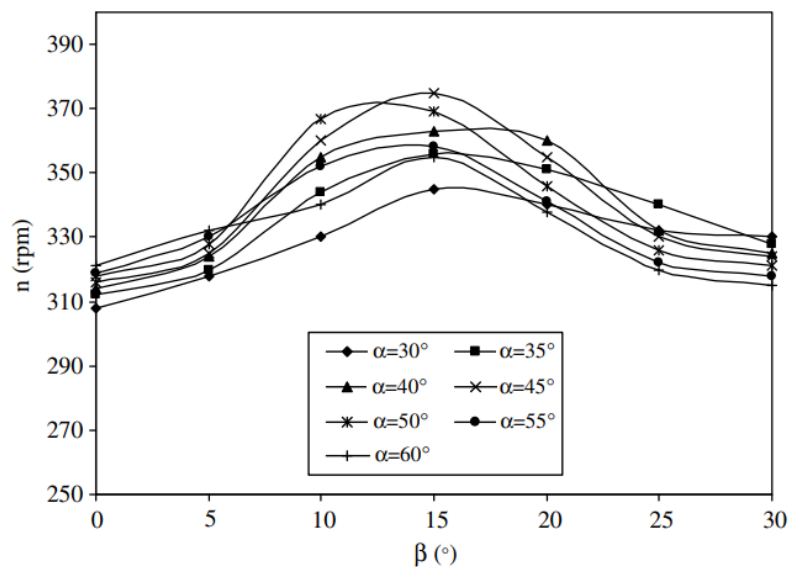
Gambar 2.11 Skema percobaan turbin angin Savonius dengan tirai (Altan, et al., 2008)

Beberapa percobaan telah dilakukan dengan dan tanpa menggunakan plat pengarah, diperoleh hasil koefisien daya tertinggi pada curtain model pertama, Sehingga digunakan tirai model pertama pada penelitian pengaruh variasi sudut. Pada tabel 2.3 ditunjukkan hasil koefisien daya akibat pengaruh panjang tirai.

Tabel 2.3 Hasil koefisien daya akibat pengaruh panjang tirai (Altan, et al., 2008)

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

Pada variasi sudut α dan β digunakan nilai sudut untuk α dimulai dari 30° hingga 60° dan variasi sudut β mulai dari 0° hingga 30° . Dan diperoleh hasil pada gambar 2.12.



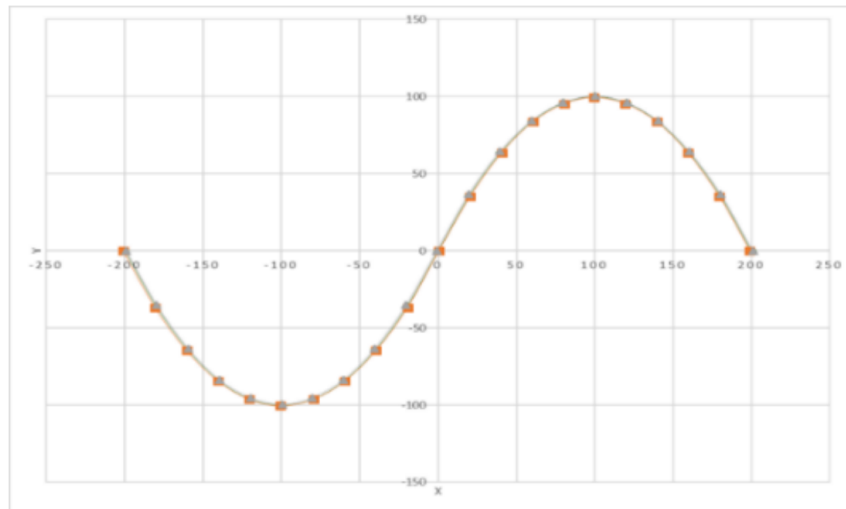
Gambar 2.12 Hasil percobaan turbin angin Savonius menggunakan tirai (Altan, et al., 2008)

Dengan ditingkatkannya sudut α dan β dapat diketahui bahwa semakin besar aliran yang mengalir, ketika sisi *returning* berada pada bukaan tirai, akan menimbulkan torsi negatif yang

besar. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, diperoleh bahwa aliran tidak semuanya dapat dikumpulkan pada sudut β dibawah 15° dan pada kondisi di atas 15° , kecepatan putar turbin juga pelan. Diperoleh hasil maksimal pada α dan β sebesar 45° dan 15° .

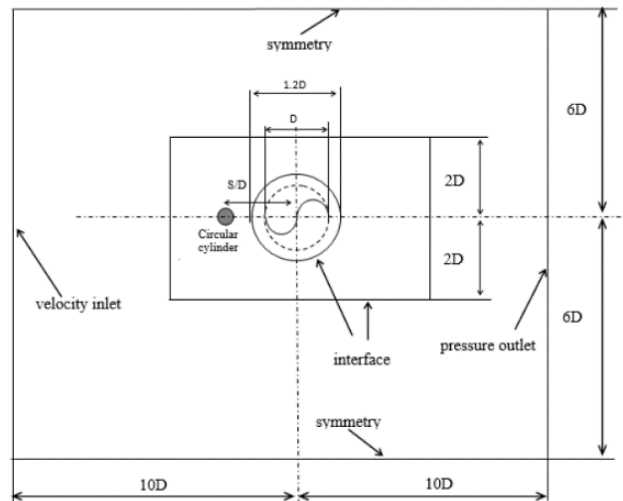
2.10.2 A Numerical Study of Savonius Water Turbine Performance Disturbed by Circular Cylinder in Front of Turbine (Setiawan, et al., 2020)

Penelitian ini dilakukan oleh **Setiawan et. al. (2020)**. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui efek dari diameter silinder pengganggu yang diletakkan pada bagian depan turbin angin Savonius dengan sudut 0° terhadap titik pusat turbin pada rasio antara jarak turbin dan Diameter sudu S/D dan dengan rasio diameter silinder dan sudu turbin d/D . Penelitian dilakukan dengan menggunakan *myring formula* untuk $n = 2$ atau turbin angin Savonius yang mana permukaan sudu dibuat seperti *layer* sebanyak 20 *layer* dekat permukaan. Gambar 2.13 di bawah menunjukkan gambar skematik dari sudu.



Gambar 2.13 Gambar Skematik dari Sudu (Setiawan, et al., 2020)

Dengan diameter sudu sebesar 400 mm dan *domain* yang terdiri dari bagian bawah dan atas (simetris), *inlet* (*inlet* kecepatan), *outlet* (*pressure outlet*), dan sudu turbin yang bergerak bagai *mesh* dan rotasi. Pada penelitian ini, terdapat dua zona yang dinamakan *rotating* dan *stationary zone* yang dapat dilihat pada gambar 2.14 di bawah.



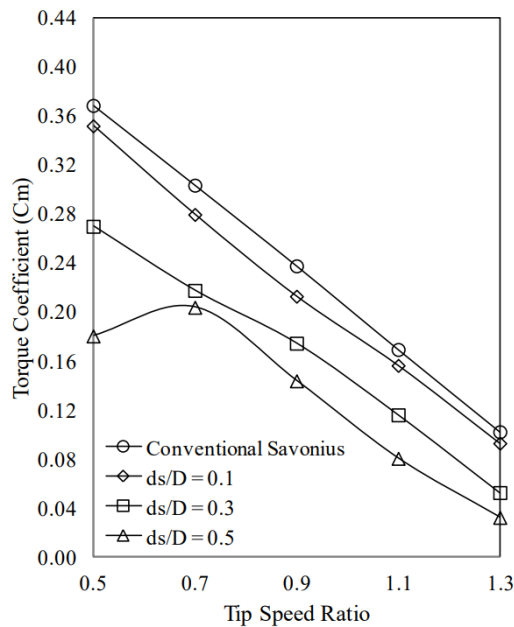
Gambar 2.14 Simulasi *Domain* yang Akan Digunakan pada Penelitian (Setiawan, et al., 2020)

Kecepatan putar dikalkulasikan berdasarkan TSR dan variasi TSR dari 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, dan 1.2. dimana setiap TSR digunakan untuk mencari TSS yang dapat dilihat pada tabel 2.4 di bawah.

Tabel 2.4 Hasil Perhitungan dari *Input* RPM dan TSS (Setiawan, et al., 2020)

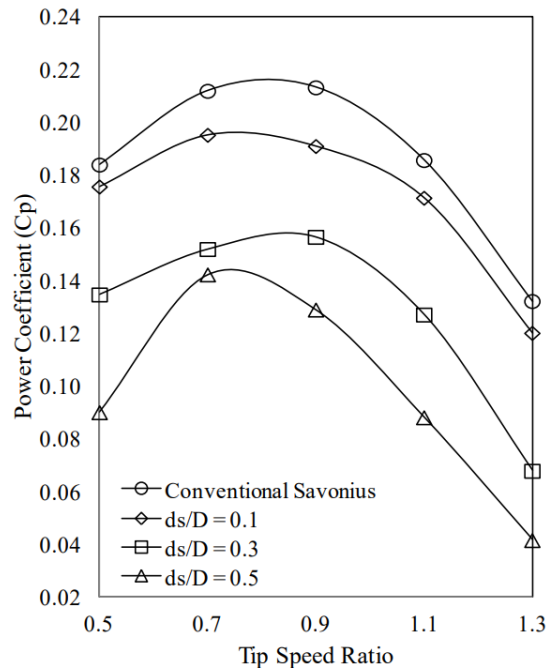
TSR	RPM	TSS (s)
0.4	4.200	0.03968254
0.6	6.300	0.02645503
0.8	8.400	0.01984127
1.0	10.500	0.01587302
1.2	12.600	0.01322751

Simulasi dilakukan dan diperoleh hasil untuk *coefficient of torque*, *coefficient of power*, dan *velocity countour*. *Coefficient of torque* pada sudut 0° dapat dilihat pada gambar 2.15 di bawah.



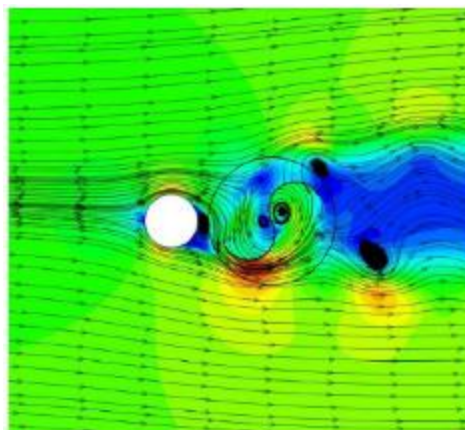
Gambar 2.15 *Coefficient of Torque* Sebagai Fungsi TSR (Setiawan, et al., 2020)

Tren dari koefisien torsi selalu berkurang dengan bertambahnya *tip speed ratio* (TSR). Peningkatan variasi rasio d/D mengurangi koefisien torsi dari turbin. Kemudian *coefficient of power* merepresentasikan performa turbin. Penempatan silinder pengganggu pada bagian depan turbin dengan variasi diameter mengurangi performa turbin angin Savonius. semakin besar diameter silinder akan semakin buruk pula performa turbin angin Savonius yang didapat. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.16 di bawah.



Gambar 2.16 *Coefficient of Power* Sebagai Fungsi TSR (Setiawan, et al., 2020)

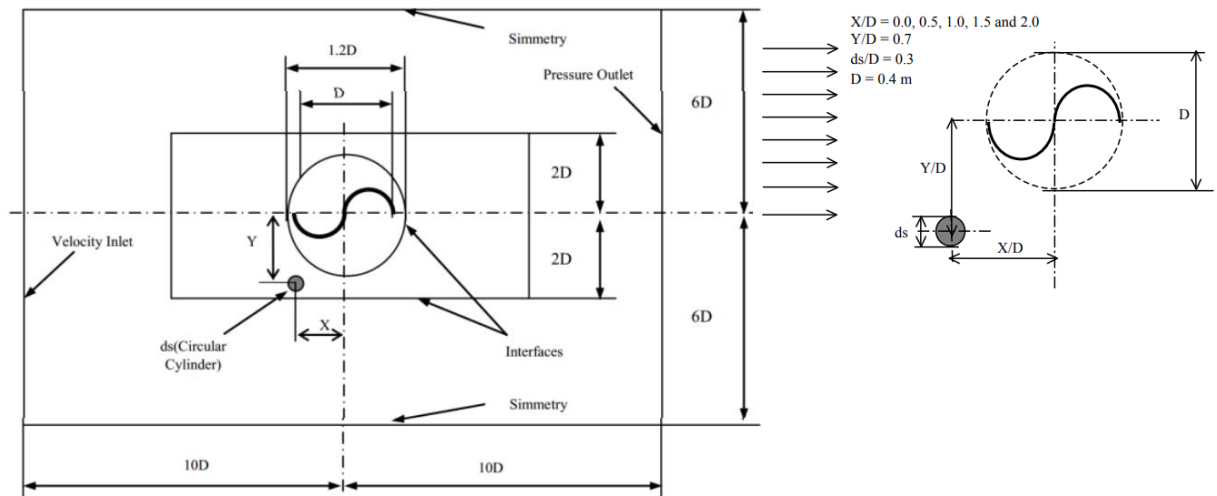
Analisis kontur kecepatan kemudian dilakukan dan diambil dari titik tengah turbin. Dengan menggunakan d/D dari 0.5. Pada gambar 2.17 dapat dilihat bahwa silinder pengganggu menimbulkan *wake* pada bagian belakang dan menutupi zona dari *advancing blade*. Hal ini menimbulkan pengurangan *static pressure* yang bekerja pada *advancing blade*, yang mana aliran pada bagian *returning blade* tidak terjadi gangguan. Kemudian torsi positif akan berkurang dan turbin angin Savonius akan mengalami pengurangan performa.



Gambar 2.17 *Velocity Pathline* untuk d/D dari 0.5 (Setiawan, et al., 2020)

2.10.3 Numerical Study of a Circular Cylinder Effect on the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance at the Side of the Advancing Blade with Horizontal Distance Variations (Setiawan, et al., 2019)

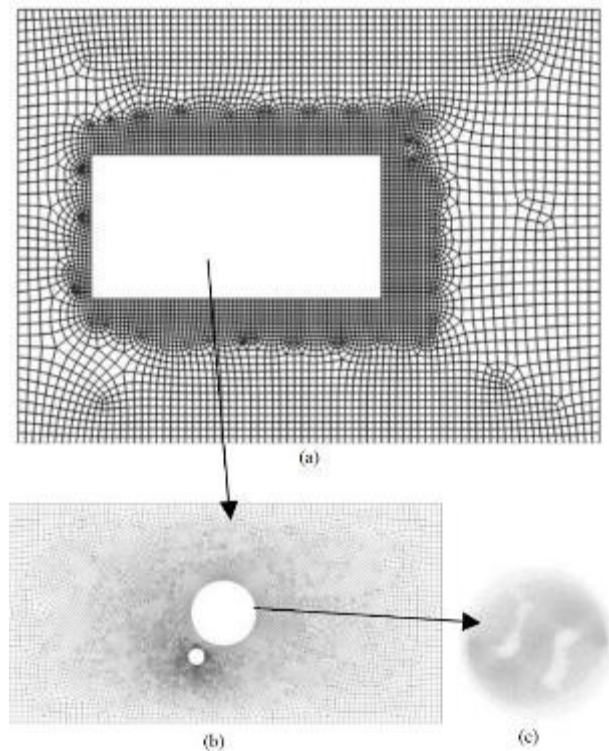
Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **Setiawan et. al. (2019)** dengan digunakannya silinder pengganggu pada sisi advancing blade turbin. Berdasarkan studi literatur yang dilakukan oleh peneliti, penggunaan silinder pengganggu atau deflektor meningkatkan performa turbin angin Savonius. Penggunaan silinder akan meningkatkan aliran pada permukaan atas silinder. Kecepatan tersebut akan bersimpangan, kemudian percobaan dilakukan untuk menentukan variasi jarak horizontal terhadap diameter sudu (X/D) yang cocok dan diharapkan akan meningkatkan performa turbin angin Savonius secara signifikan.



Gambar 2.18 Skema percobaan turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu (Setiawan, et al., 2019)

Percobaan dilakukan secara numerikal dengan menggunakan turbin angin dan batasan wilayah yang diamati sesuai pada gambar 2.18 di atas. Dengan menggunakan *inlet* kecepatan sebesar 0,22 m/s; *outlet* tekanan; dan sisi atas dan bawah simetris. Sudu dari turbin angin Savonius didefinisikan sebagai dinding yang berputar.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan 2D CFD yang dijalankan melalui ANSYS 17.0 dan persamaan U-RANS *incompressible* diselesaikan dengan analisis transien menggunakan *meshing* yang dapat dilihat pada gambar 2.19 di bawah. Wilayah yang diteliti terdiri dari 3 wilayah yaitu *fixed*, *wake*, dan *rotating*.



Gambar 2.19 Pembuatan *grid* menggunakan *software* ANSYS 17.0 (Setiawan, et al., 2019)

Dalam penelitian parameter performa yang digunakan adalah koefisien daya. Kalkulasi pada analisis *transient* atau *unsteady* menggunakan TSS dan NTS. TSS adalah waktu rotasi yang dibutuhkan untuk perpindahan 1° dan NTS adalah total langkah yang diperlukan sudu untuk memutar sudu sebesar 360° . Pada penelitian ini *increment angle* atau NTS telah ditentukan 1° . Penelitian dilakukan dengan jumlah iterasi sebanyak 150 kali. *Tip Speed Ratio* dipilih dengan nilai 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, dan 1.3. Hasil akhir yang diperoleh adalah koefisien torsi, koefisien daya, dan *Tip Speed Ratio*.

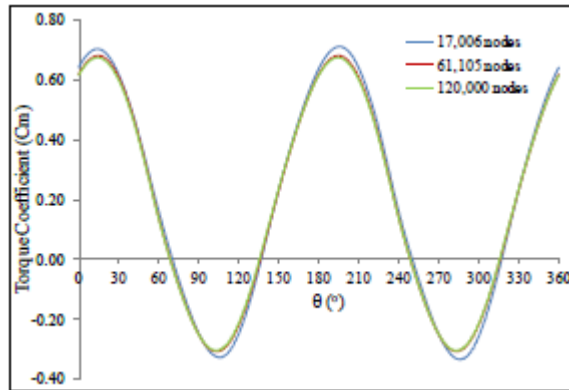
Sebagai verifikasi digunakan turbin angin Savonius sederhana dengan *Tip Speed Ratio* = 1.078 dan kecepatan udara = 7 m/s dan diperoleh nilai NTS dan TSS sebesar 51871 dan 0.0011627. Verifikasi juga dilakukan pada fluida air untuk mencari NTS dan TSS yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 2.5 di bawah.

Tabel 2.5 NTS dan TSS menggunakan fluida air (Setiawan, et al., 2019)

TSR	V (m/s)	D (m)	N (RPM)	ω (rad/s)	NTS (s)	TSS (ms)
0.3	0.22	0.4	3.150	0.330	1134	52.89041
0.5	0.22	0.4	5.250	0.550	1890	31.73424
0.7	0.22	0.4	7.350	0.770	2646	22.66732
0.9	0.22	0.4	9.450	0.990	3402	17.63014
1.1	0.22	0.4	11.550	1.210	4158	14.42466
1.3	0.22	0.4	13.650	1.430	4914	12.20548

Kemudian verifikasi terhadap studi numerikal dilakukan untuk melihat apakah terdapat dampak *grid* terhadap hasil perhitungan koefisien torsi dinamik terhadap 3 wilayah *fixed*, *wake*, dan *rotating* yang memiliki jumlah nodes sekitar 17006, 61105, dan 120000. Verifikasi

dilakukan pada turbin angin Savonius sederhana dengan *tip speed ratio* sebesar 1.078 dan diperoleh hasil seperti pada gambar 2.20 di bawah.



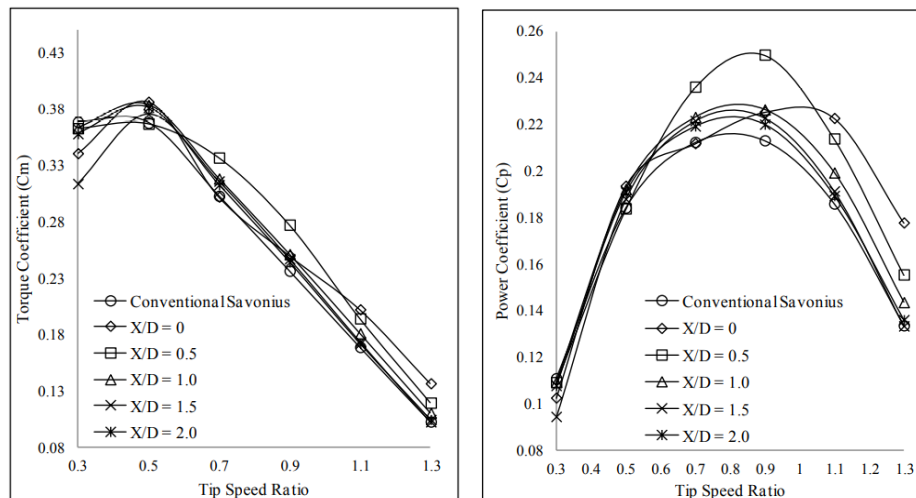
Gambar 2.20 Hasil Verifikasi *Nodes* (Setiawan, et al., 2019)

Selanjutnya, dilakukan validasi numerik terhadap data yang diperoleh melalui eksperimen dan secara numerikal. Dengan menggunakan *tip speed ratio* yang sama. Data dari simulasi akan dirata-rata dan dibandingkan. Hasil perbandingan simulasi dan eksperimen dapat dilihat pada tabel 2.6.

Tabel 2.6 Perbedaan rata-rata koefisien torsi eksperimen dan numerikal (Setiawan, et al., 2019)

TSR	Cm Numerical	Cm Experimental	Error (%)
0.5	0.3691	0.3772	2.15
0.7	0.3027	0.3303	8.36
0.9	0.2368	0.2493	5.01
1.1	0.1686	0.1749	3.60
1.3	0.1012	0.1088	6.99

Setelah dilakukan validasi, angin pada simulasi akan dirubah menjadi air. Dengan melakukan variasi jarak horizontal (X/D) silinder pengganggu terhadap turbin angin Savonius sebesar 0, 0.5, 1, 1.5, dan 2, diperoleh hasil yang dapat dilihat pada gambar 2.21 di bawah.

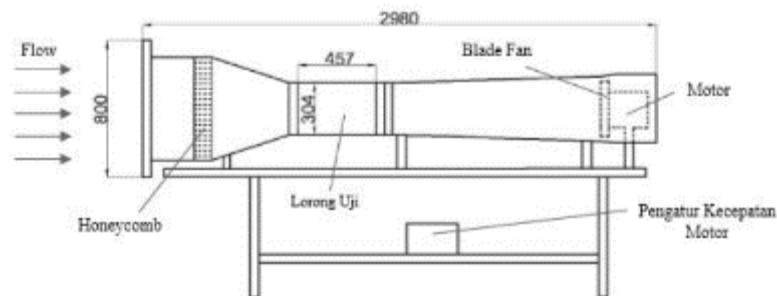


Gambar 2.21 Hasil simulasi percobaan koefisien torsi (kiri) dan koefisien daya (kanan) (Setiawan, et al., 2019)

Kedua hasil pada gambar 2.21 menunjukkan nilai dari koefisien torsi dan daya terhadap fungsi *tip speed ratio*. Dapat dilihat pada gambar 2.21 bahwa memasang silinder pengganggu pada *advancing blade* meningkatkan performa dari turbin. Untuk ukuran silinder yang sama ds/D sebesar 0.3 dan jarak vertikal sebesar 0.7 yang tidak dirubah, diperoleh hasil bahwa performa turbin meningkat seiring dengan bertambahnya rasio X/D hingga pada nilai X/D sebesar 0.5 dan mulai menurun setelah melewati X/D sebesar 0.5. Diperoleh hasil bahwa koefisien daya tertinggi meningkat sebesar 17.31% pada X/D sebesar 0.5 dan *tip speed ratio* sebesar 0.9.

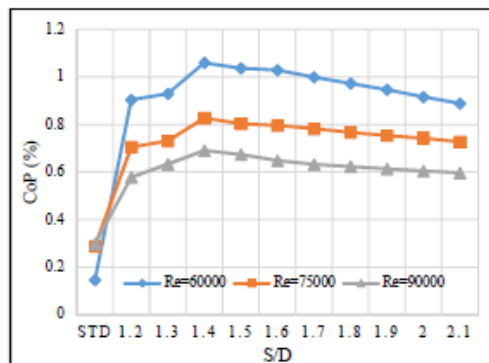
2.10.4 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius (Putro, 2017)

Studi eksperimen mengenai pengaruh variasi jarak silinder pengganggu terhadap performa turbin angin Savonius dilakukan oleh **Putro (2017)**. Pada penelitian ini plat pengganggu diletakkan di depan *returning blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 60 mm dan tinggi (H) = 80 mm, dengan *overlap* (b) = 14 mm. Silinder pengganggu memiliki diameter (d) = 12 mm dan panjang = 280 mm. Variasi perbandingan S/D = 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,00 dan 2,1. Pada penelitian ini dilakukan variasi bilangan *Reynolds* yaitu 60000, 75000 dan 90000. Dan dilakukan pada *Wind Tunnel* dengan jenis *wind tunnel: Subsonic, open circuit wind tunnel*. Dimana bentuk saluran uji yang digunakan penampang segi 8. Dengan panjang, tinggi dan lebar adalah 457 mm, 304 mm, dan 304 mm. Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Skema alat penelitian (Putro, 2017)

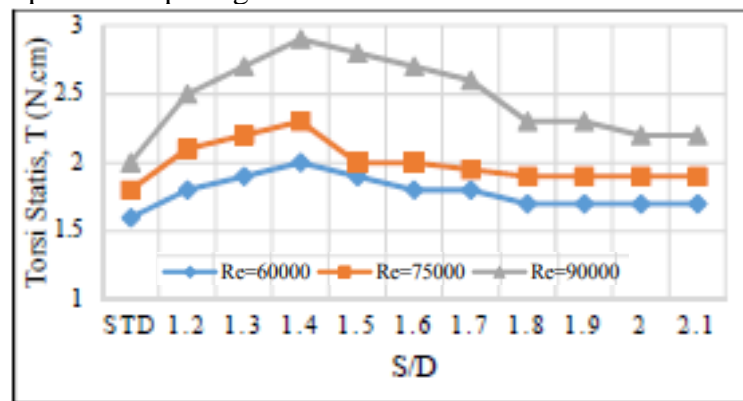
Analisis *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius yang diberikan pengganggu berupa silinder sirkular dilakukan dengan plot grafik besar nilai *Coefficient of Power* (%) yang dihasilkan oleh turbin terhadap variasi S/D serta variasi *Reynolds Number* seperti terlihat pada gambar 2.23.



Gambar 2.23 Grafik Coefficient of Power Turbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan 9×10^4 (Putro, 2017)

Dari gambar 2.23 di atas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan nilai *Coefficient of Power* turbin yang semakin menurun. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada penelitian ini didapatkan dengan menggunakan $Re = 60000$. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi pada setiap *Reynolds Number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi S/D= 1,4 dengan $Re= 6 \times 10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 1,059 %; dengan $Re= 7,5 \times 10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,827%; dengan $Re= 9 \times 10^4$ nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan sebesar 0,690%. Pada masing – masing *Reynolds Number* yang digunakan nilai *Coefficient of Power* selalu naik dari S/D = 1,2 sampai dengan S/D = 1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D = 2,1 nilai *Coefficient of Power* yang dihasilkan mengalami penurunan.

Selanjutnya adalah pengukuran torsi statis, ini dilakukan agar mengetahui pengaruh yang dihasilkan oleh penambahan pengganggu berupa silinder sirkular serta pemberian variasi S/D terhadap performa yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius. Hasil pengukuran torsi statis dengan pengganggu dapat dilihat pada gambar 2.24 di bawah ini.



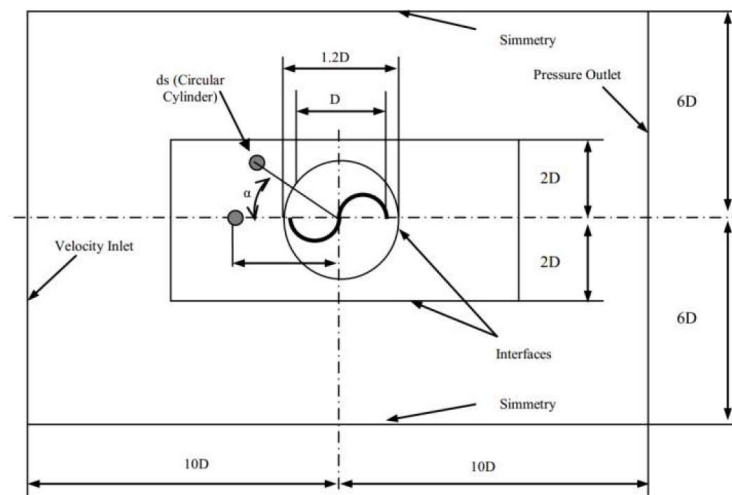
Gambar 2.24 Grafik Torsi Statis Turbin Angin Savonius Berpengganggu Sebagai Fungsi S/D pada $Re = 6 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan 9×10^4 (Putro, 2017)

Dari gambar 2.24 diatas pada setiap konfigurasi S/D dari 1,2 sampai dengan 2,1 terlihat bahwa semakin besar *Reynolds Number* yang digunakan maka menghasilkan torsi statis turbin yang semakin besar pula. Hal ini dikarenakan semakin besar nilai *Reynolds Number* maka nilai dari kecepatan udara semakin besar. Sedangkan pada persamaan koefisien *drag* tertera bahwa kecepatan sebanding dengan gaya *drag* yang menumbuk sisi blade turbin Savonius. Sehingga semakin meningkat kecepatan udara yang melewati turbin Savonius maka gaya *drag* yang menumbuk turbin juga akan meningkat, hal ini menyebabkan selisih torsi antara *advancing blade* dan *returning blade* meningkat sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh turbin juga akan meningkat. Nilai torsi statis tertinggi pada setiap *Reynolds Number* yang digunakan terletak pada konfigurasi S/D = 1,4 yaitu penempatan silinder sirkular sebagai benda pengganggu sejauh 84 mm dari pusat *returning blade*. Pada konfigurasi S/D= 1,4 dengan $Re= 6 \times 10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2 N.cm; dengan $Re= 7,5 \times 10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,3 N.cm; dengan $Re= 9 \times 10^4$ nilai torsi statis yang dihasilkan sebesar 2,9 N.cm. Pada masing – masing *Reynolds Number* yang digunakan nilai torsi statis selalu naik dari S/D= 1,2 sampai dengan S/D=1,4. Kemudian dari S/D= 1,4 sampai dengan S/D = 2,1 nilai torsi statis yang dihasilkan mengalami penurunan.

2.10.5 Numerical Study of the Stagger Angle Effect of a Circular Cylinder Installed in Front of Returning Blade Toward the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance

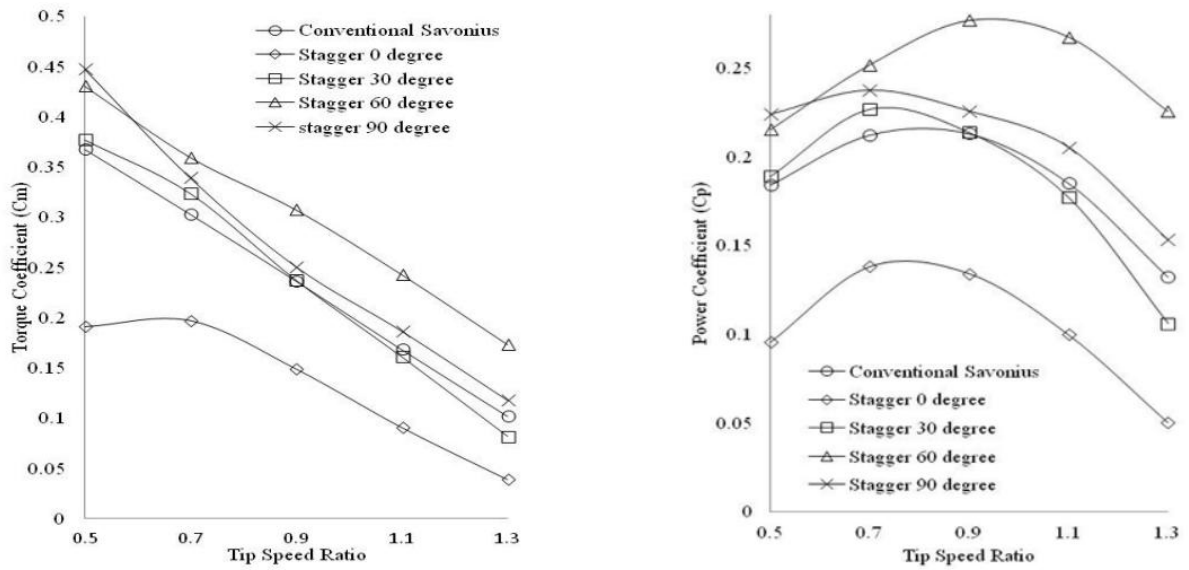
(Setiawan, et al., 2018)

Penelitian dilakukan oleh **Setiawan et. al.** pada tahun 2018 untuk mengetahui perubahan performa dari turbin angin Savonius akibat pengaruh silinder pengganggu pada sudut tertentu dengan menggunakan simulasi *unsteady numerical simulation*. Pertama dilakukan verifikasi dan validasi menggunakan data ekperimental dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh **Sheldhal et. al.** pada tahun 2018 dengan variasi pada ukuran *grid*. Setelah divalidasi maka silinder pengganggu dipasang pada bagian depan *advancing blade* pada sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° dengan variasi rasio diameter silinder terhadap diameter sudu 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 dan 0.9. Dimana nilai C_p tertinggi diperoleh pada d/D senilai 0.7. Kemudian *unsteady Computational Fluid dynamics (CFD)* dilakukan dan diperoleh *coefficient of torque* untuk sudut yang berbeda. Simulasi dilakukan dengan skema yang sesuai pada gambar 2.25 di bawah.



Gambar 2.25 Skema Simulasi Pengaruh Sudut (Setiawan, et al., 2018)

Kemudian gambar 2.26 di bawah menunjukkan hasil simulasi yang telah dilakukan pada sudut sudut 0° , 30° , 60° , dan 90° . *Coefficient of torque* berkurang dengan bertambahnya *tip speed ratio* pada semua variasi. Dapat dilihat pada 0° menghasilkan *coefficient of power* yang lebih rendah dibandingkan yang lain. Hal ini dikarenakan aliran terhalang oleh silinder pengganggu sehingga mereduksi momentum aliran dan mengurangi performa turbin angin Savonius. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh *coefficient power* tertinggi pada variasi sudut 60° dengan C_p sebesar 0.276 pada *tip speed ratio* sebesar 0.9 dan hasil paling rendah pada sudut 0° dengan C_p sebesar 0.138 dengan *tip speed ratio* sebesar 0.9.



Gambar 2.26 Hasil Simulasi Pengaruh Sudut Silinder Pengganggu Terhadap Turbin Angin Savonius (Setiawan, et al., 2018)

Hasil maksimal C_p pada setiap variasi sudut kemudian dibandingkan dengan turbin angin savonius konvensional yang dapat dilihat pada tabel 2.7 di bawah.

Tabel 2.7 Perbandingan *Coefficient Power* pada Variasi Sudut yang Berbeda. (Setiawan, et al., 2018)

Variation	Peak C_p	Corresponding TSR	C_p Gain (%) relative to conventional Savonius
Savonius conventional	0.213	0.9	0
0 degree	0.138	0.7	-35.21
30 degree	0.227	0.7	6.40
60 degree	0.276	0.9	29.84
90 degree	0.237	0.7	11.52

Disimpulkan berdasarkan hasil simulasi adalah silinder pengganggu sebagai kontrol pasif dengan variasi posisi memiliki dampak yang signifikan terhadap performa turbin angin Savonius konvensional. Dimana pada sudut 30° , 60° , dan 90° terdapat peningkatan sebesar 6.40%, 29.84%, dan 11.52%. dibandingkan turbin angin Savonius konvensional.

2.11 Perbandingan Penelitian

Tabel berikut, merupakan perbandingan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu dan penelitian yang dilakukan oleh penulis.

Tabel 2.8 Perbandingan Penelitian Terdahulu

Pembandin g	<i>Atlan et. al., 2008</i>	<i>Setiawan et. al., 2020</i>	<i>Setiawan et. al., 2019</i>	Putro, 2017	<i>Setiawan et. al., 2018</i>
Aliran	Eksternal	Eksternal	External	Internal	Eksternal
Metode Penelitian	Eksperimen	Numerikal	Numerikal	Eksperimen	Numerikal
Variasi	Penggunaan tirai pengarah dengan	Jarak Silinder Pengganggu	Penempatan silinder pengganggu di	Penempatan silinder pengganggu	Penempatan silinder pengganggu

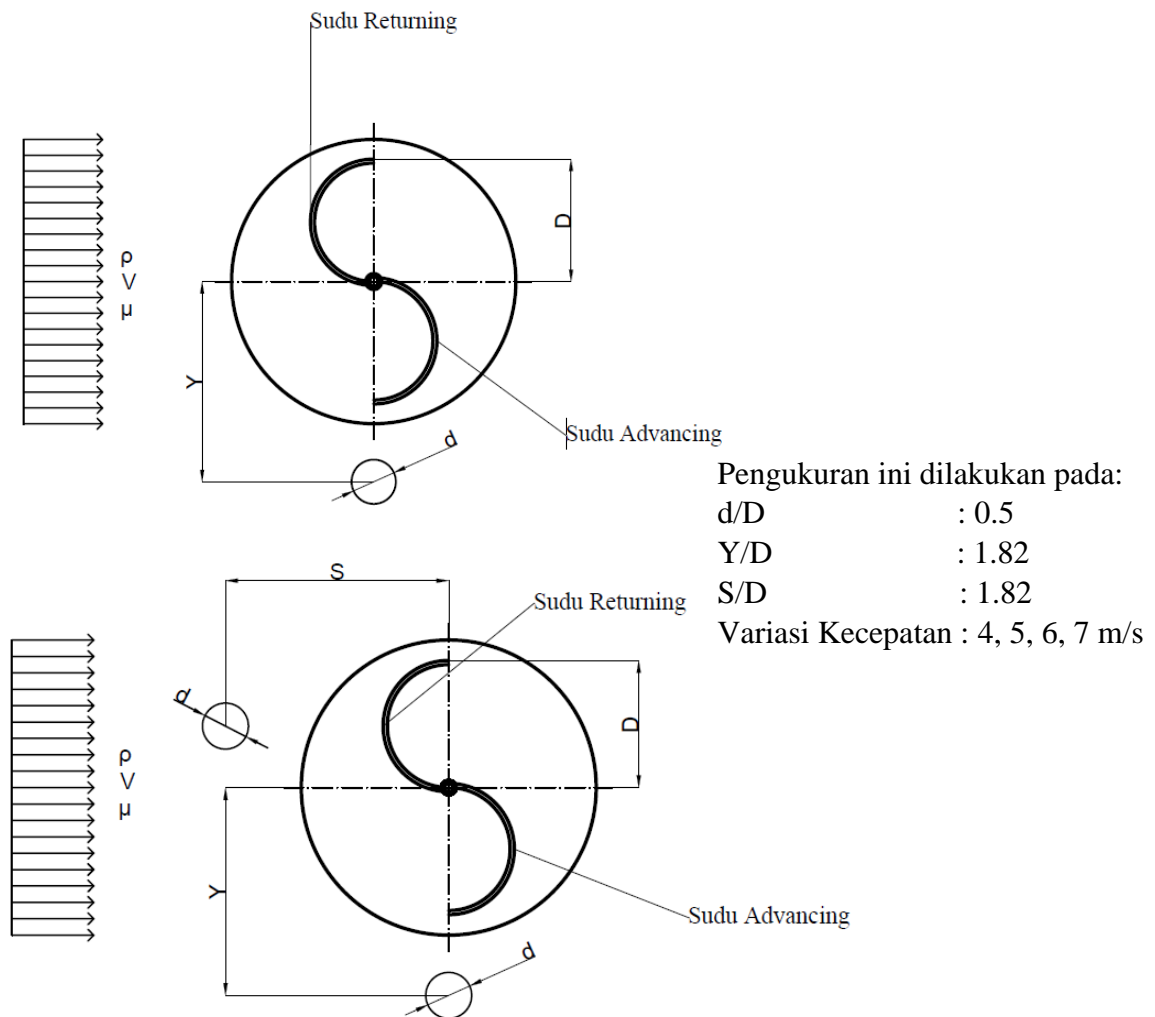
	variasi sudut dan panjang tirai	Depan Turbin	samping <i>advancing blade</i> dengan variasi jarak horizontal dan vertikal terhadap pusat turbin	pada bagian depan <i>returning blade</i> dengan variasi jarak terhadap pusat sudu turbin	di depan <i>returning blade</i> dengan variasi sudut terhadap pusat sudu turbin
Hasil	Pada sudut tertentu, angin yang dibelokkan oleh tirai akan memberikan dampak positif bagi turbin angin yang mana meningkatkan kecepatan angin pada bagian rotor	Silinder pengganggu menimbulkan <i>wake</i> pada bagian belakang dan menutupi zona <i>advancing blade</i> dan menyebabkan <i>static pressure</i> pada <i>advancing blade</i> berkurang	Penempatan silinder pengganggu, menyebabkan peningkatan performa turbin angin Savonius, hal ini disebabkan oleh peningkatan kecepatan aliran angin pada permukaan <i>advancing blade (attached flow)</i> yang mengurangi tekanan pada sisi belakang <i>advancing blade</i>	Penempatan silinder pengganggu di depan <i>returning blade</i> efektif dalam meningkatkan performa turbin dengan menurunkan tekanan <i>drag</i> pada sisi depan <i>returning blade</i> . Sehingga perbedaan tekanan antara <i>advancing blade</i> dan <i>returning blade</i>	Penempatan silinder pengganggu pada sudut 60° memberikan peningkatan yang maksimal, hal ini terjadi karena terjadi pengurangan tekanan angin akibat pengaruh silinder pengganggu pada sisi <i>returning blade</i>

Berdasarkan perbandingan pada tabel 2.8 di atas, dapat dilihat bahwa percobaan peningkatan performa turbin angin Savonius dengan penambahan silinder pengganggu di depan sisi *returning blade* dan di samping *advancing blade* belum pernah dilakukan. Berdasarkan penelitian terdahulu penambahan silinder di samping *advancing blade* didapatkan hasil dimana performa turbin meningkat, begitu juga pada percobaan penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini, diharapkan bahwa penempatan silinder pada depan sisi *returning blade* dan di samping *advancing blade* mampu meningkatkan performa turbin angin Savonius.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Parameter yang Diukur

Untuk mengetahui pengaruh parameter tertentu terhadap peningkatan performa turbin angin Savonius diperlukan analisis dimensi. Parameter-parameter yang terdapat pada penelitian ini antara lain massa jenis fluida (ρ), viskositas fluida (μ), kecepatan aliran fluida (U), tinggi turbin angin Savonius (H), diameter sudu turbin angin Savonius (D), diameter poros (b), diameter silinder sirkular pengganggu (d), panjang silinder sirkular pengganggu (h), kecepatan putaran sudu turbin angin Savonius (ω), jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (S), dan jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *advancing blade* (Y). Gambar 3.1 di bawah menunjukkan skema penelitian dan parameter yang akan dianalisis pada penelitian ini. Terdapat dua topik, topik A dimana silinder pengganggu dipasang pada bagian samping *advancing blade* dan topik B dipasang pada samping *advancing blade* dan di depan *returning blade*.



Gambar 3.1 Skema Penelitian

Dimana:

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

3.2 Analisis Dimensi

Analisis dimensi dilakukan untuk mengetahui parameter apa saja yang dapat mempengaruhi karakteristik aliran yang melewati turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu yang memiliki diameter tertentu. Metode analisis yang digunakan untuk analisis nilai *coefficient of power* dan *coefficient of moment* adalah *Buckingham-Phi Theorem*.

3.2.1 Analisis Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Adapun langkah yang perlu dilakukan untuk penentuan analisis dimensi adalah:

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi daya

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

- ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
- μ : viskositas fluida (Ns/m^2)
- V : kecepatan aliran udara (m/s)
- H : tinggi turbin angin Savonius (m)
- h : panjang silinder sirkular pengganggu (m)
- D : diameter sudu turbin angin Savonius (m)
- d : diameter silinder sirkular pengganggu (m)
- b : diameter poros (m)
- S : jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* (m)
- Y : jarak antara pusat selinder pengganggu dengan pusat *advancing blade* (m)
- ω : kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan dalam analisis.

Dipilih M, L, dan t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter yang dipilih seperti pada tabel 3.1 di bawah.

Tabel 3.1 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter

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

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan.

Dipilih ρ, V, D

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

Berdasarkan analisis dimensi di atas, diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut:

$\pi_1 =$ *Coefficient of Power (CoP)*

$\pi_2 =$ *Bilangan Reynolds (Re)*

$\pi_3 =$ *Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius*

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

$\pi_5 =$ *Rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius*

$\pi_6 =$ *Rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius*

$\pi_7 =$ *Rasio panjang silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius*

$\pi_8 =$ *Rasio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius*

$\pi_9 =$ *Tip speed ratio (λ)*

Hubungan antara grup tak berdimensi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) \dots \dots \dots (3.1)$$

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{V} \right) \dots \dots \dots (3.2)$$

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

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{\omega D}{V} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

atau

$$CoP = f_3 \left(Re, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \lambda \right) \dots \dots \dots (3.4)$$

Pada penelitian ini, digunakan nilai $S/D = 1.82$ dan nilai $Y/D = 1.82$. Sehingga persamaan 3.4 di atas berubah menjadi

$$CoP = f_4(Re, \lambda) \dots \dots \dots (3.5)$$

3.2.2 Analisis Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Adapun langkah yang perlu dilakukan untuk penentuan analisis dimensi adalah :

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi momen

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

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

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang akan digunakan dalam analisis.

Dipilih M, L, t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter yang dipilih seperti pada tabel 3.1 di bawah.

Tabel 3.2 Dimensi Primer Pada Setiap Parameter

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

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan.

Dipilih ρ, V, D

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\pi_9 = \frac{\omega D}{V}$$

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

$\pi_1 =$ *Coefficient of Moment* (Cm)

$\pi_2 =$ Bilangan *Reynolds*(Re)

$\pi_3 =$ Rasio diameter silinder penggangu dengan diameter turbin angin Savonius

$\pi_4 =$ Rasio jarak antara pusat silinder penggangu dengan pusat *returning blade*

$\pi_5 =$ Rasio posisi silinder penggangu dalam arah tegak lurus arah datang angin dengan diameter turbin angin Savonius

$\pi_6 =$ Rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter turbin angin Savonius

$\pi_7 =$ Rasio panjang silinder penggangu dengan diameter turbin angin Savonius

$\pi_8 =$ Rasio diameter poros dengan diameter turbin angin Savonius

$\pi_9 =$ *Tip speed ratio* (λ)

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) \dots \dots \dots (3.6)$$

$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{\omega D}{V} \right) \dots \dots \dots (3.7)$$

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

$$\frac{T}{\rho V^2 D^3} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \frac{\omega D}{V} \right) \dots \dots \dots (3.8)$$

atau

$$Cm = f_3 \left(Re, \frac{S}{D}, \frac{Y}{D}, \lambda \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

Pada penelitian ini digunakan nilai $S/D = 1.82$ dan nilai $Y/D = 1.82$ sehingga persamaan 3.9 tersebut berubah menjadi

$$Cm = f_4(Re, \lambda) \dots \dots \dots (3.10)$$

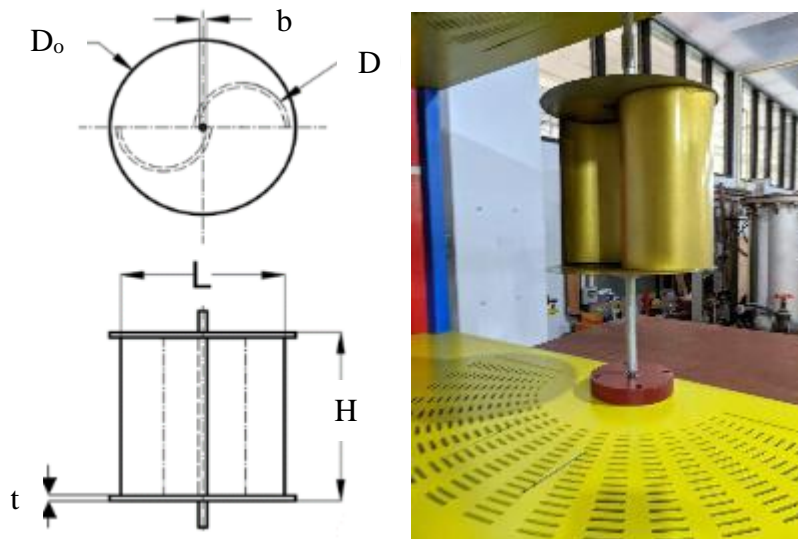
3.3 Peralatan

Pada penelitian ini beberapa peralatan akan digunakan dalam pengambilan data eksperimen.

3.3.1 Turbin Angin Savonius

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius seperti pada gambar 3.2 di bawah, dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Diameter sudu turbin (D) : 165.2 mm
- Tinggi (H) : 295 mm
- Diameter poros (b) : 19 mm
- Diameter turbin (L) : 305.4 mm
- Diameter *end plates* (D_0) : 320 mm
- Tebal *end plates* (t) : 1 mm
- Tebal sudu turbin : 3 mm
- Material sudu turbin : PVC
- Material *end plates* : *Aluminium cladding 2024*



Gambar 3.2 Skema Turbin Angin Savonius

3.3.2 Axial Fan dan Voltage Regulator

Pada penelitian ini digunakan *axial fan* yang berfungsi untuk menghasilkan kecepatan angin yang dapat memutar sudu turbin angin Savonius. *Axial fan* yang digunakan tidak memiliki pengaturan kecepatan aliran udara sehingga digunakan *voltage regulator* untuk mengatur kecepatan aliran udara yakni dengan cara mengatur besar tegangan *output* yang dibutuhkan. *Axial fan* yang digunakan pada penelitian ini adalah **CKE SF-45 H** seperti pada gambar 3.3 dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.3. Sedangkan untuk *voltage regulator* yang digunakan adalah **Model TDGC2 3KVA** seperti pada gambar 3.4 dengan spesifikasi seperti pada tabel 3.4.



Gambar 3.3 Axial Fan CKE SF-45H

Tabel 3.3 Spesifikasi Axial Fan CKE SF-45H

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



Gambar 3.4 Voltage regulator

Tabel 3.4 Spesifikasi Voltage Regulator Model TDGC2

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

3.3.3 Silinder Pengganggu

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

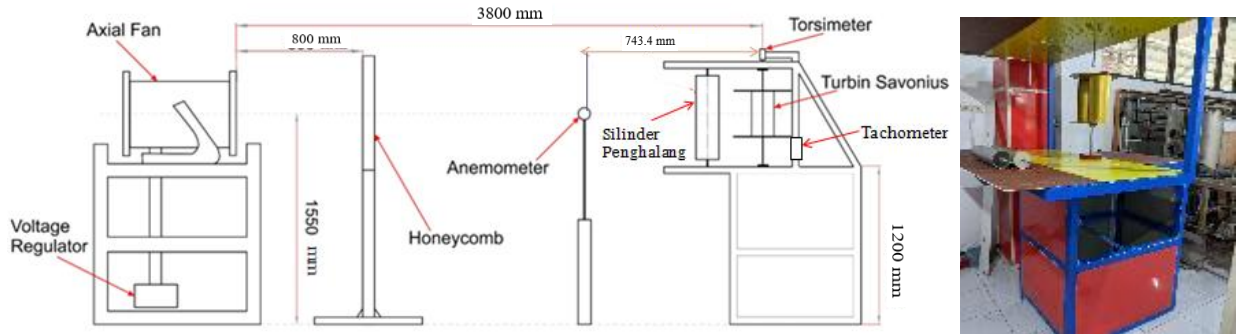
- Diameter (d) : 88 mm
- Rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan pusat *returning blade* turbin terhadap diameter sudu turbin sebesar (S/D): 1.82
- Rasio jarak pusat silinder pengganggu dengan pusat *advancing blade* turbin terhadap diameter sudu turbin sebesar (Y/D): 1.82
- Rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter turbin angin Savonius (d/D) : 0,5



Gambar 3.5 Skema Silinder Pengganggu

3.3.4 Frame Turbin Angin Savonius

Frame turbin angin Savonius pada penelitian ini digunakan sebagai tempat pemasangan turbin angin Savonius dan silinder pengganggu. Gambar 3.6 di bawah adalah skema frame turbin angin Savonius.



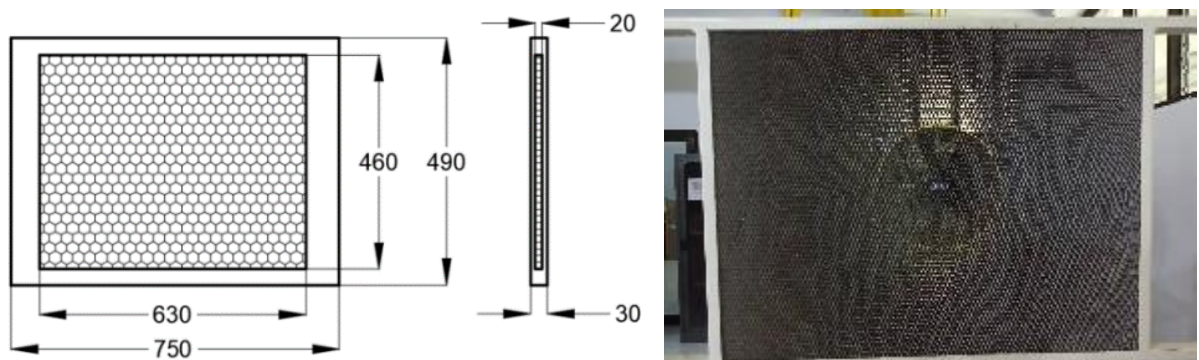
Gambar 3.6 Skema Frame Turbin

3.3.5 Honeycomb

Honeycomb pada penelitian ini digunakan agar aliran angin dari axial fan menuju turbin angin Savonius menjadi uniform. Honeycomb ini ditempatkan axial fan dan turbin angin Savonius. Gambar 3.7 menunjukkan skema honeycomb. Berikut adalah spesifikasi dari Honeycomb yang digunakan:

- Panjang sisi Honeycomb : 630 mm
- Panjang sisi frame : 750 mm
- Lebar sisi Honeycomb : 460 mm
- Lebar sisi frame : 490 mm
- Tebal frame : 30 mm
- Tebal Honeycomb : 20 mm
- Meshing size : 0,0248 lubang/mm²

Gambar dalam satuan mm



Gambar 3.7 Skema Honeycomb

3.3.6 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapat nilai-nilai yang diperlukan.

a. Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari suatu objek. Pada penelitian ini *tachometer* yang digunakan adalah *tachometer OMEGA seri HHT23* seperti yang bisa dilihat pada gambar 3.8. Spesifikasi dari *tachometer* ini dapat dilihat pada tabel 3.5



Gambar 3.8 Tachometer OMEGA Seri HHT12

Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

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

b. Anemometer

Anemometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. *Anemometer* yang digunakan pada penelitian ini adalah anemometer digital dengan seri **OMEGA HHF141 Digital Anemometer** yang bisa dilihat pada gambar 3.9. Pengukuran dapat dilakukan dalam beberapa satuan pengukuran yaitu ft/min, mph, knots, meter/s dan km/h serta memiliki *high resolution* 0,01 m/s. Spesifikasi dari *anemometer* ini dapat dilihat pada tabel 3.6.



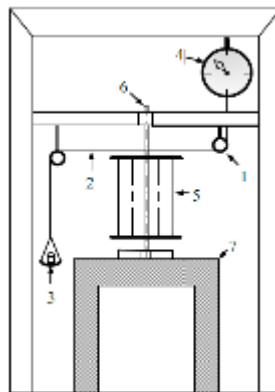
Gambar 3.9 Anemometer Omega HHF-141A

Tabel 3.6 Spesifikasi Anemometer Omega HHF-141A

Anemometer Omega HHF-141A		
Measurement Range	2,75 inch Air Probe	40 – 7800 ft/min 0.2 – 40.00 m/sec
	Air Probe AP100	300 – 6800 ft/min 1,5 – 35,00 m/s
Accuracy	Air Velocity	AP275 : $\pm 1.0\%$ of reading ± 1 digit
		AP100 : $\pm(0,5\%$ FS + 0,75% of reading + 1 digit)
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/s	
Operating Temperature	Instrument	32°F - 125°F (0°C-15°C)
	Probe	-4°F - 212° F (-20°C-100°C)
Display	0,5 inch LCD with LED backlight, 4 Digits	
Power Supply	3 AA alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours, without backlight	
Battery Check	Automatic low battery display	

c. Brake Dynamometer

Brake dynamometer merupakan sebuah alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis yang dihasilkan pada putaran suatu objek yang diuji. Konsep hasil yang didapatkan pada system brake dynamometer yaitu melalui perhitungan selisih antara massa pemberat dan nilai yang dibaca pada neraca pegas. Adapun instalasi brake dynamometer yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.10 sebagai berikut.



Gambar 3.10 Skema Brake Dynamometer

Dimana:

1. Sistem pulley
2. Benang nylon
3. Massa pemberat
4. Neraca pegas
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

d. Massa Pemberat

Beban pemberat pada penelitian ini digunakan untuk mendapatkan hasil nilai torsi dinamis dan variasi dari nilai TSR pada brake dynamometer. Beban pemberat yang digunakan bermacam macam, yaitu antara 3-20 gram. Untuk penggunaan beban pemberat, ditambahkan dengan perlahan mulai dengan beban terendah. Hal ini dikarenakan agar hasil yang didapatkan lebih spesifik. Selain itu, penambahan secara perlahan juga bertujuan untuk mengetahui titik terendah dari grafik yang dihasilkan. Gambar 3.11 menunjukkan pemberat yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.11 Masa Pemberat

e. Neraca Pegas

Neraca pegas merupakan alat ukur yang digunakan sebagai alat ukur sebuah nilai pada sebuah eksperimen. Adapun pada penelitian ini, neraca pegas digunakan untuk alat ukur nilai torsi dinamis yang dihasilkan pada brake dynamometer dalam satuan gram. Berat dari beban pemberat akan dibaca pada neraca pegas ini. Adapun nantinya, nilai yang ditunjukkan harus dikurangi dengan berat wadah dari pemberat yang digunakan. Gambar 3.12 menunjukkan neraca pegas yang digunakan pada penelitian ini dan tabel 3.7 menunjukkan spesifikasi neraca pegas yang digunakan.



Gambar 3.12 Neraca Pegas

Tabel 3.7 Spesifikasi Neraca Pegas NAGATA C-5

Spesifikasi NAGATA tipe C-5	
Capacity	3 kg
Graduation	10 gram

f. *Torquemeter*

Torquemeter merupakan alat yang digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Pada penelitian ini, *Torquemeter* yang digunakan adalah tipe LUTRON model YQ-8800 dengan high resolution 0,1 N-Cm. Gambar 3.13 menunjukkan tipe Torque Meter yang digunakan dan tabel 3.8 menunjukkan spesifikasi *Torquemeter* yang digunakan.



Gambar 3.13 *Torquemeter* LUTRON TQ-8800

Tabel 3.8 Spesifikasi *Torquemeter* LUTRON TQ-8800

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

3.5 Prosedur Penelitian

Pada eksperimen ini, prosedur penelitian yang dilakukan untuk memperoleh data pengukuran adalah sebagai berikut:

3.5.1 Prosedur Penelitian Penentuan Putaran Serta Torsi Dinamis

Tahapan pengukuran putaran serta torsi dinamis serta putaran adalah sebagai berikut:

1. Peralatan, benda uji, dan alat ukur dipersiapkan untuk pengambilan data.
2. Peralatan, benda uji, dan alat ukur diatur sesuai dengan skema penelitian.
3. *Axial Fan* dinyalakan dan diatur kecepatan putarnya melalui *voltage* regulator sehingga didapat kecepatan angin yang dibutuhkan sebesar 4 m/s.
4. Dilakukan pengukuran temperatur dengan *thermometer*.
5. Kecepatan angin dari *axial fan* diukur menggunakan *anemometer*.
6. Setelah kecepatan angin yang didapat telah *steady*, kemudian dilakukan pengukuran kecepatan putaran poros turbin angin Savonius tanpa massa pemberat dan tanpa konfigurasi silinder dengan *tachometer*.
7. Kemudian dilakukan pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* untuk daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius melalui tahapan berikut,
 - a. Pemberian massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas

- b. Dilakukan pengukuran massa yang terbaca pada neraca pegas.
 - c. Dilakukan pengukuran putara turbin angin Savonius dengan *tachometer*.
 - d. Kalkulasi nilai dari torsi dinamis yang diperoleh melalui selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang dihasilkan neraca pegas, lalu dikalikan dengan jari – jari poros turbin angin Savonius.
 - e. Diperlukan repetisi pada tahapan 7a hingga 7d dengan penambahan massa pemberat hingga turbin angin Savonius berhenti berputar
8. *Axial fan* dimatikan.
 9. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 hingga 8 dengan dilakukan variasi kecepatan angin dari *axial fan* dengan nilai 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s.
 10. Pengambilan data untuk topik A dilakukan dengan peletakkan silinder sirkular dengan ukuran rasio $(d/D) = 0.5$ di samping *advancing blade* pada rasio posisi silinder sirkular $(Y/D) = 1.82$ terhadap pusat *advancing blade*.
 11. Dilakukannya repetisi pada tahapan 3 hingga 9 pada konfigurasi pertama tersebut, dengan juga diolahnya data yang didapatkan melalui pengambilan data pada konfigurasi pertama (kecepatan sudut, dan torsi dinamis).
 12. Lalu, pengambilan data untuk topik B dilakukan dengan peletakkan silinder sirkular dengan rasio $(d/D) = 0.5$ di samping *advancing blade* pada rasio posisi silinder sirkular $(Y/D) = 1.82$ terhadap pusat *advancing blade*, serta diletaknya silinder sirkular dengan rasio $(d/D) = 0.5$ di depan *returning blade* pada rasio posisi silinder sirkular dengan pusat *returning blade* $(S/D) = 1.82$.
 13. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 hingga 9 pada kedua topik tersebut dan dilakukannya juga pengambilan data (kecepatan sudut dan torsi dinamis).
 14. Hasil yang didapatkan dibandingkan antara turbin angin Savonius konvensional, dengan konfigurasi topik A serta konfigurasi topik B.

3.5.2. Prosedur Penelitian Penentuan Torsi Statis

Tahapan pengukuran torsi statis adalah sebagai berikut:

1. Peralatan, benda uji, dan alat ukur dipersiapkan untuk pengambilan data.
2. Peralatan, benda uji, dan alat ukur diatur sesuai dengan skema penelitian.
3. Posisi turbin angin diatur pada sudut 0° dan dipertahankan.
4. *Axial fan* dinyalakan dan dilakukan pengaturan tegangan pada *voltage regulator*, sehingga didapat kecepatan aliran angin yang dibutuhkan sebesar 4 m/s.
5. Dilakukan pengukuran temperature dengan *thermometer*.
6. Dilakukan pengukuran kecepatan angin menggunakan *anemometer*.
7. Ketika kecepatan angin yang diperoleh sudah dalam kondisi *steady*, dilakukan pengukuran terhadap torsi statis dengan *torquemeter* dengan sudut turbin angin sesuai yang diatur.
8. *Axial fan* dimatikan.
9. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 hingga 8 dengan dilakukan variasi posisi sudut turbin angin pada tahapan 3 sampai 180° dengan kenaikan 10° setiap pengulangan pada kecepatan angin yang sama.
10. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 hingga 9 dengan dilakukan variasi kecepatan angin *axial fan* pada kecepatan 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s.
11. Pengambilan data untuk topik A dilakukan dengan peletakkan silinder sirkular dengan rasio $d/D = 0.5$ pada bagian samping *advancing blade* pada rasio posisi silinder sirkular $(Y/D) = 1.82$ terhadap pusat *advancing blade*.

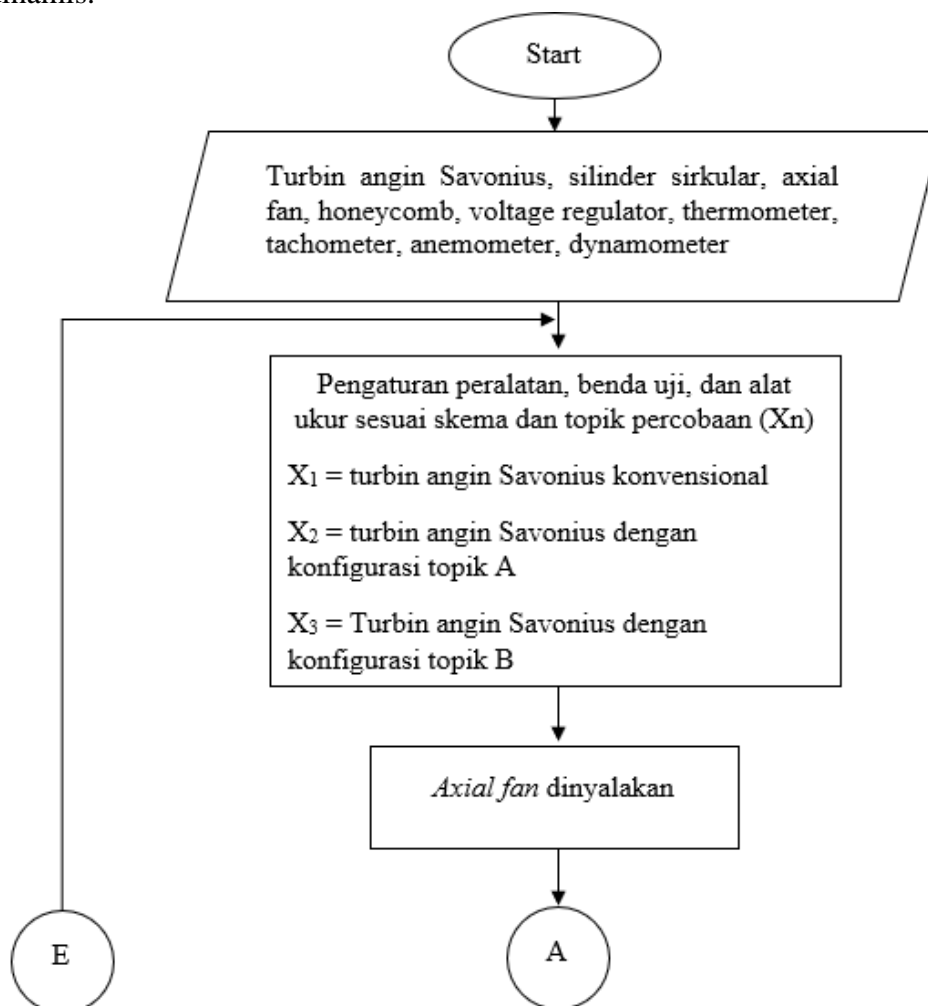
12. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 sampai 10 pada topik A dengan dilakukan pengolahan data yang didapat.
13. Pengambilan data untuk topik B dilakukan dengan peletakkan silinder sirkular dengan rasio $(d/D) = 0.5$ di samping *advancing blade* pada rasio posisi silinder sirkular $(Y/D) = 1.82$ terhadap pusat *advancing blade*, serta diletakkannya silinder sirkular dengan rasio $(d/D) = 0.5$ di depan *returning blade* pada rasio posisi silinder sirkular dengan pusat *returning blade* $(S/D) = 1.82$.
14. Dilakukan pengulangan pada tahapan 3 hingga 10 pada topik B dan juga dilakukan pengolahan data yang didapat.
15. Hasil yang diperoleh dibanding antara turbin angin Savonius konvensional dengan topik A dan topik B.

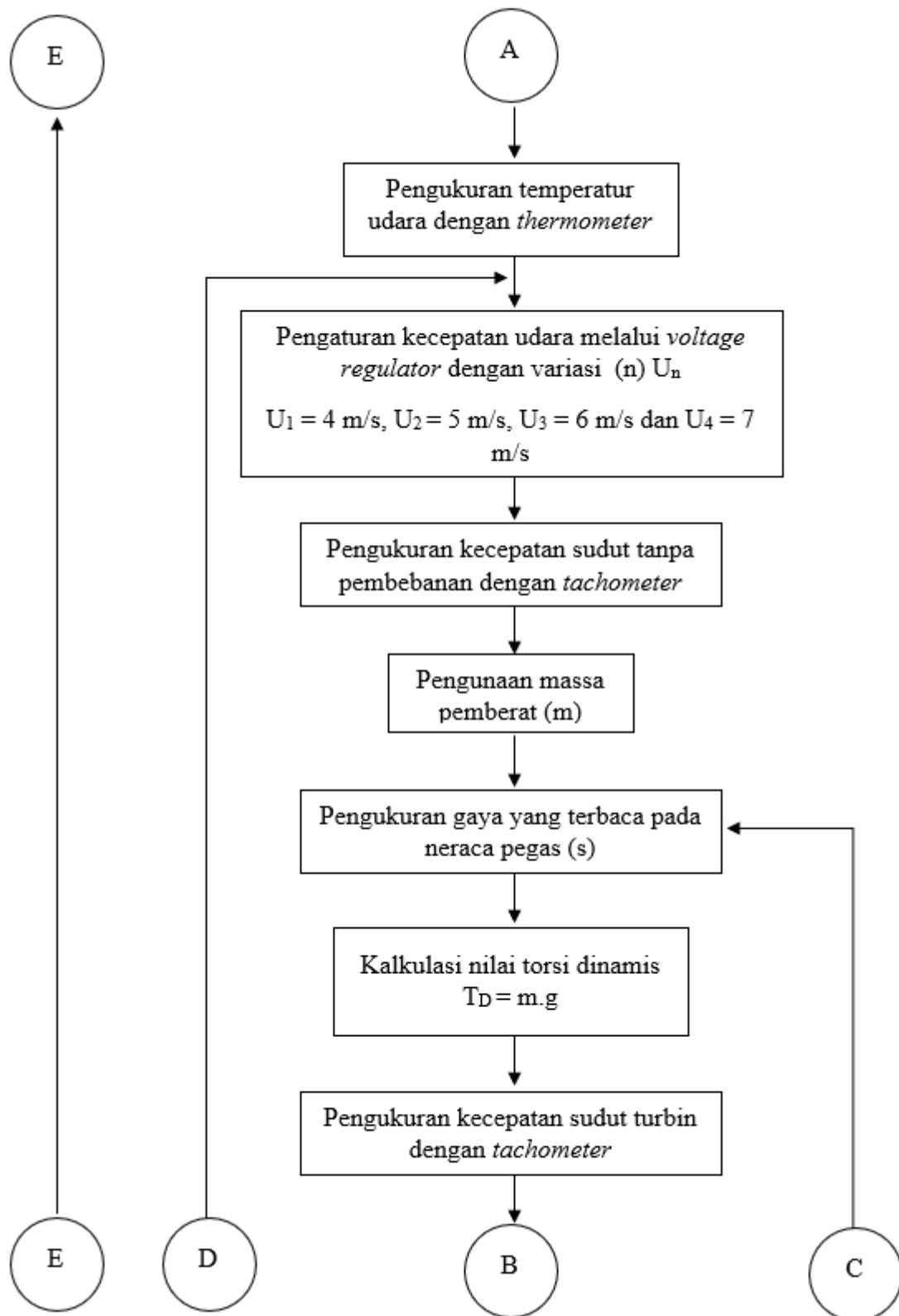
3.6 Flowchart Penelitian

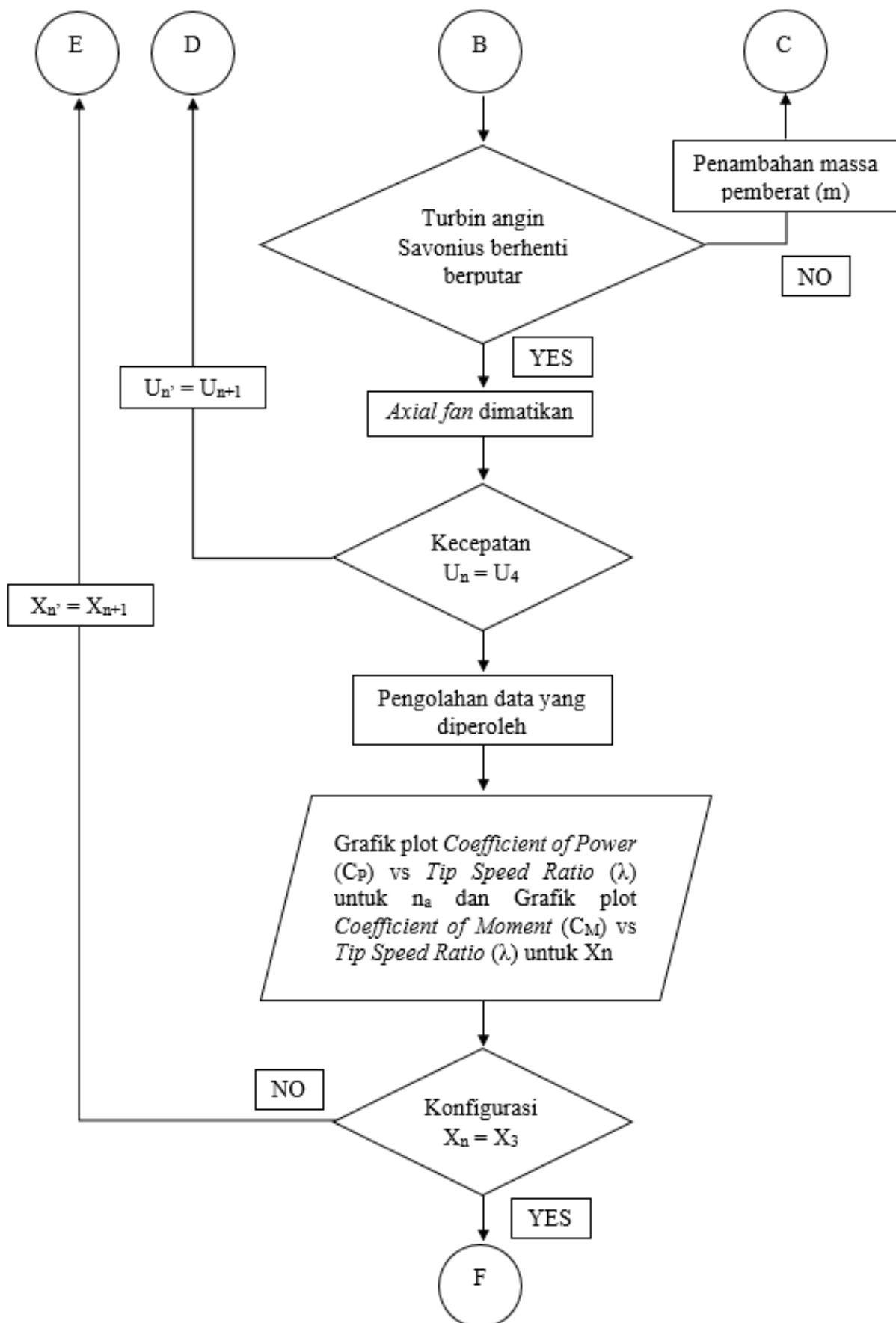
Adapun tahapan pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut:

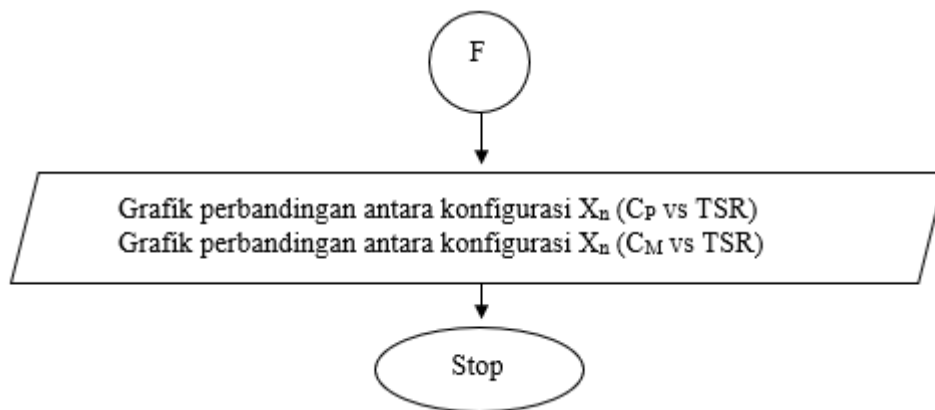
3.6.1 Flowchart Pengambilan Data Kecepatan Sudut dan Torsi Dinamis

Gambar 3.14 di bawah menunjukkan diagram alur pengambilan data kecepatan sudut dan torsi dinamis.





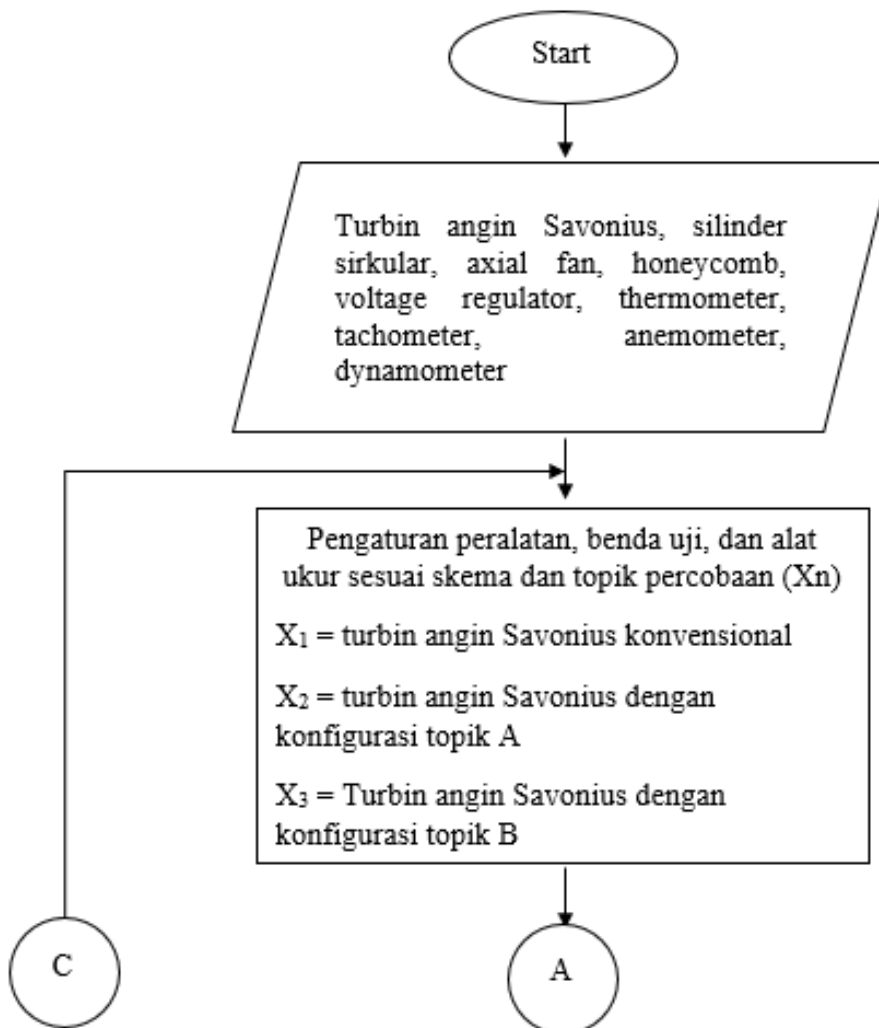


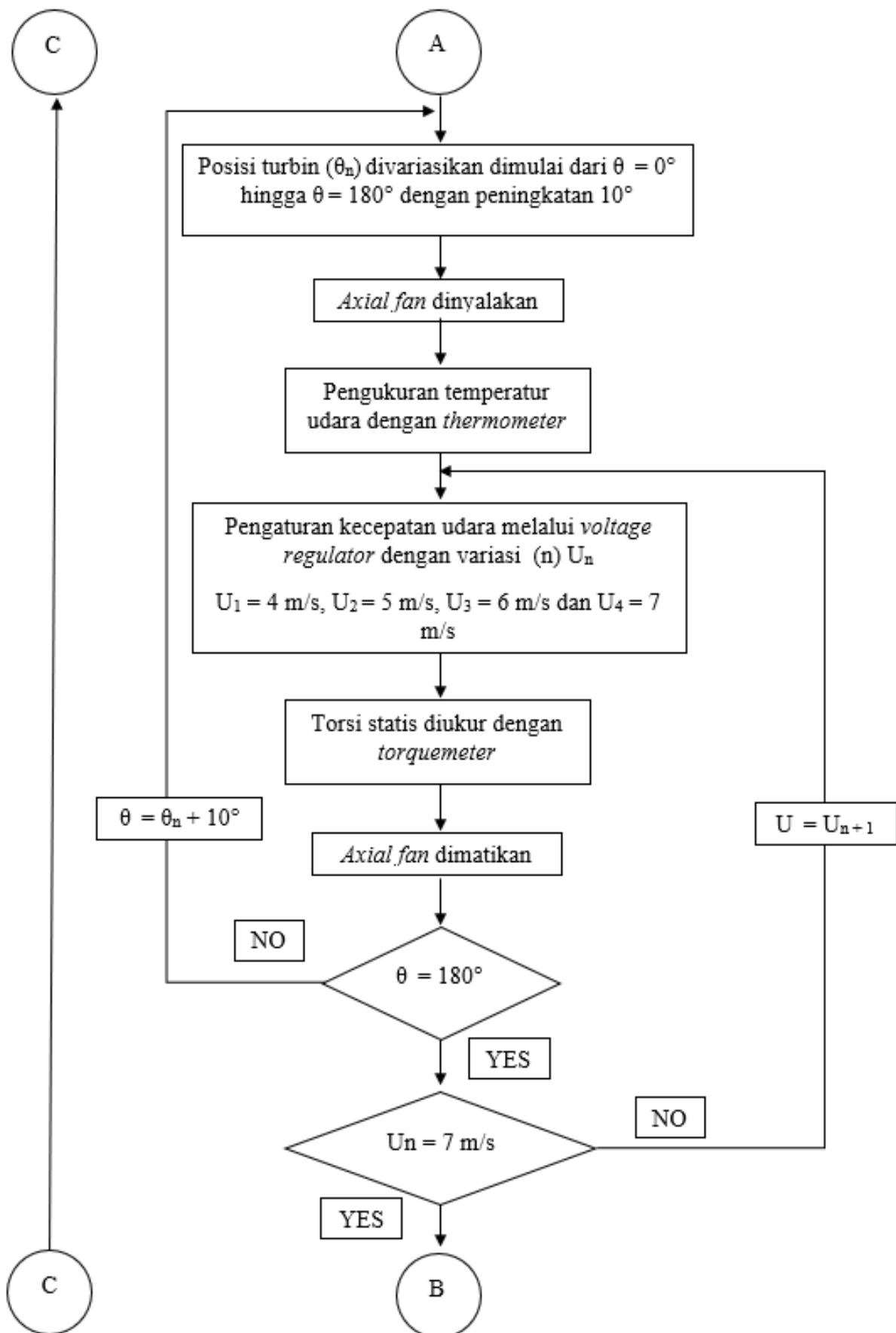


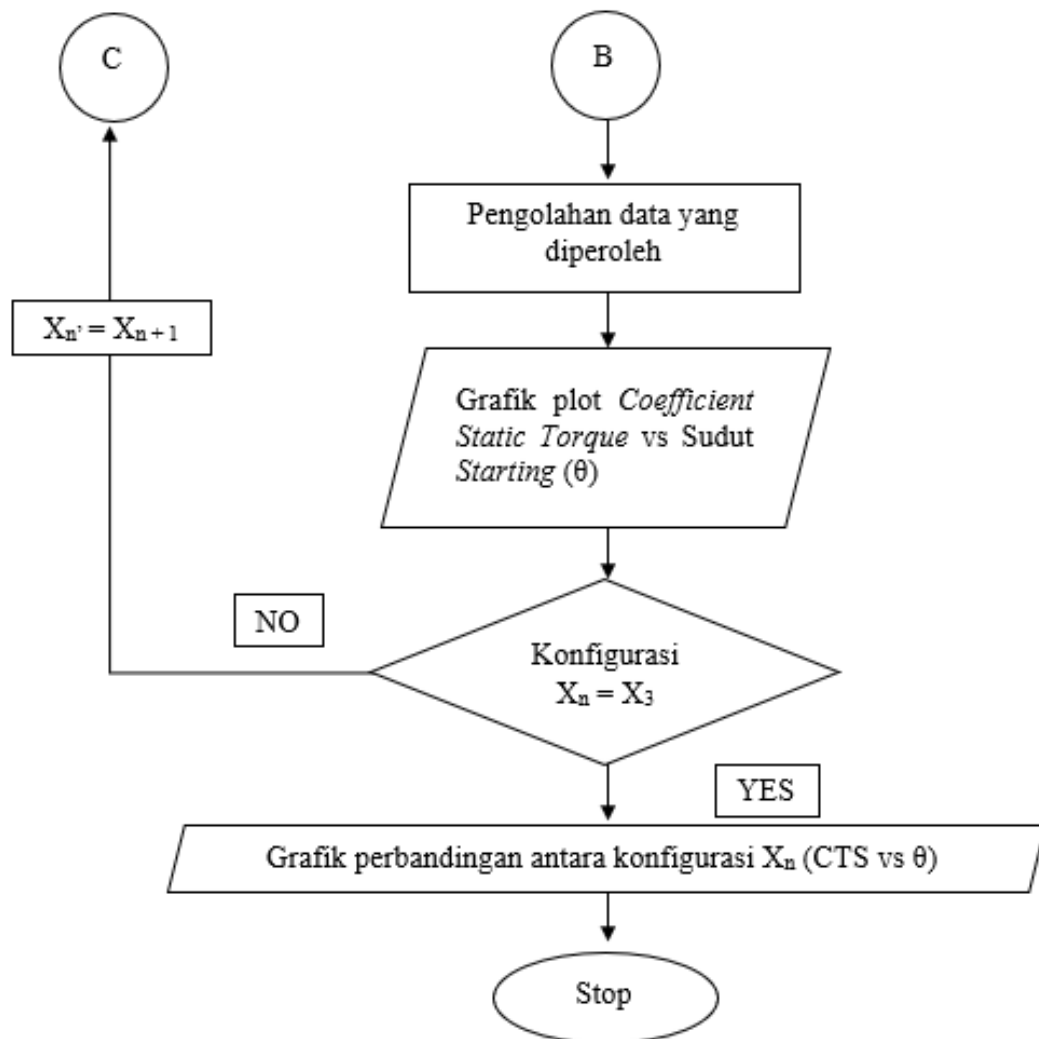
Gambar 3.14 *Flowchart* Pengambilan Data Kecepatan Sudut dan Torsi Dinamis

3.6.2 *Flowchart* Pengambilan Data Torsi Statis

Gambar 3.15 di bawah menunjukkan diagram alur pengambilan data torsi statis turbin angin Savonius untuk percobaan ini.



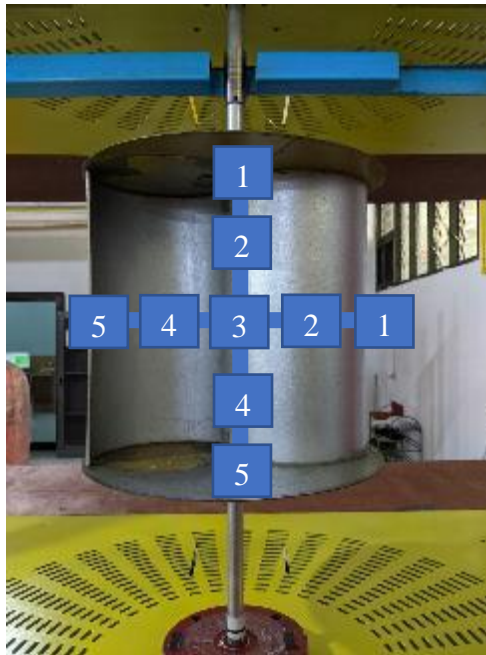




Gambar 3.15 Flowchart Pengambilan Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius

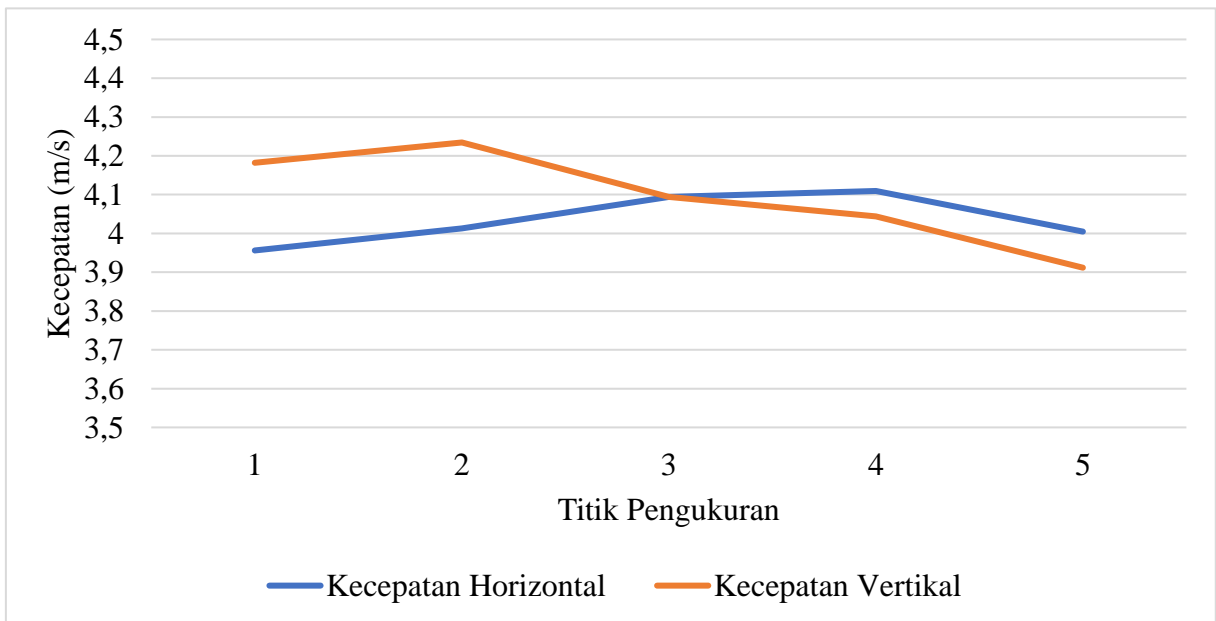
3.7 Uji Uniformity

Pada penelitian ini, keseragaman aliran (*uniform flow*) dibutuhkan supaya didapat hasil penelitian yang ideal. Untuk mendapatkan hasil aliran yang seragam, pada penelitian ini pengujian *uniformity* dilakukan tanpa melalui *wind tunnel* sehingga kondisi aliran adalah *external flow*. Penentuan keseragaman *external flow* cenderung lebih sulit dibandingkan *internal flow*. Hal ini dikarenakan pada aliran eksternal memiliki sumber yang tidak hanya 1 titik, melainkan banyak titik. *Uniformity test* aliran udara dilakukan pada sisi *upstream* turbin angin Savonius dengan melakukan pengukuran kecepatan aliran fluida menggunakan *anemometer* pada 5 titik vertikal dan 5 titik horizontal. *Uniformity test* dilakukan di depan turbin angin Savonius pada jarak 4.5 kali diameter sudu turbin angin Savonius atau 743.4 mm. Gambar 3.16 di bawah menunjukkan skema titik pengujian kecepatan aliran angin.

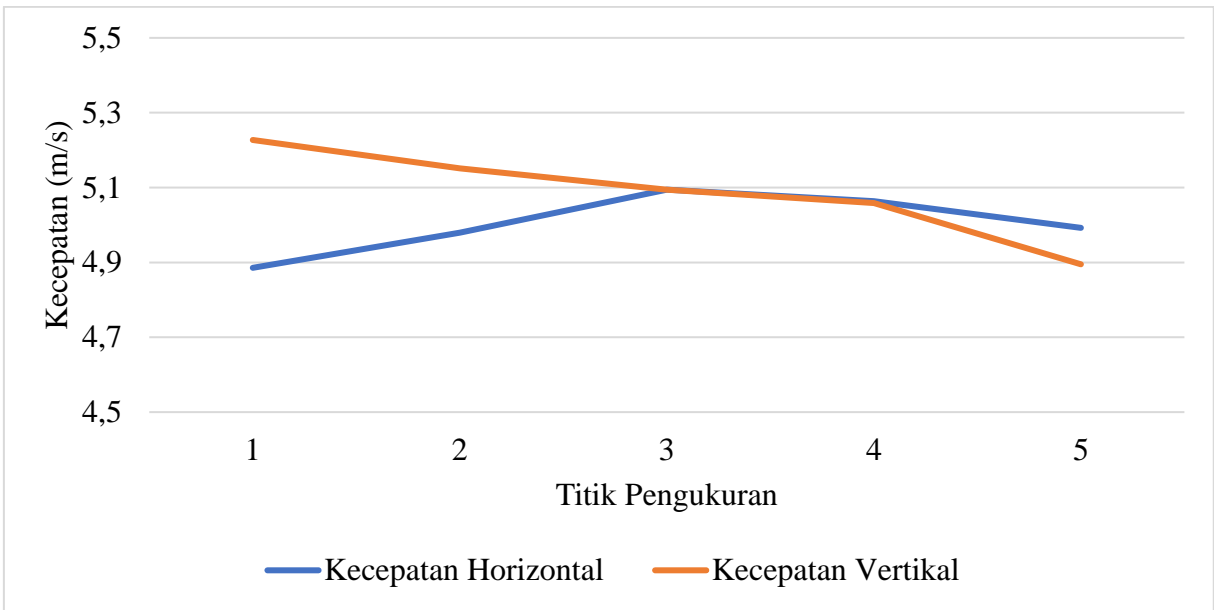


Gambar 3.16 Posisi Titik Pengambilan Keseragaman Kecepatan Aliran Angin

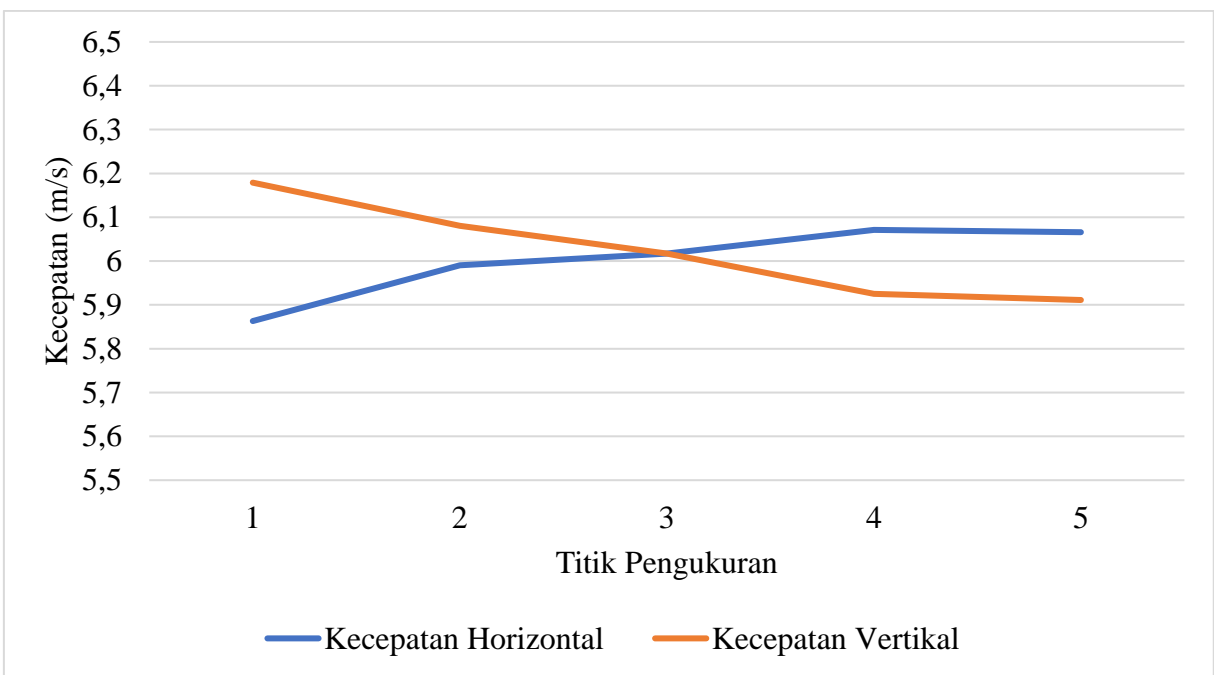
Berdasarkan hasil pengukuran keseragaman kecepatan aliran pada kecepatan 4,5,6, dan 7 m/s. Diperoleh hasil yang ditunjukkan oleh gambar 3.17, 3.18, 3.19, dan 3.20 di bawah.



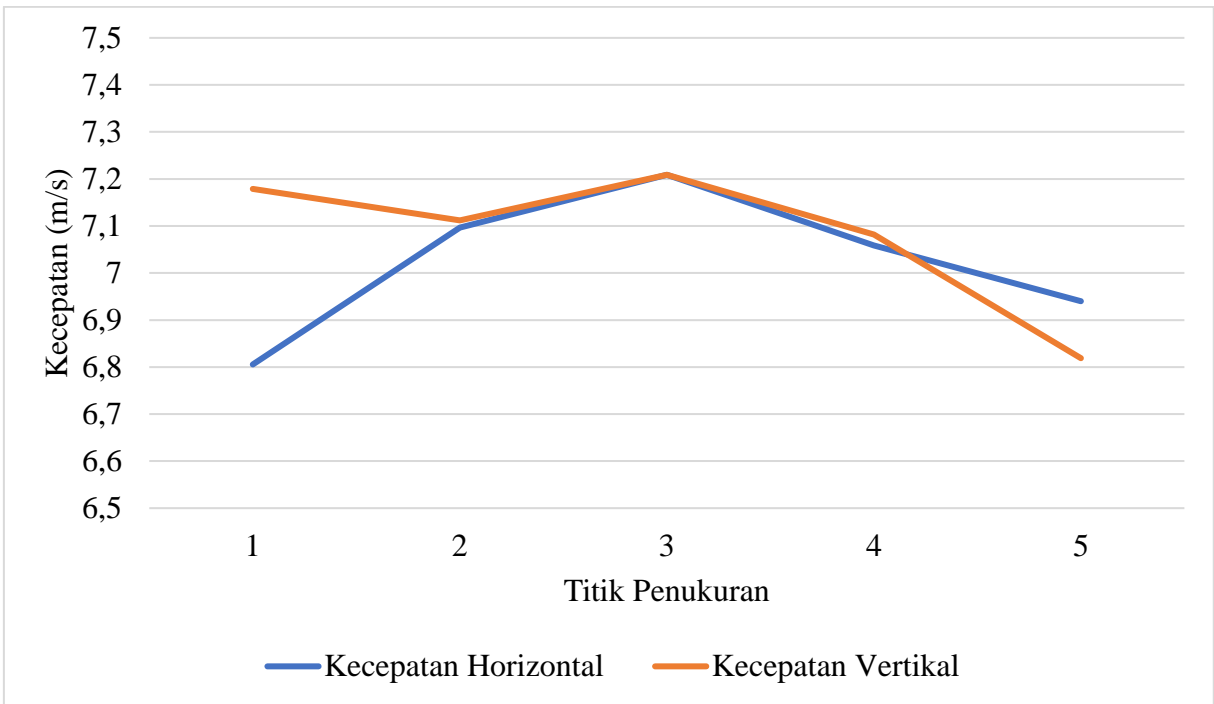
Gambar 3.17 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 4 m/s



Gambar 3.18 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 5 m/s



Gambar 3.19 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 6 m/s



Gambar 3.20 Hasil Pengukuran Keseragaman Kecepatan Aliran Angin Pada Kecepatan 7 m/s

3.8 Perhitungan *Uncertainty*

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

- *uncertainty* luas penampang

$$A = h \cdot L$$

$$u_A = \pm \left\{ [u_{A,h}]^2 + [u_{A,L}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$u_{A,h} = \frac{h}{A} \frac{\partial A}{\partial h} u_h = u_h$$

$$u_{A,L} = \frac{L}{A} \frac{\partial A}{\partial L} u_L = u_L$$

$$u_A = \pm \{u_h^2 + u_L^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_A = \pm 4 \times 10^{-5} \dots\dots\dots (3.12)$$

- *uncertainty* massa jenis

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot T_1}{T_2}, \text{ dimana } \rho_1 \text{ dan } T_1 \text{ konstan pada keadaan std.}$$

$$u_\rho = \pm \left\{ [u_{\rho,T_2}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\rho, T_2} = \frac{T_2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T_2} u_{T_2} = -u_{T_2}$$

$$u_{\rho} = \pm \left\{ [-u_{T_2}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\rho} = \pm \left\{ u_{T_2}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.13)$$

- *uncertainty* viksositas

$$\mu = \frac{b.T^{\frac{3}{2}}}{S+T}, \text{ dimana } b \text{ dan } S \text{ merupakan sebuah konstanta.}$$

$$\mu = b.T^{\frac{3}{2}}.(S+T)^{-1} \dots \dots \dots (3.14)$$

$$u_{\mu} = \pm \left\{ [u_{\mu, T}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$d\mu = \frac{bT^{\frac{1}{2}}(T+3S)}{2(T+S)^2} dT$$

$$u_{\mu} = u_{\mu, T}$$

$$u_{\mu, T} = \frac{T}{\mu} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial T} \cdot u_T = \frac{T}{\mu} \frac{bT^{\frac{1}{2}}(T+3S)}{2(T+S)^2} \cdot u_T = \frac{T+3S}{2(T+S)} u_T \dots \dots \dots (3.15)$$

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

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

$$\lambda = \omega R V^{-1} \dots \dots \dots (3.16)$$

$$u_{\lambda} = \pm \left\{ [u_{\lambda, \omega}]^2 + [u_{\lambda, R}]^2 + [u_V]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.17)$$

Uncertainty akibat ω , R , dan V

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

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

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

Maka persamaan 3.17 menjadi

$$u_{\lambda} = \pm \left\{ u_{\omega}^2 + u_R^2 + u_V^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.18)$$

Uncertainty pada pembacaan putaran (ω)

$$u_{\omega} = \pm \left\{ [u_n]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{181,6} = \pm 5,5 \times 10^{-4}$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (R)

$$u_R = \pm \frac{0,01}{152,7} = \pm 6,55 \times 10^{-5}$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan (V)

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

Selanjutnya substitusi hasil *Uncertainty* ω , R, dan V ke persamaan 3.18 sehingga didapatkan hasil sebagai berikut.

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

$$u_\lambda = \pm \{ (5,5 \times 10^{-4})^2 + (6,55 \times 10^{-5})^2 + (0,002)^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 0,00207531$$

$$u_\lambda = \pm 0,2075\%$$

- *Uncertainty* pada perhitungan bilangan Reynolds (λ)

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

$$Re = \rho \cdot v \cdot L \cdot \mu^{-1} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$u_{Re} = \pm \left\{ [u_{Re,\rho}]^2 + [u_{Re,v}]^2 + [u_{Re,L}]^2 + [u_{Re,\mu}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.20)$$

Uncertainty akibat ρ , v , L dan V

$$u_{Re,\rho} = \frac{\rho}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \rho} u_\rho = u_\rho$$

$$u_{Re,v} = \frac{v}{Re} \frac{\partial Re}{\partial v} u_v = u_v$$

$$u_{Re,L} = \frac{v}{Re} \frac{\partial Re}{\partial L} u_L = u_L$$

$$u_{Re,\mu} = \frac{v}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \mu} u_\mu = \frac{T + 3S}{2(T + S)} u_T$$

$$u_{Re} = \pm \left\{ [u_\rho]^2 + [u_v]^2 + [u_L]^2 + \left[\frac{T+3S}{2(T+S)} u_T \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3.21)$$

Uncertainty pada pembacaan ρ

$$u_\rho = \frac{0,1}{T} = \frac{0,1}{27,5} = 3,6 \times 10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan v

$$u_v = \frac{0,01}{v} = \frac{0,01}{5} = 2 \times 10^{-3}$$

Uncertainty pada pembacaan L

$$u_L = \frac{0,01}{L} = \frac{0,01}{305,4} = 3,27 \times 10^{-5}$$

Uncertainty pada pembacaan μ

$$u_{\mu} = \frac{T + 3S}{2(T + S)} u_T = \frac{T + 3S}{2(T + S)} \cdot \frac{0,1}{T} = \frac{27,5 + 273 + 3.110,4}{2(27,5 + 273 + 110,4)} \cdot \frac{0,1}{27,5} = 0,00279$$

Sehingga persamaan 3.21 menjadi

$$u_{Re} = \pm \{ [3,6 \times 10^{-3}]^2 + [2 \times 10^{-3}]^2 + [3,27 \times 10^{-5}]^2 + [0,00279]^2 \}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 0,005249477$$

$$u_{Re} = \pm 0,5249\%$$

- Uncertainty pada perhitungan *Coefficient of Moment* (CM)

$$C_M = \frac{|m - s| \cdot g \cdot r}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 \cdot R}$$

$$u_{C_M} = \left\{ [u_{C_M,m}]^2 + [u_{C_M,s}]^2 + [u_{C_M,r}]^2 + [u_{C_M,\rho}]^2 + [u_{C_M,A}]^2 + [u_{C_M,U}]^2 + [u_{C_M,R}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.22)$$

Uncertainty akibat m, s, r, ρ, A, v , dan R

$$u_{C_M} = \left\{ [u_m]^2 + [-u_s]^2 + [u_r]^2 + [-u_{\rho}]^2 + [-u_A]^2 + [-2 \cdot u_v]^2 + [-u_R]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Sehingga persamaan 3.22 menjadi

$$u_{C_M} = \left\{ [u_m]^2 + [-u_s]^2 + [u_r]^2 + [-u_{\rho}]^2 + [-u_A]^2 + [-2 \cdot u_v]^2 + [-u_R]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \left\{ \left[\frac{0,01}{130,5} \right]^2 + \left[\frac{10}{200} \right]^2 + \left[\frac{0,01}{12,575} \right]^2 + [3,6 \times 10^{-3}]^2 + [4 \times 10^{-5}]^2 + [-2 \cdot 0,002]^2 + \left[-\frac{0,01}{305,4/2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = 0,0503121$$

$$u_{C_M} = 5,031\%$$

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

$$CoP = C_M \cdot \lambda$$

$$u_{CoP} = \pm \left\{ [u_{CoP,C_M}]^2 + [u_{CoP,\lambda}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.23)$$

Uncertainty akibat CoP dan λ

$$u_{CoP,C_M} = \frac{C_M}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial C_M} u_{C_M} = u_{C_M}$$

$$u_{CoP,\lambda} = \frac{\lambda}{CoP} \frac{\partial CoP}{\partial \lambda} u_{\lambda} = u_{\lambda}$$

Sehingga persamaan 3.23 menjadi

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

$$u_{CoP} = \pm\{[0,0503121]^2 + [0,002751]^2\}^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{CoP} = 0,0503632$$

$$u_{CoP} = 5,036\%$$

Tabel 3.9 menunjukkan hasil *uncertainty* CoP dan CM Maksimum pada tiap kecepatan dan tiap konfigurasi

Tabel 3.9 Hasil *Uncertainty* CoP,CM, dan Re pada Turbin Angin Konvensional pada Kecepatan 5 m/s

Unvertainity	Nilai
CM	5,031%
CoP	5,036%
Re	0,5249%

BAB IV
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

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

1. Tekanan *absolute* udara dalam keadaan standar (P_{std}) = $1,01325 \times 10^5$ N/m².
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_{std}) = 288,2 K.
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = 1,225 kg/m³.
4. Temperatur udara ruang kerja (saat penelitian) (T_2) = 28,5°C = 301,5 K

Data diatas merupakan data standar yang akan digunakan untuk contoh perhitungan dan perhitungan pada penelitian ini. Adapun perhitungan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pada kecepatan 5 m/s:

4.1.1 Perhitungan Reynolds Number

Berikut adalah langkah-langkah perhitungan *Reynolds Number*:

- **Penentuan Massa Jenis Udara (ρ)**

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

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

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

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

keadaan 1 dan 2 berada pada ketinggian yang sama sehingga $P_1 = P_2$ dan massa udara pada keadaan 1 dan 2 maka $m_1 = m_2$. Berdasarkan batasan tersebut, maka persamaan 4.2 menjadi:

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

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

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

- **Penentuan Viskositas Udara**

Dengan menggunakan persamaan Sutherland, maka:

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

dimana untuk udara:

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

$$S = 110,4 K$$

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

dari nilai tersebut, maka dapat substitusi pada persamaan 4.4 sehingga diperoleh:

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

$$\mu = 1,839 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

- **Perhitungan Reynolds Number**

Berdasarkan rumus *Reynolds Number*, maka dapat dihitung bilangan *Reynolds* pada kecepatan angin 4 m/s adalah:

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

Dimana L adalah panjang karakteristik yang diukur dari medan aliran dan dalam kasus ini adalah diameter turbin yang besarnya $2D - b - 2x = (2 \times 165,2) - 19 - (2 \times 3) = 305,4$ mm atau 0,3054 m. Kemudian dihitung bilangan *Reynolds* adalah sebagaimana berikut:

$$Re = \frac{1,18 \text{ kg/m}^3 \times 4 \text{ m/s} \times 0,3054 \text{ m}}{\left(1,839 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}\right)} = 78384 \approx 7,8 \times 10^4$$

Tabel 4.1 Bilangan Reynolds pada Tiap Kecepatan

Kecepatan Aliran Udara (m/s)	<i>Reynolds Number</i>
4	78000
5	97000
6	110000
7	130000

4.1.2 Perhitungan Tip Speed Ratio

Berdasarkan persamaan 2.20 untuk mendapat nilai *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

dimana:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \pi (306,4)}{60} = 32,07 \text{ rad/s}$$

R = jari-jari turbin angin Savonius

$$I = \frac{L}{2} = \frac{(2D - b - 2x)}{2} = \frac{(2 \times 165,2) - 19 - (2 \times 3)}{2} = 152,7 \text{ mm} \\ = 0,1545 \text{ m}$$

V = kecepatan pada bilangan *Reynolds* $9,6 \times 10^4$ yaitu 5 m/s dan diperoleh nilai *Tip Speed Ratio*:

$$\lambda = \frac{32,07 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1527 \text{ m}}{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,98$$

4.1.3 Perhitungan Coefficient of Power

Berdasarkan persamaan 2.17 nilai *Coefficient of Power* pada kecepatan 5 m/s dapat diperoleh sebagai berikut:

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

dimana:

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

$$A = L \cdot H = 0,3054 \text{ m} \times 0,295 \text{ m} = 0,09 \text{ m}^2$$

r = Jari-jari silinder yang menerima beban = 25,15/2 mm

$$r = 12,75 \text{ m}$$

ω = Kecepatan sudut turbin angin Savonius = 31,14 rad/s
 m = massa pembebanan (kg) = 10 gr = 0,01 kg
 s = massa yang terbaca di neraca pegas (kg) = 30 gr = 0,03 kg
 Sehingga didapatkan nilai CoP :

$$\begin{aligned}
 CoP &= \frac{\left| \frac{10 - 30}{1000} \right| kg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 12,75 m \cdot 31,14 \frac{rad}{s}}{\frac{1}{2} \cdot 1,17 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,09 m^2 \cdot \left(5 \frac{m}{s}\right)^3} \\
 &= 0,009 \\
 &= 0,9\%
 \end{aligned}$$

4.1.4 Perhitungan *Coefficient of Moment*

Berdasarkan persamaan 2.18 untuk memperoleh nilai *Coefficient of Moment* pada kecepatan 5 m/s adalah sebagai berikut:

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

Dan diperoleh nilai C_m :

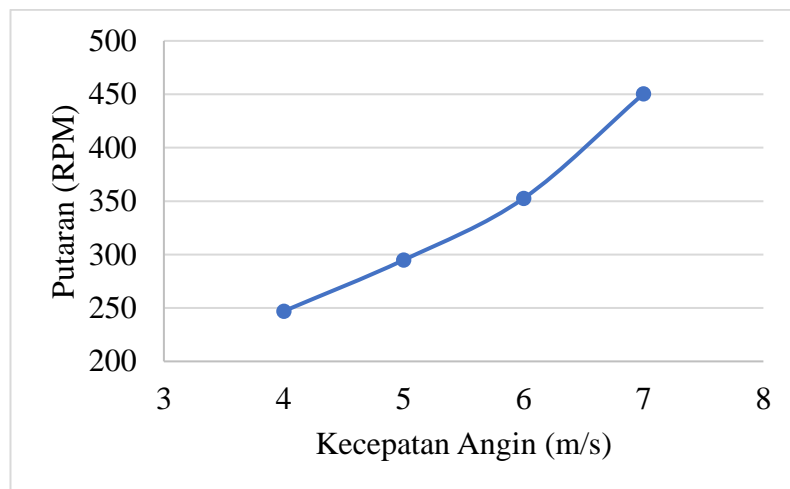
$$C_M = \frac{0,009}{0,98} = 0,097$$

4.2 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu dengan Variasi Kecepatan 4, 5, 6, 7 m/s

Pada sub bab ini, analisis dari performa turbin angin Savonius dilakukan tanpa menggunakan silinder pengganggu dipasang. Adapun variasi yang akan dianalisis adalah variasi kecepatan angin. Sebelum dilakukan analisis performa dari turbin angin Savonius akibat pengaruh silinder pengganggu, maka perlu dilakukan analisis performa turbin angin Savonius tanpa adanya penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Analisis yang dilakukan disajikan dalam bentuk grafik. Analisis yang dilakukan meliputi putaran turbin sebagai fungsi dari kecepatan angin, *Coefficient of Power* sebagai fungsi dari kecepatan angin, *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), dan torsi statis yang dihasilkan oleh turbin terhadap posisi angular sudu (θ).

4.2.1 Analisis Putaran Turbin Angin Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.1 menunjukkan grafik putaran turbin angin Savoniu tanpa silinder sebagai fungsi dari kecepatan angin dimana penelitian ini dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.

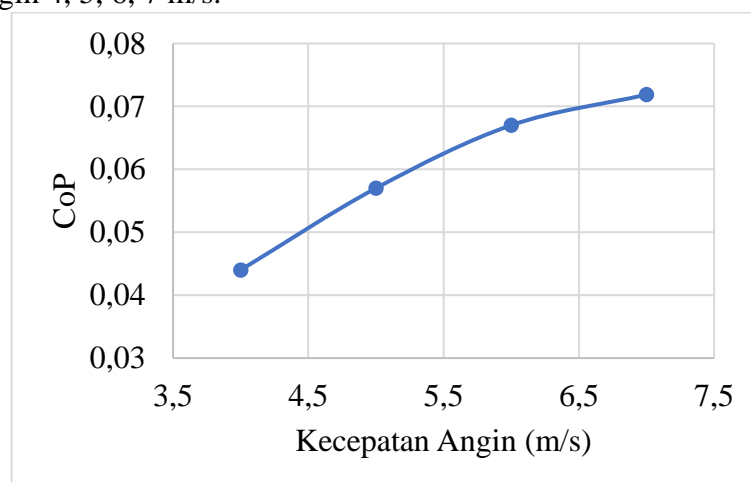


Gambar 4.1 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi Kecepatan Angin

Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa kurva putaran turbin angin Savonius dengan fungsi kecepatan angin 4, 5, 6, 7 m/s tanpa silinder pengganggu memiliki *trendline* yang meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin yang melewati turbin angin Savonius mempengaruhi kecepatan putaran turbin. Dimana semakin tinggi kecepatan angin, maka putaran yang dihasilkan turbin juga semakin tinggi. Berdasarkan hasil pengukuran, dilihat bahwa nilai putaran angin tertinggi pada kecepatan 7 m/s dengan nilai 450,5 rpm. Kemudian pada kecepatan 6 m/s dengan nilai 352,6 rpm. Pada Kecepatan 5 m/s sebesar 295,9 rpm dan pada kecepatan 4 m/s sebesar 247 rpm.

4.2.2 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi Kecepatan Angin Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.2 menunjukkan nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi dari kecepatan angin. Dimana penelitian ini dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, 7 m/s.



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

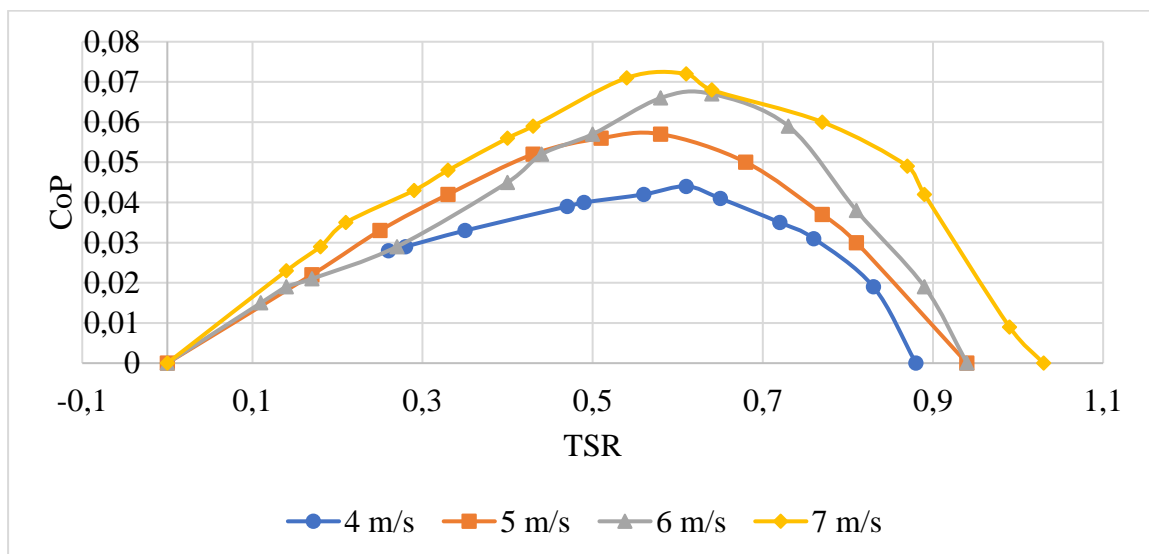
Berdasarkan hasil pengukuran, diperoleh nilai CoP terhadap fungsi kecepatan pada turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s. Grafik pada

gambar 4.2 memiliki *trendline* yang meningkat dari kecepatan 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s dan meningkat lagi pada kecepatan 7 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, maka nilai *Coefficient of Power* juga akan meningkat. Hal ini dikarenakan pada kecepatan yang lebih tinggi, daya yang dihasilkan angin juga akan meningkat. Namun, belum tentu turbin angin dapat mengubah seluruh daya angin tersebut menjadi energi putaran turbin. Hal ini ditunjukkan dengan gambar 4.2 dimana pada kecepatan 7 m/s grafik meningkat secara landai.

Berdasarkan gambar 4.2 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Power* tertinggi terjadi pada kecepatan 7 m/s dengan nilai sebesar 0,0720. Kemudian pada kecepatan 6 m/s didapatkan nilai *Coefficient of Power* sebesar 0,0670. Pada kecepatan 5 m/s diperoleh *Coefficient of Power* sebesar 0,0570 dan pada kecepatan 4 m/s diperoleh *Coefficient of Power* sebesar 0,044. Pada kecepatan 7 m/s dapat dilihat bahwa kurva naik tetapi tidak sama tinggi dengan kenaikan pada kecepatan sebelumnya. Hal tersebut diperkuat dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud, et al. 2012** yang menunjukkan nilai CoP turbin angin Savonius fungsi kecepatan angin mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada kecepatan angin tertentu dan akan turun setelah mencapai titik maksimumnya dalam hal ini dikarenakan kecepatan penelitian hanya sampai 7 m/s penurunan tidak dapat dilihat, tetapi pada kecepatan 7 m/s kenaikan mulai melandai. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi kecepatan angin atau bilangan *Reynolds* maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi. Hal ini dikarenakan kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta kecepatan angin yang sangat tinggi yang akan menyebabkan nilai putaran turbin akan menurun dan menyebabkan nilai daya *output* akan menurun, dengan nilai daya *input* yang tetap sama maka nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun.

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

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



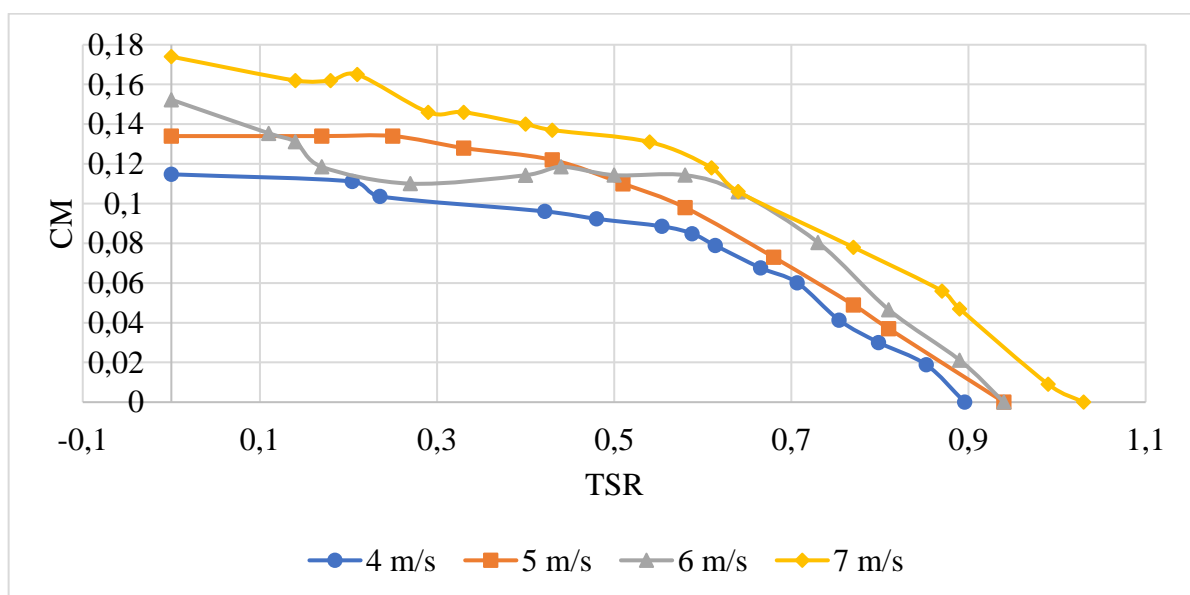
Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s

Pada gambar 4.3 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Berdasarkan gambar 4.3 nilai *Coefficient of Power* akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai λ optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai λ . Pada kecepatan 4 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,044 dengan $\lambda = 0,61$; pada kecepatan 5 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,057 dengan $\lambda = 0,58$; pada kecepatan 6 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,067 dengan $\lambda = 0,64$; pada kecepatan 7 m/s nilai CoP maksimum sebesar 0,072 dengan $\lambda = 0,61$.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, titik optimum berada pada kecepatan 7 m/s, dimana pada kecepatan ini diperoleh nilai CoP maksimum tertinggi, sehingga performa yang dihasilkan paling besar dibandingkan kecepatan yang lainnya. Berdasarkan gambar 4.3 diperoleh hasil bahwa nilai CoP pada kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s memiliki *trendline* yang meningkat hingga pada *Tip Speed Ratio* optimum, kemudian CoP akan menurun setelah melewati *Tip Speed Ratio* optimum. Hal tersebut diperkuat dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Mahmoud, et al. 2012** yang menunjukkan nilai CoP turbin angin Savonius fungsi *tip speed ratio* angin mempunyai bentuk grafik parabolik yang akan naik sampai CoP maksimum pada *tip speed ratio* tertentu dan akan turun setelah mencapai titik maksimumnya. Sehingga dapat diartikan semakin tinggi *tip speed ratio* maka nilai CoP tidak selalu lebih tinggi. Hal ini dikarenakan kerugian-kerugian mekanis yang terjadi pada turbin serta kecepatan angin yang sangat tinggi akan membuat putaran turbin berputar sangat cepat sehingga turbin angin Savonius seolah – olah akan terlihat seperti dinding *solid* terhadap angin dan dapat mengakibatkan turbulensi saat sudu berputar sehingga fluida tidak dapat mencapai sudu turbin yang akan menyebabkan nilai putaran turbin akan menurun dan menyebabkan nilai daya *output* akan menurun, dengan nilai daya *input* yang tetap sama maka nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun.

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

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



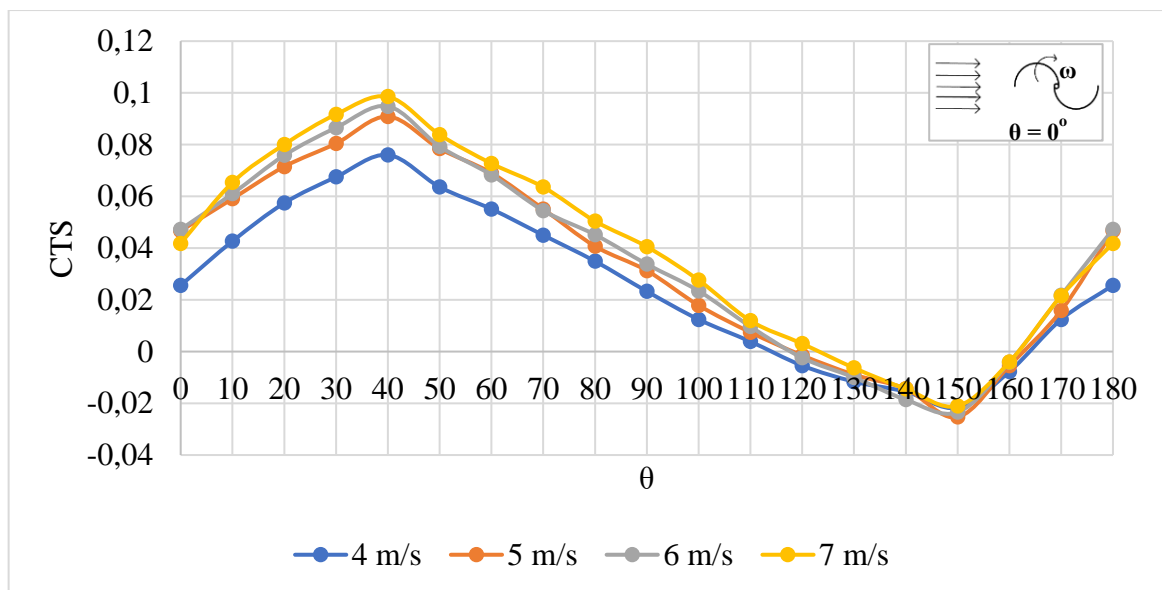
Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu Sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Pada Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.4 dapat dilihat bahwa nilai C_m turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu maksimum tertinggi terdapat pada kecepatan 7 m/s yaitu sebesar 0,174 pada $\lambda = 0$, pada kecepatan 6 m/s didapatkan C_m maksimum sebesar 0,152 pada $\lambda = 0$, pada kecepatan 5 m/s didapatkan C_m maksimum sebesar 0,134 pada $\lambda = 0$, pada kecepatan 4 m/s didapatkan C_m maksimum sebesar 0,128 pada $\lambda = 0$. Dari *trendline* grafik dapat dilihat bahwa pada kecepatan 7 m/s berada pada posisi paling atas.

Nilai C_m akan naik seiring meningkatnya nilai kecepatan angin sampai mencapai kecepatan angin optimum. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan angin, maka energi kinetik yang dihasilkan oleh angin juga lebih besar, oleh karena itu nilai torsi dinamis turbin juga meningkat seiring dengan meningkatnya gaya kinetik yang dihasilkan oleh angin.

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

Studi eksperimen dilakukan dengan cara mengukur torsi statis dengan *torquemeter* dari turbin angin Savonius tanpa penggunaan silinder pengganggu (T_s) pada saat *blade* turbin angin Savonius berada pada posisi angular sudu $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ dengan tiap kenaikan 10. Torsi statis yang diukur pada penelitian ini menggunakan variasi kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s. Torsi statis ini kemudian diolah menjadi *Static Torque Coefficient* (CTS) fungsi posisi angular sudu (θ) dengan variasi kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s ditunjukkan pada gambar 4.5.



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

Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa grafik tersebut berbentuk sinusoidal pada seluruh kecepatan angin. Pada seluruh variasi kecepatan angin didapatkan bahwa nilai *Static Torque Coefficient* mengalami peningkatan dari sudut 0° hingga 40° . Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada kecepatan angin tersebut mengalami penurunan hingga sudut 150° untuk $V = 4, 5, 6, \text{ dan } 7 \text{ m/s}$. Lalu nilai *Static Torque Coefficient* pada seluruh kecepatan angin tersebut mengalami kenaikan hingga sudut 180° . Pada kecepatan angin 4 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar 0,0760 pada sudut 40° dan nilai *Static Torque*

Coefficient minimum yaitu dengan nilai sebesar $-0,0,2172$ pada sudut 150° . Pada kecepatan angin 4 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar $0,0908$ pada sudut 40° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum sebesar $-0,02531$ pada sudut 150° . Pada kecepatan angin 6 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar $0,0948$ pada sudut 40° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum yaitu sebesar $-0,02344$ pada sudut 150° . Pada kecepatan angin 7 m/s didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* maksimum sebesar $0,09853$ pada sudut 40° dan nilai *Static Torque Coefficient* minimum sebesar $-0,021$ pada sudut 150° . *Static Torque Coefficient* negatif pada masing-masing variasi kecepatan memiliki rentang sudut yang sama. *Static Torque Coefficient* maksimum dan minimum tertinggi terjadi pada saat kecepatan angin 7 m/s , karena semakin besar kecepatan angin semakin besar pula gaya *drag* yang diterima turbin angin Savonius. Pada penelitian ini didapatkan nilai torsi dengan harga negatif yang berarti turbin angin Savonius pada sudut tertentu tidak memiliki kemampuan *self starting* sehingga pada sudut tertentu turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

Pada penelitian ini didapatkan bahwa turbin angin Savonius mempunyai torsi positif terbesar pada sudut 40° untuk seluruh kecepatan angin dan untuk torsi negatif terbesar pada sudut 150° untuk seluruh kecepatan angin. Pada sudut 0° sampai 40° untuk seluruh kecepatan, serta pada sudut 150° sampai 180° pada seluruh kecepatan, terjadi peningkatan nilai *Static Torque Coefficient* karena luas permukaan *advancing blade* yang terpapar oleh aliran udara lebih besar dibandingkan dengan luas permukaan *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* meningkat sedangkan gaya *drag* pada *returning blade* berkurang sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat dan *Static Torque Coefficient* akan meningkat. Penurunan nilai *Static Torque Coefficient* terjadi pada sudut 50° sampai dengan sudut 150° dikarenakan posisi *advancing blade* yang semakin menjauhi arah datangnya angin sehingga luas permukaan *advancing blade* lebih kecil dibandingkan luas permukaan *returning blade* yang terkena aliran angin yang mengakibatkan gaya *drag* pada sisi *advancing blade* mengecil dan sisi *returning blade* mendekati datangnya arah angin sehingga gaya *drag* yang terjadi akan membesar. Hal ini menyebabkan selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan mengecil dan *Static Torque Coefficient* yang terjadi akan mengecil juga. Pada penelitian ini didapatkan bahwa posisi sudut 40° merupakan posisi dimana turbin angin Savonius menghasilkan *Static Torque Coefficient* maksimum dan juga didapatkan nilai *Static Torque Coefficient* dengan harga negatif. *Static Torque Coefficient* adalah torsi minimum yang diperlukan untuk menggerakkan turbin dari posisi diamnya. Kemampuan *self starting* turbin angin Savonius yang baik terdapat pada nilai *Static Torque Coefficient* yang bernilai positif pada semua posisi angular sudu karena dapat menangkap aliran udara dari berbagai kondisi, sedangkan pada posisi angular sudu yang menghasilkan nilai *Static Torque Coefficient* negatif menunjukkan bahwa turbin Savonius tidak memiliki kemampuan *self starting*, sehingga pada sudut tertentu tersebut turbin angin Savonius membutuhkan torsi awal untuk berputar.

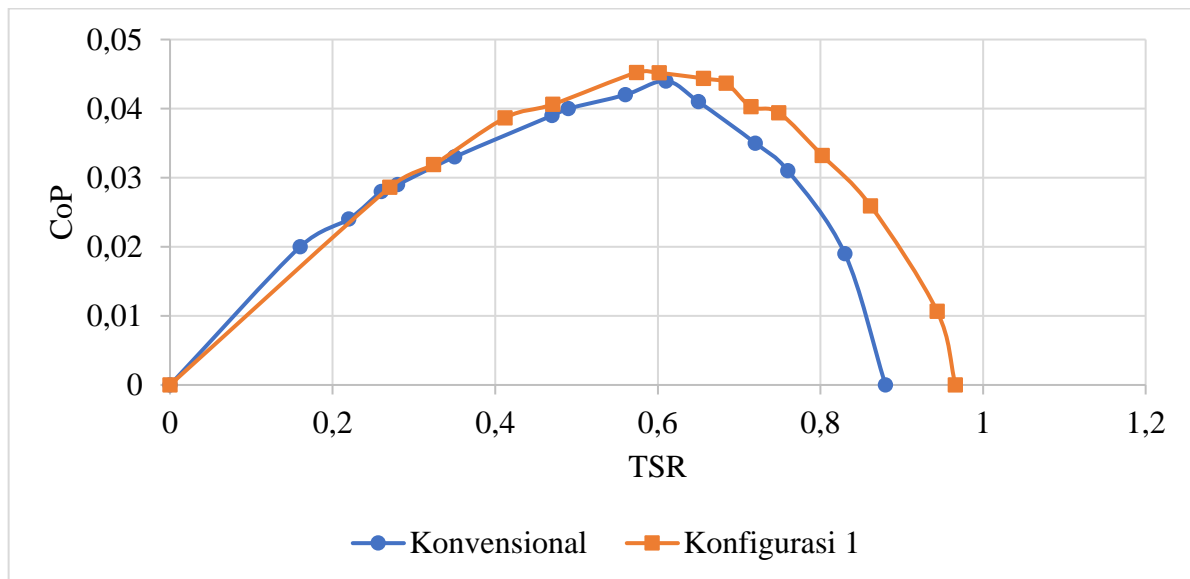
4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu di Samping *Advancing Blade* pada Variasi Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s pada Variasi Jarak $Y/D = 1,82$

Pada sub bab ini, analisis dari performa turbin angin Savonius dilakukan dengan menggunakan silinder pengganggu di samping *advancing blade*. Silinder pengganggu yang digunakan yaitu $d/D = 0,5$ dengan posisi $Y/D = 1,82$. Adapun yang akan dianalisis adalah variasi kecepatan angin, *Static Torque Coefficient*, *Tip Speed Ratio*, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* dari turbin angin Savonius. Analisis yang dilakukan, disajikan dalam bentuk grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), *Coefficient of Moment*

(Cm) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan *Static Torque Coefficient* (CTS) terhadap posisi angular sudu (θ).

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

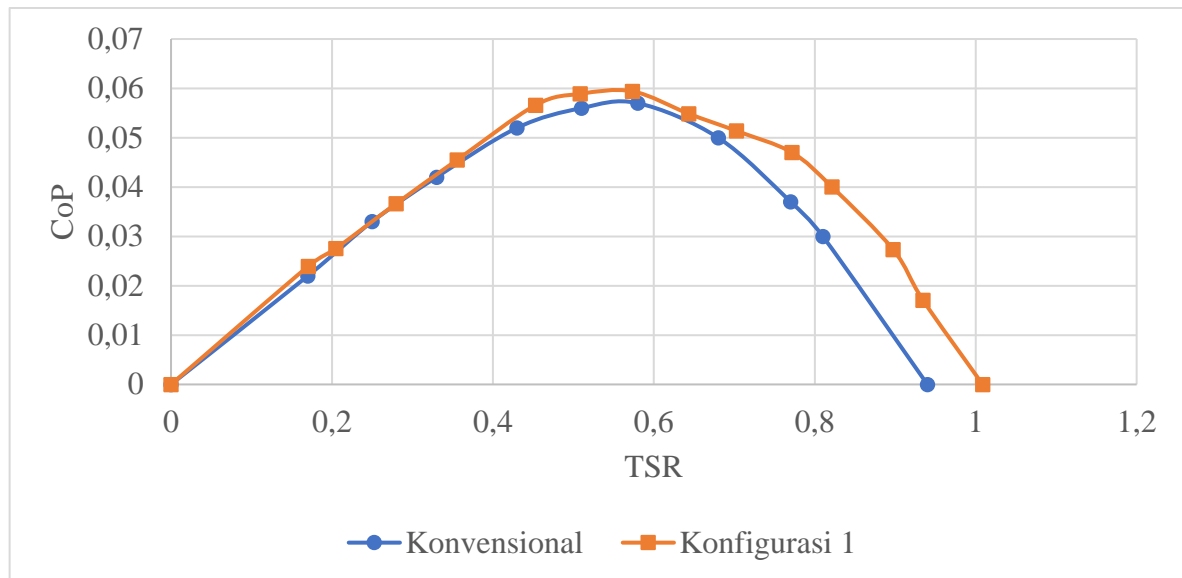
Gambar 4.6 - 4.9 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP) sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.



Gambar 4.6 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 4 m/s

Pada gambar 4.6 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.6 pada kecepatan 4 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,044 dengan $\lambda = 0,61$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu sebesar 0,045 dengan $\lambda = 0,6$. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 4 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,044 menjadi 0,045 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 2,27% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Selain peningkatan CoP, terjadi peningkatan TSR dari 0,88 menjadi 0,97 atau peningkatan sebesar 10,22% dibandingkan dengan turbin konvensional.

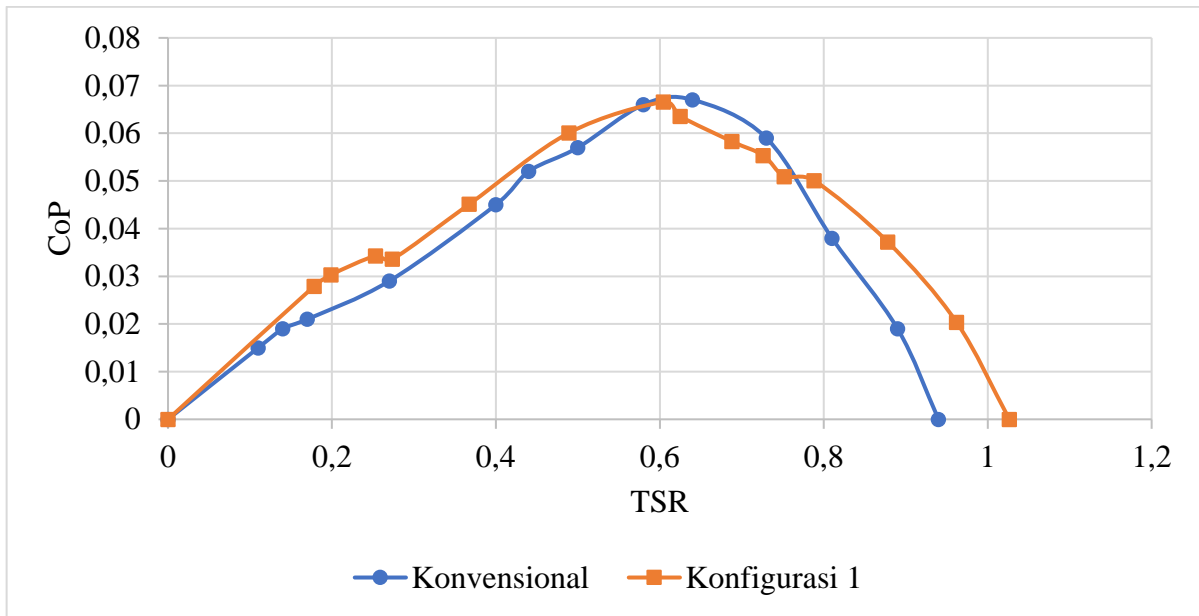
Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 5 m/s

Pada gambar 4.7 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.7 pada kecepatan 5 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,057 dengan $\lambda = 0,58$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu sebesar 0,059 dengan $\lambda = 0,57$. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s dapat meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,057 menjadi 0,059 atau terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* maksimum sebesar 3,5% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Selain peningkatan CoP, terjadi peningkatan TSR dari 0,94 menjadi 1,01 atau peningkatan sebesar 7,44% dibandingkan dengan turbin konvensional.

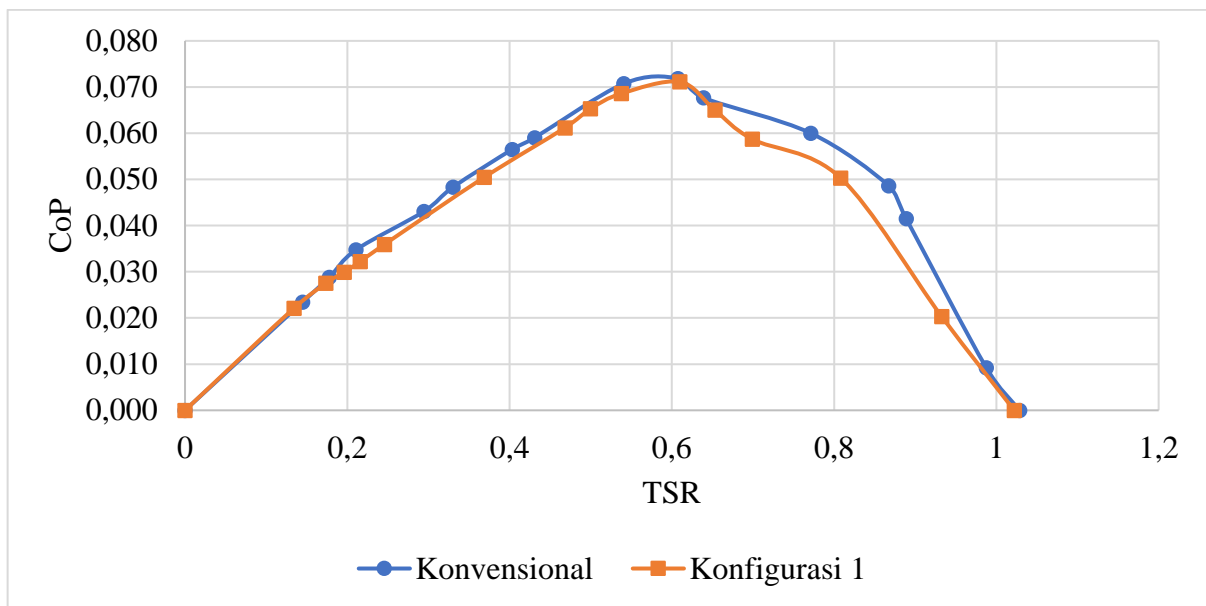
Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



Gambar 4.8 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Pada gambar 4.8 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.8 pada kecepatan 6 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,067 dengan $\lambda = 0,64$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu sebesar 0,067 dengan $\lambda = 0,6$.

Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s tidak meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu. Pada kecepatan 6 m/s, penggunaan silinder pengganggu dengan jarak $Y/D = 1,82$ kurang efektif. Hal ini dikarenakan pada kecepatan 6 m/s ketika turbin berputar dengan cepat aliran angin cenderung terdefleksi dan masuk pada daerah nozzle yang terbentuk. Tetapi ketika posisi putaran sudu advancing dan silinder pengganggu berdekatan, sehingga momentum efek nozzle yang terjadi menjadi terlalu kuat dan meningkatkan *base pressure* pada *advancing blade*. Sehingga seakan-akan efek *nozzle* ini tidak memberikan efek karena saling menghilangkan keuntungannya (Sumner, et al., 1999). Namun terjadi peningkatan TSR dari 0,94 menjadi 1,03 atau peningkatan sebesar 9,57% dibandingkan dengan turbin konvensional.



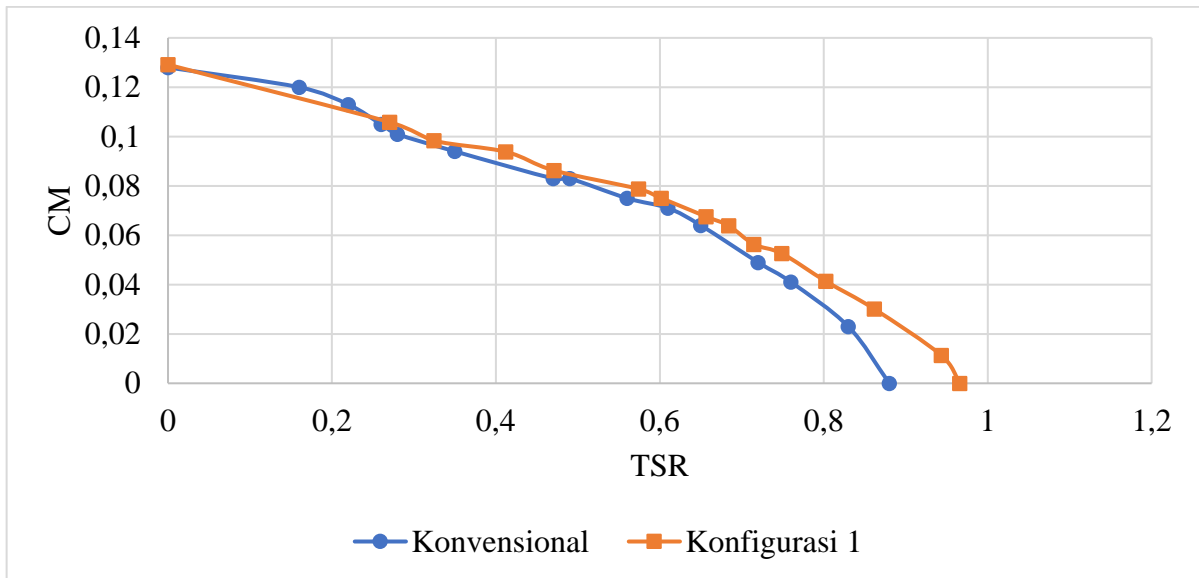
Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Pada gambar 4.9 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.9 pada kecepatan 7 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,072 dengan $\lambda = 0,61$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu sebesar 0,072 dengan $\lambda = 0,61$.

Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s tidak meningkatkan *Coefficient of Power* dibandingkan tanpa silinder pengganggu. Pada kecepatan 7 m/s, penggunaan silinder pengganggu dengan jarak $Y/D = 1,82$ kurang efektif. Hal ini dikarenakan pada kecepatan 7 m/s ketika turbin berputar dengan cepat aliran angin cenderung terdefleksi dan masuk pada daerah nozzle yang terbentuk. Tetapi ketika posisi putaran sudu *advancing* dan silinder pengganggu berdekatan, sehingga momentum efek nozzle yang terjadi menjadi terlalu kuat dan meningkatkan *base pressure* pada *advancing blade*. Sehingga seakan-akan efek nozzle ini tidak memberikan efek karena saling menghilangkan keuntungannya (Sumner, et al., 1999).

4.3.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* (CM) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu

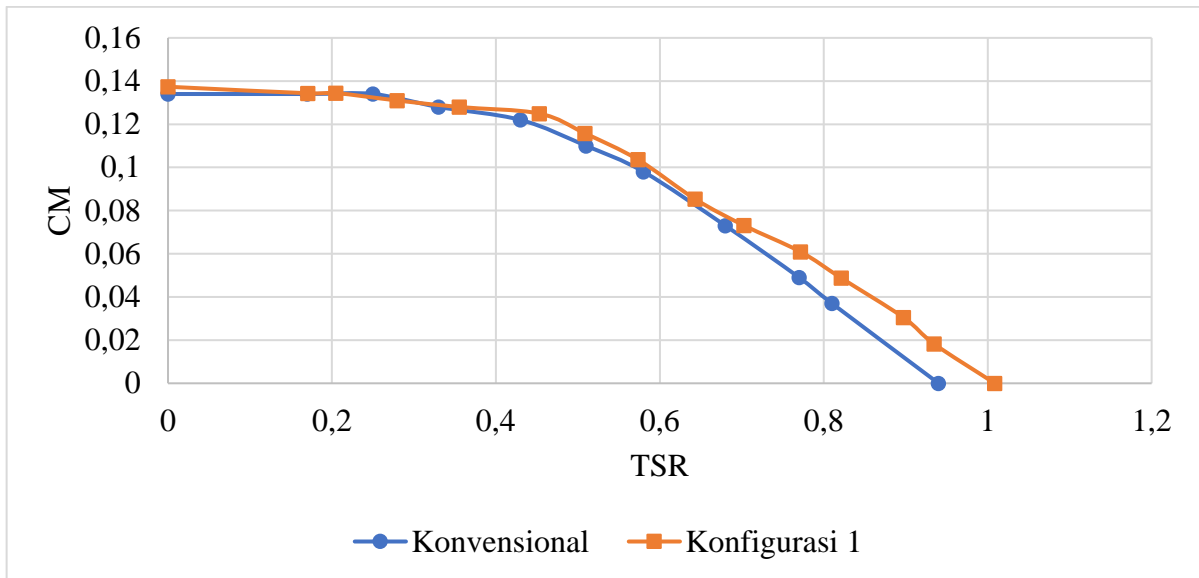
Gambar 4.10 - 4.13 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 4 m/s didapatkan C_m maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,128 pada $\lambda = 0$, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan pengganggu sebesar 0,129 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (C_m) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu terjadi peningkatan dari 0,128 menjadi 129 atau peningkatan sebesar 0,781%.

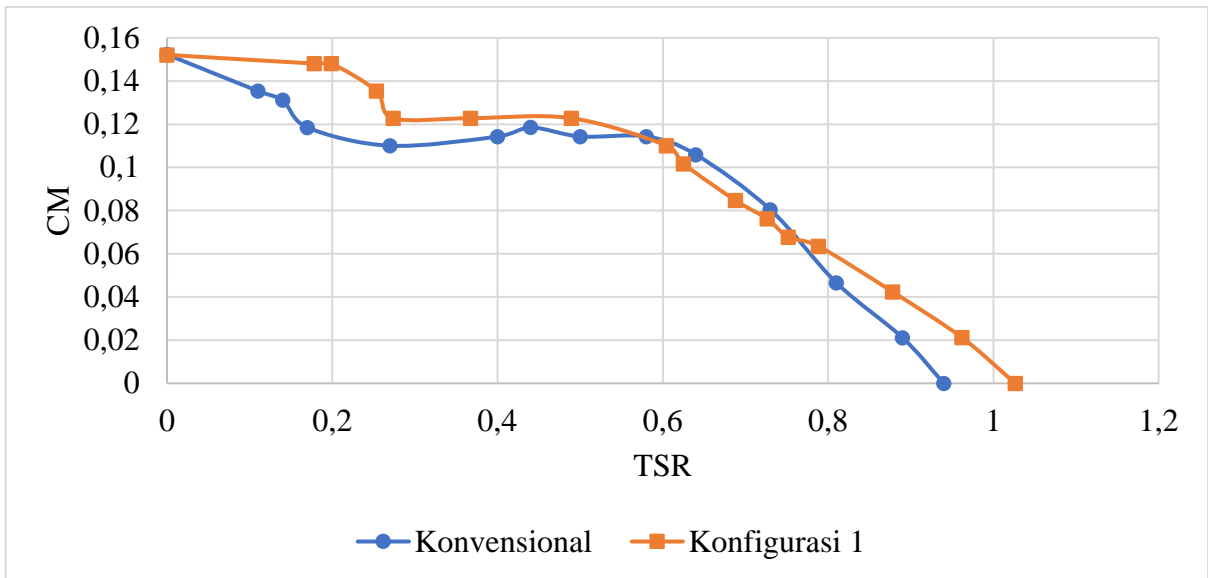
Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan yang menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (C_m).



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 5 m/s

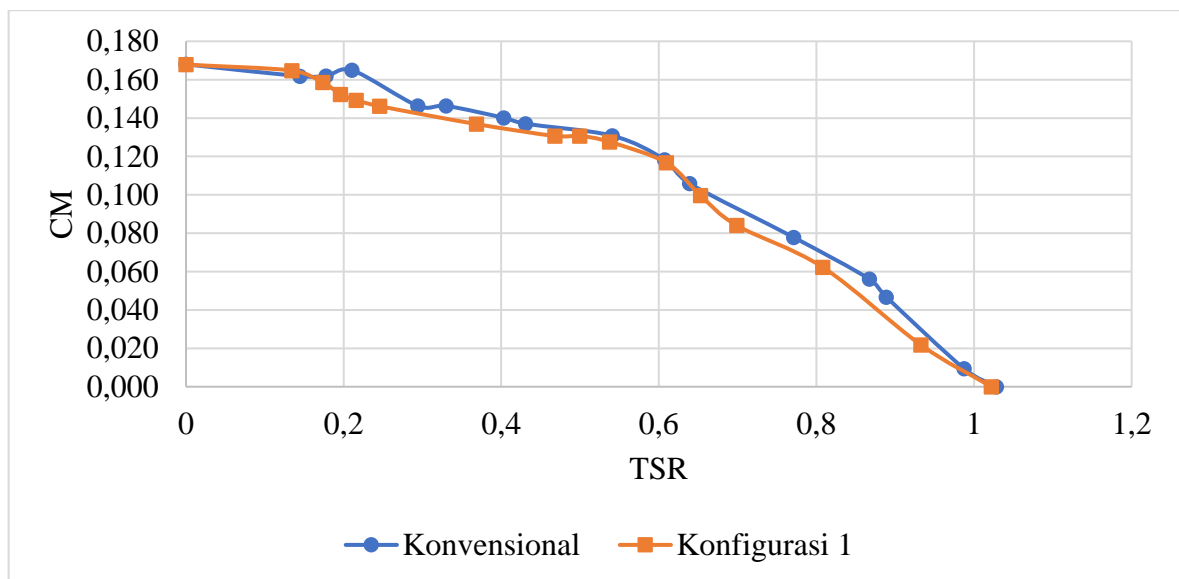
Berdasarkan gambar 4.11 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.11 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 5 m/s didapatkan C_m maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,134 pada $\lambda = 0$, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan pengganggu sebesar 0,137 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (C_m) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Penggunaan silinder pengganggu pada kecepatan 5 m/s meningkatkan *Coefficient of Moment* sebesar 2,24% dibandingkan tanpa silinder pengganggu yaitu dari 0,134 menjadi 0,137.

Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi bekalang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan yang menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Moment* (C_m).



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 6 m/s didapatkan C_m maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,152 pada $\lambda = 0$, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan pengganggu sebesar 0,152 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (C_m) maksimum memiliki nilai maksimum yang sama dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Tidak ada terjadinya peningkatan dikarenakan pemasangan silinder pengganggu pada kecepatan 6 m/s kurang efektif membentuk *nozzle effect*.

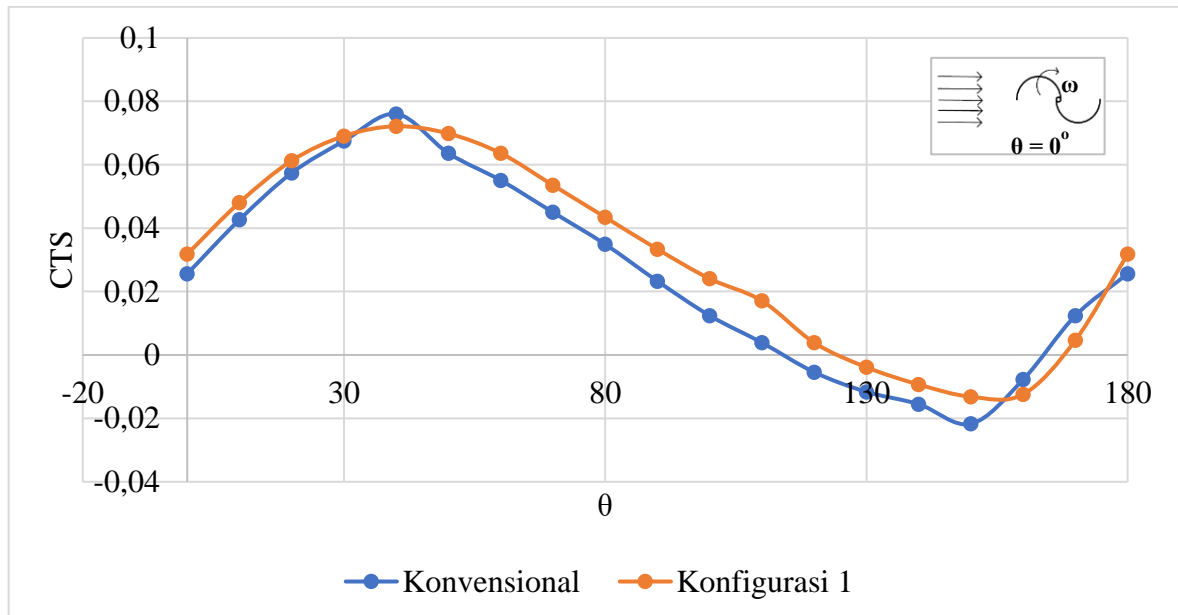


Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.13 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 7 m/s didapatkan C_m maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,168 pada $\lambda = 0$, sedangkan untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan pengganggu sebesar 0,168 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (C_m) maksimum memiliki nilai maksimum sama besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Tidak ada terjadinya peningkatan dikarenakan pemasangan silinder pengganggu pada kecepatan 7 m/s kurang efektif membentuk *nozzle effect*.

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

Gambar 4.14 - 4.17 menunjukkan grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.

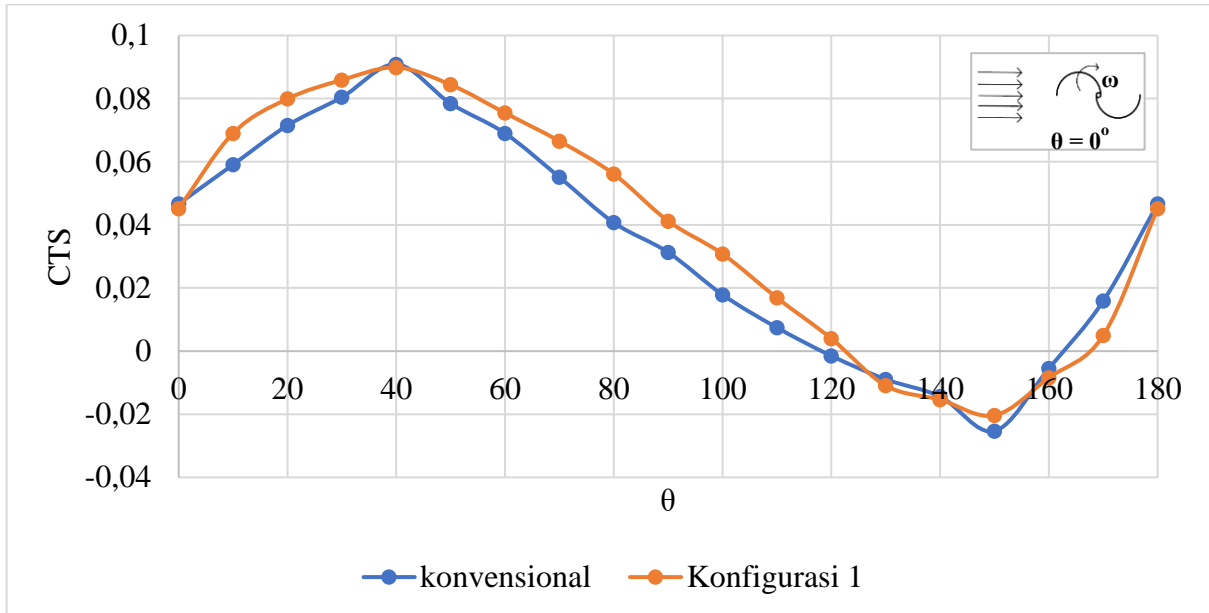


Gambar 4.14 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.14 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 4 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,07602 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,0217. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,07214 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01319. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu tidak terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,82$ pada kecepatan angin 4 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di dekat *advancing blade* pada Y/D

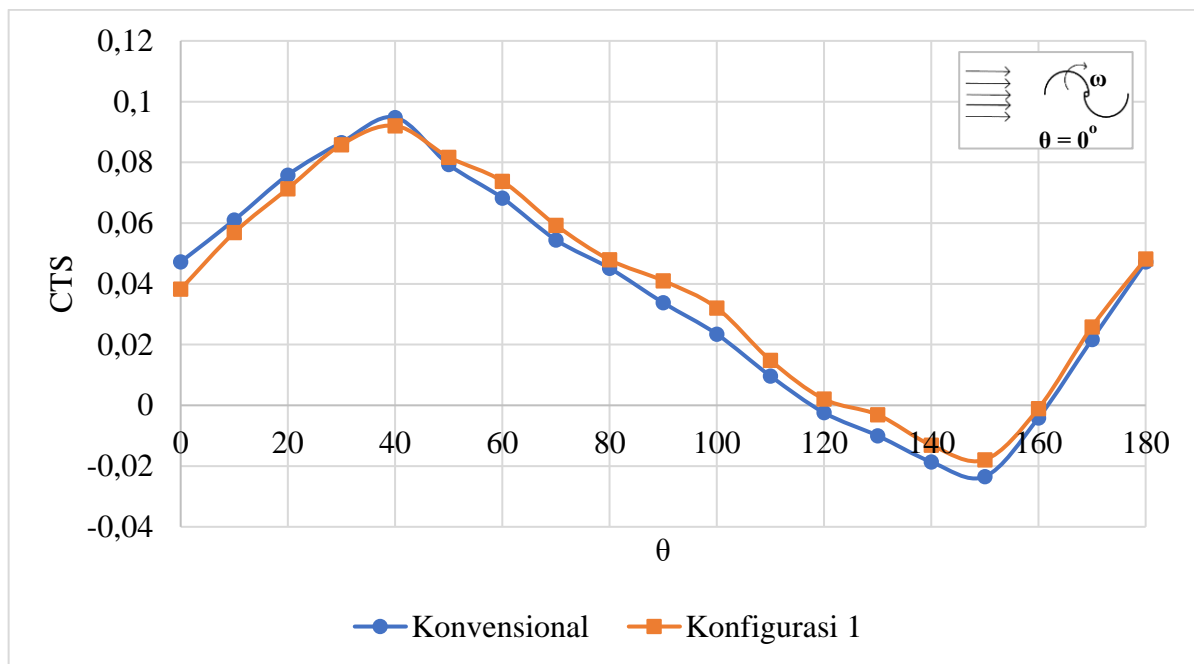
= 1,82 memperbaiki kemampuan *self starting* turbin dibanding turbin konvensional. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat.



Gambar 4.15 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.15 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 5 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,00908 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,02531. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,08986 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,02482. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu tidak terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

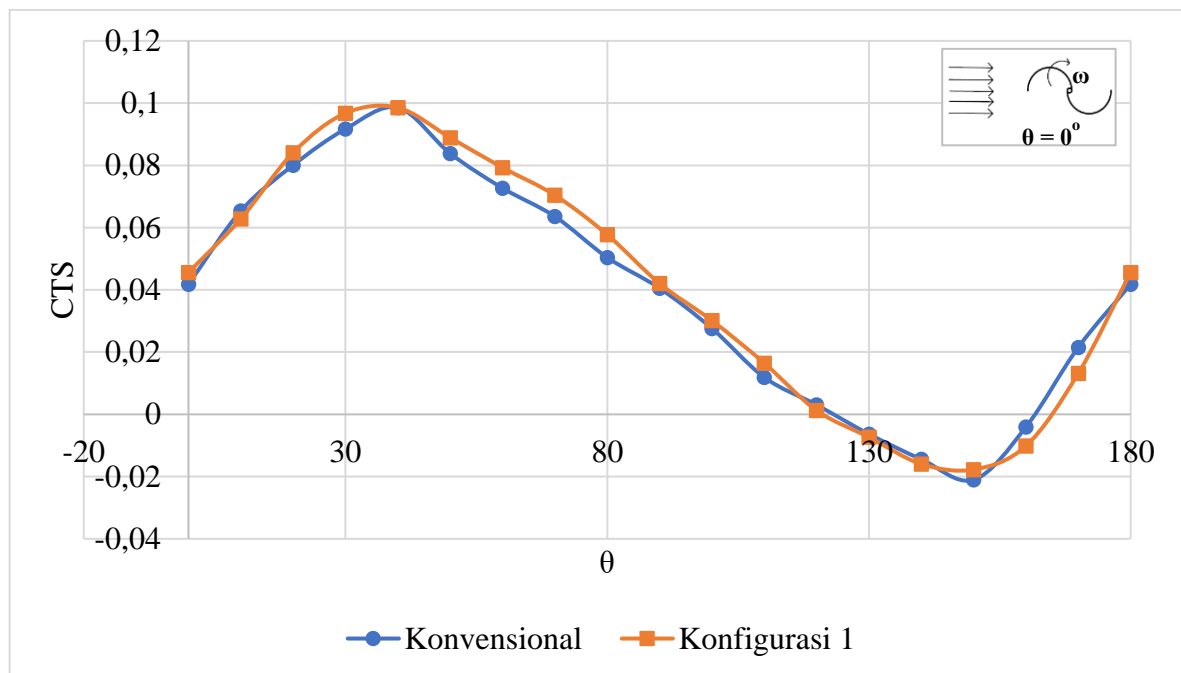
Penggunaan silinder pengganggu pada jarak $S/D = 1,82$ pada kecepatan angin 5 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di dekat *advancing blade* pada $Y/D = 1,82$ memperbaiki kemampuan *self starting* turbin dibanding turbin konvensional. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat.



Gambar 4.16 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.16 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 6 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,09481 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,0234. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,09205 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,0179. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu tidak terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 6 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di dekat *advancing blade* pada $Y/D = 1,82$ memperbaiki kemampuan *self starting* turbin dibanding turbin konvensional. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat.



Gambar 4.17 Grafik Static Torque turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.17 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 7 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,098533 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,02102. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,098533 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01773. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu tidak terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

Penggunaan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 7 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di dekat *advancing blade* pada $Y/D = 1,82$ memperbaiki kemampuan *self starting* turbin dibanding turbin konvensional. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat.

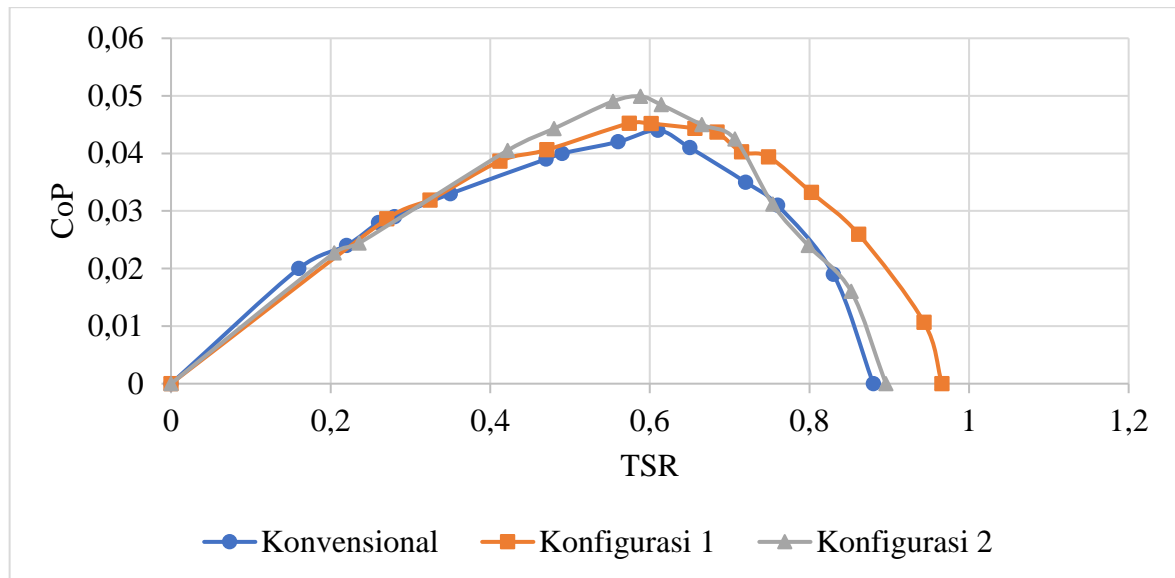
4.4 Analisis Performa Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu di Samping *Advancing Blade* dan di Depan *Returnning Blade* pada Variasi Kecepatan 4, 5, 6, dan 7 m/s pada Variasi Jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$

Pada sub bab ini, analisis dari performa turbin angin Savonius dilakukan dengan menggunakan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returnning blade*. Silinder pengganggu yang digunakan yaitu $d/D = 0,5$ dengan posisi $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$. Adapun yang akan dianalisis adalah variasi kecepatan angin, *Static Torque Coefficient*, *Tip Speed Ratio*, *Coefficient of Power* dan *Coefficient of Moment* dari turbin angin Savonius. Analisis yang dilakukan, disajikan dalam bentuk grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap

Tip Speed Ratio (λ), *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan *Static Torque Coefficient* (CTS) terhadap posisi angular sudu (θ).

4.4.1 Analisis Nilai *Coefficient of Power* (CoP) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2

Gambar 4.18 - 4.21 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu (CoP) pada konfigurasi 2 sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.

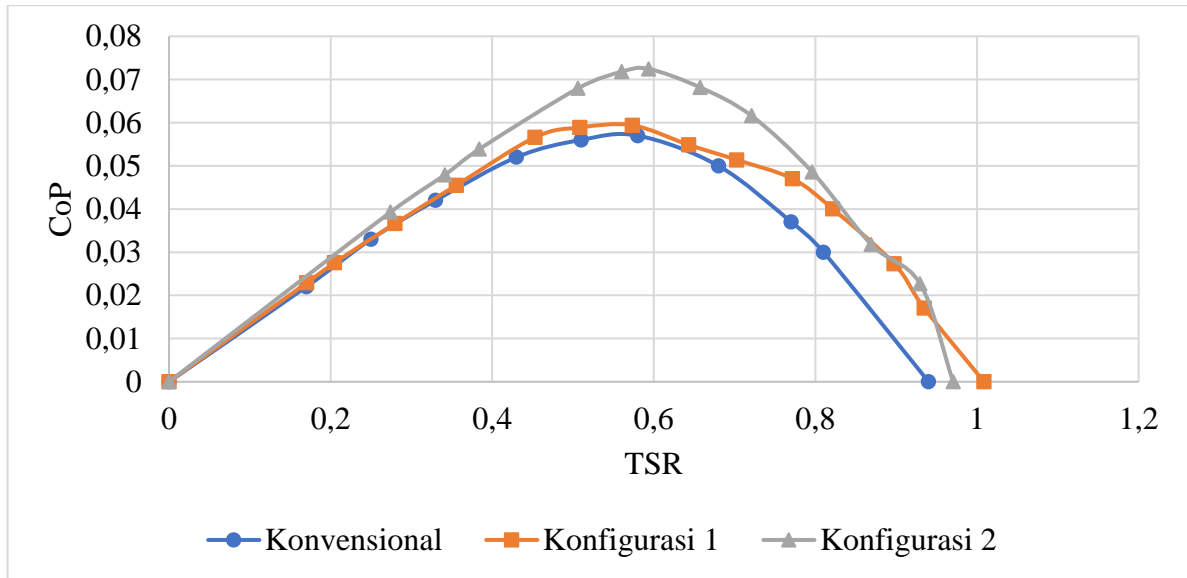


Gambar 4.18 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 4 m/s

Pada gambar 4.18 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.18 pada kecepatan 4 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,044 dengan $\lambda = 0,61$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu di samping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,045 dengan $\lambda = 0,6$ dan nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,50 $\lambda = 0,59$. Penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan performa dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum dari 0,045 menjadi 0,05 atau peningkatan sebesar 11,11% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Selain peningkatan CoP, terjadi peningkatan TSR dari 0,88 menjadi 0,90 atau peningkatan sebesar 2,27% dibandingkan dengan turbin konvensional.

Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Kemudian ditambah dengan

penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun **2020** yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).

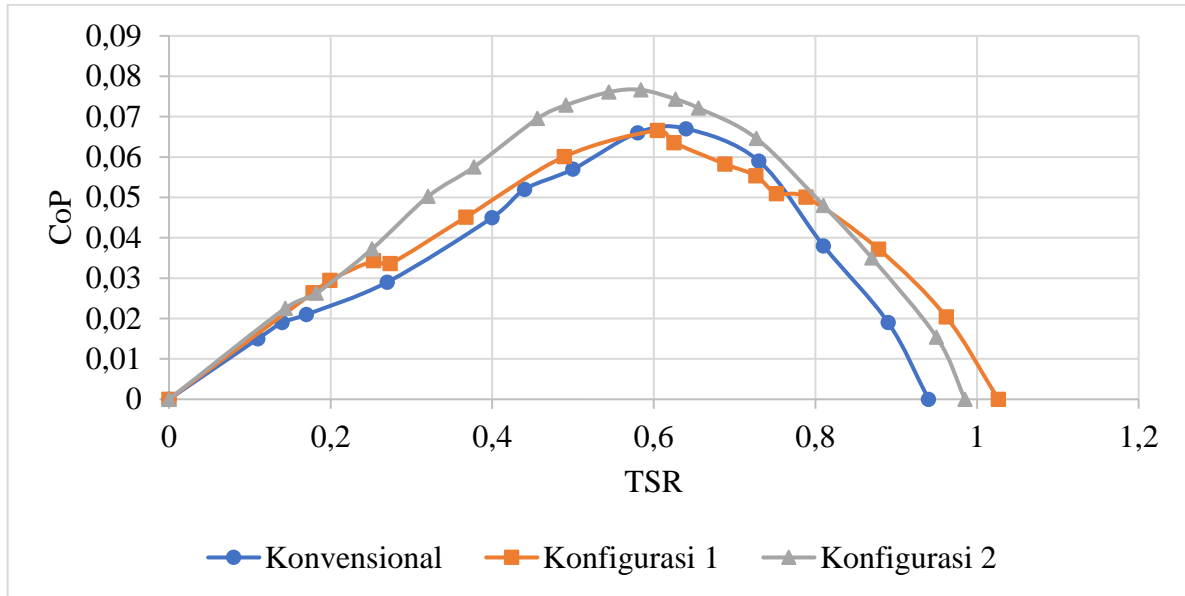


Gambar 4.19 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 5 m/s

Pada gambar 4.19 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.19 pada kecepatan 5 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,057 dengan $\lambda = 0,58$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,059 dengan $\lambda = 0,57$ dan nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,072 dengan $\lambda = 0,59$. Penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan performa dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum dari 0,057 menjadi 0,072 atau peningkatan sebesar 31,57% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Selain peningkatan CoP, terjadi peningkatan TSR dari 0,94 menjadi 0,97 atau peningkatan sebesar 3,19% dibandingkan dengan turbin konvensional.

Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi. Kemudian ditambah dengan penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun **2020** yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi

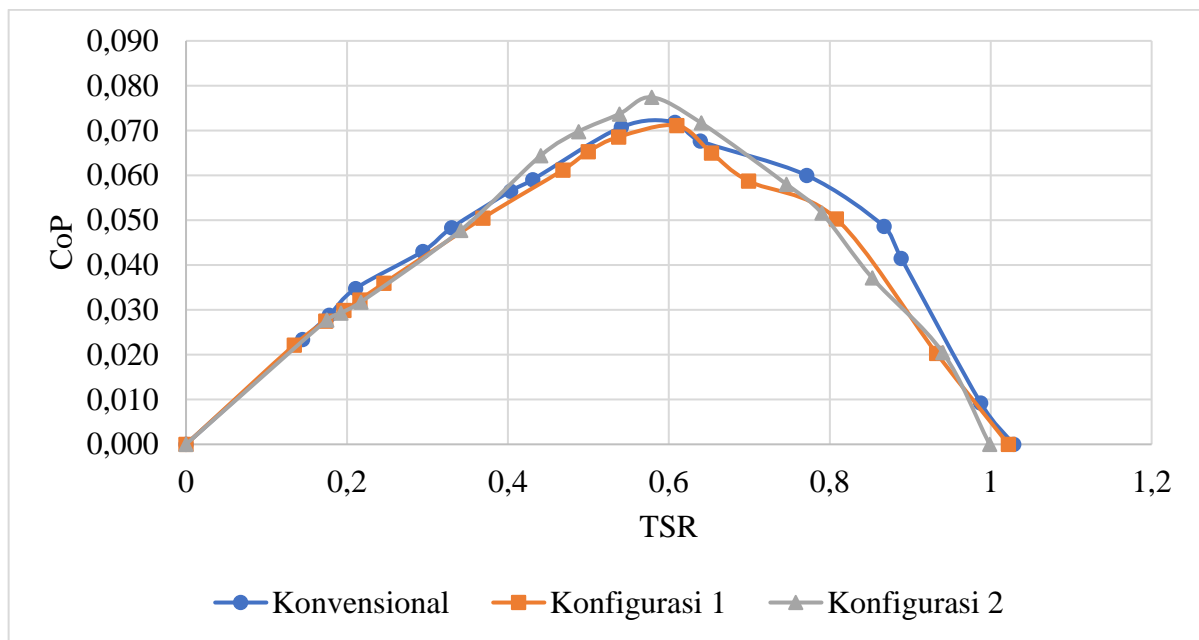
tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



Gambar 4.20 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Pada gambar 4.20 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.20 pada kecepatan 6 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,067 dengan $\lambda = 0,64$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,067 dengan $\lambda = 0,60$ dan nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,077 dengan $\lambda = 0,58$. Penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan performa dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum dari 0,067 menjadi 0,077 atau peningkatan sebesar 14,9% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu. Selain peningkatan CoP, terjadi peningkatan TSR dari 0,94 menjadi 0,99 atau peningkatan sebesar 5,32% dibandingkan dengan turbin konvensional.

Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun 2020 yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



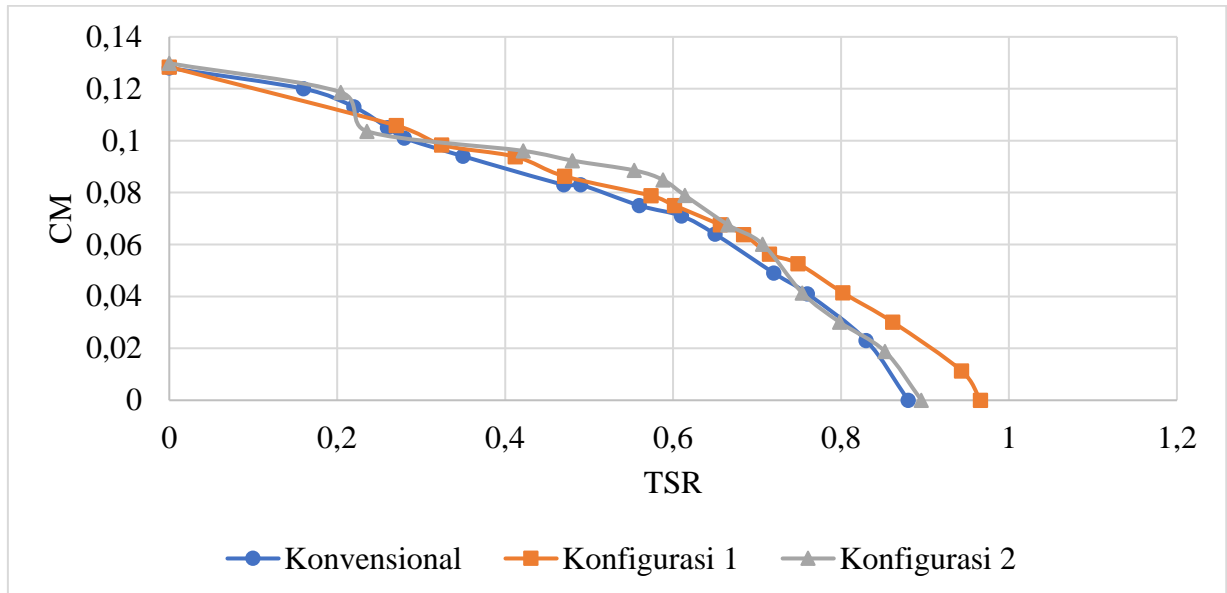
Gambar 4.21 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Pada gambar 4.21 dapat dilihat grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dilihat bahwa *trendline* yang terbentuk adalah parabolik. Dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Tip Speed Ratio* (λ) hingga mencapai *Tip Speed Ratio* optimum pada nilai *Coefficient of Power* maksimum. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) akan menurun setelah melewati titik optimum seiring bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio*. Berdasarkan gambar 4.21 pada kecepatan 7 m/s nilai *Coefficient of Power* tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,072 dengan $\lambda = 0,61$; sedangkan untuk nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,071 dengan $\lambda = 0,61$ dan nilai *Coefficient of Power* dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,077 dengan $\lambda = 0,58$. Penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan performa dengan nilai *Coefficient of Power* maksimum menjadi 0,077 dari 0,072 atau peningkatan sebesar 7,14% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.

Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et al.**, tahun 2020 yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).

4.4.2 Analisis Nilai *Coefficient of Moment* (CM) Terhadap Fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2

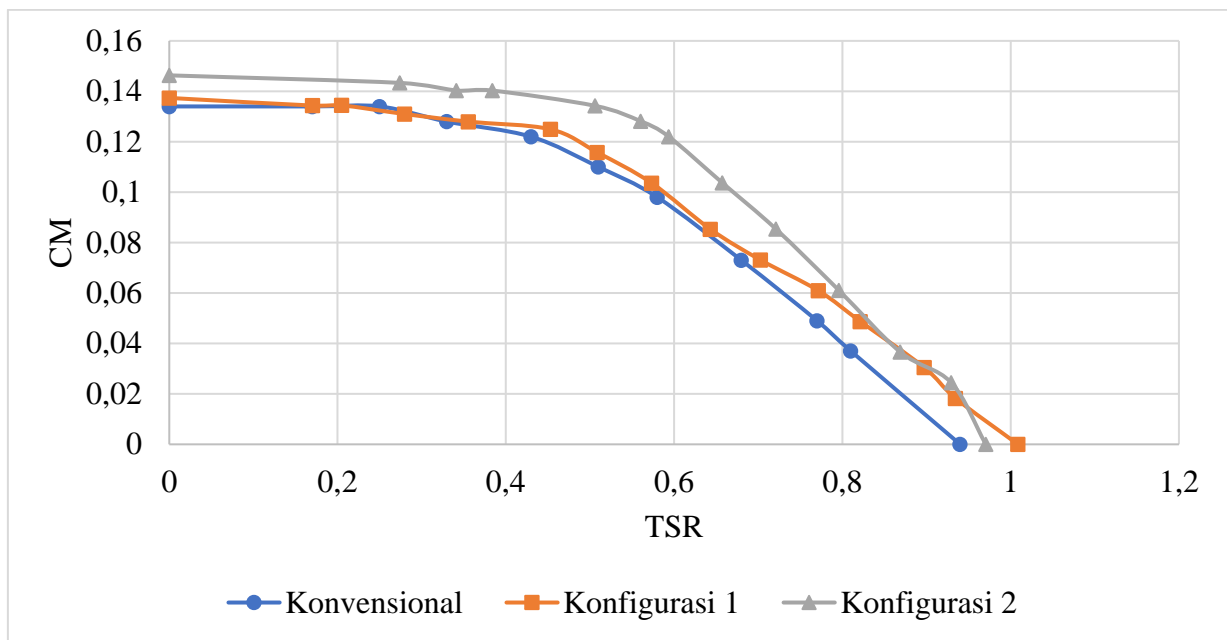
Gambar 4.22 - 4.25 menunjukkan grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada konfigurasi 2 sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.



Gambar 4.22 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.22 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum di setiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.22 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 4 m/s didapatkan Cm maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,128 pada $\lambda = 0$, untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan dengan pengganggu di samping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,128 dengan $\lambda = 0$, dan nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,130 dengan $\lambda = 0$.

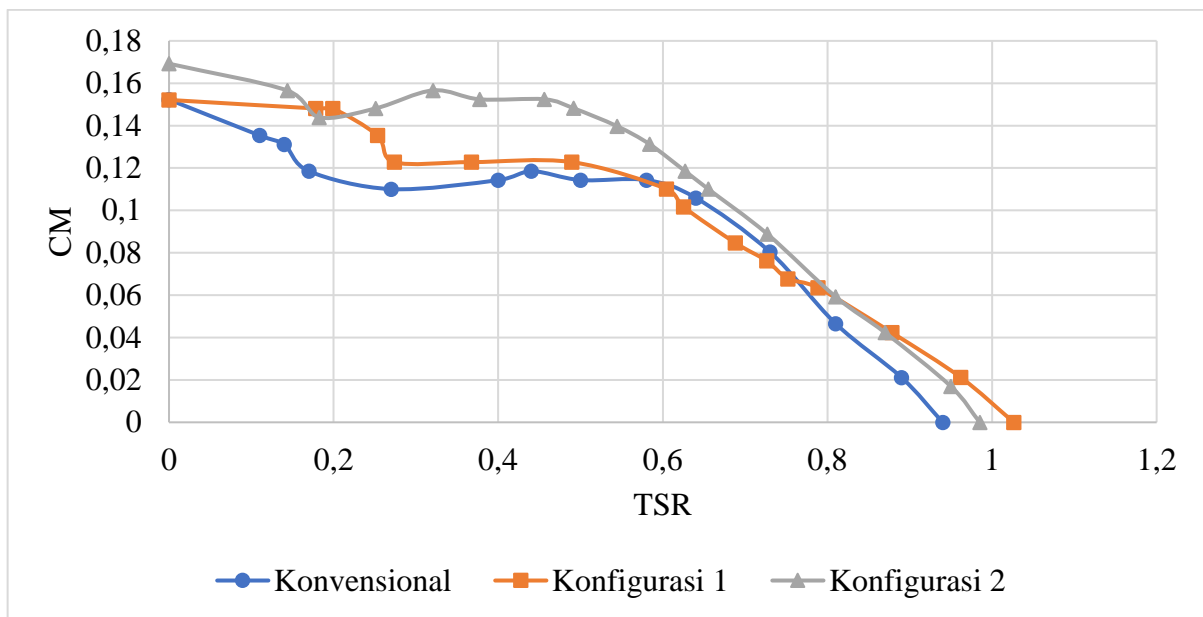
Tidak ada terjadinya peningkatan dikarenakan pemasangan silinder pengganggu pada kecepatan angin 4 m/s kurang efektif dalam membentuk efek *nozzle*. Kemudian penambahan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum dari 0,128 menjadi 0,130 atau peningkatan sebesar 1,56% dari nilai *Coefficient of Moment* (CM) tanpa pengganggu. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun 2020 yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



Gambar 4.23 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.23 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.23 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 5 m/s didapatkan C_m maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,134 pada $\lambda = 0$, untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,137 dengan $\lambda = 0$, dan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,146 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (C_m) maksimum memiliki nilai maksimum yang lebih besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dari 0,134 menjadi 0,137 atau peningkatan sebesar 2,24% dibandingkan dengan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) tanpa pengganggu. Kemudian penambahan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum dari 0,134 menjadi 0,146 atau peningkatan sebesar 8,96% dari nilai *Coefficient of Moment* (C_m) tanpa pengganggu.

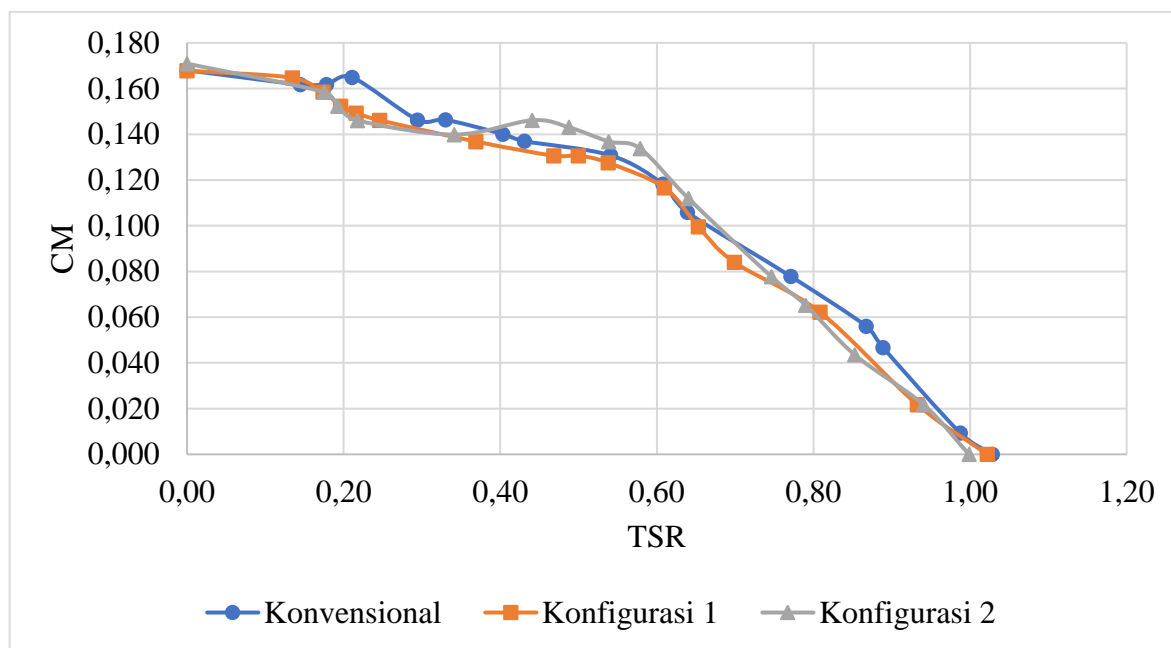
Hal ini sesuai dengan hipotesa bahwa, setelah diberi silinder pengganggu di samping sudu *advancing* turbin, terjadi peningkatan *attached flow* pada sisi belakang *advancing blade* yang menyebabkan tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang dan terjadi kenaikan selisih gaya *drag* kedua sudu mengakibatkan kenaikan nilai torsi pada turbin. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun 2020 yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



Gambar 4.24 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.24 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.24 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 6 m/s didapatkan Cm maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,152 pada $\lambda = 0$, untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,152 dengan $\lambda = 0$, dan nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,169 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang sama besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang sama besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu.

Pada kecepatan 6 m/s penggunaan silinder pengganggu di sampin *advancing blade* tidak meningkatkan performa turbin. Kemudian penambahan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum dari 0,152 menjadi 0,169 atau peningkatan sebesar 11,2% dari nilai *Coefficient of Moment* (CM) tanpa pengganggu. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al., tahun 2020** yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).



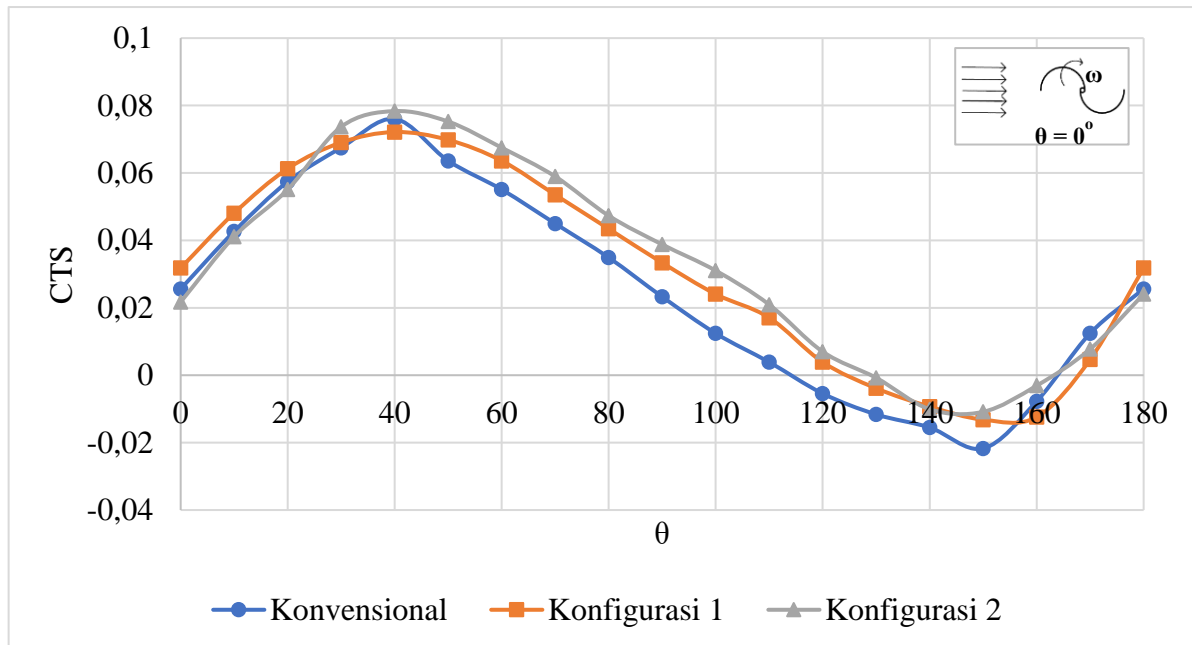
Gambar 4.25 Grafik *Coefficient of Moment* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.25 dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Moment* dengan dan tanpa pengganggu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan nilai *Tip Speed Ratio* (λ). Nilai *Coefficient of Moment* (Cm) maksimum disetiap kecepatan angin didapat saat Torsi dinamis bernilai maksimum yaitu pada saat turbin angin Savonius berhenti. Dari gambar 4.25 dapat dilihat bahwa pada kecepatan 7 m/s didapatkan Cm maksimum tanpa pengganggu maksimum sebesar 0,168 pada $\lambda = 0$, untuk nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan dengan pengganggu disamping *advancing blade* atau konfigurasi 1 sebesar 0,168 dengan $\lambda = 0$, dan nilai *Coefficient of Moment* (CM) dengan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* atau konfigurasi 2 sebesar 0,171 dengan $\lambda = 0$. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang sama besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Nilai *Coefficient of Moment* dengan silinder pengganggu (Cm) maksimum memiliki nilai maksimum yang sama besar dibanding turbin tanpa silinder pengganggu. Tidak ada terjadinya peningkatan dikarenakan pada kecepatan 7 m/s tidak efektif dalam membantu efek *nozzle*. Kemudian penambahan pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* meningkatkan nilai *Coefficient of Moment* (CM) maksimum dari 0,171 menjadi 0,168 atau peningkatan sebesar 1,78% dari nilai *Coefficient of Moment* (CM) tanpa pengganggu.

Pada kecepatan 7 m/s penggunaan silinder pengganggu di sampin *advancing blade* tidak meningkatkan performa turbin. Penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada penelitian **Triyogi et. al.**, tahun 2020 yang mana peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning balde* dan menunda terjadinya separasi sehingga *wake* yang timbul akibat turbin angin menyempit. Dimana hal ini menyebabkan nilai torsi turbin Savonius yang mengalami kenaikan, mengakibatkan nilai daya *output* naik, sedangkan daya *input* yang berasal dari kecepatan aliran udara bernilai tetap. Kenaikan nilai daya *output* dari turbin menghasilkan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP).

4.4.3 Analisis *Static Torque Coefficient* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Konfigurasi 2

Gambar 4.26 - 4.29 menunjukkan grafik *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu pada konfigurasi 2 sebagai fungsi dari kecepatan angin. Penelitian dilakukan pada kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s.

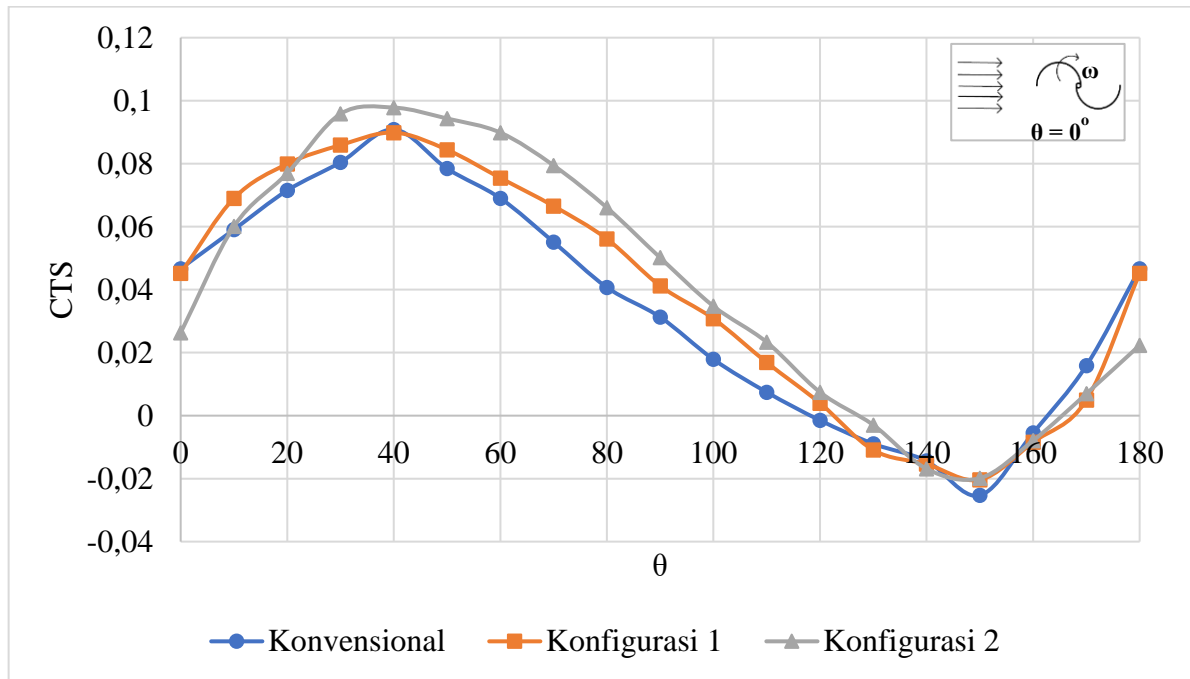


Gambar 4.26 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 4 m/s

Berdasarkan gambar 4.26 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 4 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,07602 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,0217. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,07214 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01319. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,078348 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01086. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu konfigurasi 2 terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu dari 0,07602 menjadi 0,078348 atau peningkatan sebesar 3,06%.

Penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 4 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* memperbaiki kemampuan *self starting* turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat. Kemudian penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* mengurangi tekanan

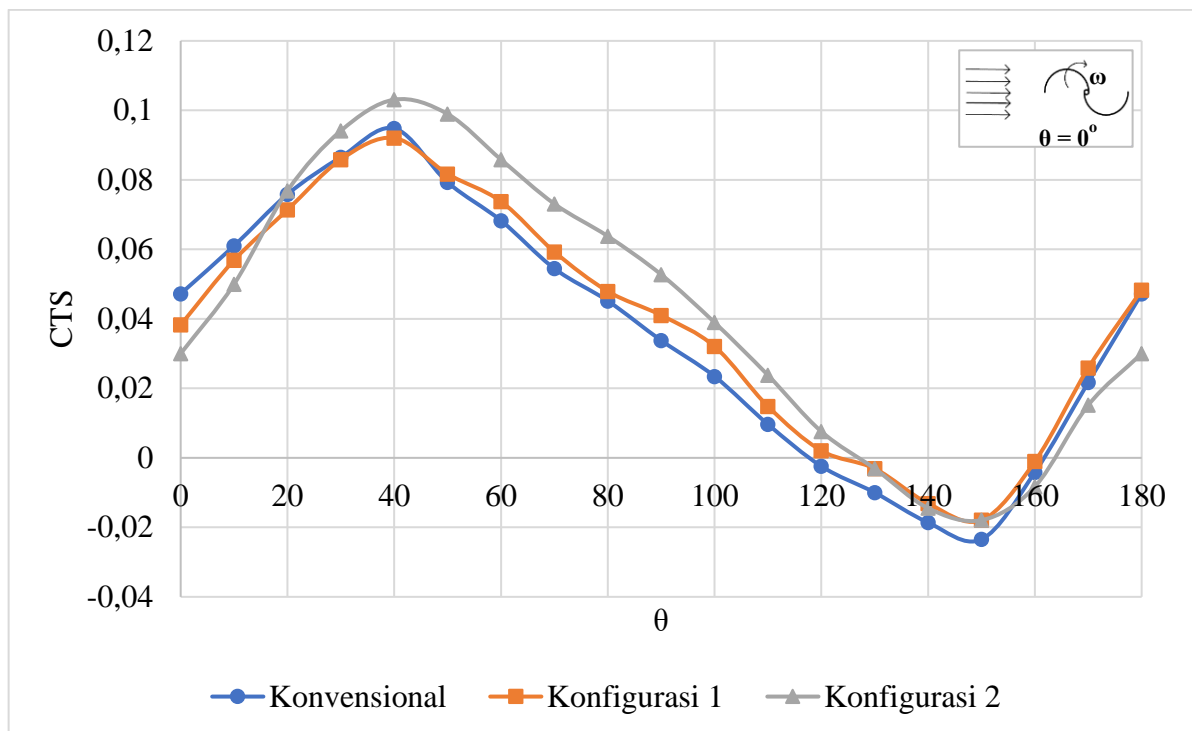
stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan mencegah separasi pada sisi *returning blade* yang memperbaiki *self starting* turbin.



Gambar 4.27 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.27 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 5 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,090853 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,02532. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,08986 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,02035. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,09708 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,02482. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu konfigurasi 2 terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu dari 0,090853 menjadi 0,09708 atau peningkatan sebesar 6,85%.

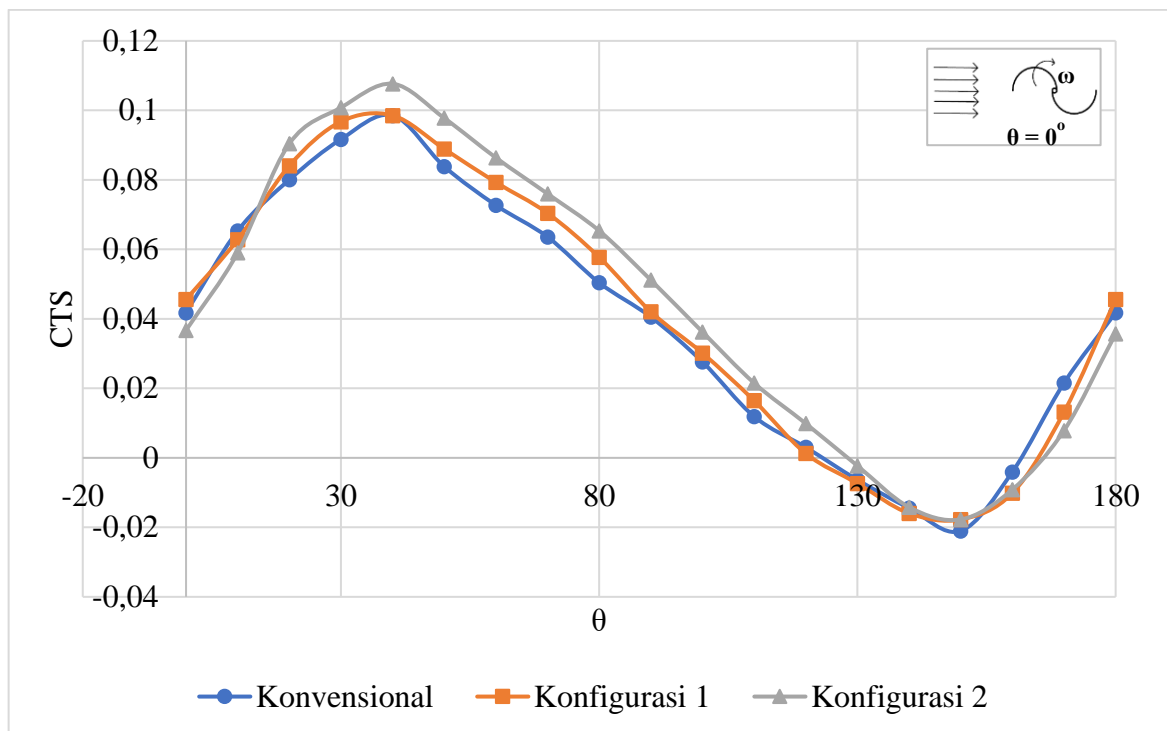
Penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 5 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* memperbaiki kemampuan *self starting* turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat. Kemudian penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan mencegah separasi pada sisi *returning blade* yang memperbaiki *self starting* turbin.



Gambar 4.28 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 6 m/s

Berdasarkan gambar 4.28 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 6 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,09481 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,0234. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,09205 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,0179. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,10308 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01793. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu konfigurasi 2 terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu dari 0,09481 menjadi 0,10308 atau peningkatan sebesar 8,722%.

Penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 6 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* memperbaiki kemampuan *self starting* turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat. Kemudian penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan mencegah separasi pada sisi *returning blade* yang memperbaiki *self starting* turbin.



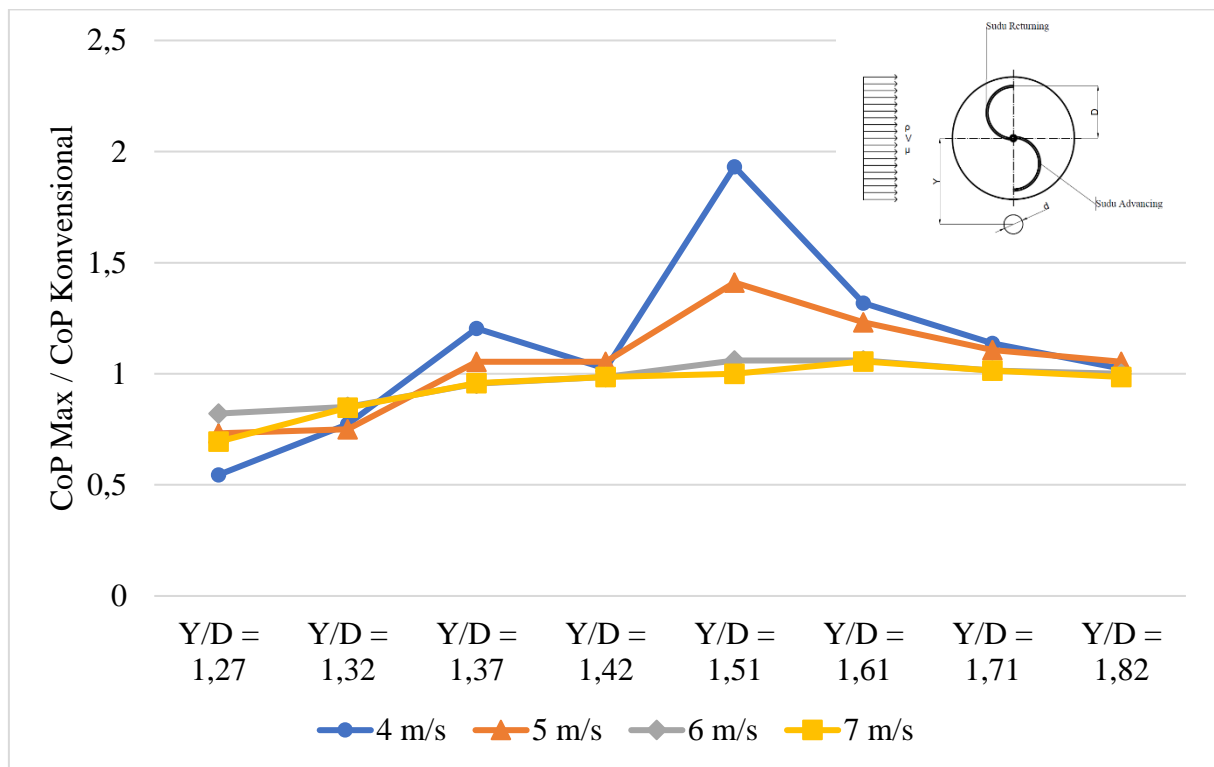
Gambar 4.29 Grafik *Static Torque* turbin angin Savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu terhadap Sudut (θ) pada kecepatan angin 7 m/s

Berdasarkan gambar 4.29 diperoleh bahwa pada kecepatan angin 7 m/s, nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi tanpa silinder pengganggu diperoleh pada posisi angular sudu 40° yaitu sebesar 0,098533 dan minimum terendah diperoleh pada posisi angular sudu 150° yaitu sebesar -0,02102. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* atau konfigurasi 1 pada jarak $S/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,098533 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01773. Nilai *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dengan penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ diperoleh pada posisi angular sudu 40° sebesar 0,107651 dan minimum terendah pada posisi angular sudu 150° sebesar -0,01773. Grafik hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penggunaan silinder pengganggu konfigurasi 2 terjadi peningkatan pada *Static Torque Coefficient* maksimum tertinggi dan torsi minimum terendah dibandingkan tanpa silinder pengganggu dari 0,098533 menjadi 0,107651 atau peningkatan sebesar 9,25%.

Penggunaan silinder pengganggu di samping *returning blade* dan silinder pengganggu di depan *returning blade* pada jarak $S/D = 1,82$ dan $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 7 m/s tidak memberikan kemampuan *self starting* pada turbin, dimana nilai torsi terendah masih berada pada zona negatif. Namun penggunaan silinder pengganggu di samping *advancing blade* memperbaiki kemampuan *self starting* turbin angin Savonius. Hal ini dikarenakan terjadi efek *nozzle* sehingga tekanan pada sisi belakang *advancing blade* berkurang sehingga selisih tekanan depan dan belakang *advancing blade* meningkat sehingga gaya *drag* *advancing* meningkat. Kemudian penempatan silinder pengganggu di depan *returning blade* mengurangi tekanan stagnasi pada sisi depan *returning blade* dan mencegah separasi pada sisi *returning blade* yang memperbaiki *self starting* turbin.

4.5 Analisis Perbandingan Nilai *Coefficient of Power maximum* (CoP) antara Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu Terhadap Variasi Jarak

Pada subbab ini, akan dilakukan analisis terhadap penggunaan silinder pengganggu pada konfigurasi 1 dan konfigurasi 2 dengan ukuran $d/D = 0,5$ pada posisi $Y/D = 1,27; 1,32; 1,37; 1,42; 1,51; 1,61; 1,71; 1,82$ dan pada posisi $S/D = 1,37; 1,42; 1,51; 1,61; 1,71; 1,82$ dengan variasi 4, 5, 6, dan 7 m/s dengan membandingkan nilai *coefficient of power* (CoP) maksimum dibagi dengan nilai *coefficient of power* (CoP) maksimum turbin angin konvensional (CoP Max/CoP Konvensional) pada masing-masing variasi jarak. Dimana hasil pengukuran *coefficient of power* Naufal, 2022 dengan variasi jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ akan dibandingkan dengan penelitian yang dilakukkan Murti, 2022 dengan jarak $YD = 1,27$ dan $S/D = 1,37$, Chandra, 2022 dengan jarak $Y/D = 1,32$ dan $S/D = 1,37$, Shabira, 2022 dengan jarak $Y/D = 1,37$ dan $S/D = 1,37$, Fairuz, 2022 dengan jarak $Y/D = 1,42$ dan $SD = 1,42$, Farhan, 2022 dengan jarak $YD = 1,51$ dan $SD = 1,51$. Alzamora, 2022 dengan jarak $YD = 1,61$ dan $SD = 1,61$, Sutiasa, 2022 dengan jarak $Y/D = 1,71$ dan $SD = 1,71$.

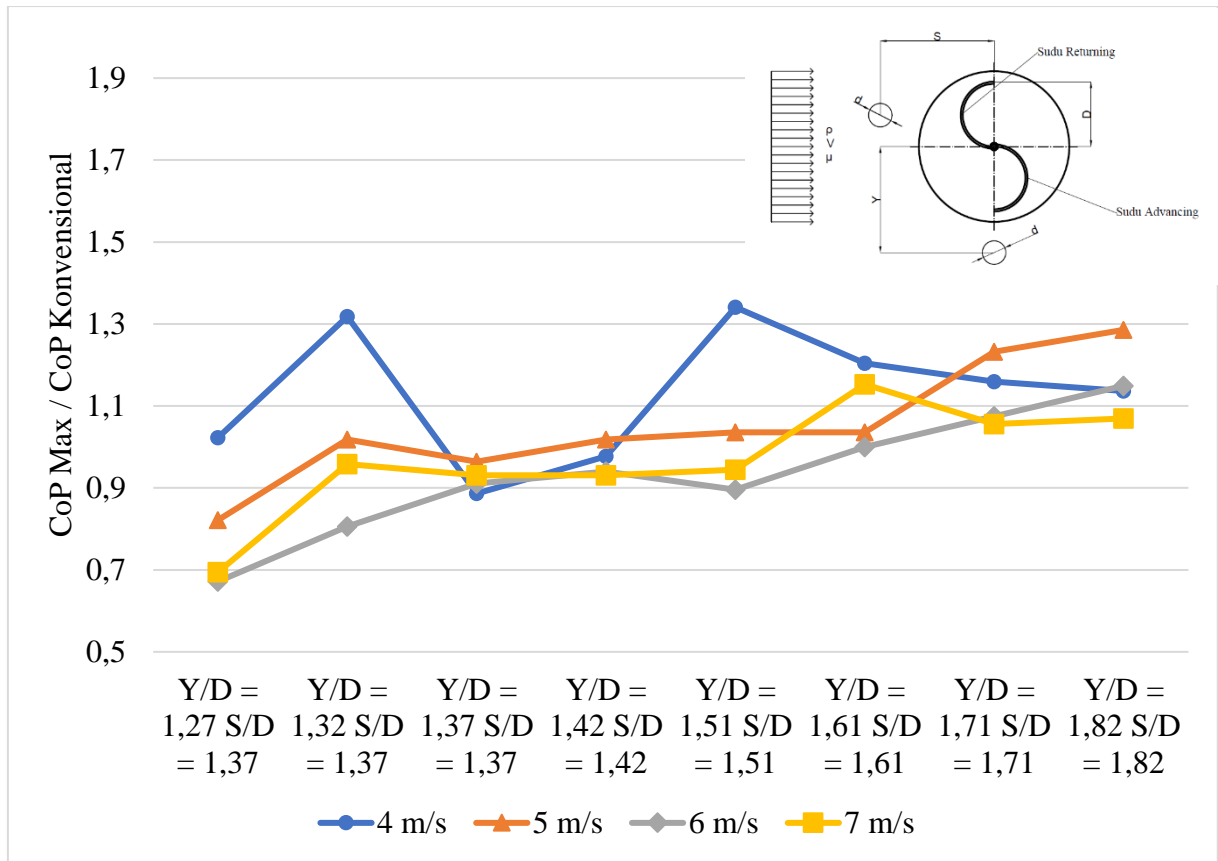


Gambar 4.30 Grafik Perbandingan *Coefficient Of Power* Antara Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu di Samping *Advancing Blade* Terhadap Variasi Jarak dan Kecepatan

Berdasarkan gambar 4.30 dapat dilihat bahwa pemasangan silinder pengganggu di samping *advancing blade* pada kecepatan 4 m/s dan pada jarak $Y/D = 1,27$ dan $Y/D = 1,32$ memiliki nilai *coefficient of power* di bawah turbin angin Savonius konvensional. Kemudian mulai naik pada $Y/D = 1,37$ hingga berada pada jarak optimumnya pada $Y/D = 1,51$. Lalu nilai *coefficient of power* mulai turun pada $Y/D = 1,61; 1,71$, dan $1,82$. Kemudian pada kecepatan 5 m/s tren kurva cenderung sama dengan kecepatan 4 m/s dimana CoP optimum diperoleh pada jarak $Y/D = 1,51$ dimana nilai CoP Max / CoP Konvensional sebesar 1,931 pada kecepatan 4

m/s dan 1,41 pada kecepatan 5 m/s. Kemudian pada kecepatan 6 m/s dan 7 m/s tren kurva terlihat berbeda dibandingkan dengan 4 m/s dan 5 m/s. Dimana pada jarak $Y/D = 1,27$; $1,32$; $1,37$; $1,42$; dan $1,51$ nilai *coefficient of power* berada di bawah turbin angin konvensional dengan nilai $CoP_{Max} / CoP_{Konvensional}$ kurang dari 1 dan berada optimum pada jarak $Y/D = 1,61$ dengan nilai $CoP_{Max} / CoP_{Konvensional}$ 1,055 pada kecepatan 6 m/s dan 7 m/s.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa *nozzle effect* efektif pada jarak tertentu di kecepatan tertentu. Pada kecepatan 4 m/s dan 5 m/s, efek *nozzle* efektif pada jarak $Y/D = 1,51$. Namun, ketika kecepatan semakin tinggi efek *nozzle* efektif pada jarak $Y/D = 1,61$. Hal ini terjadi dikarenakan pada kecepatan tinggi dan jarak yang semakin dekat, maka kecepatan pada *nozzle effect* juga akan meningkat. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Sumner et. al.** tahun 1999 didapatkan hasil bahwa semakin tinggi kecepatan pada celah / *nozzle* tersebut, maka *base pressure* akan meningkat. Dimana dalam penelitian ini, *base pressure* meningkat pada jarak $Y/D = 1,51$ pada kecepatan 6 dan 7 m/s. sehingga kenaikan *coefficient of power* tidak seefektif kecepatan 4 dan 5 m/s. Apabila *base pressure* meningkat, maka gaya *drag* yang terjadi pada *advancing blade* akan berkurang, sehingga performa turbin angin Savonius akan menurun.



Gambar 4.31 Grafik Perbandingan *Coefficient Of Power* Antara Turbin Angin Savonius Dengan dan Tanpa Silinder Pengganggu di Samping *Advancing Blade* dan di Depan *Returning Blade* Terhadap Variasi Jarak dan Kecepatan

Gambar 4.31 menunjukan perbandingan *coefficient of power* antara turbin angin savonius dengan dan tanpa silinder pengganggu di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* terhadap variasi jarak dan kecepatan. Pada kurva dapat dilihat bahwa penambahan silinder pengganggu di depan *returning blade* dan di samping *advancing blade* memberikan pengaruh pada performa turbin angin Savonius. Kombinasi jarak silinder pengganggu di

samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* pada kecepatan 4 m/s paling optimum pada jarak $Y/D = 1,51$ dan $S/D = 1,51$ dengan nilai CoP Max / CoP Konvensional sebesar 1,34; pada kecepatan 5 m/s diperoleh pada jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ dengan nilai CoP Max / CoP Konvensional sebesar 1,28; pada kecepatan 6 m/s diperoleh pada jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ dengan nilai CoP Max / CoP Konvensional sebesar 1,069; dan kecepatan 7 m/s diperoleh pada jarak $Y/D = 1,61$ dan $S/D = 1,61$ dengan nilai CoP Max / CoP Konvensional sebesar 1,152.

Hal ini terjadi dikarenakan pada kombinasi dan kecepatan angin tertentu, aliran yang terpisah akibat melewati silinder pengganggu di depan *returning blade* akan terbelokkan menuju daerah efek *nozzle*. Sehingga aliran yang masuk pada efek *nozzle* akan semakin besar dan meningkatkan kecepatan pada *attached flow*, sehingga *base pressure* pada *advancing blade* meningkat dan menurunkan perfora turbin angin Savonius (Sumner, et al., 1999).

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan dari penelitian mengenai pengaruh penggunaan silinder pengganggu berdiameter $d/D = 0,5$ di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada jarak $S/D = 1,2$ dan di samping *advancing blade* turbin angin Savonius pada jarak $Y/D = 1,82$ dengan variasi kecepatan angin 4, 5, 6, dan 7 m/s terhadap performa turbin didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya adalah:

1. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius pada kecepatan 4 m/s dan 5 m/s. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius.
2. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan di depan *returning blade* dengan jarak $S/D = 1,82$ efektif dalam meningkatkan performa turbin angin Savonius pada seluruh kecepatan. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya nilai *Coefficient of Power*, *Coefficient of Moment*, dan *Static Torque Coefficient* turbin angin Savonius.
3. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* turbin dengan jarak $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* maksimum dari semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 3,5% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
4. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* turbin dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan nilai *Coefficient of Power* maksimum dibanding semua variasi kecepatan angin. Dimana pada kecepatan angin 5 m/s terjadi kenaikan sebesar 31,75% dari nilai *Coefficient of Power* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
5. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dengan jarak $Y/D = 1,82$ pada kecepatan angin 5 m/s paling efektif dalam meningkatkan dari nilai *Coefficient of Moment*. Dimana, terjadi kenaikan sebesar 2,24% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
6. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* turbin dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ pada kecepatan angin 6 m/s paling efektif dalam meningkatkan dari nilai *Coefficient of Moment*. Dimana terjadi kenaikan sebesar 11,2% dari nilai *Coefficient of Moment* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.
7. Penggunaan silinder pengganggu $d/D = 0,5$ di samping *advancing blade* dan di depan *returning blade* turbin dengan jarak $Y/D = 1,82$ dan $S/D = 1,82$ untuk semua variasi kecepatan angin efektif meningkatkan nilai *Static Torque Coefficient* pada semua posisi angular sudu. Namun belum mampu membuat turbin angin Savonius memiliki *self starting* pada semua posisi angular sudu. Hal ini ditandai dengan adanya *Static Torque Coefficient* yang bernilai negatif pada beberapa posisi angular sudu.

5.2 Saran

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

1. Menggunakan neraca pegas pengukuran dengan kemampuan menerima beban yang lebih tinggi
2. Dalam melakukan *setting* alat terutama *voltage regulator* yang harus dilakukan dengan lebih teliti dan hati-hati.
3. Pengukuran torsi dinamis dengan *brake dynamometer* sebaiknya lebih diperhatikan karena seringnya terjadi *slip* pada benang dan poros turbin.
4. Perlunya dilakukan pelumasan terhadap *bearing* poros turbin pada setiap akan dilakukan pengukuran untuk mendapatkan putaran tanpa adanya gesekan.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M. & Özdamar, A., 2008. An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental thermal and fluid science*.
- Casini, M., 2016. Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings. *Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 1*.
- Hyams, M. A., 2012. Wind Energy in the Built Environment. *Metropolitan Sustainability*.
- Mahmoud, N., El-Haroun, A., Wahba, E. & Nasef, M., 2012. An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Mechanical Power Eng. Dept., Faculty of Engineering, Shebin El-Kom, Menufiya University, Egypt*.
- Prasetyo, A., Notosudjono, D. & Soebagja, H., 2019. Studi Potensi Penerapan dan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin di Indonesia. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik Elektro*.
- Pritchard, P. J. & Leylegian, J. C., 2011. *Introduction to Fluid Mechanics*. Eighth Edition ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Putro, A. H., 2017. Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran di Depan Sisi Returning blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius. *Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Ragheb, M., 2014. Optimal Rotor Speed Ratio. *Lecture notes of Course no. NPRE, 475.*, p. 10.
- Setiawan, P. A., Yuwono, T. & Widodo, W. A., 2018. Numerical Study of the Stagger Angle Effect of a Circular Cylinder Installed in Front of Returning Blade Toward the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance. *Institut Tekonologi Sepuluh Nopember*.
- Setiawan, P. A., Yuwono, T. & Widodo, W. A., 2020. A numerical study of Savonius water turbine performance disturbed by circular cylinder in front of turbine.
- Setiawan, P. A. et al., 2019. Numerical Study of a Circular Cylinder Effect on the Vertical Axis Savonius Water Turbine Performance at the Side of the Advancing Blade with Horizontal Distance Variations.
- Sumner, D., Wong, S. T., Price, . S. J. & Paigdoussis, . M. P., 1999. Fluid Behaviour of Side-By-Side Circular Cylinders in Steady Cross-Flow. *Journal of Fluids And Structures, P. 30*.
- Yuwono, T. Y. & Bagas R.A., Suksmatatya P., Festy M.M., Elza L., V, 2020. Enhancing Savonius Turbine Self-starting Capability by Installing a Circular Cylinder in Front of Returning Turbine Blade. *The International Journal of Mechanical Engineering and Sciences*.

LAMPIRAN

Tabel 1 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 4,5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoretical (Watt)	T Teoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	4,5	247	25,8689211	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,88	4,81928594	0,16353444	0	0	0	0	0
27,5	300,5	4,5	233,5	24,455728	10,01	0,01001	40	0,04	0,09009	1,17404326	0,83	4,81928594	0,16353444	0,00369582	0,019	1,87546272	0,023	2,25996294
27,5	300,5	4,5	213,6	22,3660453	20,06	0,02006	75	0,075	0,09009	1,17404326	0,76	4,81928594	0,16353444	0,00677053	0,031	3,14216676	0,041	4,14012551
27,5	300,5	4,5	203,2	21,2764363	25,09	0,02509	90	0,09	0,09009	1,17404326	0,72	4,81928594	0,16353444	0,00799918	0,035	3,53152163	0,049	4,89143696
27,5	300,5	4,5	182,5	19,1087373	30,12	0,03012	115	0,115	0,09009	1,17404326	0,65	4,81928594	0,16353444	0,01046019	0,041	4,14752236	0,064	6,39632059
27,5	300,5	4,5	172,5	18,0683466	35,16	0,03516	130	0,13	0,09009	1,17404326	0,61	4,81928594	0,16353444	0,01168761	0,044	4,3818886	0,071	7,14687847
27,5	300,5	4,5	157,4	16,4849839	40,19	0,04019	140	0,14	0,09009	1,17404326	0,56	4,81928594	0,16353444	0,01230009	0,042	4,20740149	0,075	7,52140384
27,5	300,5	4,5	136,8	14,3204265	45,24	0,04524	155	0,155	0,09009	1,17404326	0,49	4,81928594	0,16353444	0,01352627	0,04	4,01930928	0,083	8,27120815
27,5	300,5	4,5	132,8	13,9062599	50,27	0,05027	160	0,16	0,09009	1,17404326	0,47	4,81928594	0,16353444	0,01352258	0,039	3,90199848	0,083	8,26894743
27,5	300,5	4,5	97,8	10,2389741	55,31	0,05531	180	0,18	0,09009	1,17404326	0,35	4,81928594	0,16353444	0,01536617	0,033	3,26467116	0,094	9,3962914
27,5	300,5	4,5	79,6	8,33621611	65,39	0,06539	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,28	4,81928594	0,16353444	0,01658866	0,029	2,86944341	0,101	10,143835
27,5	300,5	4,5	74,5	7,80162176	70,46	0,07046	210	0,21	0,09009	1,17404326	0,26	4,81928594	0,16353444	0,01719621	0,028	2,78378047	0,105	10,5153461
27,5	300,5	4,5	61	6,38685787	80,55	0,08055	230	0,23	0,09009	1,17404326	0,22	4,81928594	0,16353444	0,01841747	0,024	2,44081321	0,113	11,2621361
27,5	300,5	4,5	46	4,81920313	90,58	0,09058	250	0,25	0,09009	1,17404326	0,16	4,81928594	0,16353444	0,01964612	0,02	1,96457861	0,12	12,0134476
27,5	300,5	4,5	0	0	100,66	0,10066	270	0,27	0,09009	1,17404326	0	4,81928594	0,16353444	0,02086861	0	0	0,128	12,7609911

Tabel 2 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoretical (Watt)	T Teoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	5	294,9	30,8651533	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,94	6,61081747	0,20189437	0	0	0	0	0
27,5	300,5	5	254,8	26,6737767	10,03	0,01003	70	0,07	0,09009	1,17404326	0,81	6,61081747	0,20189437	0,0073904	0,03	2,98193013	0,037	3,66052957
27,5	300,5	5	239,6	25,0817967	20,03	0,02003	100	0,1	0,09009	1,17404326	0,77	6,61081747	0,20189437	0,0098551	0,037	3,73907901	0,049	4,88131649
27,5	300,5	5	213,1	22,30185	30,02	0,03002	150	0,15	0,09009	1,17404326	0,68	6,61081747	0,20189437	0,01478574	0,05	4,98802534	0,073	7,32350071
27,5	300,5	5	181,6	19,0038033	40,08	0,04008	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,58	6,61081747	0,20189437	0,01970774	0,057	5,66529086	0,098	9,76141219
27,5	300,5	5	159,9	16,7362	50,16	0,05016	230	0,23	0,09009	1,17404326	0,51	6,61081747	0,20189437	0,02216258	0,056	5,61076468	0,11	10,977316
27,5	300,5	5	134,4	14,0673047	60,13	0,06013	260	0,26	0,09009	1,17404326	0,43	6,61081747	0,20189437	0,02463098	0,052	5,24128058	0,122	12,1999341
27,5	300,5	5	103,6	10,83928	70,15	0,07015	280	0,28	0,09009	1,17404326	0,33	6,61081747	0,20189437	0,02586086	0,042	4,24021924	0,128	12,8091067
27,5	300,5	5	77,5	8,10643333	80,16	0,08016	300	0,3	0,09009	1,17404326	0,25	6,61081747	0,20189437	0,02709198	0,033	3,32212091	0,134	13,4188898
27,5	300,5	5	51,8	5,4165	90,25	0,09025	310	0,31	0,09009	1,17404326	0,17	6,61081747	0,20189437	0,02708089	0,022	2,2188428	0,134	13,4133963
27,5	300,5	5	0	0	100,27	0,10027	320	0,32	0,09009	1,17404326	0	6,61081747	0,20189437	0,02707843	0	0	0,134	13,4121755

Tabel 3 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 6 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m2)	ρ (kg/m3)	λ	P Teoretical (Watt)	T Teoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	6	352,6	36,9038967	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,94	11,4234926	0,29072789	0	0	0	0	0
27,5	300,5	6	332,5	34,7964333	20,1	0,0201	70	0,07	0,09009	1,17404326	0,89	11,4234926	0,29072789	0,00614943	0,019	1,87314088	0,02115183	2,11518289
27,5	300,5	6	305,3	31,9500233	40,15	0,04015	150	0,15	0,09009	1,17404326	0,81	11,4234926	0,29072789	0,01353736	0,038	3,78622489	0,0465637	4,65636954
27,5	300,5	6	275,7	28,8555533	60,21	0,06021	250	0,25	0,09009	1,17404326	0,73	11,4234926	0,29072789	0,02338877	0,059	5,90796478	0,08044901	8,044901
27,5	300,5	6	238,7	24,9870733	70,21	0,07021	320	0,32	0,09009	1,17404326	0,64	11,4234926	0,29072789	0,03078287	0,067	6,73326341	0,10588207	10,5882071
27,5	300,5	6	216,1	22,61585	80,29	0,08029	350	0,35	0,09009	1,17404326	0,58	11,4234926	0,29072789	0,03323771	0,066	6,58029145	0,11432585	11,4325847
27,5	300,5	6	188,5	19,72705	90,29	0,09029	360	0,36	0,09009	1,17404326	0,5	11,4234926	0,29072789	0,03323771	0,057	5,73976828	0,11432585	11,4325847
27,5	300,5	6	164,8	17,2459267	110,33	0,11033	390	0,39	0,09009	1,17404326	0,44	11,4234926	0,29072789	0,03446513	0,052	5,20316481	0,11854774	11,8547735
27,5	300,5	6	148,9	15,5796333	130,35	0,13035	400	0,4	0,09009	1,17404326	0,4	11,4234926	0,29072789	0,03323032	0,045	4,53203048	0,11430041	11,4300414
27,5	300,5	6	100,2	10,48289	150,39	0,15039	410	0,41	0,09009	1,17404326	0,27	11,4234926	0,29072789	0,03199304	0,029	2,93587534	0,11004462	11,0044615
27,5	300,5	6	65,3	6,83054667	170,45	0,17045	450	0,45	0,09009	1,17404326	0,17	11,4234926	0,29072789	0,03445034	0,021	2,05991891	0,11849687	11,8496869
27,5	300,5	6	53,6	5,61222667	190,52	0,19052	500	0,5	0,09009	1,17404326	0,14	11,4234926	0,29072789	0,03813877	0,019	1,87371251	0,13118373	13,1183727
27,5	300,5	6	42,7	4,47397667	210,58	0,21058	530	0,53	0,09009	1,17404326	0,11	11,4234926	0,29072789	0,03936372	0,015	1,54166845	0,13539714	13,5397138
27,5	300,5	6	0	0	220,66	0,22066	580	0,58	0,09009	1,17404326	0	11,4234926	0,29072789	0,04428326	0	0	0,1523186	15,2318601

Tabel 4 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konvensinal Pada Kecepatan 7 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n0 (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m2)	ρ (kg/m3)	λ	P Teoretical (Watt)	T Teoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	7	450,5	47,1481467	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	1,03	18,1400831	0,39571296	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	7	432,5	45,27252	20,02	0,02002	50	0,05	0,09009	1,17404326	0,99	18,1400831	0,39571296	0,00369459	0,009	0,92206406	0,009	0,93365285
27,5	300,5	7	389,3	40,7435933	50	0,05	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,89	18,1400831	0,39571296	0,01848525	0,042	4,15188565	0,047	4,67137851
27,5	300,5	7	379,9	39,7592033	70,02	0,07002	250	0,25	0,09009	1,17404326	0,87	18,1400831	0,39571296	0,02217984	0,049	4,86134807	0,056	5,60503136
27,5	300,5	7	337,8	35,3543067	80,14	0,08014	330	0,33	0,09009	1,17404326	0,77	18,1400831	0,39571296	0,0307915	0,060	6,00114136	0,078	7,78127089
27,5	300,5	7	279,9	29,2972467	120,01	0,12001	460	0,46	0,09009	1,17404326	0,64	18,1400831	0,39571296	0,04189867	0,068	6,76686866	0,106	10,5881465
27,5	300,5	7	266,1	27,8481367	130,14	0,13014	510	0,51	0,09009	1,17404326	0,61	18,1400831	0,39571296	0,04681205	0,072	7,18645155	0,118	11,8297989
27,5	300,5	7	236,9	24,79501	140,01	0,14001	560	0,56	0,09009	1,17404326	0,54	18,1400831	0,39571296	0,05175747	0,071	7,07453719	0,131	13,0795484
27,5	300,5	7	188,8	19,7563567	150,02	0,15002	590	0,59	0,09009	1,17404326	0,43	18,1400831	0,39571296	0,05422094	0,059	5,90519971	0,137	13,7020874
27,5	300,5	7	176,6	18,4846567	160,09	0,16009	610	0,61	0,09009	1,17404326	0,40	18,1400831	0,39571296	0,05544466	0,056	5,64978383	0,140	14,0113327
27,5	300,5	7	144,6	15,1348	180,14	0,18014	650	0,65	0,09009	1,17404326	0,33	18,1400831	0,39571296	0,0579032	0,048	4,83103248	0,146	14,632626
27,5	300,5	7	128,9	13,4920567	200,18	0,20018	670	0,67	0,09009	1,17404326	0,29	18,1400831	0,39571296	0,05789827	0,043	4,3063017	0,146	14,6313803
27,5	300,5	7	92,2	9,65497667	240,3	0,2403	770	0,77	0,09009	1,17404326	0,21	18,1400831	0,39571296	0,06527758	0,035	3,47436945	0,165	16,4961946
27,5	300,5	7	77,9	8,15562667	260,36	0,26036	780	0,78	0,09009	1,17404326	0,18	18,1400831	0,39571296	0,06403784	0,029	2,87908646	0,162	16,1829009
27,5	300,5	7	63,4	6,63482	300,5	0,3005	820	0,82	0,09009	1,17404326	0,14	18,1400831	0,39571296	0,06402058	0,023	2,34158266	0,162	16,1785409
27,5	300,5	7	0	0	320,57	0,32057	860	0,86	0,09009	1,17404326	0,00	18,1400831	0,39571296	0,06647666	0,000	0	0,168	16,7992114

Tabel 5 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 4,5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	4,5	271,9	28,4691126	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,97	4,81928594	0,16353444	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	4,5	265,5	27,8062366	5,03	0,00503	20	0,02	0,09009	1,17404326	0,94	4,81928594	0,16353444	0,00184483	0,011	1,06442579	0,011	1,12809754
27,5	300,5	4,5	242,5	25,3955878	10,08	0,01008	50	0,05	0,09009	1,17404326	0,86	4,81928594	0,16353444	0,00491954	0,026	2,59238904	0,030	3,00826011
27,5	300,5	4,5	225,8	23,6467679	25,1	0,0251	80	0,08	0,09009	1,17404326	0,80	4,81928594	0,16353444	0,0067656	0,033	3,31967454	0,041	4,13711122
27,5	300,5	4,5	210,7	22,0670704	30,17	0,03017	100	0,1	0,09009	1,17404326	0,75	4,81928594	0,16353444	0,0086055	0,039	3,94037992	0,053	5,26219447
27,5	300,5	4,5	201,1	21,0638551	35,25	0,03525	110	0,11	0,09009	1,17404326	0,71	4,81928594	0,16353444	0,00921182	0,040	4,02624716	0,056	5,63295198
27,5	300,5	4,5	192,5	20,1611709	40,28	0,04028	125	0,125	0,09009	1,17404326	0,68	4,81928594	0,16353444	0,01044047	0,044	4,36770273	0,064	6,38426343
27,5	300,5	4,5	184,7	19,3422624	45,32	0,04532	135	0,135	0,09009	1,17404326	0,66	4,81928594	0,16353444	0,01105171	0,044	4,4356191	0,068	6,75803523
27,5	300,5	4,5	169,3	17,7311489	50,4	0,0504	150	0,15	0,09009	1,17404326	0,60	4,81928594	0,16353444	0,01227421	0,045	4,51593405	0,075	7,50557882
27,5	300,5	4,5	161,5	16,915382	55,45	0,05545	160	0,16	0,09009	1,17404326	0,57	4,81928594	0,16353444	0,01288422	0,045	4,52227765	0,079	7,87859705
27,5	300,5	4,5	132,5	13,8743204	65,51	0,06551	180	0,18	0,09009	1,17404326	0,47	4,81928594	0,16353444	0,01410918	0,041	4,06191329	0,086	8,62764778
27,5	300,5	4,5	116	12,1438264	75,5	0,0755	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,41	4,81928594	0,16353444	0,01534276	0,039	3,86612843	0,094	9,38197353
27,5	300,5	4,5	91,3	9,55829565	79,5	0,0795	210	0,21	0,09009	1,17404326	0,32	4,81928594	0,16353444	0,01608217	0,032	3,18964497	0,098	9,83411683
27,5	300,5	4,5	76,1	7,96969696	89,56	0,08956	230	0,23	0,09009	1,17404326	0,27	4,81928594	0,16353444	0,01730712	0,029	2,86209473	0,106	10,5831676
27,5	300,5	4,5	0	0	99,62	0,09962	271	0,271	0,09009	1,17404326	0,00	4,81928594	0,16353444	0,02112001	0,000	0	0,129	12,9147199

Tabel 6 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	5	315,4	33,024422	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	1,01	6,61081747	0,20189437	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	5	292,2	30,6006832	10,09	0,01009	40	0,04	0,09009	1,17404326	0,93	6,61081747	0,20189437	0,00368596	0,017	1,70618626	0,018	1,82568683
27,5	300,5	5	280,6	29,3822689	20,09	0,02009	70	0,07	0,09009	1,17404326	0,90	6,61081747	0,20189437	0,00615066	0,027	2,73370598	0,030	3,04647375
27,5	300,5	5	256,8	26,8941275	30,15	0,03015	110	0,11	0,09009	1,17404326	0,82	6,61081747	0,20189437	0,00984031	0,040	4,00323683	0,049	4,87399177
27,5	300,5	5	241,3	25,2662589	40,21	0,04021	140	0,14	0,09009	1,17404326	0,77	6,61081747	0,20189437	0,01229762	0,047	4,70009751	0,061	6,09111632
27,5	300,5	5	219,7	23,0048358	50,19	0,05019	170	0,17	0,09009	1,17404326	0,70	6,61081747	0,20189437	0,01476479	0,051	5,13796462	0,073	7,31312402
27,5	300,5	5	201,1	21,0607136	60,25	0,06025	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,64	6,61081747	0,20189437	0,01722209	0,055	5,48660634	0,085	8,53024858
27,5	300,5	5	179,3	18,7778229	70,31	0,07031	240	0,24	0,09009	1,17404326	0,57	6,61081747	0,20189437	0,02091175	0,059	5,93991721	0,104	10,3577666
27,5	300,5	5	159	16,6525355	80,29	0,08029	270	0,27	0,09009	1,17404326	0,51	6,61081747	0,20189437	0,02337891	0,059	5,88910767	0,116	11,5797743
27,5	300,5	5	141,7	14,8340769	90,31	0,09031	295	0,295	0,09009	1,17404326	0,45	6,61081747	0,20189437	0,02522497	0,057	5,66025576	0,125	12,4941437
27,5	300,5	5	111,2	11,6401244	100,34	0,10034	310	0,31	0,09009	1,17404326	0,36	6,61081747	0,20189437	0,02583745	0,045	4,54937887	0,128	12,7975092
27,5	300,5	5	87,4	9,15564819	105,38	0,10538	320	0,32	0,09009	1,17404326	0,28	6,61081747	0,20189437	0,0264487	0,037	3,66301072	0,131	13,1002644
27,5	300,5	5	64	6,70625312	119,75	0,11975	340	0,34	0,09009	1,17404326	0,20	6,61081747	0,20189437	0,02714251	0,028	2,75343458	0,134	13,4439159
27,5	300,5	5	53,3	5,58365734	129,91	0,12991	350	0,35	0,09009	1,17404326	0,17	6,61081747	0,20189437	0,02712279	0,023	2,29085696	0,134	13,4341496
27,5	300,5	5	0	0	134,94	0,13494	360	0,36	0,09009	1,17404326	0,00	6,61081747	0,20189437	0,02773527	0,000	0	0,137	13,7375152

Tabel 7 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 6 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Theoretical (Watt)	T Theoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	6	385,1	40,3307193	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	1,03	11,4234926	0,29072789	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	6	360,9	37,7970248	20,03	0,02003	70	0,07	0,09009	1,17404326	0,96	11,4234926	0,29072789	0,00615805	0,020	2,03752117	0,021	2,11815008
27,5	300,5	6	329,5	34,5072537	40,13	0,04013	140	0,14	0,09009	1,17404326	0,88	11,4234926	0,29072789	0,01230748	0,037	3,71775368	0,042	4,23333296
27,5	300,5	6	295,8	30,9766272	60,21	0,06021	210	0,21	0,09009	1,17404326	0,79	11,4234926	0,29072789	0,01845937	0,050	5,00555358	0,063	6,34936362
27,5	300,5	6	282,1	29,5435373	70,21	0,07021	230	0,23	0,09009	1,17404326	0,75	11,4234926	0,29072789	0,01969172	0,051	5,09269017	0,068	6,77324797
27,5	300,5	6	272,5	28,5350861	80,21	0,08021	260	0,26	0,09009	1,17404326	0,73	11,4234926	0,29072789	0,02215642	0,055	5,53451902	0,076	7,62101666
27,5	300,5	6	258,2	27,0339284	90,18	0,09018	290	0,29	0,09009	1,17404326	0,69	11,4234926	0,29072789	0,02462482	0,058	5,82751337	0,085	8,470057
27,5	300,5	6	234,5	24,5594006	100,19	0,10019	340	0,34	0,09009	1,17404326	0,63	11,4234926	0,29072789	0,02955299	0,064	6,35360508	0,102	10,1651705
27,5	300,5	6	226,8	23,7493933	110,22	0,11022	370	0,37	0,09009	1,17404326	0,60	11,4234926	0,29072789	0,03201399	0,067	6,65569476	0,110	11,0116675
27,5	300,5	6	183,6	19,2270706	130,27	0,13027	420	0,42	0,09009	1,17404326	0,49	11,4234926	0,29072789	0,03570488	0,060	6,00954724	0,123	12,2812012
27,5	300,5	6	137,9	14,4366654	140,32	0,14032	430	0,43	0,09009	1,17404326	0,37	11,4234926	0,29072789	0,03569871	0,045	4,51149592	0,123	12,2790817
27,5	300,5	6	102,7	10,7562897	150,34	0,15034	440	0,44	0,09009	1,17404326	0,27	11,4234926	0,29072789	0,03569625	0,034	3,36113673	0,123	12,278234
27,5	300,5	6	95,1	9,95413632	190,54	0,19054	510	0,51	0,09009	1,17404326	0,25	11,4234926	0,29072789	0,03936865	0,034	3,43048273	0,135	13,5414093
27,5	300,5	6	74,7	7,81994771	210,58	0,21058	560	0,56	0,09009	1,17404326	0,20	11,4234926	0,29072789	0,04306077	0,029	2,9477237	0,148	14,8113668
27,5	300,5	6	66,9	7,00470442	230,59	0,23059	580	0,58	0,09009	1,17404326	0,18	11,4234926	0,29072789	0,04305954	0,026	2,64034276	0,148	14,8109429
27,5	300,5	6	0	0	241,09	0,24109	600	0,6	0,09009	1,17404326	0,00	11,4234926	0,29072789	0,04423027	0,000	0	0,152	15,2136331

Tabel 8 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 1 Pada Kecepatan 7 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Theoretical (Watt)	T Theoretical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	7	447,4	46,8474297	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	1,02	18,1400831	0,39571296	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	7	408,2	42,7513164	20,09	0,02009	90	0,09	0,09009	1,17404326	0,93	18,1400831	0,39571296	0,00861536	0,020	2,03040929	0,022	2,17717381
27,5	300,5	7	353,8	37,0467078	50,16	0,05016	250	0,25	0,09009	1,17404326	0,81	18,1400831	0,39571296	0,02462728	0,050	5,02952344	0,062	6,22352187
27,5	300,5	7	306	32,0463395	70,26	0,07026	340	0,34	0,09009	1,17404326	0,70	18,1400831	0,39571296	0,03324141	0,059	5,87243987	0,084	8,40038426
27,5	300,5	7	285,9	29,9357128	80,32	0,08032	400	0,4	0,09009	1,17404326	0,65	18,1400831	0,39571296	0,03939576	0,065	6,5012949	0,100	9,95564188
27,5	300,5	7	266,9	27,9497026	90,38	0,09038	465	0,465	0,09009	1,17404326	0,61	18,1400831	0,39571296	0,0461663	0,071	7,11316606	0,117	11,6666121
27,5	300,5	7	235,4	24,6468416	100,38	0,10038	510	0,51	0,09009	1,17404326	0,54	18,1400831	0,39571296	0,05047952	0,069	6,8586276	0,128	12,7566004
27,5	300,5	7	218,8	22,90797	110,41	0,11041	530	0,53	0,09009	1,17404326	0,50	18,1400831	0,39571296	0,05170817	0,065	6,52990002	0,131	13,0670914
27,5	300,5	7	205	21,4649318	120,45	0,12045	540	0,54	0,09009	1,17404326	0,47	18,1400831	0,39571296	0,05170324	0,061	6,11797975	0,131	13,0658457
27,5	300,5	7	161,4	16,9033393	150,58	0,15058	590	0,59	0,09009	1,17404326	0,37	18,1400831	0,39571296	0,05415192	0,050	5,04599859	0,137	13,6846476
27,5	300,5	7	107,6	11,2720344	190,65	0,19065	660	0,66	0,09009	1,17404326	0,25	18,1400831	0,39571296	0,05784035	0,036	3,59413119	0,146	14,6167434
27,5	300,5	7	94,5	9,89549326	210,75	0,21075	690	0,69	0,09009	1,17404326	0,22	18,1400831	0,39571296	0,05906037	0,032	3,22176875	0,149	14,9250543
27,5	300,5	7	85,9	8,99123818	230,81	0,23081	720	0,72	0,09009	1,17404326	0,20	18,1400831	0,39571296	0,06028533	0,030	2,98807758	0,152	15,234611
27,5	300,5	7	76	7,95660699	250,85	0,25085	760	0,76	0,09009	1,17404326	0,17	18,1400831	0,39571296	0,0627451	0,028	2,75212688	0,159	15,8562158
27,5	300,5	7	58,8	6,156998	291,01	0,29101	820	0,82	0,09009	1,17404326	0,13	18,1400831	0,39571296	0,06519008	0,022	2,21264261	0,165	16,4740834
27,5	300,5	7	0	0	311,06	0,31106	850	0,85	0,09009	1,17404326	0,00	18,1400831	0,39571296	0,06641627	0,000	0	0,168	16,7839516

Tabel 9 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 4,5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	4,5	252,1	26,3956615	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,90	4,81928594	0,16353444	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	4,5	239,9	25,1170333	5,03	0,00503	30	0,03	0,09009	1,17404326	0,85	4,81928594	0,16353444	0,00307718	0,016	1,60375587	0,019	1,88166971
27,5	300,5	4,5	224,7	23,5326234	10,12	0,01012	50	0,05	0,09009	1,17404326	0,80	4,81928594	0,16353444	0,00491461	0,024	2,39981006	0,030	3,00524582
27,5	300,5	4,5	212,2	22,218914	15,16	0,01516	70	0,07	0,09009	1,17404326	0,75	4,81928594	0,16353444	0,00675821	0,031	3,1158149	0,041	4,13258978
27,5	300,5	4,5	198,9	20,8250941	20,21	0,02021	100	0,1	0,09009	1,17404326	0,71	4,81928594	0,16353444	0,00983292	0,042	4,2490008	0,060	6,01275235
27,5	300,5	4,5	187,2	19,6030146	25,26	0,02526	115	0,115	0,09009	1,17404326	0,67	4,81928594	0,16353444	0,01105911	0,045	4,49842312	0,068	6,76255666
27,5	300,5	4,5	172,8	18,0987153	30,29	0,03029	135	0,135	0,09009	1,17404326	0,61	4,81928594	0,16353444	0,01290394	0,048	4,84604321	0,079	7,8906542
27,5	300,5	4,5	165,5	17,3305959	37,37	0,03737	150	0,15	0,09009	1,17404326	0,59	4,81928594	0,16353444	0,01387996	0,050	4,99136069	0,085	8,48748336
27,5	300,5	4,5	155,8	16,3195266	47,49	0,04749	165	0,165	0,09009	1,17404326	0,55	4,81928594	0,16353444	0,01448134	0,049	4,9038114	0,089	8,85522658
27,5	300,5	4,5	135,1	14,1471153	57,5	0,0575	180	0,18	0,09009	1,17404326	0,48	4,81928594	0,16353444	0,01509629	0,044	4,43154698	0,092	9,23125909
27,5	300,5	4,5	118,7	12,4249989	72,5	0,0725	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,42	4,81928594	0,16353444	0,01571246	0,041	4,05095968	0,096	9,60804518
27,5	300,5	4,5	66,3	6,94239617	82,51	0,08251	220	0,22	0,09009	1,17404326	0,24	4,81928594	0,16353444	0,01694358	0,024	2,44079823	0,104	10,3608638
27,5	300,5	4,5	57,5	6,02334942	92,57	0,09257	250	0,25	0,09009	1,17404326	0,20	4,81928594	0,16353444	0,01940089	0,024	2,42480561	0,119	11,8634867
27,5	300,5	4,5	0	0	97,73	0,09773	270	0,27	0,09009	1,17404326	0,00	4,81928594	0,16353444	0,02122969	0,000	0	0,130	12,9817878

Tabel 10 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 5 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	5	303,5	31,7772097	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,97	6,61081747	0,20189437	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	5	290,6	30,4357496	10	0,01	50	0,05	0,09009	1,17404326	0,93	6,61081747	0,20189437	0,0049294	0,023	2,26946191	0,024	2,44157383
27,5	300,5	5	271,7	28,4518339	20,06	0,02006	80	0,08	0,09009	1,17404326	0,87	6,61081747	0,20189437	0,00738671	0,032	3,17911257	0,037	3,65869839
27,5	300,5	5	248,9	26,0657943	30,04	0,03004	130	0,13	0,09009	1,17404326	0,80	6,61081747	0,20189437	0,01231857	0,049	4,85708958	0,061	6,10149301
27,5	300,5	5	225,4	23,607498	40,07	0,04007	180	0,18	0,09009	1,17404326	0,72	6,61081747	0,20189437	0,01724427	0,062	6,15800021	0,085	8,54123566
27,5	300,5	5	205,5	21,5204333	50,07	0,05007	220	0,22	0,09009	1,17404326	0,66	6,61081747	0,20189437	0,02094132	0,068	6,81710482	0,104	10,372416
27,5	300,5	5	185,6	19,4349394	60,05	0,06005	260	0,26	0,09009	1,17404326	0,59	6,61081747	0,20189437	0,02464084	0,072	7,2440844	0,122	12,2048172
27,5	300,5	5	175,2	18,3442831	70,07	0,07007	280	0,28	0,09009	1,17404326	0,56	6,61081747	0,20189437	0,02587072	0,072	7,178838	0,128	12,8139899
27,5	300,5	5	158,3	16,5745192	80,08	0,08008	300	0,3	0,09009	1,17404326	0,51	6,61081747	0,20189437	0,02710184	0,068	6,79492348	0,134	13,4237729
27,5	300,5	5	120,1	12,5726538	90,14	0,09014	320	0,32	0,09009	1,17404326	0,38	6,61081747	0,20189437	0,0283268	0,054	5,38727646	0,140	14,030504
27,5	300,5	5	106,7	11,1746451	100,14	0,10014	330	0,33	0,09009	1,17404326	0,34	6,61081747	0,20189437	0,0283268	0,048	4,78824147	0,140	14,030504
27,5	300,5	5	85,7	8,97710101	105,18	0,10518	340	0,34	0,09009	1,17404326	0,27	6,61081747	0,20189437	0,02893804	0,039	3,92961587	0,143	14,3332592
27,5	300,5	5	0	0	110,26	0,11026	350	0,35	0,09009	1,17404326	0,00	6,61081747	0,20189437	0,02954436	0,000	0	0,146	14,6335728

Tabel 11 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 6 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	6	369,6	38,7049451	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	0,99	11,4234926	0,29072789	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	6	340,6	35,6628362	20,07	0,02007	60	0,06	0,09009	1,17404326	0,91	11,4234926	0,29072789	0,00492077	0,015	1,53620917	0,017	1,69257019
27,5	300,5	6	310	32,4605061	40,15	0,04015	140	0,14	0,09009	1,17404326	0,83	11,4234926	0,29072789	0,01230501	0,035	3,49654016	0,042	4,2324852
27,5	300,5	6	303,9	31,8243336	60,2	0,0602	200	0,2	0,09009	1,17404326	0,81	11,4234926	0,29072789	0,01722825	0,048	4,79956254	0,059	5,92590316
27,5	300,5	6	272,7	28,5602188	80,27	0,08027	290	0,29	0,09009	1,17404326	0,73	11,4234926	0,29072789	0,02584608	0,065	6,46185565	0,089	8,89012639
27,5	300,5	6	245,8	25,7448282	100,35	0,10035	360	0,36	0,09009	1,17404326	0,66	11,4234926	0,29072789	0,03199797	0,072	7,21129879	0,110	11,006157
27,5	300,5	6	235,3	24,6379404	110,38	0,11038	390	0,39	0,09009	1,17404326	0,63	11,4234926	0,29072789	0,03445897	0,074	7,43203586	0,119	11,8526541
27,5	300,5	6	219,1	22,944622	120,39	0,12039	430	0,43	0,09009	1,17404326	0,58	11,4234926	0,29072789	0,03815479	0,077	7,66356863	0,131	13,1238832
27,5	300,5	6	204,3	21,3926752	130,37	0,13037	460	0,46	0,09009	1,17404326	0,54	11,4234926	0,29072789	0,04062195	0,076	7,6072378	0,140	13,9724997
27,5	300,5	6	184,4	19,3087521	140,35	0,14035	490	0,49	0,09009	1,17404326	0,49	11,4234926	0,29072789	0,04308912	0,073	7,28321119	0,148	14,8211162
27,5	300,5	6	171,1	17,9201681	150,37	0,15037	510	0,51	0,09009	1,17404326	0,46	11,4234926	0,29072789	0,044319	0,070	6,95237449	0,152	15,2441527
27,5	300,5	6	141,6	14,8283173	170,41	0,17041	530	0,53	0,09009	1,17404326	0,38	11,4234926	0,29072789	0,04431407	0,058	5,7522088	0,152	15,2424572
27,5	300,5	6	120,4	12,6030225	190,48	0,19048	560	0,56	0,09009	1,17404326	0,32	11,4234926	0,29072789	0,0455378	0,050	5,02397913	0,157	15,6633744
27,5	300,5	6	94,3	9,87036052	210,46	0,21046	560	0,56	0,09009	1,17404326	0,25	11,4234926	0,29072789	0,04307556	0,037	3,72190311	0,148	14,8164534
27,5	300,5	6	68,5	7,16806724	230,57	0,23057	570	0,57	0,09009	1,17404326	0,18	11,4234926	0,29072789	0,04182966	0,026	2,62474707	0,144	14,3879064
27,5	300,5	6	54	5,65381958	270,68	0,27068	640	0,64	0,09009	1,17404326	0,14	11,4234926	0,29072789	0,04551315	0,023	2,25257852	0,157	15,6548967
27,5	300,5	6	0	0	290,75	0,29075	690	0,69	0,09009	1,17404326	0,00	11,4234926	0,29072789	0,04920157	0,000	0	0,169	16,9235825

Tabel 12 Hasil Pengukuran Torsi Dinamis Konfigurasi 2 Pada Kecepatan 7 m/s

T (deg C)	T (deg K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	m (kg)	s (gr)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	λ	P Teoritical (Watt)	T Teoritical (Nm)	Td (Nm)	CP	Cp (%)	Cm	Cm (%)
27,5	300,5	7	437,2	45,7792882	0	0	0	0	0,09009	1,17404326	1,00	18,1400831	0,39571296	0	0,000	0	0,000	0
27,5	300,5	7	411,7	43,1105052	20,1	0,0201	90	0,09	0,09009	1,17404326	0,94	18,1400831	0,39571296	0,00861413	0,020	2,04717554	0,022	2,17686238
27,5	300,5	7	373,3	39,0897902	50,22	0,05022	190	0,19	0,09009	1,17404326	0,85	18,1400831	0,39571296	0,01722579	0,037	3,71195901	0,044	4,35310192
27,5	300,5	7	345,8	36,2162801	70,29	0,07029	280	0,28	0,09009	1,17404326	0,79	18,1400831	0,39571296	0,02584361	0,052	5,15962071	0,065	6,53089858
27,5	300,5	7	326,7	34,206708	90,35	0,09035	340	0,34	0,09009	1,17404326	0,75	18,1400831	0,39571296	0,03076562	0,058	5,80146461	0,078	7,77473096
27,5	300,5	7	280,3	29,3503294	110,43	0,11043	470	0,47	0,09009	1,17404326	0,64	18,1400831	0,39571296	0,04431161	0,072	7,1695389	0,112	11,1979171
27,5	300,5	7	253,3	26,5302264	130,5	0,1305	560	0,56	0,09009	1,17404326	0,58	18,1400831	0,39571296	0,05292943	0,077	7,74103302	0,134	13,3757138
27,5	300,5	7	235,8	24,6882059	150,54	0,15054	590	0,59	0,09009	1,17404326	0,54	18,1400831	0,39571296	0,05415685	0,074	7,37061417	0,137	13,6858933
27,5	300,5	7	213,5	22,3571441	170,6	0,1706	630	0,63	0,09009	1,17404326	0,49	18,1400831	0,39571296	0,05661416	0,070	6,97753644	0,143	14,3068752
27,5	300,5	7	193	20,2093419	190,71	0,19071	660	0,66	0,09009	1,17404326	0,44	18,1400831	0,39571296	0,05783295	0,064	6,44300203	0,146	14,6148748
27,5	300,5	7	149,4	15,6446078	230,84	0,23084	680	0,68	0,09009	1,17404326	0,34	18,1400831	0,39571296	0,05535223	0,048	4,77375966	0,140	13,9879758
27,5	300,5	7	95,2	9,9661791	250,92	0,25092	720	0,72	0,09009	1,17404326	0,22	18,1400831	0,39571296	0,05780707	0,032	3,17592619	0,146	14,6083349
27,5	300,5	7	84,3	8,82368657	271	0,271	760	0,76	0,09009	1,17404326	0,19	18,1400831	0,39571296	0,06026192	0,029	2,93125586	0,152	15,2286939
27,5	300,5	7	76,6	8,02153324	291,07	0,29107	800	0,8	0,09009	1,17404326	0,17	18,1400831	0,39571296	0,06271799	0,028	2,77338547	0,158	15,8493644
27,5	300,5	7	0	0	331,2	0,3312	880	0,88	0,09009	1,17404326	0,00	18,1400831	0,39571296	0,06763137	0,000	0	0,171	17,0910168

Tabel 13 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konvensional

kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis
4	0	0,33		5	0	0,94		6	0	1,37		7	0	1,65
	10	0,55			10	1,19			10	1,77			10	2,58
	20	0,74			20	1,44			20	2,2			20	3,16
	30	0,87			30	1,62			30	2,51			30	3,62
	40	0,98			40	1,83			40	2,75			40	3,89
	50	0,82			50	1,58			50	2,3			50	3,31
	60	0,71			60	1,39			60	1,98			60	2,87
	70	0,58			70	1,11			70	1,58			70	2,51
	80	0,45			80	0,82			80	1,31			80	1,99
	90	0,3			90	0,63			90	0,98			90	1,6
	100	0,16			100	0,36			100	0,68			100	1,09
	110	0,05			110	0,15			110	0,28			110	0,47
	120	-0,07			120	-0,03			120	-0,07			120	0,12
	130	-0,15			130	-0,18			130	-0,29			130	-0,25
140	-0,2		140	-0,29		140	-0,54		140	-0,57				
150	-0,28		150	-0,51		150	-0,68		150	-0,83				
160	-0,1		160	-0,11		160	-0,12		160	-0,16				
170	0,16		170	0,32		170	0,63		170	0,85				
180	0,33		180	0,94		180	1,37		180	1,65				

Tabel 14 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konfigurasi 1

kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis
4	0	0,41		5	0	0,91		6	0	1,11		7	0	1,8
	10	0,62			10	1,39			10	1,65			10	2,48
	20	0,79			20	1,61			20	2,07			20	3,32
	30	0,89			30	1,73			30	2,49			30	3,92
	40	0,93			40	1,81			40	2,67			40	3,89
	50	0,9			50	1,7			50	2,37			50	3,51
	60	0,82			60	1,52			60	2,14			60	3,13
	70	0,69			70	1,34			70	1,72			70	2,78
	80	0,56			80	1,13			80	1,39			80	2,28
	90	0,43			90	0,83			90	1,19			90	1,66
	100	0,31			100	0,62			100	0,93			100	1,19
	110	0,22			110	0,34			110	0,43			110	0,65
	120	0,05			120	0,08			120	0,06			120	0,05
	130	-0,05			130	-0,22			130	-0,09			130	-0,29
140	-0,12		140	-0,31		140	-0,38		140	-0,63				
150	-0,17		150	-0,41		150	-0,52		150	-1,08				
160	-0,16		160	-0,17		160	-0,03		160	-0,56				
170	0,06		170	0,1		170	0,75		170	0,52				
180	0,41		180	0,91		180	1,4		180	1,8				

Tabel 15 Hasil Pengukuran Torsi Statis Konfigurasi 2

kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis		kec	sudut	torsi statis
4	0	0,28		5	0	0,53		6	0	0,87		7	0	1,45
	10	0,53			10	1,21			10	1,45			10	2,33
	20	0,71			20	1,55			20	2,23			20	3,57
	30	0,95			30	1,93			30	2,73			30	3,98
	40	1,01			40	1,97			40	2,99			40	4,25
	50	0,97			50	1,9			50	2,87			50	3,86
	60	0,87			60	1,81			60	2,49			60	3,41
	70	0,76			70	1,6			70	2,12			70	3
	80	0,61			80	1,33			80	1,85			80	2,58
	90	0,5			90	1,01			90	1,53			90	2,02
	100	0,4			100	0,7			100	1,13			100	1,43
	110	0,27			110	0,47			110	0,69			110	0,85
	120	0,09			120	0,15			120	0,22			120	0,39
	130	-0,01			130	-0,06			130	-0,09			130	-0,09
140	-0,13		140	-0,34		140	-0,42		140	-0,56				
150	-0,14		150	-0,5		150	-0,57		150	-0,75				
160	-0,04		160	-0,16		160	-0,24		160	-0,36				
170	0,1		170	0,14		170	0,44		170	0,31				
180	0,31		180	0,45		180	0,87		180	1,41				

BIODATA PENULIS



M. Rifqi Putra Naufal merupakan nama lengkap dari penulis Tugas Akhir ini. Penulis lahir di Bojonegoro, 15 Februari 2000 dan merupakan anak pertama dari 4 bersaudara pasangan Nanang Satmoko dan Dwi Yuliasuti. Penulis memulai pendidikan formal di SD Muhammadiyah GKB setelah lulus pada tahun 2011 penulis melanjutkan ke SMP Negeri 1 Gresik dan lulus pada tahun 2015 dan melanjutkan ke SMA Negeri 1 Gresik hingga tahun 2018. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan Strata 1 dan diterima di program S1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2018.

Selama menuntut ilmu S1, penulis aktif mengikuti kegiatan kemahasiswaan seperti UKM Robotik ITS dan tergabung pada tim KRAI ITS pada tahun 2019-2020, mengikuti lomba paper dengan tema “*Renewable Energy*” dan PIMNAS 2021, dan magang melalui Kampus Merdeka di PT. Unilever Oleochemical Indonesia. . Karena ketertarikan terhadap bidang konversi energi, penulis memutuskan tugas akhir pada bidang mekanika fluida dengan topik penelitian yang diambil berupa “Studi Eksperimen Pengaruh Penggunaan Silinder Pengganggu pada Performa Turbin Angin Savonius”.