

TUGAS AKHIR - TM234802

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG PENGARUH SUDUT DEFLEKTOR DI DEPAN SUDU ADVANCING DAN RETURNING TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk Deflektor dengan Kemiringan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Variasi Kecepatan Angin 5 dan 7 m/s”

MASYITHA ZAHROYANA

NRP 5007201043

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. TRI YOGI YUWONO, DEA, IPU, A.ENG.

NIP 196001291987011001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



TUGAS AKHIR - TM234802

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG PENGARUH SUDUT DEFLEKTOR DI DEPAN SUDU ADVANCING DAN RETURNING TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk Deflektor dengan Kemiringan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Variasi Kecepatan Angin 5 dan 7 m/s”

MASYITHA ZAHROYANA

NRP 5007201043

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. TRI YOGI YUWONO, DEA, IPU, A.ENG.

NIP 196001291987011001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



FINAL PROJECT - TM234802

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
DEFLECTOR ANGLE ON OF ADVANCING AND
RETURNING BLADES ON TURBINE PERFORMANCE
SAVONIOUS WINDS**

“Case Study for Deflectors with Angle $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Wind Speed Variations 5 and 7 m/s”

MASYITHA ZAHROYANA

NRP 5007201043

Advisor

Prof. Dr. Ir. TRI YOGI YUWONO, DEA, IPU, A.ENG.

NIP 196001291987011001

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG PENGARUH SUDUT DEFLEKTOR DI DEPAN SUDU *ADVANCING* DAN *RETURNING* TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk Deflektor dengan Kemiringan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Variasi Kecepatan Angin 5 dan 7 m/s”

PROPOSAL 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 : **MASYITHA ZAHROYANA**

NRP. 5007201043

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG. Pembimbing
NIP. 196001291987011001



2. Prof. Ir. Sutardi, MEng, PhD, IPM, AEng
NIP. 196412281990031002

Penguji



3. Nur Ikhwan, ST, MEng, IPM, AEng
NIP. 196709151995121001

Penguji



4. Dhia Fairuz Shabrina ST., MT.

Penguji



SURABAYA

JULI, 2024

APPROVAL SHEET

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DEFLECTOR ANGLE ON OF ADVANCING AND RETURNING BLADES ON TURBINE PERFORMANCE SAVONIOUS WINDS

“Case Study for Deflectors with Angle $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Wind Speed
Variations 5 and 7 m/s”


FINAL PROJECT

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


Oleh : **MASYITHA ZAHROYANA**

NRP. 5007201043

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG. Advisor 
NIP. 196001291987011001

2. Prof. Ir. Sutardi, MEng, PhD, IPM, AEng Examiner 
NIP. 196412281990031002

3. Nur Ikhwan, ST, MEng, IPM, AEng Examiner 
NIP. 196709151995121001

4. Dhia Fairuz Shabrina ST., MT. Examiner 

SURABAYA

JULY, 2024

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Masyitha Zahroyana / 5007201043
Program studi : S-1 Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG. /
196001291987011001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG PENGARUH SUDUT DEFLEKTOR DI DEPAN SUDU ADVANCING DAN RETURNING TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

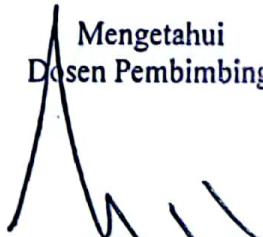
“Studi Kasus untuk Deflektor dengan Kemiringan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ; \beta = 0^\circ$; Variasi
Kecepatan Angin 5 dan 7 m/s”

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, 24 10/1 2024

Mengetahui
Dosen Pembimbing


Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG.
NIP. 196001291987011001

Mahasiswa


Masyitha Zahroyana
NRP. 5007201043

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Nama mahasiswa / NRP : Masyitha Zahroyana / 5007201043
Program studi : S-1 Mechanical Engineering
Dosen Pembimbing / NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG./
196001291987011001

Hereby declare that the Final Project with the title of :

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DEFLECTOR ANGLE ON OF
ADVANCING AND RETURNING BLADES ON TURBINE PERFORMANCE SAVONIOUS
WINDS**

“Case Study for Deflectors with Angle $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ; \beta = 0^\circ$; Wind Speed
Variations 5 and 7 m/s”

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

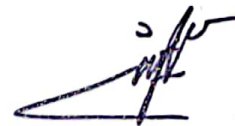
If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 24 / 07 / 2024

Acknowledge
Advisor

Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG.
NIP. 196001291987011001

Student



Masyitha Zahroyana
NRP. 5007201043

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG PENGARUH SUDUT DEFLEKTOR DI DEPAN SUDU *ADVANCING* DAN *RETURNING* TERHADAP KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk Deflektor dengan Kemiringan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Variasi Kecepatan Angin 5 dan 7 m/s”

Nama Mahasiswa / NRP : Masyitha Zahroyana / 5007201043
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG.
ABSTRAK

Tercatat bahwa terjadi peningkatan potensi energi angin di Indonesia pada tahun 2021 menjadi 154, 9 GW yang membuktikan besarnya potensi pemanfaatan energi bersih di Indonesia. Dengan kecepatan rata-rata angin yang tergolong rendah, maka pengaplikasian turbin poros vertikal sangat sesuai karena memiliki cut-in speed yang rendah, salah satunya yaitu turbin angin Savonius. Namun, efisiensi yang rendah menyebabkan turbin ini jarang digunakan. Banyak modifikasi geometri dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin tetapi disisi lain justru menimbulkan permasalahan lain pada bidang fabrikasi dan biaya. Maka dilakukan modifikasi aliran angin di sekitar turbin Savonius dengan berbagai instalasi pengganggu aliran, salah satunya dengan deflektor. Deflektor dapat diletakkan di depan sudu *advancing* dan di depan sudu *returning*.

Studi eksperimental ini dilakukan menggunakan turbin angin Savonius dengan dimensi: diameter sudu turbin (D) 165,2 mm, tinggi turbin (H) 295 mm, dan diameter poros (d) sebesar 19 mm. Penambahan dua deflektor dengan panjang (l) 325 mm, tinggi (h) 735 mm, dengan sudut kemiringan deflektor di depan sudu *advancing* (α) sebesar $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ dan sudut kemiringan deflektor di depan sudu *returning* (β) sebesar 0° . Variasi kecepatan angin pada penelitian ini yaitu 5 & 7 m/s. Aliran angin yang digunakan pada penelitian ini dihasilkan oleh *axial fan*, diatur besarnya oleh *voltage regulator*, dan dijaga keseragamannya oleh *honeycomb*. Adapun data kecepatan aliran anginnya diukur menggunakan anemometer, data kecepatan putaran turbinnya diukur menggunakan *tachometer*, data torsi dinamisnya diukur menggunakan *brake dynamometer*, dan data torsi statisnya diukur menggunakan *torquemeter*.

Berdasarkan penelitian ini, diperoleh hasil bahwa instalasi deflektor di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* meningkatkan koefisien daya (CoP) dan koefisien momen (C_M) turbin pada seluruh variasi kecepatan angin dan sudut α . Peningkatan CoP_{max} dan C_{Mmax} maksimum masing-masing sebesar 43,14% dan 37,27% pada konfigurasi $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 0^\circ$. Instalasi deflektor pada seluruh variasi kecepatan angin dan sudut α meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin dengan nilai CTS positif pada seluruh sudut azimut. Lalu, peningkatan kecepatan angin meningkatkan CoP, C_M , dan kemampuan *self-starting* turbin pada seluruh konfigurasi.

Kata kunci: Turbin angin Savonius, Deflektor, Koefisien Momen, Koefisien Daya, Self-starting

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DEFLECTOR ANGLE ON OF ADVANCING AND RETURNING BLADES ON TURBINE PERFORMANCE SAVONIOUS WINDS

“Case Study for Deflectors with Slopes $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$; $\beta = 0^\circ$; Wind Speed Variations 5 and 7 m/s”

Student Name / NRP : Masyitha Zahroyana / 5007201043
Department : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG.
Abstract

It is recorded that there will be an increase in the potential for wind energy in Indonesia in 2021 to 154.9 GW, which proves the large potential for clean energy utilization in Indonesia. With the average wind speed being relatively low, the application of a vertical shaft turbine is very suitable because it has a low cut-in speed, one of which is the Savonius wind turbine. However, low efficiency means this turbine is rarely used. Many geometry modifications are carried out to increase turbine efficiency but on the other hand this actually causes other problems in the field of fabrication and costs. So the wind flow around the Savonius turbine was modified with various flow disturbance installations, one of which was a deflector. The deflector can be placed in front of the advancing blade and in front of the returning blade.

This experimental study was carried out using a Savonius wind turbine with dimensions: turbine blade diameter (D) 165.2 mm, turbine height (H) 295 mm, and shaft diameter (d) 19 mm. Addition of two deflectors with length (l) 331 mm, height (h) 735 mm, with deflector tilt angles in front of the advancing blade (α) of $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ and deflector tilt angles in front returning angle (β) is 0° . Variations in wind speed in this study were 5 & 7 m/s. The wind flow used in this research is generated by an axial fan, regulated by a voltage regulator, and maintained uniformity by a honeycomb. The wind flow speed data is measured using an anemometer, turbine rotation speed data is measured using a tachometer, dynamic torque data is measured using a brake dynamometer, and static torque data is measured using a torquemeter.

Based on this research, the results showed that installing deflectors next to the advancing blade and in front of the returning blade increased the power coefficient (CoP) and moment coefficient (CM) of the turbine at all variations in wind speed and angle α . The maximum increase in CoPmax and CMmax is 43.14% and 37.27% respectively in the $\alpha = 45^\circ$ and $\beta = 0^\circ$ configurations. Installation of deflectors at all variations in wind speed and α angle increases the turbine's self-starting capability with positive CTS values at all azimuthal angles. Then, increasing the wind speed increases the CoP, CM, and self-starting capability of the turbine in all configurations.

Keywords: Savonius wind turbine, Deflector, Moment Coefficient, Power Coefficient, Efficiency, Self-starting.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah mengizinkan dan memberikan penulis kesempatan untuk menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin ITS hingga berkesempatan untuk menuliskan karya ini.
2. Ibu dan Ayah selaku orang tua serta keluarga yang selalu memberikan dukungan baik moral maupun material kepada penulis.
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA, IPU, A.ENG. selaku dosen pembimbing penulis yang selalu memberikan ilmu dan bimbingan dengan penuh kesabaran dan ketelatenan kepada penulis.
4. Prof. Dr. Ing. Ir. Herman Sasongko, Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., IPM, A.Eng., Ir. Nur Ikhwan, M.Eng. IPM, A.Eng dan Ibu Dhia Fairuz Shabrina S.T., M.T., selaku dosen penguji sidang seminar proposal dan tugas akhir penulis yang telah memberikan kritik, saran, dan petunjuk yang membangun kepada penulis.
5. Seluruh dosen dan karyawan di Departemen Teknik Mesin ITS yang telah memberikan ilmu dan bantuan kepada penulis selama perkuliahan.
6. Teman-teman kelompok Tugas Akhir 17 yang telah membantu penulis dalam pengambilan data dan diskusi selama penulisan tugas akhir.
7. Teman-teman Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida yang telah membantu penulis selama penulisan tugas akhir.
8. Teman-teman M63 Teknik Mesin yang telah membantu penulis selama masa perkuliahan.
9. Keluarga besar Ma'had Ahlul Qur'an Surabaya beserta Ustadz Baidum Makenun selaku pengasuh Ma'had yang telah membantu penulis mendekatkan diri dengan Al-Qur'an seiring dengan kesibukan perkuliahan.

Penulis berharap agar segala kebaikan yang dilakukan oleh pihak terkait di atas menjadi kebaikan yang akan terus mengalir sampai akhir hayat penulis atas izin Tuhan. Penulis juga menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis selalu terbuka dan mengharapkan akan kritik dan saran yang akan diberikan. Penulis juga berharap tugas akhir ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat kepada pembaca, keluarga besar Departemen Teknik Mesin, dan civitas akademika ITS.

Surabaya, 10 Juli 2023

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Turbin Angin	6
2.2 Turbin Angin Savonius.....	7
2.3 Bilangan Reynolds.....	8
2.4 Gaya <i>Drag</i>	9
2.5 Perhitungan Daya	10
2.5.1 Daya Teoritis	10
2.5.2 Daya Aktual.....	11
2.6 Perhitungan Torsi	12
2.6.1 Perhitungan Torsi Statis.....	12
2.6.2 Perhitungan Torsi Dinamis.....	13
2.7 <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	13
2.8 <i>Coefficient of Power</i> (CoP).....	13
2.9 Batas Betz (<i>Betz Limit</i>)	14
2.10 <i>Coefficient of Moment</i> (C_m).....	15
2.11 Coeffisien of Static Torque (C_{TS}).....	15

2.12	Penelitian Terdahulu.....	16
2.12.1	The Use of a Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors (Altan et. al., 2010).....	16
2.12.2	Experimental Investigation on The Effects of Deflector Angles on The Power Performance of a Savonius Turbine for Hydrokinetic Applications in Small Rivers (Salleh et. al., 2022).....	18
2.12.3	Performance Enhancement of a Savonius Turbine Under Effect of Frontal Guiding Plate (Mohamed et. al., 2021)	20
2.13	Komparasi Penelitian.....	22
BAB III	METODOLOGI	23
3.1	Parameter yang Diukur.....	23
3.2	Analisa Dimensi	25
3.2.1	Analisa Dimensi <i>Coefficient of power (CoP)</i>	25
3.2.2	Analisa Dimensi <i>Coefficient of moment</i>	27
3.3	Peralatan Penelitian	29
3.3.1	Turbin Angin Savonius.....	29
3.3.2	Deflektor.....	30
3.3.3	<i>Axial Fan</i>	30
3.3.4	<i>Honeycomb</i>	31
3.3.5	Penyangga Turbin Angin Savonius	32
3.3.6	<i>Bearing</i>	32
3.3.7	<i>Voltage Regulator</i>	33
3.3.8	<i>Voltage Stabilizer</i>	33
3.4	Alat Ukur Penelitian	34
3.4.1	Anemometer	34
3.4.2	Torquemeter.....	35
3.4.3	Tachometer	35
3.4.4	Brake Dynamometer.....	36
3.5	Prosedur Penelitian	37
3.5.1	Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis.....	38
3.5.2	Prosedur Pengambilan Data Torsi Dinamis.....	38
3.6	Flowchart Penelitian.....	39
3.6.1	Flowchart Torsi Statis.....	39
3.6.2	Flowchart Torsi Dinamis	40
3.7	Uji <i>Uniformity</i>	42

3.8	Uncertainty	44
3.8.1	Uncertainty pada Perhitungan Tip Speed Ratio ($u\lambda$)	44
3.8.2	<i>Uncertainty</i> pada Perhitungan Massa Jenis Udara ($u\rho$).....	45
3.8.3	<i>Uncertainty</i> pada Perhitungan Viskositas Dinamik Udara ($u\mu$)	45
3.8.4	<i>Uncertainty</i> pada Perhitungan Bilangan Reynolds (uRe)	46
3.8.5	<i>Uncertainty</i> pada Perhitungan Luas Penampang Turbin yang Terkena Angin (uA) 46	
3.8.6	<i>Uncertainty</i> pada Perhitungan Torsi Dinamis (uTD).....	47
3.8.7	Uncertainty pada Perhitungan Coefficient of Moment (uCM).....	47
3.8.8	Uncertainty pada Perhitungan Coefficient of Power ($uCoP$)	48
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	50
4.1	Hasil Penelitian.....	50
4.2	Contoh Perhitungan	50
4.2.1	Perhitungan Bilangan Reynolds	50
4.2.2	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i>	51
4.2.3	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i>	52
4.2.4	Perhitungan <i>Coefficient of Moment</i>	52
4.2.5	Perhitungan <i>Coefficient of Static Torque</i>	52
4.3	Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius Tanpa Instalasi Deflektor.....	53
4.3.1	Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin Tanpa Instalasi Deflektor	53
4.3.2	Analisis <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Tanpa Instalasi Deflektor.....	55
4.3.3	Analisis <i>Coefficient of Static Torque</i> Turbin Tanpa Instalasi Deflektor	56
4.4	Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Instalasi Deflektor	57
4.4.1	Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin dengan Instalasi Deflektor.....	58
4.4.2	Analisis <i>Coefficient of Moment</i> Turbin dengan Instalasi Deflektor	69
4.4.3	Analisis <i>Coefficient of Static Torque</i> Turbin dengan Instalasi Deflektor.....	74
4.5	Analisis Perbandingan Maximum Coefficient of Power Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Instalasi Deflektor terhadap Variasi Sudut Deflektor	80
BAB V	Kesimpulan dan Saran.....	85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran	85
	DAFTAR PUSTAKA.....	86
	LAMPIRAN	88
	BIODATA PENULIS	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Jenis Turbin Angin berdasarkan Poros	6
Gambar 2. 2 Gambar Turbin Savonius	7
Gambar 2. 3 Skema Turbin Angin Savonius (a) Tampak Depan, (b) Tampak Atas	8
Gambar 2. 4 Skema Turbin Angin Savonius	9
Gambar 2. 5 Skema Brake Dynamometer	12
Gambar 2. 6 Grafik <i>Coefficient of Power</i> terhadap <i>Tip speed ratio</i> pada Beberapa Turbin Angin	14
Gambar 2. 7 Geometri Turbin Angin Savonius Oleh Altan, et al.....	16
Gambar 2. 8 Skema Curtain dan Rotor Savonius oleh Altan, et al.....	17
Gambar 2. 9 Skema dari Set up Penelitian oleh Altan, et al.....	17
Gambar 2. 10 Skema Deflektor pada Penelitian Salleh, et al.....	18
Gambar 2. 11 Flowpattern pada Deflektor Advancing Blade.....	19
Gambar 2. 12 Flowpattern pada Deflektor Returning Blade	20
Gambar 2. 13 Skema Guiding Plate pada Penelitian Mohamed, et al.....	21
Gambar 2. 14 Flowpattern pada Penelitian Mohamed, et al.....	21
Gambar 3. 1 Skema Alat Penelitian (a) 3d dan (b) 2d	24
Gambar 3. 2 Skema Deflektor dan Turbin Angin Savonius	24
Gambar 3. 3 Turbin Angin Savonius	29
Gambar 3. 4 Deflektor yang pada Turbin Angin Savonius.....	30
Gambar 3. 5 <i>Axial fan</i> CKE SF-45 H.....	31
Gambar 3. 6 (a) <i>Honeycomb</i> , (b) Dimensi <i>Honeycomb</i>	31
Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Angin Savonius.....	32
Gambar 3. 8 <i>Voltage Regulator</i> TDGC2- 3kVA	33
Gambar 3. 9 <i>Voltage Stabilizer</i> SVC-3000NA	34
Gambar 3. 10 <i>Anemometer</i> Omega HHF141	34
Gambar 3. 11 <i>Torquemeter</i> Lutron TQ-8800.....	35
Gambar 3. 12 <i>Tachometer</i> Omega HHT12.....	35
Gambar 3. 13 Skema Instalasi <i>Brake Dynamometer</i>	36
Gambar 3. 14 Neraca Pegas Nagata C-5.....	37
Gambar 3. 15 Beban Pemberat NKH tipe M1	37
Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis	40
Gambar 3. 17 Flowchart Torsi Dinamis.....	42
Gambar 3. 18 Titik Uji Keseragaman Aliran Angin.....	42
Gambar 3. 19 Hasil Uji <i>Uniformity</i> Posisi Horizontal (a) Kecepatan 5 m/s dan (b) Kecepatan 7 m/s.....	43
Gambar 3. 20 Hasil Uji <i>Uniformity</i> Posisi Vertikal (a) Kecepatan 5 m/s dan (b) Kecepatan 7 m/s.....	43
Gambar 4. 1 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa Deflektor.....	53
Gambar 4. 2 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (C_M) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa Deflektor	55
Gambar 4. 3 Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> (CTS) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa Deflektor	56

Gambar 4. 4	Ilustrasi Posisi Turbin saat $\theta = 40^\circ$ dan $\theta = 150^\circ$ Tanpa Deflektor.....	57
Gambar 4. 5	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s.....	58
Gambar 4. 6	<i>Flowpattern</i> di sekitar sudu <i>returning</i> turbin angin Savonius (a) Konvensional (b) Deflektor $\beta = 0^\circ$ (Salleh dkk, 2022).....	60
Gambar 4. 7	<i>Flowpattern</i> di sekitar turbin angin Savonius (Mohamed dkk, 2021)	61
Gambar 4. 8	Kontur Tekanan Statis Variasi Sudut Puncak pada Sudut Azimuth 0° (Huda, 2024)	61
Gambar 4. 9	Pola Aliran di sekitar sudu <i>advancing</i> pada sudut deflektor (a) 30° dan (b) 60° (Salleh, 2021).....	62
Gambar 4. 10	Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s.....	63
Gambar 4. 11	<i>Flowpattern</i> di sekitar sudu <i>returning</i> turbin angin Savonius (a) Konvensional (b) Deflektor $\beta = 0^\circ$ (Salleh dkk, 2022)	65
Gambar 4. 12	Kontur Tekanan Statis Variasi Sudut Puncak pada Sudut Azimuth 0° (Huda, 2024)	66
Gambar 4. 13	Pola Aliran di sekitar sudu <i>advancing</i> pada sudut deflektor (a) 30° dan (b) 60° (Salleh, 2021).....	67
Gambar 4. 14	Grafik Rasio Perubahan <i>Coefficient of Power</i> (CoP) terhadap Sudut α	67
Gambar 4. 15	Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s.....	69
Gambar 4. 16	Grafik <i>Coefficient of Momentr</i> (CoP) terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s.....	71
Gambar 4. 17	Grafik Rasio Perubahan <i>Coefficient of Moment</i> (C_M) terhadap Sudut α	73
Gambar 4. 18	Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> (CoP) terhadap Sudut Sudu (θ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s.....	74
Gambar 4. 19	Grafik <i>Coefficient of Static Torque</i> (CoP) terhadap Sudut Sudu (θ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s.....	77
Gambar 4. 20	Grafik CoP_{max}/CoP_{max0} terhadap Variasi Sudut Deflektor α	81
Gambar 4. 21	Ilustrasi Pola Aliran dan Kecepatan pada Sudut Deflektor (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; dan (d) 70°	83
Gambar 4. 22	Ilustrasi Pola Aliran dan Kecepatan pada Sudut Deflektor (a) 70° ; (b) 80° dan (d) 90°	84

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Coefficient of Drag</i> pada beberapa bentuk benda ($Re \geq 103$).....	10
Tabel 2. 2 Variasi Geometri <i>Curtain</i>	16
Tabel 2. 3 Tahapan Penelitian dan Hasil	17
Tabel 2. 4 Data Hasil Percobaan oleh Salleh, et al.	19
Tabel 2. 5 Tabel Komparasi Penelitian.....	22
Tabel 3. 1 Konfigurasi Skema Percobaan.....	23
Tabel 3. 3 Dimensi Primer untuk Parameter CoP.....	25
Tabel 3. 4 Dimensi Primer untuk Parameter Cm.....	28
Tabel 3. 5 Spesifikasi Turbin Angin Savonius	30
Tabel 3. 6 Spesifikasi Deflektor.....	30
Tabel 3. 7 Spesifikasi <i>Axial fan</i>	31
Tabel 3. 8 Spesifikasi <i>Honeycomb</i>	32
Tabel 3. 9 Spesifikasi <i>Bearing</i>	33
Tabel 3. 10 Spesifikasi <i>Voltage Regulator</i>	33
Tabel 3. 11 Spesifikasi <i>Voltage Stabilizer</i>	34
Tabel 3. 12 Spesifikasi <i>Anemometer</i>	34
Tabel 3. 13 Spesifikasi <i>Torquemeter</i>	35
Tabel 3. 14 Spesifikasi <i>Tachometer Omega</i>	36
Tabel 3. 15 Spesifikasi Neraca Pegas	37
Tabel 3. 16 Spesifikasi Timbangan Digital.....	37
Tabel 4.1 Perbandingan Nilai CoP Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor	68
Tabel 4.2 Perbandingan Nilai CoP Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor.....	73
Tabel 4.3 Perbandingan Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 5 m/s.....	75
Tabel 4.4 Perbandingan Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 7 m/s.....	78
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor	79
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai CoPmax/CoPmax0 Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor.....	81

DAFTAR SIMBOL

A	= Luas penampang turbin (m^2)
C_D	= <i>Coeffisien drag</i>
C_m	= <i>Coefficient of Moment</i>
CoP	= <i>Coefficient of Power</i>
C_{TS}	= <i>Coefficient static torque</i>
D	= Diameter sudu turbin (m)
D_0	= Diameter <i>endplates</i> turbin
d_p	= Diameter poros turbin (m)
E_k	= Energi kinetik (<i>joule</i>)
F_D	= Gaya drag (N)
g	= Percepatan gravitasi bumi (m/s^2)
h	= Ketinggian deflektor (m)
H	= Ketinggian turbin angin Savonius (m)
L	= Panjang karakteristik aliran (m)
ℓ	= lebar deflektor (mm)
m	= Massa beban (kg)
\dot{m}	= <i>Mass flowrate</i> (kg/s)
p	= Tekanan (N/m^2)
P_A	= Daya aktual turbin (<i>watt</i>)
P_t	= Daya kinetik angin atau daya teoritis turbin (<i>watt</i>)
R	= Jari-jari turbin (m)
r	= Jari-jari poros turbin (m)
Re	= Reynolds number
T_d	= Torsi dinamis turbin Savonius ($N \cdot m$)
T_s	= Torsi poros turbin ($N \cdot m$)
U	= Kecepatan free stream aliran (m/s)
s	= massa yang terbaca oleh pegas (kg)
t	= ketebalan sudu turbin (mm)
t_p	= ketebalan piringan turbin (mm)
t_d	= ketebalan deflektor (mm)
ω	= kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)
X	= jarak antara deflektor sudu <i>advancing</i> terhadap sumbu netral (m)
Y	= jarak antara deflektor sudu <i>returning</i> terhadap sumbu netral (m)
α	= sudut deflektor sudu <i>advancing</i> ($^\circ$)
β	= sudut deflektor sudu <i>returning</i> ($^\circ$)
θ	= sudut sudu turbin ($^\circ$)
λ	= <i>tip speed ratio</i>
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m^3)
τ	= Tegangan geser (N/m^2)
μ	= Viskositas dinamis fluida (N)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tahun 2023 lalu, telah berhasil menjadi tahun terpanas dalam sejarah kehidupan di bumi, setelah berhasil mengalahkan kenaikan suhu rata-rata bumi pada tahun 2016 (Copernicus, 2024). Tercatat bahwa tahun 2023 memiliki rata-rata suhu permukaan bumi sebesar 14.98°C , yang mana 0.17°C lebih tinggi dari tahun 2016. Kenaikan suhu ini hampir mendekati batas yang telah disepakati dalam *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, yaitu sebesar 1.5°C . Dalam kesepakatan tersebut, setidaknya ada 195 negara yang berkomitmen untuk menjaga kenaikan temperatur bumi dibawah 2°C dan membatasinya hanya pada kenaikan 1.5°C di atas suhu rata-rata pada masa pra-industrial. Maka dari itu, seluruh dunia harus mengurangi emisi CO_2 hingga mencapai *Net Zero Emission* pada pertengahan abad-21 ini (Chen et al., 2023). Reduksi emisi karbon tersebut dapat berjalan beriringan dengan transisi energi fosil menjadi energi bersih terbarukan.

Indonesia sebagai negara kepulauan yang memiliki garis pantai yang panjang, memiliki potensi energi bayu yang besar. Pada tahun 2021, terdapat peningkatan data potensi bayu yang semula sebesar 60,6 GW menjadi 154,9 GW, selisih ini diperoleh dari potensi energi bayu *offshore*. Dengan potensi yang melimpah, pemanfaatan energi bayu masih tergolong minim yang berada di angka 0,2 MW atau hanya sebesar 0,1% dari potensi energi yang ada (Ditjen EBTKE, 2023). Angka tersebut masih menunjukkan bahwa pemanfaatan energi bayu di Indonesia belum optimal.

Kecepatan angin darat di Indonesia memiliki kisaran sebesar 4-6 m/s (Sekjen DEN, 2023), dengan kecepatan yang tergolong rendah, maka dibutuhkan jenis turbin yang tepat untuk mengonversi energi tersebut. Turbin angin akan berputar dengan kecepatan angin yang disebut *cut-in speed*. Namun untuk turbin angin jenis poros horizontal memiliki *cut-in speed* sebesar 6 m/s. Hal ini memiliki arti bahwa turbin tidak akan berputar dan memproduksi *power* pada kecepatan dibawah itu. Seiring perkembangan turbin angin, para ilmuwan telah berhasil mengurangi kecepatan potong minimal dari turbin angin hingga menjadi 2 m/s. Tipe turbin ini dikenal sebagai turbin angin poros vertikal (VAWT). Jenis turbin VAWT ini sesuai dengan kecepatan angin di Indonesia, baik untuk skala kecil maupun menengah (Hidayat, 2022). Hal ini juga didukung dengan karakteristik turbin poros vertikal yang dapat menerima angin dari segala posisi, kesederhanaan desain konstruksi dan juga kemudahan dalam perawatan karena dapat diletakkan dalam level *ground* (Giorgetti et al., 2015).

Salah satu tipe turbin VAWT adalah turbin angin Savonius yang memiliki kemampuan *self-starting* dan berputar dengan memanfaatkan gaya drag. Dengan desain yang sederhana, turbin savonius memiliki biaya fabrikasi yang rendah. Rotor savonius dapat dibuat dengan memotong silinder menjadi dua bagian sepanjang bidang tengah dan kemudian membuatnya menjadi bentuk 'S'. Dengan kesederhanaan desainnya ini, sangat disayangkan, turbin angin ini masih belum sepopuler turbin angin horizontal (Golecha et al., 2011). Hal ini dapat disebabkan karena performa dari turbin savonius yang masih tergolong rendah jika dibandingkan dengan turbin darius dan turbin angin poros horizontal. Maka dari itu banyak dikembangkan metode untuk meningkatkan performa turbin savonius seperti memodifikasi geometri rotor menjadi bentuk *twisted blade*, *multi stages*, dan *3 blades rotor* (Diaz et al., 2015). Namun hal ini tentu akan meningkatkan biaya fabrikasi dari turbin karena bentuk geometri yang lebih kompleks.

Selain modifikasi parameter geometri, modifikasi karakteristik aliran angin dengan suatu instalasi pengganggu aliran, bisa menjadi salah satu opsi dalam meningkatkan performa turbin savonius. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh instalasi pengganggu aliran di sekitar turbin angin Savonius terhadap kinerjanya. Instalasi yang

digunakan dapat berupa silinder, silinder oval, deflektor berupa papan tipis maupun benda dengan geometri lain yang diletakkan disekitar turbin. Penggunaan deflektor memiliki kemudahan dalam fabrikasi dan instalasi sehingga akan menekan biaya. Altan et al. (2008) melakukan studi eksperimental tentang peningkatan performa turbin savonius dengan menggunakan *curtaining*. Pada dasarnya, *curtain* digunakan sebagai penghambat aliran pada sudu *returning* sehingga mengurangi gaya *drag* yang diterima. Aliran yang dihambat tersebut kemudian diarahkan menuju sudu *advancing* dengan harapan menambah torsi positif dari turbin. Parameter yang divariasikan berupa geometri dari *curtain*, yaitu panjang *curtain advancing* dan *returning*, serta sudut *curtain*. Nilai CoP tertinggi diperoleh dari konfigurasi curtain 1 dengan panjang $l_1 = 45$ cm dan $l_2 = 52$ cm. Dengan geometri tersebut, eksperimen dilanjutkan dengan variasi sudut. Variasi sudut yang digunakan yaitu α dengan rentang 30° - 60° dengan interval 5° setiap kenaikan. Sedangkan untuk β memiliki nilai diantara 0° - 30° dengan interval kenaikan yang sama. Hasil optimum yang diperoleh yaitu pada $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ dengan peningkatan *coefficient of power* (CoP) hingga 38%

Studi eksperimental oleh (Golecha, et al., 2011) mengamati pengaruh penambahan deflektor pada turbin air Savonius dengan bilangan Reynolds sebesar 1.32×10^5 di depan sudu *returning*. Pada studi ini, telah diatur sebuah deflektor dengan 8 posisi berbeda. Nilai CoP tertinggi diperoleh pada angka 0.21 dengan Tip Speed Ratio (TSR) sebesar 0.82. Pada posisi optimum tersebut, didapatkan hasil peningkatan Coefficient of Power (CoP) sebesar 50% dibanding turbin air tanpa deflektor. Adapun posisi deflektor tersebut yaitu pada $X_1 = 152$ mm, $X_2 = 135$ mm, $Y_1 = 55$ mm, dan $\beta = 101$). Dengan posisi optimum ini, juga dilakukan eksperimen pada turbin dua tingkat 0° , dua tingkat 90° , dan juga 3 tingkat, dengan hasil masing-masing percobaan Coefficient of Power (CoP) meningkat sebesar 42%, 31%, dan 17%.

Studi experimental oleh (Salleh, et al., 2020) dilakukan untuk menguji performa daya turbin angin Savonius 2 sudu dengan adanya 2 deflektor di depan sudu *advancing* dan sudu *returning* pada variasi rasio perbandingan jarak deflektor terhadap jari-jari turbin. Pada deflektor sudu *advancing* diberikan variasi rasio perbandingan jarak deflektor terhadap jari-jari turbin (X_A/R) sebesar 0.00, -0.25, -0.50. Sedangkan pada deflektor sudu *returning* diberikan variasi rasio Perbandingan jarak deflektor terhadap jari-jari turbin (X_R/R) sebesar -1.204, -1.454, -1.704. Adapun posisi deflektor pada sudut *advancing blade* memiliki sudut sebesar 30° dan deflektor pada *returning blade* memiliki sudut 90° terhadap arah aliran angin. Maka terdapat sembilan jenis variasi kombinasi posisi dari variabel yang telah disebutkan. Dari beberapa kombinasi tersebut, didapatkan salah satu angka performance improvement tertinggi yaitu pada kombinasi dengan $X_A/R = -0.50$ dan $X_R/R = -1.204$. Selain persentase performance improvement tertinggi, pada posisi ini juga didapat nilai *coefficient of power* (CoP) tertinggi yaitu 0.26, dan nilai *coefficient of torque* (CT) tertinggi yaitu 0.28. Masih dengan konfigurasi X_A/R dan X_R/R yang sama, Salleh melanjutkan studi eksperimental dengan X_A/R dan X_R/R yang sama namun menggunakan variasi sudut deflektor yang berbeda. Variasi sudut yang digunakan yaitu dari 15° - 105° dengan kenaikan interval sebesar 15° . Dengan adanya 7 sudut yang berbeda, maka didapatkan konfigurasi sebanyak 30 variasi. Kecepatan angin yang digunakan yaitu sebesar 7 m/s. Hasil paling optimal yang didapat yaitu pada konfigurasi ke-11 dengan kemiringan deflektor sudu *advancing* sebesar 30° dan kemiringan deflektor sudu *returning* 90° , dengan persentase performance improvement sebesar 61.53%, *coefficient of power* (CoP) senilai 0.2, dan nilai *coefficient of torque* (CT) senilai 0.24.

Adapun penelitian numerik yang dilakukan oleh Mohamed et al (2021) bertujuan menemukan posisi optimal deflektor yang diletakkan di depan sudu *advancing* dan *returning*. Deflektor yang digunakan berupa plat datar dengan jarak yang diukur dari sumbu yang berpusat di poros turbin. Dengan menggunakan teknik optimasi *in-house library* yang disebut OPAL dan dihubungkan dengan CFD. Dari optimasi tersebut diperoleh sudut optimal untuk deflektor *advancing* sebesar $105,6^\circ$ dan dengan sudut deflektor *returning* sebesar $68,1^\circ$. Hasil optimisasi

otomatis ini meningkatkan efisiensi turbin sebesar 35%. Peningkatan ini tidak lepas dari peran deflektor yang berada pada posisi optimalnya sehingga dapat mengarahkan angin menuju *advancing blade*. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Tian et al (2022) yang mengamati perubahan kinerja turbin angin savonius dengan penambahan deflektor pasif pada sisi *upstream* dan *downstream* turbin. Pada sisi *upstream* deflektor diletakkan di depan sudu *returning* dan pada sisi *downstream*, deflektor diletakkan dengan posisi sejajar arah aliran angin. Penggunaan metode CFD dan validasi dengan data empirik yang sudah ada, menghasilkan maksimum efisiensi yang meningkat sebesar 24,91%. Hal ini tentunya atas adanya modifikasi berupa deflektor pasif.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, terlihat bahwa penelitian terkait posisi sudut untuk dua deflektor masih belum banyak dilakukan. Padahal, dengan variasi posisi derajat kemiringan deflektor dapat mempengaruhi kondisi aliran fluida disekitar turbin yang akan berdampak kepada kinerja turbin Savonius. Maka dari itu, perlu dilakukan penelitian yang berfokus pada kenaikan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan deflektor dedepan sudu *returning* dan di samping sudu *advancing*. Adapun dimensi deflektor yang digunakan yaitu dengan tinggi 735 mm, lebar (l) 325 mm dan ketebalan deflektor sebesar 3 mm. Posisi sudut β pada deflektor yang berada didepan sudu *returning* diatur pada sudut 0° . Sedangkan untuk posisi sudut α pada deflektor yang mengarahkan aliran menuju sudu *advancing* akan memiliki variasi sudut sebesar 0° , 10° , 20° , 30° , 45° terhadap sumbu yang tegak lurus arah aliran angin, dan variasi lainnya yaitu kecepatan angin (U) sebesar 5 dan 7 m/s.

1.2 Rumusan Masalah

Geometri rotor turbin angin Savonius terdiri atas sudu *advancing* dan sudu *returning*. Sudu *advancing* merupakan sudu dengan sisi cekung menghadap ke arah datangnya angin, sedangkan sudu *returning* merupakan sudu dengan sisi cembung menghadap ke arah datangnya angin. Prinsip kerja turbin ini berdasarkan pada perbedaan gaya drag pada sudu *advancing* dan *returning*. Semakin besar selisih gaya drag pada kedua sudu tersebut maka kinerja turbin akan meningkat. Kinerja turbin angin ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan gaya drag pada sudu *advancing* dan/atau menurunkan gaya drag pada sudu *returning*. Pada penelitian ini, dilakukan upaya peningkatan gaya drag pada sudu *advancing* dan menurunkan gaya drag pada sudu *returning* dengan pemasangan dua deflektor. Deflektor pertama akan diletakkan didekat sudu *advancing* dengan kemiringan 0° , 10° , 20° , 30° , 45° terhadap sumbu yang tegak lurus dengan arah aliran angin. Deflektor ini berperan untuk mengarahkan angin tepat menuju sudu *advancing*. Deflektor kedua akan diletakkan didepan sudu *returning* tanpa sudut kemiringan, yaitu 0° terhadap sumbu yang tegak lurus dengan arah aliran angin. Peran deflektor ini yaitu untuk menghambat aliran angin yang menuju sudu *returning*. Hal tersebut akan menimbulkan selisih gaya *drag* yang cukup besar, sehingga daya turbin juga meningkat. Adapun hipotesis awal yang dinyatakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Instalasi dua deflektor ini diduga akan meningkatkan *Coefficient of Power* (CoP), *Coefficient of Moment* (CM), dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) turbin Savonius. Hal tersebut dapat terjadi karena kedua deflektor tersebut akan memfokuskan aliran angin menuju sudu *advancing* dan menghambat aliran angin mengenai sudu *returning*. Pada deflektor yang memiliki kemiringan sebesar α menuju sudu *advancing*, aliran angin akan diarahkan menuju sudu *advancing* dan memperbesar jumlah aliran massa angin yang mengenai sudu *advancing*. Akibatnya, momentum aliran yang diterima oleh sudu *advancing* semakin besar, sehingga gaya *drag* juga semakin besar. Pada deflektor kedua yang memiliki kemiringan sebesar β di depan sudu *returning*, aliran angin akan dihambat untuk mengenai sudu *returning*. Hal tersebut akan meminimalisir gaya *drag* pada sudu *returning*. Peningkatan gaya *drag* pada sudu *advancing* dan penurunan gaya *drag* pada sudu *returning* dapat menyebabkan peningkatan selisih gaya antara sudu *advancing* dan

- sudu *returning*, sehingga torsi positif turbin akan meningkat. Torsi yang semakin besar akan berpengaruh pada kenaikan nilai CoP, C_M , dan juga C_{TS} turbin Savonius
2. Hipotesa kedua, yaitu pengaruh variasi sudut α (0° , 10° , 20° , 30° , 45°) terhadap kinerja turbin angin Savonius. Semakin tinggi nilai CoP, C_M , dan C_{TS} , maka semakin baik pula kinerja turbin. Ketiganya dipengaruhi secara linear oleh torsi positif turbin, sehingga torsi pada sudu *advancing* tersebut harus ditingkatkan. Apabila α terlalu kecil, aliran angin yang diarahkan oleh deflektor akan menghalangi aliran utama, sehingga momentum yang diterima oleh sudu *advancing* kecil dan gaya *drag* yang bekerja pada sudu *advancing* menurun. Sebaliknya, apabila sudut α terlalu besar, deflektor cenderung mengarahkan angin ke sisi luar sudu *advancing*, sehingga pada sudu *advancing* tidak ada peningkatan momentum. Studi ekperimental ini dilakukan untuk mendapatkan nilai sudut α yang optimum sehingga menghasilkan kinerja turbin yang maksimum.
 3. Hipotesa ketiga, Adanya peningkatan kecepatan angin diduga akan memberi pengaruh terhadap kinerja turbin Savonius. Dengan asumsi efisiensi turbin memiliki nilai yang sama, maka energi yang akan dibangkitkan oleh turbin akan lebih besar hingga mencapai nilai maksimumnya. Hal ini memiliki arti bahwa nilai torsi positif turbin juga akan meningkat dan berpengaruh pada kenaikan performa turbin Savonius. Namun apabila peningkatan kecepatan angin terus ditingkatkan maka kinerja turbin angin justru diduga akan mengalami penurunan. Hal ini dapat terjadi karena semakin besar kerugian mekanis yang terjadi serta terjadinya efek *solid wall*.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, digunakan beberapa batasan masalah agar hasil yang didapatkan sesuai dengan yang diharapkan, pembahasan penelitian lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan penelitian. Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa dilakukan pada aliran eksternal flow menggunakan aliran satu arah.
2. Aliran yang mengalir merupakan udara dengan kondisi *steady flow*, *incompressible flow*, dan *uniform flow* pada sisi upstream.
3. Analisa dilakukan pada kondisi adiabatik dengan menggunakan aliran dua dimensi.
4. Perpindahan panas yang terjadi diabaikan.
5. Analisa dilakukan dengan variasi kecepatan angin (U) sebesar 5 m/s dan 7 m/s.
6. Analisa dilakukan dengan variasi kemiringan deflektor dengan α sebesar 0° , 10° , 20° , 30° , 45° dan kemiringan β sebesar 0° terhadap sumbu yang tegak lurus arah aliran angin.
7. Analisa dilakukan dengan deflektor berukuran lebar (l) 325 mm dan tinggi (h) 735 mm.

1.4 Tujuan

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut deflektor di depan sudu *advancing* dan sudu *returning* terhadap kinerja turbin angin Savonius dengan variasi kecepatan angin (U) sebesar 5 dan 7 m/s. Adapun untuk mencapai tujuan tersebut, langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh penambahan deflektor di depan sudu *advancing* dan *returning* terhadap kinerja turbin angin Savonius
2. Mengetahui pengaruh perubahan sudut deflektor di depan sudu *advancing* dan *returning* terhadap kinerja turbin angin Savonius
3. Mengetahui pengaruh perubahan kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin Savonius

1.5 Manfaat

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi energi terbarukan yang menggunakan energi angin sebagai sumber energi bersih.
2. Dapat memberikan penjelasan dan data tambahan mengenai pengaruh penambahan dua deflektor di depan sudu advancing dan sudu returning terhadap *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan *coefficient of static torque* (C_{TS}).
3. Memberikan penjelasan dan data tambahan terkait pengaruh sudut deflektor di depan sudu advancing dan sudu returning terhadap *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan *coefficient of static torque* (C_{TS}).
4. Memberikan data tambahan mengenai pengaruh variasi kecepatan angin terhadap *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan *coefficient of static torque* (C_{TS}) dengan instalasi deflektor di depan sudu advancing dan sudu returning.
5. Dapat menjadi kepustakaan tambahan untuk penelitian selanjutnya mengenai peningkatan performa turbin angin Savonius.

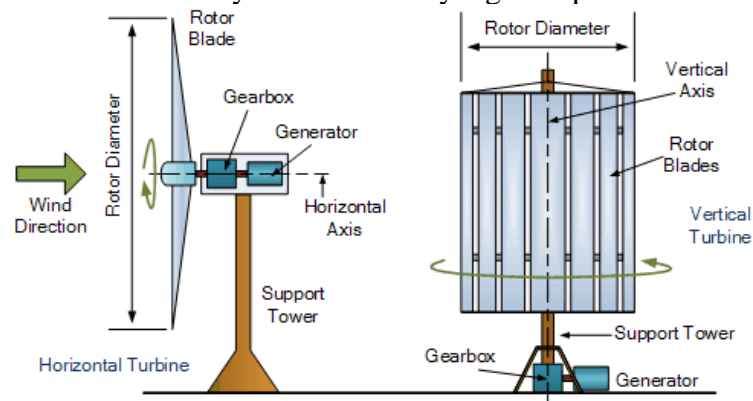
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Abad ke-19 merupakan masa dimana pemahaman manusia tentang energi listrik berkembang dengan pesat. Mulai dari penemuan baterai penyimpanan energi, kereta listrik, telegram, telepon dan lain-lain. Pada abad ini juga, para ilmuwan mulai mengalihkan bakat mereka untuk memanfaatkan energi angin menjadi energi listrik. Adapun pada tahun 1887 telah berhasil dibangun turbin angin pertama untuk membangkitkan energi listrik di Skotlandia dan Perancis yang kemudian diikuti oleh Amerika dan Denmark. Pada tahun tersebut, seorang profesor keteknikan bernama James Blyth mulai mengoperasikan turbin angin yang membangkitkan energi listrik. Turbin tersebut merupakan turbin angin konvensional Eropa yang memiliki empat bilah yang menggunakan layar kain. Blyth menyadari bahwa sangat sulit mengontrol rotor turbin pada angin dengan kecepatan tinggi di Skotlandia. Maka pada tahun 1891, ia berhasil merancang turbin dengan sumbu vertikal setelah anemometer cangkir Robinson baru saja ditemukan. Dengan sengaja memilih perangkat yang menjadi semakin tidak efisien seiring dengan meningkatnya kecepatan angin, dan dengan menjaga mesinnya tetap dalam ukuran yang dapat ia kelola dengan bahan-bahan yang ada, Blyth mampu membangun turbin angin dengan rotor vertikal pertama di dunia (Gipe et al., 2022).

Berdasarkan penemuan James Blyth, turbin angin dapat diklasifikasikan berdasarkan arah orientasi rotornya menjadi dua, yaitu *horizontal axis wind turbine* (HAWT) dan *vertical axis wind turbine* (VAWT). Pada gambar 2.1, terdapat gambar kedua jenis turbin tersebut. Turbin HAWT memiliki poros yang paralel terhadap tanah dan harus mendapatkan aliran angin yang sejajar dengan poros. Dengan memanfaatkan gaya lift yang mengenai sudu turbin, turbin ini banyak digunakan untuk pembangkit listrik karena efisiensinya yang baik. Untuk mendapatkan energi yang besar, maka diperlukan ketinggian turbin yang cukup dan juga *yaw drives* untuk mengarahkan turbin menuju arah datangnya angin. Selain itu komponen konversi energi lainnya juga harus diletakkan pada poros turbin yang berada jauh di atas tanah sehingga proses maintenance akan lebih rumit. Dari beberapa karakteristik tersebut, turbin jenis HAWT memerlukan biaya konstruksi dan biaya maintenance yang cukup besar.



Gambar 2. 1 Jenis Turbin Angin berdasarkan Poros
(Sumber : Hossain, 2019)

Turbin angin VAWT memiliki karakteristik yang sesuai dengan keadaan angin di Indonesia, karena membutuhkan kecepatan angin yang tergolong lebih rendah jika dibandingkan dengan HAWT. Turbin VAWT juga memiliki tingkat *noise* yang rendah, biaya konstruksi yang murah dan juga memiliki kemampuan *self-starting* dengan torsi yang lebih rendah. Turbin ini juga dapat menerima angin dari segala arah dan instalasi konversi energi lainnya dapat ditempatkan di bagian bawah poros pusat di permukaan tanah. Namun, seluruh kemampuan tersebut harus

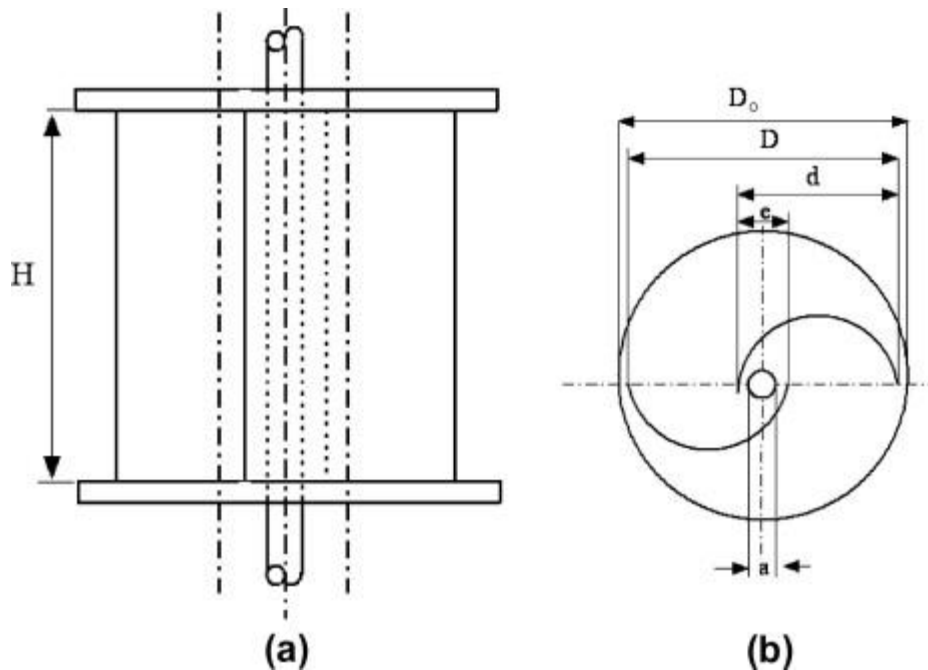
dibayar dengan efisiensi daya pembangkitan yang rendah sehingga diperlukan pengembangan pada turbin VAWT. Adapun contoh VAWT yang terkenal yakni turbin angin Darrieus dan Savonius (Hidayat, 2022).

2.2 Turbin Angin Savonius

Sesuai dengan nama penemunya, turbin angin Savonius ditemukan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Dalam desain aslinya, turbin ini dibuat dengan dua bilah setengah silinder yang disusun membentuk huruf 'S', desain ini dapat dilihat dengan mudah pada gambar potongan turbin Savonius pada gambar 2.3. Sudu cembung pada salah satu setengah silinder (sudu *returning*) dan sudu cekung (sudu *advancing*) pada setengah silinder lainnya menghadap angin pada saat yang sama seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Karena koefisien hambatan pada sudu *advancing* lebih besar daripada koefisien hambatan pada sudu *returning*. Perbedaan gaya drag masing-masing sudu tersebut akhirnya menghasilkan torsi dari poros turbin, dimana ketika torsi dikalikan kecepatan putarannya akan menghasilkan daya. Semakin besar selisih gaya drag kedua sudu tersebut maka akan semakin besar pula daya yang akan dihasilkan. Adapun beberapa variasi pengembangan dari turbin savonius yaitu adanya dua set rotor yang ditempatkan pada offset 90° untuk menghaluskan fluktuasi torsi selama pengoperasian. Demikian pula, selain rotor berbentuk silinder, bilah dengan dasar elips juga dicoba untuk meningkatkan efisiensi aerodinamis. Upaya lain untuk meningkatkan kinerja adalah dengan memasang deflektor (Mathew, S. 2012).



Gambar 2. 2 Gambar Turbin Savonius
(Sumber : <https://cults3d.com/>)



Gambar 2. 3 Skema Turbin Angin Savonius (a) Tampak Depan, (b) Tampak Atas
 (Sumber : N.H. Mahmoud et al 2010)

Keuntungan utama dari rotor Savonius adalah kesederhanaannya. Karena tidak diperlukan metode canggih atau keterampilan teknis untuk fabrikasi, bahkan dapat dibuat di bengkel lokal kecil. Hal ini membuatnya menarik untuk diterapkan di negara-negara berkembang. Rotor Savonius memiliki soliditas tinggi dan bekerja pada kecepatan rendah. Kerugian utama dari rotor ini adalah efisiensinya yang rendah.

2.3 Bilangan Reynolds

Seorang insinyur dari Inggris bernama Osborne Reynolds melakukan percobaan untuk mengembangkan bilangan Reynolds pada tahun 1883. Bilangan Reynolds sendiri merupakan bilangan yang tak memiliki dimensi dan dapat merepresentasikan jenis aliran fluida, yaitu laminar, transisi, dan turbulen (Bastian, 2017). Bilangan ini merupakan rasio antara gaya inersia dan gaya viskos suatu aliran yang dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

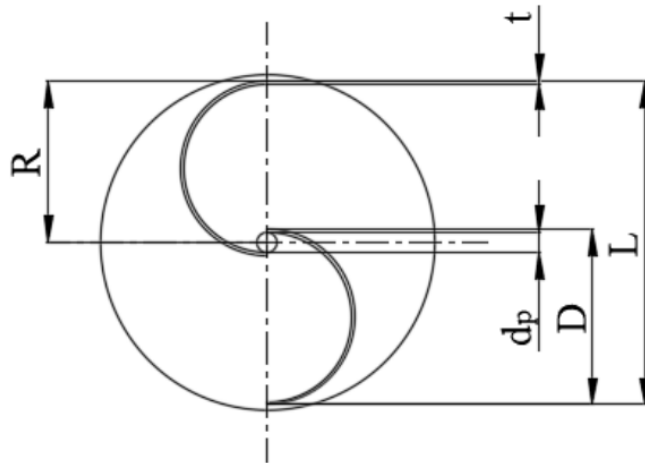
$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viskos}} = \frac{(\rho U^2)L^2}{\left(\frac{\mu U}{L}\right)L^2} = \frac{\rho UL}{\mu} \dots\dots\dots(2.1)$$

$$\text{Gaya Inersia} = P \times A = (\rho U^2)L^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

$$\text{Gaya Viskos} = \tau \times A = \left(\frac{\mu U}{L}\right)L^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana,

- Re : bilangan Reynolds
- ρ : massa jenis fluida (kg/m³)
- U : kecepatan aliran fluida (m/s)
- L : panjang karakteristik aliran (m)
- μ : viskositas dinamik fluida (N.s/m)



Gambar 2. 4 Skema Turbin Angin Savonius

(Sumber : Saputro 2022)

Gambar 2.4 merupakan gambar skema turbin Savonius. Adapun panjang karakteristik turbin dapat dicari dengan persamaan berikut :

$$L = 2D - 2t - d_p \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana,

D : diameter sudu (m)

t : tebal sudu (m)

d_p : diameter poros (m)

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.1 ke dalam persamaan 2.3, maka persamaan Reynolds yang akan digunakan menjadi seperti berikut ini :

$$Re = \frac{\rho U(2D-2t-d_p)}{\mu} \dots \dots \dots (2.5)$$

Maka, didapatkan hubungan antara bilangan Reynolds dengan diameter sudu, tebal sudu dan diameter dari poros turbin.

2.4 Gaya Drag

Apabila ada sebuah benda yang berada pada medan aliran fluida, suatu interaksi antara permukaan benda dengan fluida akan terjadi. Interaksi keduanya berupa gaya yang bekerja pada permukaan benda. Gaya tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk tegangan geser yang disebabkan oleh efek *viscous*. Maka jika, seluruh gaya yang timbul diresultankan, akan diperoleh gaya yang searah terhadap kecepatan *upstream* fluida, yaitu gaya *drag* dan pada arah normal terhadap kecepatan *upstream* yaitu gaya *lift* (Munson et al, 2013). Gaya *drag* terdiri atas *friction drag* akibat tegangan geser dan *pressure drag* akibat gaya tekan pada benda. Nilai keduanya dipengaruhi oleh orientasi permukaan benda. Pada umumnya, dengan nilai viskositas fluida yang bernilai kecil maka *friction drag* tidak berpengaruh besar terhadap gaya *drag*. Resultan dari *friction drag* dan *pressure drag* ini merupakan total *drag*. Secara umum, gaya *drag* dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

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

Dimana,

F_D : gaya drag (N)

ρ : massa jenis fluida (kg/m³)

U : kecepatan aliran fluida (m/s)

C_D : koefisien drag

A : luas permukaan yang terkena aliran fluida (m²)

Adapun koefisien drag (C_D) yang merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang nilainya diperoleh melalui eksperimen merupakan fungsi dari bilangan Reynolds. Koefisien drag menunjukkan besarnya gaya hambat yang dialami oleh suatu benda yang bergerak melalui fluida. Secara matematis, koefisien drag ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \dots \dots \dots (2.7)$$

Besar nilai koefisien drag dipengaruhi oleh geometri benda serta sifat fluida. Dari pernyataan tersebut, maka setiap benda memiliki besar nilai koefisien drag yang berbeda-beda, tergantung dari dimensi permukaan benda yang bergesekan dengan aliran fluida. Berikut merupakan nilai koefisien drag pada beberapa bentuk penampang benda yang disajikan pada tabel 2.1 sebagai berikut :

Tabel 2. 1 *Coefficient of Drag* pada beberapa bentuk benda ($Re \geq 10^3$)

(Fox, et al., 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

2.5 Perhitungan Daya

2.5.1 Daya Teoritis

Untuk memperkirakan daya yang dapat dibangkitkan oleh suatu mesin konversi energi seperti sebuah turbin angin, diperlukan daya yang menunjukkan besarnya energi kinetik yang dihasilkan oleh angin per satuan waktu dan kemudian akan dikonversi. Daya ini biasa disebut daya teoritis yang mana bisa terjadi ketika efisiensi turbin mencapai titik

tertingginya, yaitu 100% (Talles, 2006). Daya angin merupakan energi yang dimiliki oleh angin per satuan waktu yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_t = \frac{E_K}{t} \dots\dots\dots(2.13)$$

Adapun energi kinetik yang dimiliki angin dapat diuraikan dalam persamaan berikut:

$$P_t = \frac{E_K}{t} = \frac{\frac{1}{2}m.U^2}{t} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dari persamaan 2.14, terdapat variabel yang dapat diuraikan lagi, yaitu aliran massa angin. Massa udara m yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ bisa didefinisikan oleh persamaan 2.15.

$$\dot{m} = \rho.U.A \dots\dots\dots(2.15)$$

Sehingga, apabila kita substitusikan persamaan 2.15 dengan persamaan 2.14, akan diperoleh persamaan 2.14 berikut ini:

$$P_t = \frac{1}{2}.\rho.A.U^3 \dots\dots\dots(2.16)$$

Luasan penampang (A) pada persamaan 2.16 diatas merupakan luas penampang turbin angin Savonius. Luas penampang tersebut dapat didefinisikan dengan menggunakan informasi mengenai L pada sub bab 2.4, seperti berikut:

$$A = L \times H = (2D - 2t - d_p).H \dots\dots\dots(2.17)$$

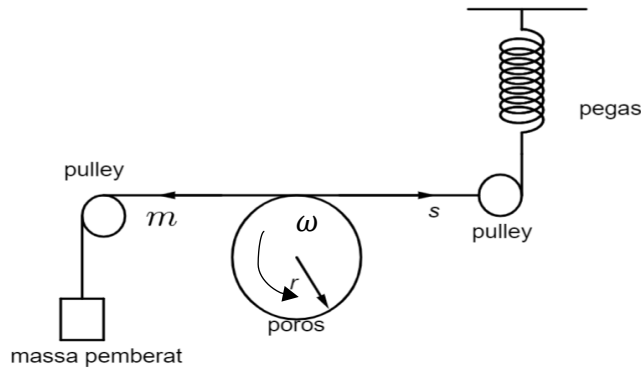
Dimana,

- P_t : daya teoritis angin (W)
- E_K : energi kinetik (J)
- t : waktu (s)
- m : massa udara (kg)
- \dot{m} : massa udara per satuan waktu (kg/s)
- ρ : massa jenis udara (kg/m³)
- U : kecepatan aliran udara (m/s)
- A : luas penampang yang terkena angin (m²)
- L : panjang karakteristik (m)
- H : tinggi turbin angin Savonius (m)

Maka akan diperoleh persamaan yang menjelaskan hubungan daya teoritis turbin dengan massa jenis angin, kecepatan angin dan dimensi dari rotor turbin Savonius.

2.5.2 Daya Aktual

Pada kenyataannya, tidak seluruh energi kinetik angin dapat dikonversi oleh turbin angin menjadi energi mekanik. Hal ini tentu saja disebabkan oleh efisiensi turbin yang tidak sempurna dan juga terjadi *losses* pada saat proses transisi energi dan lain lain. Untuk mengetahui kinerja dari turbin, daya aktual yang telah dikonversi oleh turbin perlu diketahui besarnya dengan menggunakan data torsi dinamis dan kecepatan putaran turbin. Keduanya diperoleh dengan menggunakan alat ukur, yaitu *brake dynamometer* dan *tachometer* (Talles, 2006). Dengan menggunakan skema *brake dynamometer* yang ditunjukkan oleh gambar 2.5, kita dapat memformulasikan persamaan dari daya aktual turbin Savonius.



Gambar 2. 5 Skema Brake Dynamometer
(Sumber : Dokumen Pribadi)

Daya aktual turbin dapat dihitung, dengan mengalikan torsi dinamis dengan kecepatan putaran turbin, sehingga didapat perumusan daya aktual sebagai berikut:

$$P_a = T_d \cdot \omega \dots \dots \dots (2.18)$$

$$P_a = (m - s) \cdot g \cdot r \cdot \frac{\pi n}{30} \dots \dots \dots (2.19)$$

Dimana,

P_a : daya aktual turbin (W)

T_d : torsi dinamis (Nm)

ω : kecepatan rotasi rotor (rad/s)

n : kecepatan putar turbin yang diukur dengan *tachometer* (rpm)

m : massa pemberat (kg)

s : massa yang terbaca oleh pegas (kg)

g : percepatan gravitasi (m/s²)

r : jari-jari poros turbin (m)

2.6 Perhitungan Torsi

Menurut (Halliday, et al., 2010), Torsi dapat diartikan sebagai sebuah aksi memutar atau *twisting* yang terjadi pada sebuah *body* pada suatu sumbu rotasi tertentu dikarenakan adanya sebuah gaya. Torsi juga dapat didefinisikan sebagai besaran gaya yang dapat menyebabkan suatu benda dapat berputar terhadap suatu sumbu putar. Pada sebuah turbin angin, torsi dapat diklasifikasikan berdasarkan pergerakan turbin. Pada saat turbin bergerak dan sedang diam, keduanya memiliki jenis torsi yang berbeda apabila dikenai aliran angin. Jenis torsi yang dimaksud yaitu torsi statis dan torsi dinamis. Adapun cara untuk menentukan besar keduanya dapat melalui persamaan atau menggunakan alat ukur.

2.6.1 Perhitungan Torsi Statis

Torsi statis adalah torsi yang terjadi pada sebuah benda sebelum dan/atau tepat akan bergerak sehingga kecepatan dan akselerasinya bernilai nol (Tong, 2022). Pada umumnya, torsi adalah hasil dari perkalian *cross* antara dua vektor, yaitu gaya yang bekerja dan jarak gaya tersebut terhadap sumbu putar (Halliday et al., 2010). Dalam penelitian ini gaya torsi tersebut merupakan gaya *drag* dan jarak merupakan jari-jari dari turbin sehingga torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T_s = F_D \times R \dots \dots \dots (2.8)$$

Persamaan 2.6 dapat disubsitusikan ke dalam persamaan 2.8, sehingga persamaan torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot C_D \cdot A \cdot R \dots \dots \dots (2.9)$$

Dimana,

T_s : torsi statis poros (N.m)

F_D : gaya drag (N)
 R : jari-jari turbin (m)

2.6.2 Perhitungan Torsi Dinamis

Torsi dinamis merumakan besar torsi yang dihasilkan saat poros memiliki kecepatan tertentu yang disertai dengan adanya pembebanan. Torsi ini berkaitan dengan adanya percepatan atau perlambatan sesuai dengan Hukum II Newton (Tong, 2022). Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis diperlukan alat ukur, yaitu *brake dynamometer*. Alat tersebut akan dihubungkan dengan poros turbin melalui suatu tali. Namun, *brake dynamometer* tidak dapat menampilkan nilai torsi dinamsi secara langsung. Adapun angka yang ditampilkan merupakan hasil pengukuran massa pemberat yang digunakan. Skema *brake dynamometer* dapat dilihat pada gambar 2.5..

Berdasarkan free body diagram yang tertera pada Gambar 2.5, apabila diasumsikan gaya yang mengakibatkan disk yang berotasi *counter clockwise* adalah positif maka nilai torsi dinamis dari turbin angin Savonius dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$T_d = F \times r \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana, besar gaya yang bekerja pada poros turbin yaitu :

$$F = (m - s)g \dots\dots\dots(2.11)$$

Maka persamaan 2.11 dapat disubstitusikan ke persamaan 2.1 menjadi sebagai berikut :

$$T_d = (m - s)gr \dots\dots\dots(2.12)$$

T_d : torsi dinamis turbin Savonius (N.m)
 m : massa pemberat (kg)
 s : massa yang terbaca oleh pegas (kg)
 g : percepatan gravitasi (m/s^2)
 r : jari-jari poros turbin (m)

Maka, dari persamaan 2.12 diatas, dapat dilihat hubungan antara torsi dinamis dengan massa pemberat dan juga nilai yang ditunjukkan oleh *brake dynamometer*.

2.7 Tip Speed Ratio (TSR)

Untuk memanfaatkan energi angin dengan efisien, maka rotor turbin harus memiliki kecepatan putaran yang sesuai dengan ukuran (diameter) rotor dan kecepatan angin atau dengan kata lain rotor turbin harus memiliki *Tip speed ratio* (TSR) yang sesuai. *Tip speed ratio* (TSR) merupakan rasio antara kecepatan putar pada ujung sudu dengan kecepatan angin. Sehingga, nilai TSR bergantung pada kecepatan putar, jari-jari turbin, dan kecepatan aliran angin. TSR dapat dicari dengan persamaan berikut:

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

Dimana,
 λ : *tip speed ratio*
 ω : kecepatan putaran turbin (rad/s)
 R : jari-jari turbin (m)
 U : kecepatan aliran angin (m/s)

TSR juga dipengaruhi oleh jumlah sudu pada rotor, apabila jumlah sudu semakin sedikit maka *tip speed ratio* akan semakin tinggi. Namun, pada penelitian ini, digunakan turbin dengan jumlah sudu yang sama sehingga tidak diperlukan variasi TSR karena jumlah sudu (Wizelius, 2015).

2.8 Coefficient of Power (CoP)

Coefficient of Power (CoP) dapat didefinisikan sebagai kemampuan turbin dalam mengekstrak energi yang ada pada aliran angin. CoP sendiri merupakan rasio antara daya aktual

turbin dengan daya angin yang tersedia. CoP atau yang biasa juga disebut efisiensi, menunjukkan kinerja dari turbin angin. Semakin tinggi nilai CoP, semakin tinggi pula energi yang di-generate oleh turbin (Jamdade et al., 2013). Adapun persamaan 2.21 berikut ini dapat digunakan untuk mendapatkan besar nilai CoP :

$$CoP = \frac{P_a}{P_t} \dots \dots \dots (2.21)$$

Dimana,

CoP : *Coefficient of Power*

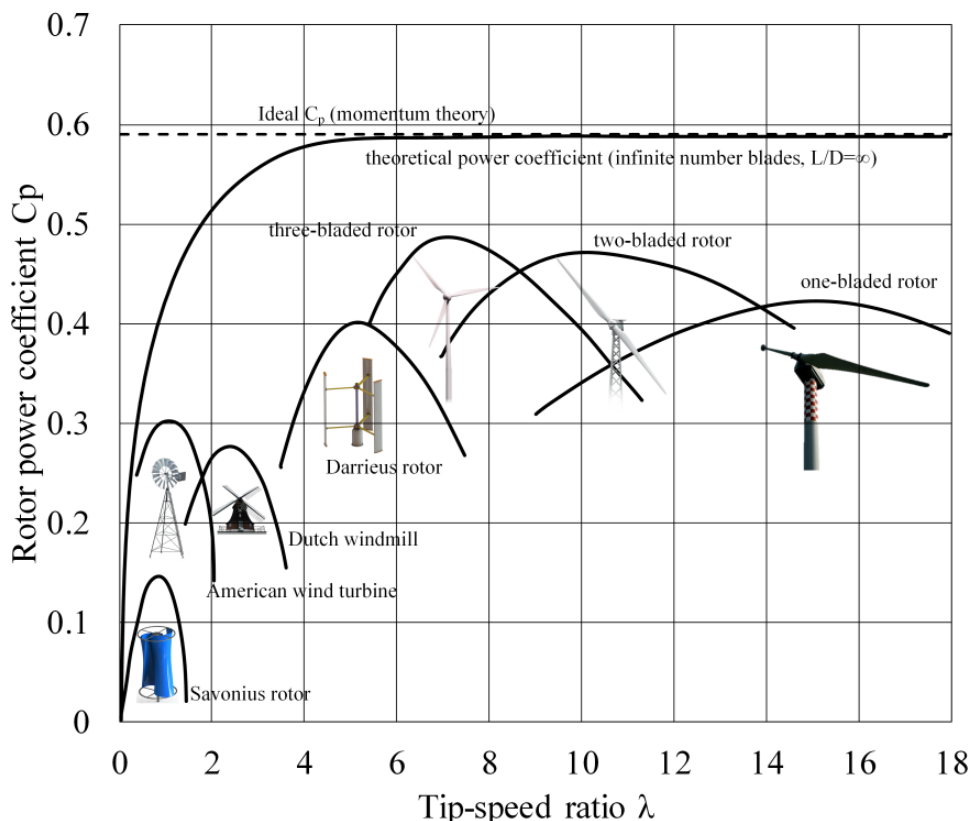
P_a : daya aktual turbin Savonius (W)

P_t : daya teoritis angin (W)

Untuk mendapatkan persamaan dengan hubungan antara parameter yang lebih detail, maka persamaan 2.16 dan 2.19 dapat disubstitusikan dengan persamaan 2.21.

2.9 Batas Betz (*Betz Limit*)

Turbin angin tidak bisa mengambil seluruh energi yang tersedia dalam aliran angin, hal ini dapat terjadi karena pada kenyataannya turbin itu sendiri memengaruhi medan aliran. Selain itu kelemahan dalam desain teknologi juga dapat menyebabkan adanya fenomena nilai batas efisiensi. Pada tahun 1919, seorang ahli aerodinamika asal Jerman bernama Albert Betz yang menemukan nilai *Coefficient of Power* atau efisiensi maksimum untuk turbin angin bernilai 0,593 (59,3%). Nilai ini menunjukkan bahwa tidak ada turbin angin yang dapat mengonversi energi kinetik angin menjadi energi mekanik (*shaft power*) dengan efisiensi melampaui 59,3% (Dinçer, 2023). Adapun hubungan antara *Coefficient of Power* (CoP) dan juga *Tip speed ratio* (TSR) dapat dilihat dari gambar 2.6 berikut ini:



Gambar 2. 6 Grafik *Coefficient of Power* terhadap *Tip speed ratio* pada Beberapa Turbin Angin (Palomo : 2019)

Gambar 2.6 tersebut menunjukkan hubungan antara CoP dan TSR pada berbagai jenis turbin angin. Nilai TSR akan berpengaruh pada CoP untuk setiap turbin angin yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Setiap turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda sehingga kondisi optimum nya juga berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa tidak ada jenis turbin angin yang memiliki efisiensi melampaui batas Betz tersebut.

Batas Betz menjelaskan bahwa energi kinetik yang dimiliki angin tidak dapat dikonversi secara maksimal oleh turbin karena angin harus memiliki sisa energi untuk dapat mengalir melewati sudu turbin sehingga terdapat aliran angin baru yang akan mengisi sudu turbin. Hal ini juga tentu berbeda jika turbin mengonversi secara penuh energi kinetik angin, dimana angin tersebut akan berhenti bergerak, sehingga menghalangi aliran angin berikutnya untuk mencapai sudu turbin. Betz Limit menunjukkan bahwa turbin harus menyisakan sebagian energi kinetik angin tetap ada untuk memastikan aliran udara yang berkelanjutan.

2.10 Coefficient of Moment (C_m)

Coefficient of Moment (C_m) merupakan suatu besaran tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara nilai torsi yang dihasilkan rotor dengan torsi teoritis angin. Nilai ini didapat pada saat turbin dalam kondisi berputar, seperti pada Persamaan sebagai berikut :

$$C_m = \frac{T_d}{T_t} = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \rho U^2 A R} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana,

C_m : *Coefficient of Moment*

T_d : torsi dinamis turbin angin Savonius (N.m)

T_t : torsi teoritis turbin angin Savonius (N.m)

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

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

A : frontal area (m^2)

U : kecepatan aliran fluida (m/s)

Adapun hubungan antara C_m , CoP, dan juga TSR dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$$\frac{C_{oP}}{C_m} = \lambda = \frac{\omega R}{U} \dots \dots \dots (2.23)$$

Persamaan ini diperoleh dengan menguraikan nilai torsi dinamis persamaan 2.22 dengan persamaan 2.12.

2.11 Coeffisien of Static Torque (C_{TS})

Coefficient of static torque adalah rasio antara torsi actual yang dihasilkan oleh turbin pada posisi statis terhadap torsi yang dapat dihasilkan oleh angin. Koefisien ini dapat digunakan untuk mengetahui performa self-starting turbin (Shamsudin, et al., 2023). *Coefficient of static torque* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$C_{TS} = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \rho A R U^2} \dots \dots \dots (2.24)$$

Dimana,

C_{TS} : *Coefficient of static torque*

T_s : torsi statis turbin angin Savonius (Nm)

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

ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)

A : frontal area (m^2)

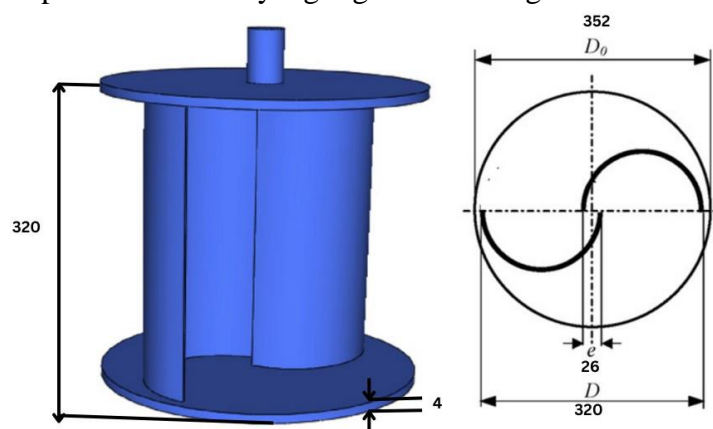
U : kecepatan aliran fluida (m/s)

Koefisien tak berdimensi ini penting untuk menjadi parameter terhadap kemampuan turbin untuk berputar meski tanpa diberi gaya eksternal.

2.12 Penelitian Terdahulu

2.12.1 The Use of a Curtain Design to Increase the Performance Level of a Savonius Wind Rotors (Altan et. al., 2010)

Sebuah studi eksperimental yang dilakukan Altan, et al. dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan *curtaining* atau tirai untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius. Penambahan *curtain* ini diletakkan di depan sudu *advancing* dan *returning* yang berfungsi untuk menghambat aliran untuk mengenai sudu *returning* dan mengarahkan aliran ke sudu *returning*. Adapun parameter yang divariasikan yaitu geometri *curtain* dan sudut kemiringan curtain terhadap sumbu yang tegak lurus arah aliran angin. Karena performa turbin Savonius lebih baik pada saat kecepatan angin yang rendah, maka eksperimen dilakukan pada kecepatan angin rata-rata sekitar 7 m/s ($Re = 1.5 \times 10^5$). Adapun desain rotor yang digunakan sebagai berikut :



Gambar 2. 7 Geometri Turbin Angin Savonius Oleh Altan, et al.

(Sumber : Altan, et al., 2010)

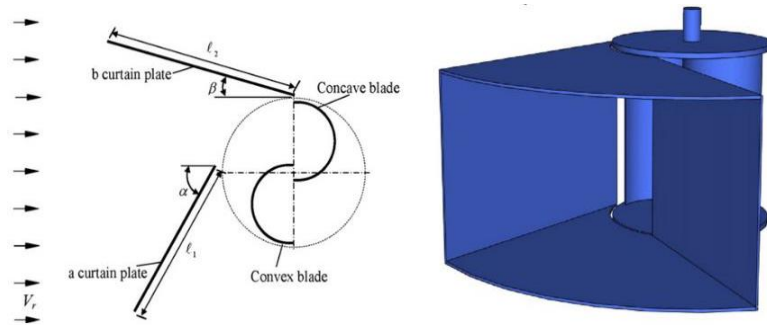
Gambar 2.7 merupakan gambar geomtri beserta ukuran dari turbin Savonius yang digunakan pada peneliatian Altan et al. Plat yang digunakan untuk membuat rotor Savonius sendiri memiliki ketebalan 2 mm. Penelitian dilakukan dengan tiga variasi geometri *curtain*.

Tabel 2. 2 Variasi Geometri *Curtain*

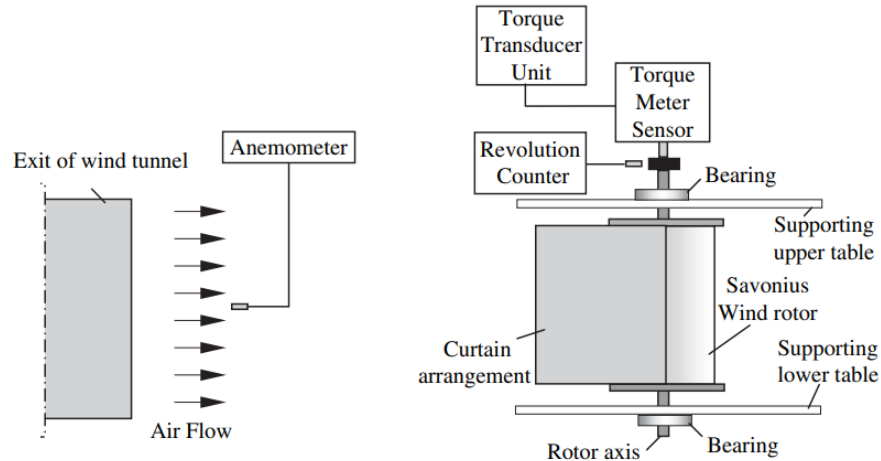
(Sumber : Altan, et al., 2010)

<i>Curtain</i> ke-	ℓ_1 (cm)	ℓ_2 (cm)
1	45	52
2	34	39
3	22	26

Dapat dilihat pada tabel 2.2 yang berisi konfigurasi dari ukuran curtain yang digunakan oleh Altan et al. bahwa, geometri *curtain* semakin mengecil menuju variasi terakhir. Adapun interval reduksi ukuran dari *curtain* 1 ke *curtain* 2 sebesar 25% dan seterusnya. Desain curtain yang digunakan pada penelitian ini juga menambahkan plat pada bagian atas dan bawah untuk menjaga keseimbangan, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.8 di bawah ini :



Gambar 2. 8 Skema Curtain dan Rotor Savonius oleh Altan, et al.
(Sumber : Altan, et al., 2009)



Gambar 2. 9 Skema dari Set up Penelitian oleh Altan, et al.
(Sumber : Altan, et al., 2010)

Adapun set up dari peralatan yang digunakan, dapat dilihat pada gambar 2.9. Untuk mengetahui hubungan antara parameter yang divariasikan, penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan. Pada tabel 2.3 dibawah ini terdapat tahapan penelitian beserta paramater dan hasil yang diperoleh oleh Altan et al sebagai berikut :

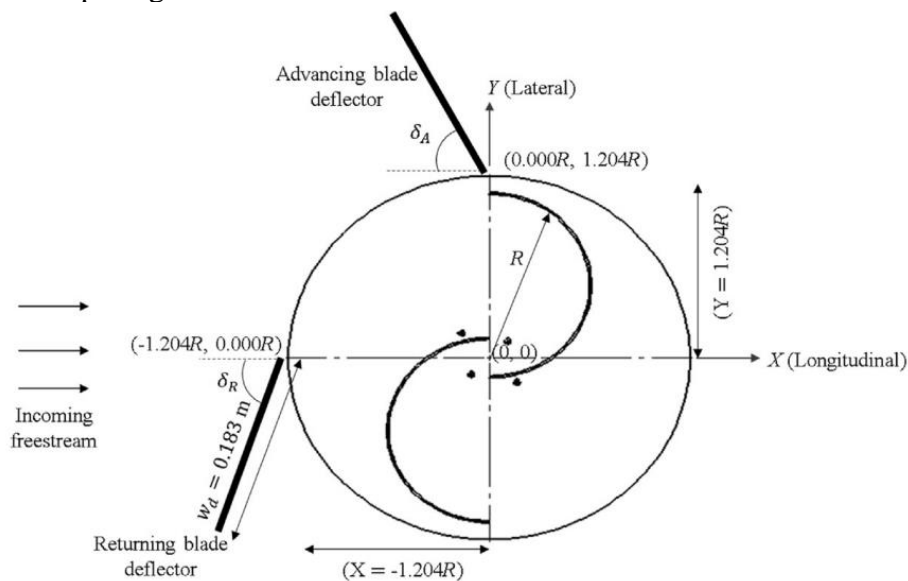
Tabel 2. 3 Tahapan Penelitian dan Hasil
(Sumber : Altan, et al., 2010)

Tahap	Parameter	Hasil
1	Tanpa <i>curtain</i> dan posisi rotor θ (45° , 60° dan 90°)	Nilai torsi statis tertinggi diperoleh pada posisi rotor 45°
2	Geometri <i>curtain</i> (1,2 dan 3), posisi rotor θ (45° , 60° dan 90°), nilai α (30° - 60° dengan interval kenaikan 5°) dan sudut β (10° dan 15°)	Nilai torsi statis tertinggi diperoleh pada konfigurasi <i>curtain</i> 1, $\theta = 60^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, dan $\beta = 15^\circ$
3	Geometri <i>curtain</i> (1,2 dan 3) dengan sudut $\alpha = 45^\circ$, dan $\beta = 15^\circ$	Daya maksimum pada <i>curtain</i> 1
4	Tanpa <i>curtain</i> dan <i>curtain</i> 1 dengan sudut $\alpha = 45^\circ$, dan $\beta = 15^\circ$	CoP pada penggunaan <i>curtain</i> 1 meningkat hampir 2 kali lipat dibandingkan percobaan <i>curtainless</i> .

Dari tabel di atas, setelah dilakukan empat tahap studi, diperoleh beberapa parameter paling optimal untuk meningkatkan efisiensi, yaitu jenis *curtain* 1 sudut $\alpha = 45^\circ$, dan $\beta = 15^\circ$.

2.12.2 Experimental Investigation on The Effects of Deflector Angles on The Power Performance of a Savonius Turbine for Hydrokinetic Applications in Small Rivers (Salleh et. al., 2022)

Salleh, et al., pada tahun 2022 telah melakukan studi eksperimental untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius dengan menambahkan dua deflektor pada sudu *advancing* dan *returning*. Percobaan dilakukan dengan *wind tunnel* pada kecepatan 7 m/s atau setara dengan 0,4 m/s aliran air yang memiliki bilangan Reynold sebesar 148.000. Percobaan ini dilakukan dengan memvariasikan besar sudut deflektor pada kedua sudu. Adapun sudut yang digunakan yaitu δ_A pada sudu *advancing* dan δ_R pada sudu *returning*. Variasi δ_A dimulai dari sudut 15° hingga 75° , sedangkan δ_R memiliki rentang sudut dari 30° sampai 105° , keduanya memiliki interval kenaikan sudut yang sama sebesar dengan interval kenaikan sebesar 15° . Dari banyaknya variasi sudut tersebut, maka diperoleh sebanyak 30 konfigurasi sudut yang akan diamati, konfigurasi mana yang paling optimal meningkatkan efisiensi dari turbin Savonius. Adapun skema deflektor dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah :



Gambar 2. 10 Skema Deflektor pada Penelitian Salleh, et al.

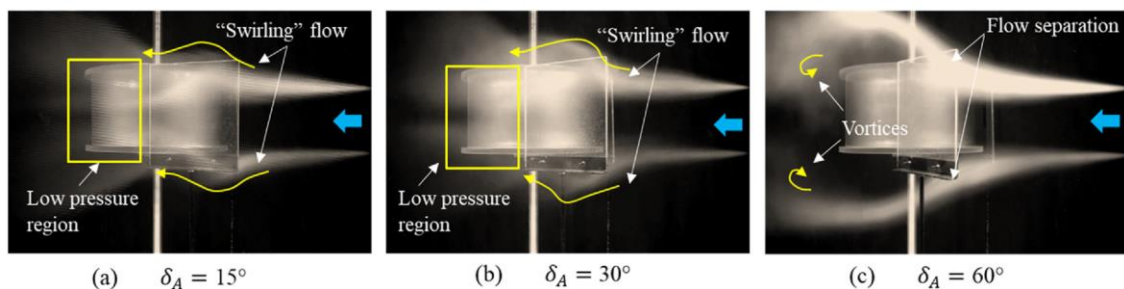
(Sumber : Salleh, et al., 2022)

Ukuran dan jarak deflektor terhadap turbin Savonius tersebut, merupakan nilai yang paling optimal untuk meningkatkan efisiensi turbin. Nilai ini diperoleh berdasarkan studi eksperimental yang telah dilakukan oleh Salleh, et al. pada tahun sebelumnya, yaitu 2020. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan, tercatat bahwa peningkatan efisiensi atau *coefficient of power* tertinggi diperoleh pada konfigurasi ke-11 dengan nilai sebesar 0.21, *coefficient of torque* sebesar 0.24, dan tip speed ratio (TSR) 0.86. Kompilasi data hasil percobaan dapat dilihat pada tabel 2.4 di bawah ini :

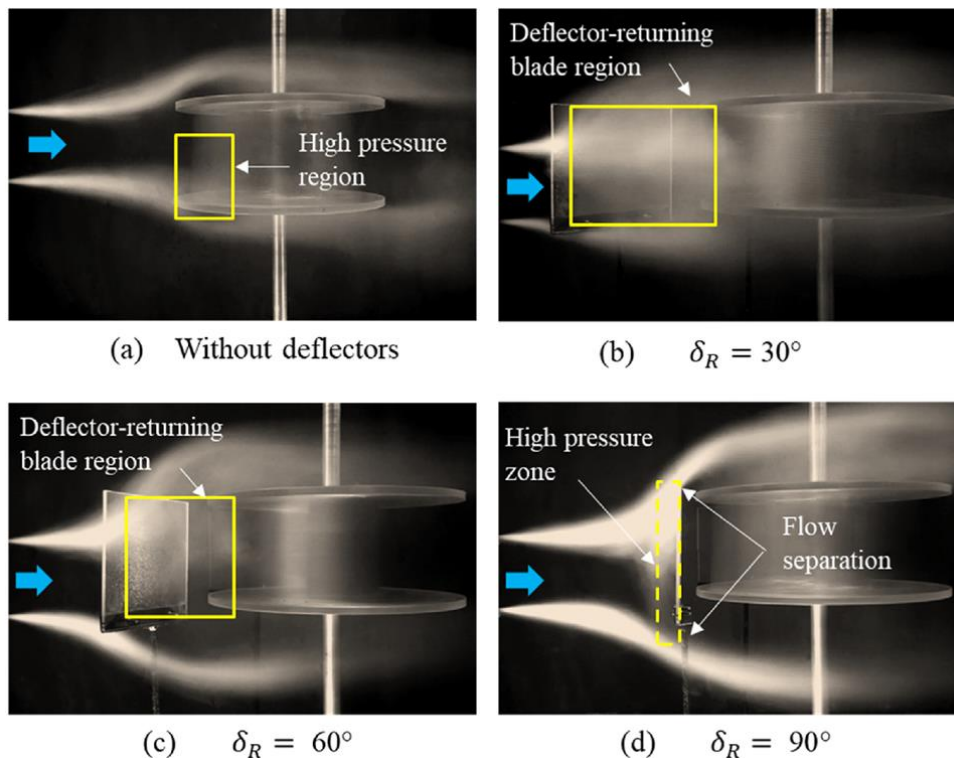
Tabel 2. 4 Data Hasil Percobaan oleh Salleh, et al.

Configuration	Advancing blade deflector angle, δ_A (°)	Returning blade deflector angle, δ_R (°)	Maximum coefficient of power, $C_{P_{max}}$	Coefficient of torque, C_T at $C_{P_{max}}$	Tip speed ratio, λ at $C_{P_{max}}$	Performance improvement with respect to without deflectors (%)
Without deflectors	–	–	0.13	0.16	0.80	–
Confg. 1	15	30	0.07	0.10	0.74	–45.64
Confg. 2	15	45	0.10	0.15	0.68	–21.43
Confg. 3	15	60	0.16	0.19	0.86	24.98
Confg. 4	15	75	0.16	0.24	0.68	26.14
Confg. 5	15	90	0.20	0.30	0.68	54.12
Confg. 6	15	105	0.17	0.22	0.80	33.92
Confg. 7	30	30	0.10	0.14	0.74	–21.74
Confg. 8	30	45	0.10	0.12	0.86	–20.20
Confg. 9	30	60	0.16	0.19	0.86	24.06
Confg. 10	30	75	0.17	0.26	0.68	34.46
Confg. 11	30	90	0.21	0.24	0.86	61.53
Confg. 12	30	105	0.18	0.24	0.74	35.16
Confg. 13	45	30	0.08	0.10	0.74	–41.48
Confg. 14	45	45	0.08	0.11	0.74	–39.86
Confg. 15	45	60	0.12	0.15	0.80	–7.17
Confg. 16	45	75	0.16	0.22	0.74	26.91
Confg. 17	45	90	0.18	0.23	0.80	40.17
Confg. 18	45	105	0.12	0.17	0.68	–10.10
Confg. 19	60	30	0.06	0.10	0.62	–51.27
Confg. 20	60	45	0.08	0.10	0.80	–39.32
Confg. 21	60	60	0.14	0.16	0.86	7.71
Confg. 22	60	75	0.13	0.17	0.80	2.70
Confg. 23	60	90	0.20	0.22	0.92	56.59
Confg. 24	60	105	0.14	0.19	0.74	10.41
Confg. 25	75	30	0.11	0.14	0.80	–15.19
Confg. 26	75	45	0.13	0.16	0.80	–2.70
Confg. 27	75	60	0.14	0.17	0.86	9.56
Confg. 28	75	75	0.17	0.23	0.74	31.84
Confg. 29	75	90	0.18	0.22	0.80	36.55
Confg. 30	75	105	0.14	0.18	0.80	8.02

Tabel 2.4 di atas berisi data hasil percobaan dari Salleh et al dengan 30 konfigurasi percobaan. Konfigurasi ke-11 dapat meraih hasil paling maksimal dikarenakan kedua sudut deflektor yang digunakan sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Pertama, pada sudu *advancing* yang memiliki sudut sebesar 30° , aliran angin akan mengalami pembelokan saat mengenai deflektor sehingga mengarah pada sudu *advancing*. Selain itu, beberapa aliran angin akan pada bagian atas dan bawah deflektor akan menunjukkan pola “*swirling*”. Hal ini dapat terjadi karena orientasi deflektor tidak tegak lurus aliran angin, namun memiliki sedikit kemiringan. Efek ini akan mengalami percepatan saat mereka melintasi *downstream* deflektor. Adanya percepatan ini, memungkinkan peningkatan perbedaan tekanan pada sisi *upstream* dan *downstream*. Daerah bertekanan rendah di bagian *downstream* sudu *advancing* torsi positif pada sudu tersebut yang meningkatkan kecepatan putaran dan torsi bersih positif turbin. Apabila sudut yang digunakan terlalu besar, maka aliran angin akan terbelah menjadi 2 sehingga menyebabkan timbulnya wake di area belakang deflektor yang dapat mendorong turbin berlawanan arah sehingga menghasilkan torsi negatif. Pola aliran diatas dapat dilihat pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2. 11 Flowpattern pada Deflektor Advancing Blade
(Sumber : Salleh, et al., 2022)

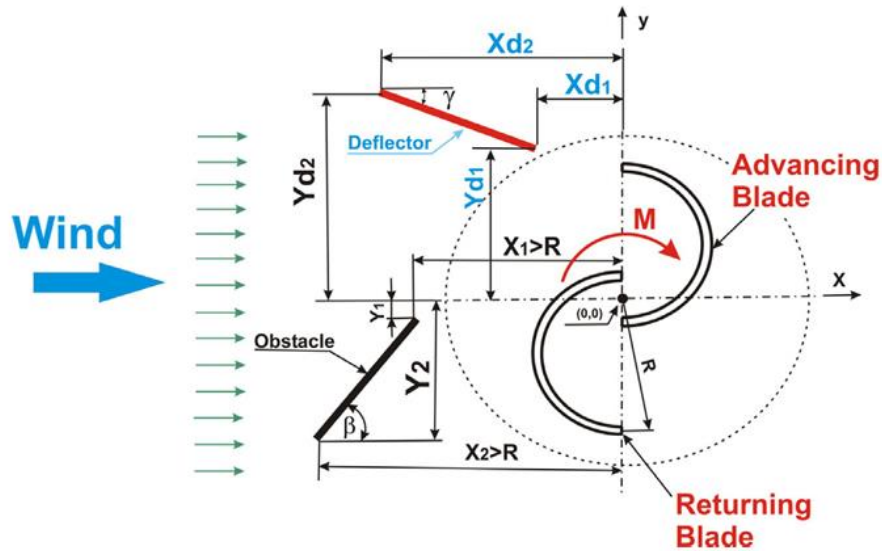


Gambar 2. 12 Flowpattern pada Deflektor Returning Blade
(Sumber : Salleh, et al., 2022)

Kedua, pada sudu *returning* dengan sudut 90° , aliran angin akan terbagi menjadi dua yaitu bagian atas dan bawah karena aliran tersebut menemui zona bertekanan tinggi pada permukaan deflektor. Pada sudut 30° & 60° , dimana aliran akan terpisah pada empat sisi deflektor lalu akan tertarik menuju daerah antara deflektor dan sudu *returning* karena adanya daerah bertekanan rendah sehingga akan menghasilkan torsi negatif. Pada sudut 90° , tidak terjadi pembentukan vortisitas pada sisi *downstream* deflektor, karena celah antara sudu *returning* dan deflektor sangat minim. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 2.12 di atas. Maka dari itu, pada sudut ini, nilai torsi negatif pada sudu *returning* bernilai paling kecil.

2.12.3 Performance Enhancement of a Savonius Turbine Under Effect of Frontal Guiding Plate (Mohamed et. al., 2021)

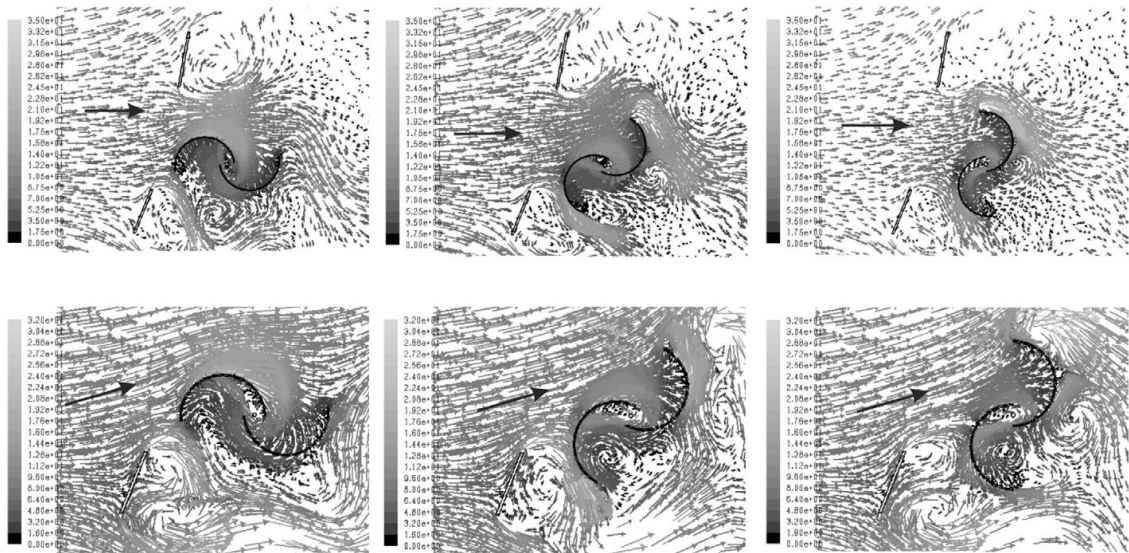
Kajian numerik yang dilakukan oleh Mohamed et al pada tahun 2021 mengamati perubahan kinerja turbin angin savonius dengan penambahan *guiding plate* pada sisi upstream turbin seperti pada gambar 2.13. Penambahan *guiding plate* bertujuan untuk meningkatkan torsi positif dan mengurangi torsi negatif pada turbin. Selain itu studi ini bertujuan untuk menemukan posisi optimal deflektor dengan menggunakan optimasi otomatis dengan teknik *in-house optimization library* (OPAL) yang dihubungkan dengan CFD. Dengan posisi guiding plate pada sudu returning yaitu $X_1/R = -1.29265$, $Y_1/R = -0.4412$, $X_2/R = -1.58823$ and $Y_2/R = -1.176$, dengan sudut $\beta = 68.1^\circ$. Posisi optimal ini diperoleh dari studi numerik yang juga dilakukan oleh Mohamed et al pada tahun 2008.



Gambar 2. 13 Skema Guiding Plate pada Penelitian Mohamed, et al.

(Sumber : Mohamed, et al., 2021)

Proses optimasi matematis yang disebutkan sebelumnya (Algoritma Evolusioner yang mengandalkan evaluasi otomatis melalui CFD) digunakan untuk mendapatkan posisi optimal *guiding plate*. Adapun kecepatan angin datang yang digunakan yaitu sebesar $U = 10$ m/s. Optimasi dilakukan dengan menjaga nilai $Y_{d2}/R = 2.235$ sehingga tersisa 3 parameter lain. Dari hasil optimasi yang dilakukan, diperoleh posisi optimal *guiding plate* pada $TSR = 0,7$ yaitu $X_{d1}/R = -0.9332$, $Y_{d1}/R = 1.543$ dan $X_{d2}/R = -0.7405$, pada sudut $\gamma = 105.6^\circ$. terjadi peningkatan efisiensi turbin, yaitu pada CoP sebesar 35,5% dan peningkatan pada C_m sebesar 55%.



Gambar 2. 14 Flowpattern pada Penelitian Mohamed, et al.

(Sumber : Mohamed, et al., 2021)

Peningkatan ini tidak lepas dari peran deflektor yang berada pada posisi optimalnya sehingga dapat mengarahkan angin menuju *advancing blade* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.14 diatas. Terlihat perbedaan pola aliran antara skema dengan dua deflektor dan skema yang hanya menggunakan deflektor pada *returning blade*. Aliran angin akan lebih terarahkan secara optimal oleh skema yang menggunakan dua deflektor.

2.13 Komparasi Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di atas, maka diperlukan perbandingan satu sama lain dengan beberapa indikator untuk mengetahui korelasi antar penelitian. Berikut ini tabel 2.5 yang menyajikan perbandingan penelitian terdahulu dan yang akan dilakukan :

Tabel 2. 5 Tabel Komparasi Penelitian

Indikator	(Altan et. Al., 2010)	(Salleh et. Al, 2022)	Mohamed et al (2021)	(Zahroyana et. Al., 2024)
Metode Penelitian	Eksperimental dan numerikal	Eksperimental	Numerik	Eksperimentak
Posisi Deflektor	Di depan sudu <i>returning</i> dan di samping sudu <i>advancing</i>	Di depan sudu <i>returning</i> dan di samping sudu <i>advancing</i>	Di depan sudu <i>advancing</i> dan <i>returning</i>	Di depan sudu <i>advancing</i> dan <i>returning</i>
Parameter Bebas	$l_1; l_2; \alpha; \beta; \theta$	$\alpha; \beta$	$l_1; \alpha; X_A/R$	$\alpha; U; \theta$
Parameter Kontrol	$X_A/R; X_R/R; H$	$X_A/R; X_R/R; H; l_1; l_2; \theta$	$X_R/R; H; \beta; l_2$	$l_1; l_2; X_A/R; X_R/R; H$
Hasil	<i>Curtain</i> 1 yaitu yang terpanjang menghasilkan CoP tertinggi pada sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Torsi statis maksimum diperoleh saat sudut $\theta = 60^\circ$	Konfigurasi 11 menghasilkan CoP tertinggi pada sudut $\alpha = 30^\circ$ dan $\beta = 90^\circ$.	Konfigurasi dengan $\alpha = 105,6^\circ$ dan $\beta = 68,1^\circ$ memiliki peningkatan CoP tertinggi sebesar 35,5%	-

Dari tabel diatas, diharapkan penelitian terdahulu dapat menjadi pedoman dan acuan pada studi eksperimental yang akan dilakukan.

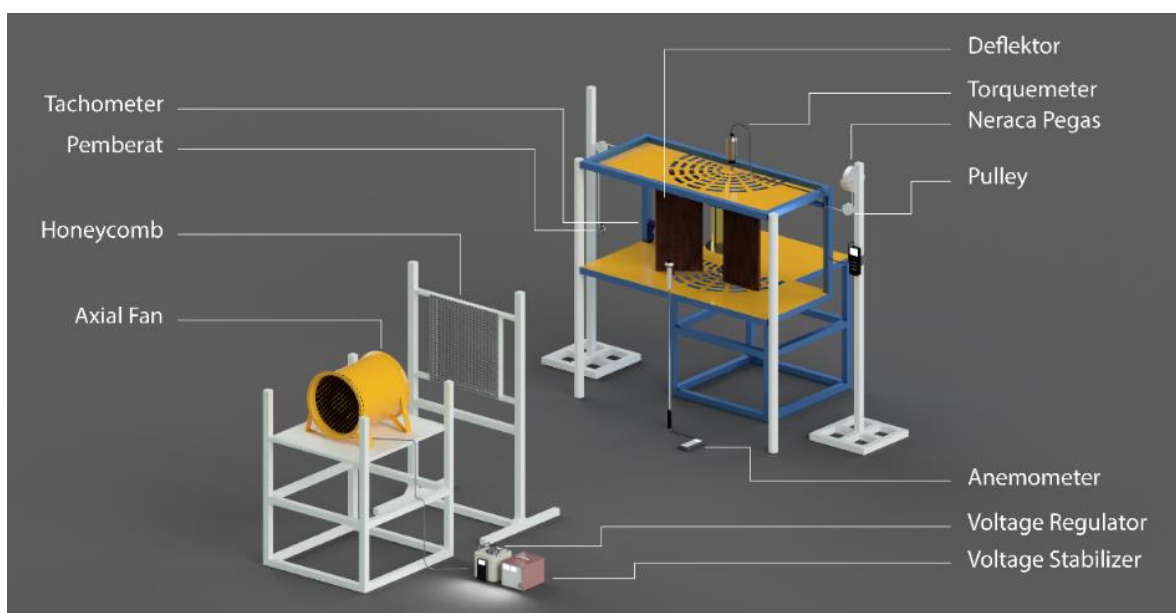
BAB III METODOLOGI

3.1 Parameter yang Diukur

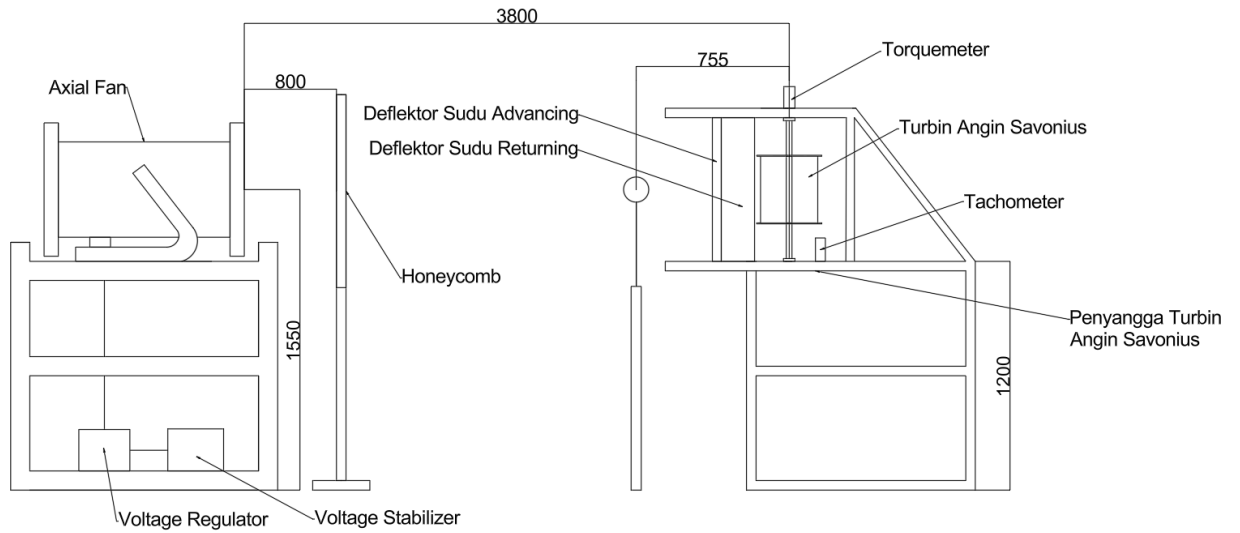
Beberapa parameter yang perlu dianalisis pada penelitian ini yaitu massa jenis udara (ρ), viskositas dinamis udara (μ), kecepatan aliran udara (U), kecepatan putar turbin angin Savonius (ω), besar sudut deflektor sudu *advancing* (α), besar sudut deflektor sudu *returning* (β), lebar deflektor (l), tebal deflektor (t_d), diameter sudu turbin (D), diameter poros turbin (d_p), tinggi turbin (H), tinggi deflektor (h). Variasi sudut deflektor yang digunakan pada penelitian ini yaitu $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ dan $\beta = 0^\circ$, serta divariasikannya nilai kecepatan angin (U) sebesar 5 & 7 m/s yang diukur dengan anemometer pada sisi upstream turbin dengan jarak 755 mm terhadap poros turbin angin. Maka dari itu, untuk setiap variasi kecepatan angin memiliki 6 konfigurasi yang dapat dirinci seperti pada tabel 3.1. Adapun jarak antara axial fan dengan honeycomb sebesar 800 mm dan jarak axial fan dengan poros turbin sebesar 3800 mm. Ketinggian poros axial fan terhadap tanah sebesar 1550 mm. Ketinggian penyangga turbin angin sebesar 1200 mm. Gambar dari set up peralatan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1 (a) sebagai gambar 3 dimensi, (b) sebagai gambar 2 dimensi dan gambar 3.2 di bawah

Tabel 3. 1 Konfigurasi Skema Percobaan

Kecepatan Angin	Sudut α	Sudut β
5 & 7 m/s	Tanpa deflektor	Tanpa deflektor
	0°	0°
	10°	
	20°	
	30°	
	45°	

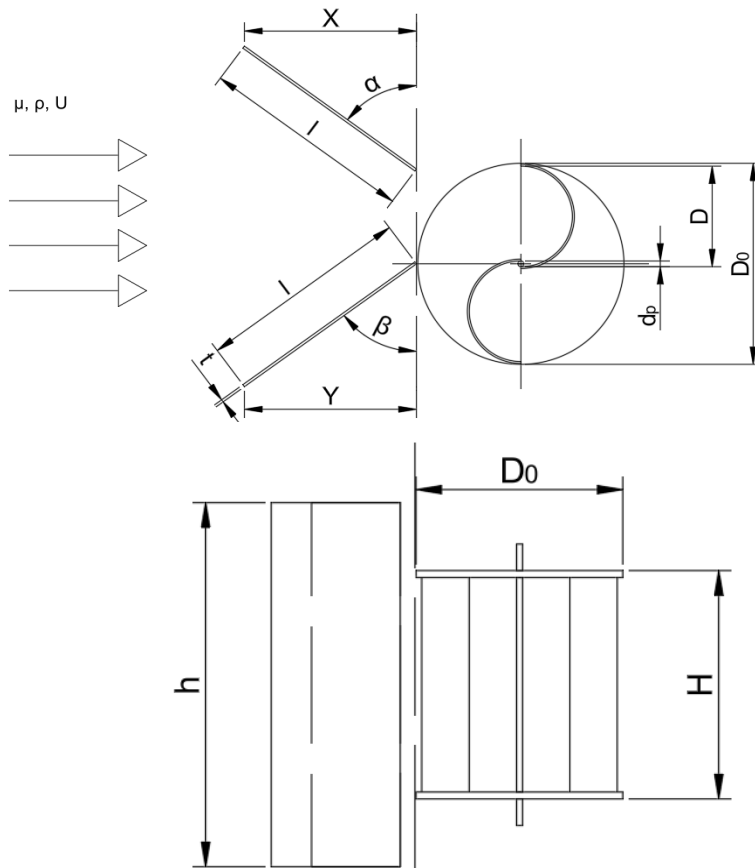


(a) Skema Alat Penelitian 3 Dimensi



(b) Skema Alat Penelitian 2 Dimensi

Gambar 3. 1 Skema Alat Penelitian (a) 3 dimensi dan (b) 2 dimensi



Gambar 3. 2 Skema Deflektor dan Turbin Angin Savonius

Dimana,

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

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

U = kecepatan aliran udara (m/s)

- ω = kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)
- α = sudut deflektor sudu *advancing* ($^{\circ}$)
- β = sudut deflektor sudu *returning* ($^{\circ}$)
- X = jarak antara deflektor sudu *advancing* terhadap sumbu netral (mm)
- Y = jarak antara deflektor sudu *returning* terhadap sumbu netral (mm)
- l = panjang deflektor (mm)
- t_d = tebal deflektor (mm)
- D = diameter sudu turbin angin Savonius (mm)
- d_p = diameter poros turbin angin Savonius (mm)
- H = tinggi turbin angin Savonius (mm)
- h = tinggi deflektor (mm)

3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi pada percobaan ini bertujuan untuk mengidentifikasi parameter-parameter yang berpengaruh terhadap hasil akhir dari penelitian. Adapun yang ditelisk pada analisa dimensi ini yaitu *coefficient of power* dan *coefficient of moment*. Metode untuk menganalisa keduanya yaitu *Buckingham Phi Theory*. Metode tersebut dipilih karena dapat menghubungkan parameter-parameter yang berpengaruh terhadap sistem atau proses. Adapun penjelasan secara rinci akan dijabarkan sebagai berikut :

3.2.1 Analisa Dimensi *Coefficient of power* (CoP)

Berikut adalah tahapan analisa dimensi untuk CoP dengan digunakannya metode *Buckingham – Phi Theorem* :

1. Menentukan dimensi parameter yang mempengaruhi daya

$$P = f(\rho, \mu, U, \omega, X, Y, l, t, D, d_p, H, h) \dots \dots \dots (3.1)$$

dimana,

Jumlah parameter (n) = 13, yaitu :

P = daya turbin angin Savonius (Watt)

ρ = massa jenis udara (kg/m^3)

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

U = kecepatan aliran udara (m/s)

ω = kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)

X = jarak antara deflektor sudu *advancing* terhadap sumbu netral (m)

Y = jarak antara deflektor sudu *returning* terhadap sumbu netral (m)

l = panjang deflektor (m)

t = ketebalan sudu turbin angin Savonius (m)

D = diameter sudu turbin angin Savonius (m)

d_p = diameter poros turbin angin Savonius (m)

H = tinggi turbin angin Savonius (m)

h = tinggi deflektor (m)

2. Menentukan grup yang berisi dimensi primer untuk proses analisa, pada penelitian ini digunakan dimensi primer [M], [L], [T].

3. Membuat tabel dimensi primer berdasarkan parameter yang dipilih seperti pada tabel 3.2 di bawah ini :

Tabel 3. 2 Dimensi Primer untuk Parameter CoP

Parameter	P	ρ	μ	U	ω	X	Y	l	t	D	d_p	H	h
Dimensi	$\frac{[M][L]^2}{[T]^3}$	$\frac{[M]}{[L]^3}$	$\frac{[M]}{[L][t]}$	$\frac{[L]}{[t]}$	$\frac{1}{[t]}$	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]

4. Pemilihan parameter berulang yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan (r), yaitu ρ , U, D.
Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
5. Menentukan grup tak berdimensi dengan menyusun persamaan dengan menggabungkan parameter yang ditetapkan dalam tahapan sebelumnya. Terdapat n – m grup tak berdimensi, sehingga terdapat 13 – 3 = 10 grup tak berdimensi.

$$\Pi_1 = \rho^a U^b D^c P, \text{ di mana } \left(\frac{[M]}{[L]^3}\right)^a \left(\frac{[L]}{[t]}\right)^b [L]^c \left(\frac{[M][L]^2}{[T]^3}\right) = M^0 L^0 t^0$$

Sehingga pada dimensi primer,

$$[M] \equiv a + 1 = 0; a = -1$$

$$[t] \equiv -b - 3 = 0; b = -3$$

$$[L] \equiv -3a + b + c + 2 = 0; c = -2$$

Lalu didapatkan untuk grup tak berdimensi 1 (Π_1)

$$\Pi_1 = \frac{P}{\rho \cdot D^2 \cdot U^3}$$

Metode yang sama digunakan untuk mengetahui persamaan dimensi untuk grup tak berdimensi (Π_n) lainnya.

$$\Pi_2 = \rho^a U^b D^c \mu = \frac{\mu}{\rho \cdot D \cdot U}; \Pi_3 = \frac{\omega D}{U}; \Pi_4 = \frac{H}{D}; \Pi_5 = \frac{h}{D}$$

$$\Pi_6 = \frac{d_p}{D}; \Pi_7 = \frac{t}{D}; \Pi_8 = \frac{l}{D}; \Pi_9 = \frac{X}{D}; \Pi_{10} = \frac{Y}{D}$$

Berdasarkan penentuan persamaan dimensi diatas, didapatkan grup tak berdimensi sebagai berikut:

Π_1 : *Coefficient of power* (CoP)

Π_2 : bilangan Reynolds (Re)

Π_3 : *tip speed ratio* (λ)

Π_4 : rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_5 : rasio tinggi deflektor dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_6 : rasio diameter poros turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_7 : rasio tebal sudu turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_8 : rasio panjang deflektor dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_9 : rasio jarak deflektor sudu *advancing* terhadap sumbu netral dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_{10} : rasio jarak deflektor sudu *returning* terhadap sumbu netral dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Sehingga, didapatkan hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) \dots \dots \dots (3.2)$$

Yang kemudian dapat diuraikan sebagai berikut :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{t}{D}, \frac{l}{D}, \frac{X}{D}, \frac{Y}{D} \right) \dots \dots \dots (3.3)$$

Adapun terdapat parameter yang tak berdimensi, namun bernilai tetap yaitu : $\frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{t}{D}, \frac{l}{D}, \frac{Y}{D}$, hal ini dikarenakan nilai-nilai tersebut tidak mengalami perubahan dalam pelaksanaan penelitian. Sedangkan grup tak berdimensi $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D}$ merupakan

parameter bebas yang dapat divariasikan untuk mengetahui pengaruh dari variabel tersebut terhadap *Coefficient of power* (CoP) pada turbin angin Savonius. Maka, persamaan 3.3 dapat menjadi persamaan 3.4 seperti berikut ini:

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D} \right) \dots \dots \dots (3.4)$$

Karena parameter panjang karakteristik $L = 2D - 2s - b$ dan memiliki nilai yang sebanding dengan D, maka persamaan 3.4 dapat dinyatakan dalam fungsi pada persamaan 3.5 berikut ini :

$$CoP = f_3 \left(\frac{\mu}{\rho U L}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

Pada persamaan 3.5 tersebut, dimana nilai D pada fungsi tersebut bersifat konstan, serta nilai X/D yang dapat diperoleh dari besar sudut kemiringan deflektor α . Sehingga, dapat diperoleh persamaan 3.6 sebagai berikut:

$$CoP = f_4(Re, TSR(\lambda), \alpha) \dots \dots \dots (3.6)$$

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini akan diolah dan disajikan dalam grafik $CoP = f_4(Re, TSR(\lambda), \alpha)$ agar dapat mengetahui korelasi antara $Re, TSR(\lambda)$, dan α terhadap CoP.

3.2.2 Analisa Dimensi *Coefficient of moment*

Berikut adalah tahapan analisis dimensi untuk Cm dengan digunakannya metode Buckingham – Phi Theorem.

1. Menentukan dimensi parameter yang mempengaruhi torsi dinamis

$$T_D = f(\rho, \mu, U, \omega, X, Y, l, t, D, d_p, H, h) \dots \dots \dots (3.7)$$

- Dimana, umlah parameter (n) = 13
- T_D = torsi dinamis (N.m)
- ρ = massa jenis udara (kg/m³)
- μ = viskositas dinamis udara (N.s/m²)
- U = kecepatan aliran udara (m/s)
- ω = kecepatan putar turbin angin Savonius (rad/s)
- X = jarak antara deflektor sudu *advancing* terhadap sumbu netral (m)
- Y = jarak antara deflektor sudu *returning* terhadap sumbu netral (m)
- l = panjang deflektor (m)
- t = ketebalan sudu turbin angin Savonius (m)
- D = diameter sudu turbin angin Savonius (m)
- d_p = diameter poros turbin angin Savonius (m)
- H = tinggi turbin angin Savonius (m)
- h = tinggi deflektor (m)

2. Menentukan dimensi primer, pada penelitian ini digunakan dimensi primer [M], [L], [T].
3. Penentuan dimensi primer untuk proses analisa, yang tercantum dalam tabel 3.3 dibawah ini :

Tabel 3. 3 Dimensi Primer untuk Parameter Cm

Parameter	T_D	ρ	μ	U	ω	X	Y	l	t	D	d_p	H	h
Dimensi	$\frac{[M][L]^2}{[T]^2}$	$\frac{[M]}{[L]^3}$	$\frac{[M]}{[L][t]}$	$\frac{[L]}{[t]}$	$\frac{1}{[t]}$	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]	[L]

- Pemilihan parameter berulang yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer yang digunakan (r), yaitu ρ , U, D.
Maka, jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
- Menetapkan persamaan dimensional lalu menggabungkan parameter yang ditetapkan sehingga menghasilkan grup tak berdimensi. Terdapat n – m grup tak berdimensi, sehingga pada penelitian ini terdapat 13 – 3 = 10 grup tak berdimensi.

$$\Pi_1 = \rho^a U^b D^c T_D, \text{ di mana } \left(\frac{[M]}{[L]^3}\right)^a \left(\frac{[L]}{[t]}\right)^b [L]^c \left(\frac{[M][L]^2}{[T]^2}\right) = M^0 L^0 t^0$$

Sehingga pada dimensi primer,

$$[M] \equiv a + 1 = 0; a = -1$$

$$[t] \equiv -b - 2 = 0; b = -2$$

$$[L] \equiv -3a + b + c + 2 = 0; c = -3$$

Lalu didapatkan untuk grup tak berdimensi 1 (Π_1)

$$\Pi_1 = \frac{T_D}{\rho \cdot D^3 \cdot U^2}$$

Metode yang sama digunakan untuk mengetahui persamaan dimensi untuk grup tak berdimensi (Π_n) lainnya.

$$\Pi_2 = \rho^a U^b D^c = \frac{\mu}{\rho \cdot D \cdot U}; \Pi_3 = \frac{\omega D}{U}; \Pi_4 = \frac{H}{D}; \Pi_5 = \frac{h}{D}$$

$$\Pi_6 = \frac{d_p}{D}; \Pi_7 = \frac{t}{D}; \Pi_8 = \frac{l}{D}; \Pi_9 = \frac{X}{D}; \Pi_{10} = \frac{Y}{D}$$

Berdasarkan penentuan persamaan dimensi diatas, didapatkan grup tak berdimensi sebagai berikut:

Π_1 : *Coefficient of moment* (Cm)

Π_2 : bilangan Reynolds (Re)

Π_3 : *tip speed ratio* (λ)

Π_4 : rasio tinggi turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_5 : rasio tinggi deflektor dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_6 : rasio diameter poros turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_7 : rasio tebal sudu turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_8 : rasio panjang deflektor dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_9 : rasio jarak deflektor sudu *advancing* terhadap sumbu netral dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Π_{10} : rasio jarak deflektor sudu *returning* terhadap sumbu netral dengan diameter sudu turbin angin Savonius

Sehingga, didapatkan hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7, \Pi_8, \Pi_9, \Pi_{10}) \dots \dots \dots (3.8)$$

Atau dapat diekspresikan menjadi persamaan berikut:

$$\frac{T_r}{\rho \cdot D^3 \cdot U^2} = f_5 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{t}{D}, \frac{l}{D}, \frac{X}{D}, \frac{Y}{D} \right) \dots \dots \dots (3.9)$$

Sama seperti penjelasan pada analisa dimensi *coefficient of power*, terdapat parameter kontrol yang dijaga nilainya tetap sama, yaitu : $\frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{d_p}{D}, \frac{t}{D}, \frac{l}{D}, \frac{Y}{D}$. Sedangkan grup tak berdimensi $\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D}$ merupakan parameter bebas yang dapat divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap *Coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius. Maka, persamaan 3.9 menjadi persamaan 3.10 seperti berikut ini:

$$\frac{T_r}{\rho \cdot D^3 \cdot U^2} = f_6 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D} \right) \dots \dots \dots (3.10)$$

Karena parameter panjang karakteristik $L = 2D - 2s - b$, maka dapat dilihat bhwa nilainya sebanding dengan nilai D sehingga diperoleh persamaan berikut :

$$Cm = f_7 \left(\frac{\mu}{\rho U L}, \frac{\omega D}{U}, \frac{X}{D} \right) \dots \dots \dots (3.11)$$

Pada persamaan 3.11 tersebut, dimana nilai D pada fungsi tersebut bersifat konstan, serta nilai X/D yang dapat diperoleh dari besar sudut kemiringan deflektor α . Sehingga, dapat diperoleh persamaan 3.12 sebagai berikut:

$$Cm = f_8(Re, TSR(\lambda), \alpha) \dots \dots \dots (3.12)$$

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini akan diolah dan disajikan dalam grafik $Cm = f_8(Re, TSR(\lambda), \alpha)$ agar dapat mengetahui korelasi antara $Re, TSR(\lambda), \alpha$ terhadap Cm.

3.3 Peralatan Penelitian

Adapun peralatan yang digunakan untuk menunjang penelitian tugas akhir ini yaitu sebagai berikut:

3.3.1 Turbin Angin Savonius

Turbin angin Savonius sebagai benda uji yang akan dianalisa memiliki spesifikasi pada tabel 3.3 dan bentuk seperti pada gambar 3.3 di bawah ini :



Gambar 3. 3 Turbin Angin Savonius

Tabel 3.4 di bawah ini merupakan spesifikasi lebih detail terkait dimensi turbin Savonius yang digunakan :

Tabel 3. 4 Spesifikasi Turbin Angin Savonius

Spesifikasi Turbin Angin Savonius	
Diameter turbin	305,4 mm
Diameter sudu turbin (D)	165,2 mm
Diameter poros turbin (d_p)	19 mm
Diameter end plates (D_0)	320 mm
Tinggi turbin (H)	295 mm
Tebal sudu turbin (t)	3 mm
Tebal <i>end plates</i> (t_e)	1 mm
Material sudu turbin	PVC
Material <i>end plates</i>	Aluminium Cladding 2024
<i>Bearing</i> atas	SKF 51201
<i>Bearing</i> bawah	SKF 52204

3.3.2 Deflektor

Deflektor merupakan objek penting dalam penelitian ini, karena pengaruh dari instalasi deflektor di sekitar turbin akan menjadi pokok bahasan dari penelitian ini. Bentuk fisik deflektor dapat dilihat pada gambar 3.4 di bawah ini. Adapun spesifikasi dari deflektor dapat dilihat pada tabel 3.5 dibawah ini :



Gambar 3. 4 Deflektor yang pada Turbin Angin Savonius

Tabel 3. 5 Spesifikasi Deflektor

Spesifikasi Deflektor	
Jumlah Deflektor	2
Material	Papan Kayu
Ketebalan Deflektor (t)	10 mm
Panjang Deflektor (L)	325 mm
Tinggi Deflektor (h)	735 mm

Deflektor akan diinstalasikan pada bagian depan sudu *returning* dan di sebelah sudu *advancing*.

3.3.3 Axial Fan

Axial fan memiliki fungsi sebagai sumber aliran angin yang akan disesuaikan kecepatannya. *Axial fan* yang digunakan merupakan tipe CKE SF-45 H yang ditunjukkan oleh gambar 3.5 dan spesifikasinya tertera pada tabel 3.6.



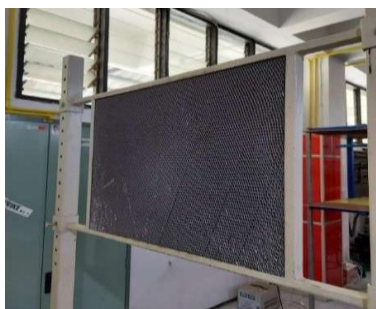
Gambar 3. 5 Axial fan CKE SF-45 H

Tabel 3. 6 Spesifikasi Axial fan

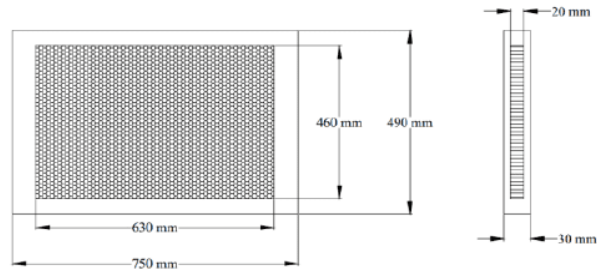
Spesifikasi Axial fan CKE SF-45 H	
Diameter	450 mm
Kecepatan Putar	2850 rpm
Tegangan	220 – 240 V
Tekanan Statis	520 Pa
<i>Air Flow</i>	125 m ³ /s
<i>Phase</i>	1

3.3.4 Honeycomb

Aliran angin yang dihasilkan oleh kipas tidak selalu sama di setiap titiknya. Maka digunakan *honeycomb* yang berfungsi untuk menyeragamkan aliran angin yang berasal dari *axialfan* menjadi aliran *uniform*.



(a)



(b)

Gambar 3. 6 (a) *Honeycomb*, (b) Dimensi *Honeycomb*

Tabel 3. 7 Spesifikasi *Honeycomb*

Spesifikasi <i>Honeycomb</i>	
Panjang Total (termasuk <i>frame</i>)	750 mm
Panjang <i>Honeycomb</i>	630 mm
Lebar Total (termasuk <i>frame</i>)	490 mm
Lebar <i>Honeycomb</i>	460 mm
Tebal <i>Honeycomb</i>	20 mm
Tebal <i>Frame</i>	30 mm
Dimensi <i>Mesh</i>	0,0248 lubang/mm ²

Honeycomb akan diletakkan di antara turbin dan *axialfan*. Spesifikasi disajikan pada tabel 3.7 dan gambar 3.6 menunjukkan *honeycomb* yang akan digunakan pada penelitian ini

3.3.5 Penyangga Turbin Angin Savonius



Gambar 3. 7 Penyangga Turbin Angin Savonius

Penyangga ini digunakan sebagai tempat dipasangnya angin Savonius serta deflektor. Adapun skema dari penyangga turbin angin Savonius dapat dilihat pada gambar 3.7. Terlihat pada bagian yang horizontal, terdapat lubang lubang yang digunakan sebagai tempat memasukkan baut dan mur untuk mengatur sudut dari deflektor.

3.3.6 Bearing

Pada *mechanical equipment* yang mengalami putaran, maka diperlukan kehadiran *bearing* yang berfungsi untuk menjaga poros turbin pada sumbunya, mengurangi gesekan, dan melindungi poros selama proses pengoperasian, juga untuk menahan beban radial dan beban aksial. Jenis *bearing* yang digunakan pada bagian atas turbin untuk menahan beban radial yaitu SKF 51201. Pada bagian bawah turbin, untuk menahan beban radial dan aksial digunakan *bearing* dengan tipe SKF 52204. Spesifikasi kedua *bearing* yang digunakan dapat dilihat pada tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Spesifikasi *Bearing*

Spesifikasi <i>Bearing</i> Atas	
Model	SKF 51201 <i>single direction thrust ball bearing</i>
Diameter Luar	28 mm
Diameter Dalam	12 mm
Ketebalan	11 mm
Spesifikasi <i>Bearing</i> Bawah	
Model	SKF 52204 <i>double direction thrust ball bearing</i>
Diameter Luar	40 mm
Diameter Dalam	15 mm
Ketebalan	26 mm

3.3.7 *Voltage Regulator*

Voltage regulator digunakan untuk mengatur kecepatan aliran angin dari *axial fan* dengan mengatur *output* tegangan. *Voltage regulator* yang digunakan adalah tipe TDGC2- 3kVA seperti pada gambar 3.8 dengan spesifikasi yang tercantum pada tabel 3.9 di bawah ini.



Gambar 3. 8 *Voltage Regulator* TDGC2- 3kVA

Tabel 3. 9 Spesifikasi *Voltage Regulator*

Spesifikasi <i>Voltage regulator</i> TDGC2- 3kVA	
<i>Input</i>	110/120 V
<i>Output</i>	0 – 250 V
Frekuensi	50 – 60 Hz
Arus Maksimal	4,8/12 A
Kapasitas	3 KVA

3.3.8 *Voltage Stabilizer*

Voltage stabilizer berfungsi untuk menjaga nilai tegangan yang dialirkan ke *axial fan*. Alat ini diperlukan agar aliran angin dari *axial fan* lebih konstan kecepatannya. Adapun *voltage stabilizer* yang digunakan yaitu Matsunaga tipe SVC-3000NA yang ditunjukkan oleh gambar 3.9 dengan spesifikasi yang tertera pada tabel 3.10.



Gambar 3. 9 Voltage Stabilizer SVC-3000NA

Tabel 3. 10 Spesifikasi Voltage Stabilizer

Spesifikasi Voltage Stabilizer SVC-3000NA	
Input	140 - 240 V
Output	110 dan 220 V
Frekuensi	50/60 Hz
Phase	1

3.4 Alat Ukur Penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan untuk menunjang proses pengambilan data yaitu sebagai berikut :

3.4.1 Anemometer

Anemometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Pada penelitian ini *anemometer* yang digunakan adalah *anemometer* tipe digital dari Omega dengan tipe HHF141 yang ditunjukkan pada gambar 3.10 dengan spesifikasi yang dicantumkan pada tabel 3.11.



Gambar 3. 10 Anemometer Omega HHF141

Tabel 3. 11 Spesifikasi Anemometer

Spesifikasi Anemometer Omega HHF141		
Range	25 mm air probe	300 – 6800 FPM
	70 mm air probe	40 – 7800 FPM
Temperatur	Instrumen	0 – 50 °C
	Pemeriksaan	-20 – 100 °C
Akurasi	± 1% atau pembacaan 1 digit	
Resolusi	1 FPM atau 0,01 MPS	
Daya	3 baterai AA	
Output	USB atau 0 – 5 V DC	

3.4.2 Torquemeter

Alat yang digunakan untuk mengukur nilai torsi statis turbin angin Savonius yaitu *torquemeter*. Penelitian ini menggunakan *torquemeter* Lutron dengan tipe TQ-8800 yang ditunjukkan pada gambar 3.11. Spesifikasi *torquemeter* Lutron TQ-8800 dapat dilihat pada tabel 3.12.



Gambar 3. 11 *Torquemeter* Lutron TQ-8800

Tabel 3. 12 Spesifikasi *Torquemeter*

Spesifikasi <i>Torquemeter</i> Lutron TQ-8800	
<i>Range</i> Maksimum	141,7 N.cm
Resolusi Tinggi	0,1 N.cm
Resolusi Rendah	1 N.cm
<i>Overload Protection Range</i>	220,1 N.cm

3.4.3 Tachometer

Tachometer berfungsi untuk mendapatkan nilai dari kecepatan putaran poros turbin angin Savonius. *Tachometer* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *tachometer* Omega HHT12 yang ditunjukkan oleh gambar 3.12 dan spesifikasi yang tertera pada tabel 3.13.



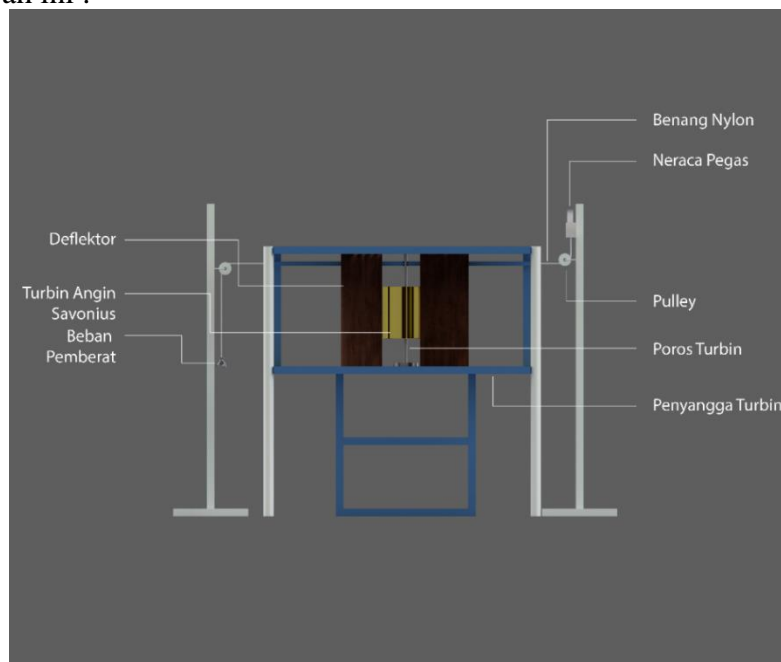
Gambar 3. 12 *Tachometer* Omega HHT12

Tabel 3. 13 Spesifikasi *Tachometer Omega*

Spesifikasi <i>Tachometer Omega</i> HHT12	
<i>Range</i>	5 – 99.999 rpm
Akurasi	0,01% atau ± 1 digit
Resolusi	0,001 – 1,0 rpm
<i>Display</i>	5-digit alphanumeric LCD
Memori	Max, min, and last
<i>Power</i>	2 baterai AA 1,5 V
Temperatur Pengukuran	5 40 °C

3.4.4 Brake Dynamometer

Brake Dynamometer berfungsi untuk mengukur torsi dinamis pada putaran poros turbin angin Savonius. Hasil pengukuran didapat dari selisih massa pemberat dengan nilai yang terbaca oleh neraca pegas. Skema *Brake Dynamometer* ditunjukkan oleh gambar 3.13 di bawah ini :



Gambar 3. 13 Skema Instalasi *Brake Dynamometer*

Pengukuran dilakukan dengan menambahkan beban secara bertahap sehingga kecepatan putaran turbin terus berkurang sampai berhenti. Pemberat yang digunakan akan terhubung oleh tali nilon pada neraca pegas. Neraca pegas yang digunakan adalah neraca pegas Nagata C-5 yang ditunjukkan oleh gambar 3.14. Nilai yang ditampilkan oleh neraca pegas analog tersebut menunjukkan nilai torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin. Neraca ini memiliki spesifikasi yang tertera pada tabel 3.14.



Gambar 3. 14 Neraca Pegas Nagata C-5

Tabel 3. 14 Spesifikasi Neraca Pegas

Nagata C-5	
Kapasitas Maksimal	3 kg
Ketelitian	10 gram

Beban pemberat digunakan pada sistem ini adalah anak timbangan dengan massa 1, 2, 5, dan 10 gram yaitu pemberat NKH tipe M1 seperti pada gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Beban Pemberat NKH tipe M1

Tabel 3. 15 Spesifikasi Timbangan Digital

Spesifikasi Timbangan Digital CHQ-Pocket Scale	
Kapasitas Maksimal	200 g
Ketelitian	0,01 gram
Daya	3 baterai AAA

Digunakan pula timbangan digital untuk pengukuran massa beban pemberat, yaitu timbangan digital dengan model CHQ-Pocket Scale. Gambar 3.15 menunjukkan timbangan digital CHQ-Pocket Scale dan spesifikasinya pada tabel 3.15.

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dibagi menjadi dua, yaitu pada pengambilan data Torsi statis dan dinamis. Adapun uraian dari kedua prosedur tersebut yaitu sebagai berikut :

3.5.1 Prosedur Penelitian Menentukan Torsi Statis

Prosedur pengambilan data torsi statis pada penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Peralatan serta benda uji disiapkan.
2. Peralatan serta benda uji diatur sesuai dengan skema penelitian.
3. *Axial fan* dinyalakan, kemudian tegangan *input* ke *axial fan* diatur dengan menggunakan nilai voltase yang ada pada *voltage regulator*, sehingga diperoleh kecepatan angin yang diinginkan.
4. Kecepatan angin diukur dengan *anemometer* untuk mendapatkan nilai sebesar 5 m/s.
5. Posisi turbin angin Savonius disesuaikan pada kondisi variasi sudut 0°
6. Nilai torsi statis diukur menggunakan *torquemeter*.
7. Pengulangan langkah 5 dan 6 dengan divariasikannya posisi sudut turbin angin Savonius hingga posisi 180° dengan interval kenaikan sudut sebesar 10° . Perubahan posisi sudut turbin dilakukan ketika turbin tidak terkena angin untuk mendapatkan hasil yang baik.
8. *Axial fan* dimatikan.
9. Pengulangan langkah 3 hingga 8 untuk variasi kecepatan angin sebesar 7 m/s.
10. Deflektor pada sudu *advancing* dan sudu *returning* dipasang.
11. Dilakukannya pengulangan langkah 1 hingga 9 untuk konfigurasi 1 ($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 2 ($\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 3 ($\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 4 ($\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 5 ($\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$).
12. Data hasil percobaan dapat diolah dan dianalisis.

3.5.2 Prosedur Pengambilan Data Torsi Dinamis

Prosedur pengambilan data torsi dinamis pada penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Peralatan serta benda uji disiapkan untuk pengambilan data.
2. Peralatan serta benda uji diatur sesuai dengan skema penelitian yang telah ditentukan.
3. *Axial fan* dinyalakan, kemudian diurnya tegangan *input* ke *axial fan* melalui pengaturan nilai voltase menggunakan *voltage regulator*, sehingga didapatkan kecepatan angin yang dibutuhkan.
4. Kecepatan angin diukur dengan *anemometer* untuk mendapatkan kecepatan angin sebesar 5 m/s.
5. Setelah kecepatan angin yang *steady* tercapai, dilakukan pengukuran terhadap kecepatan putaran poros turbin angin Savonius tanpa beban pemberat dan tanpa konfigurasi deflektor menggunakan *tachometer*.
6. Torsi dinamis diukur menggunakan *Brake Dynamometer* dengan beberapa tahapan, yaitu:
 - a. Beban pemberat ditambahkan pada wadah yang terhubung dengan neraca pegas pada turbin angin Savonius
 - b. Nilai beban pemberat yang terbaca pada neraca pegas diamati dan dicatat.
 - c. Kecepatan putaran poros turbin angin Savonius diukur dengan *tachometer*.
 - d. Poin a-c diulangi hingga turbin berhenti berputar karena bertambahnya beban pemberat.
7. Pengulangan langkah 1-6 untuk variasi kecepatan angin 7 m/s.
8. Deflektor dipasang di sekitar sudu *advancing* dan didepan sudu *returning*.
9. Dilakukannya pengulangan langkah 1-7 untuk deflektor konfigurasi 1 ($\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 2 ($\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 3 ($\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 4 ($\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$), konfigurasi 5 ($\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$).
10. *Axial fan* dimatikan

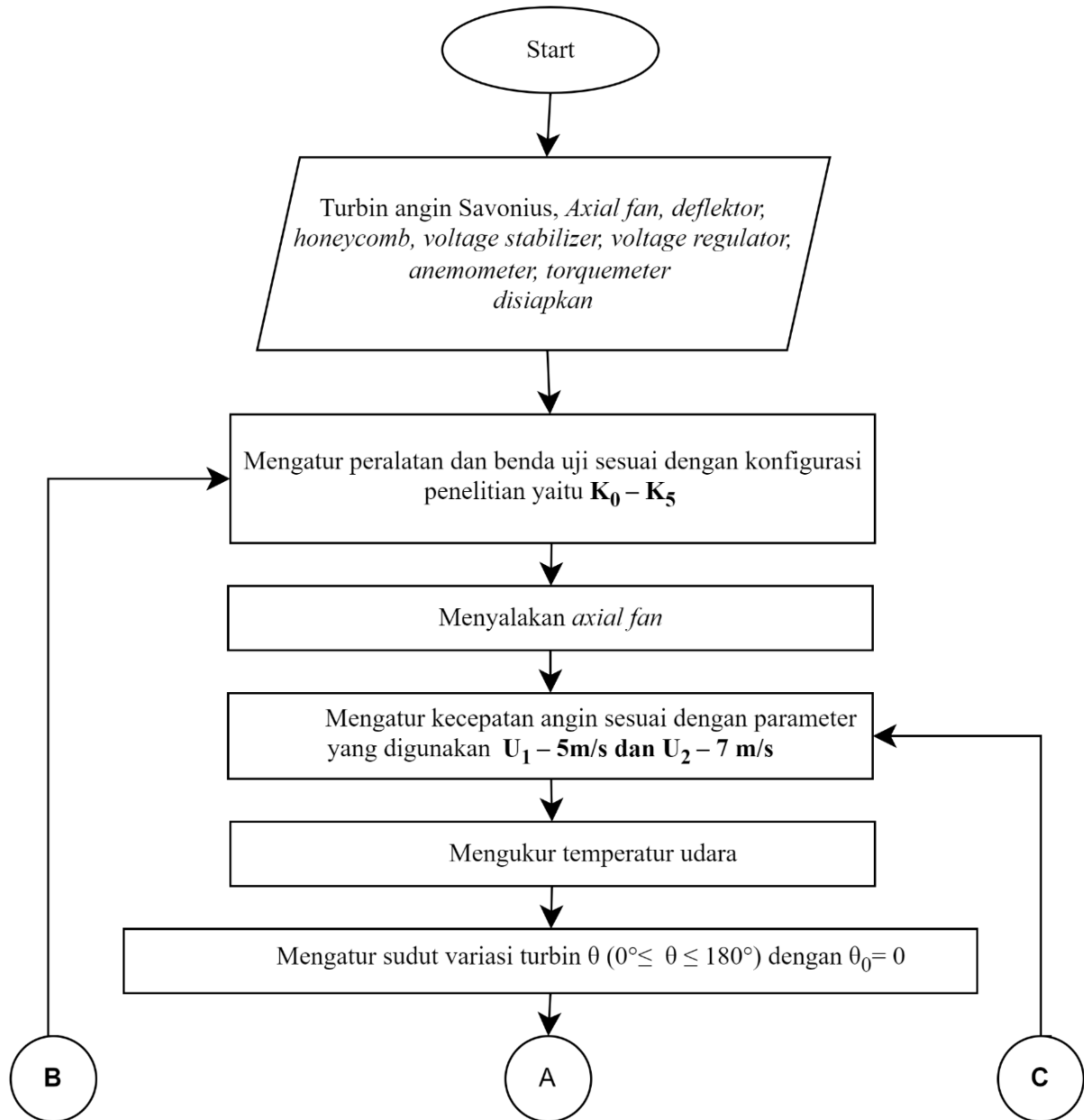
11. Data yang diperoleh dapat diolah.

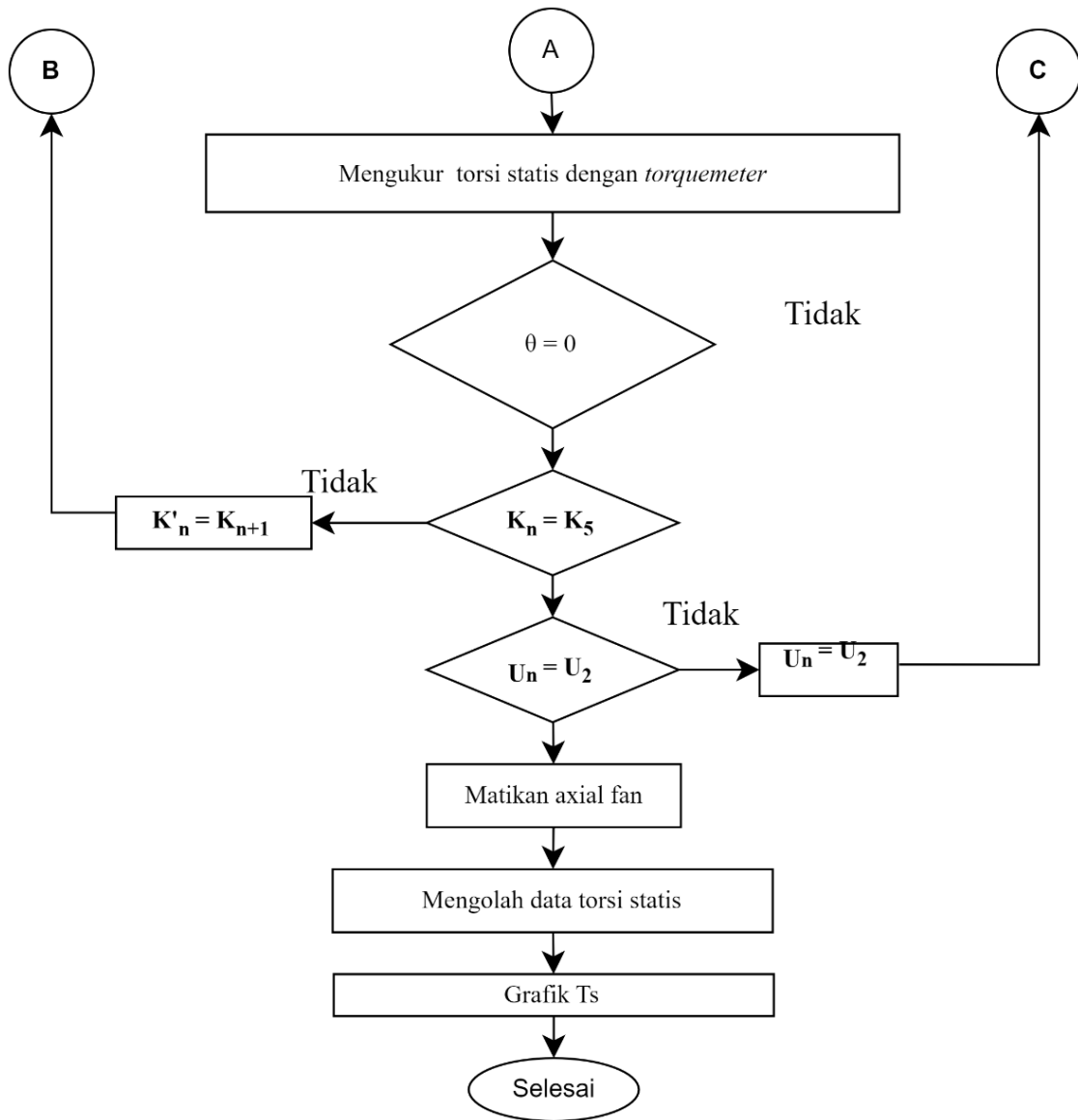
3.6 Flowchart Penelitian

Berdasarkan prosedur diatas, maka flowchart percobaan yang telah disusun yaitu sebagai berikut :

3.6.1 Flowchart Torsi Statis

Berikut ini merupakan flowchart untuk pengambilan data torsi statis :

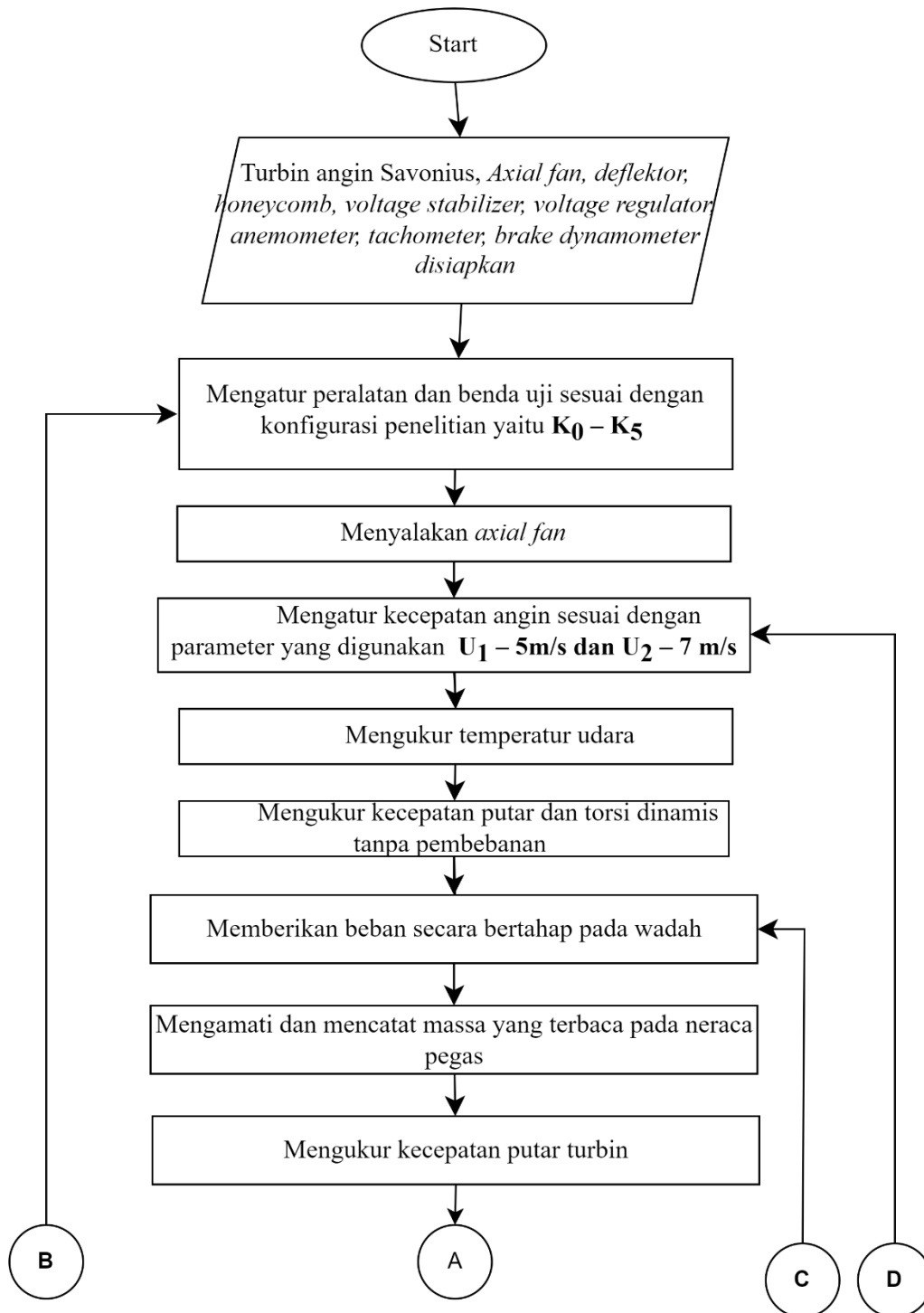


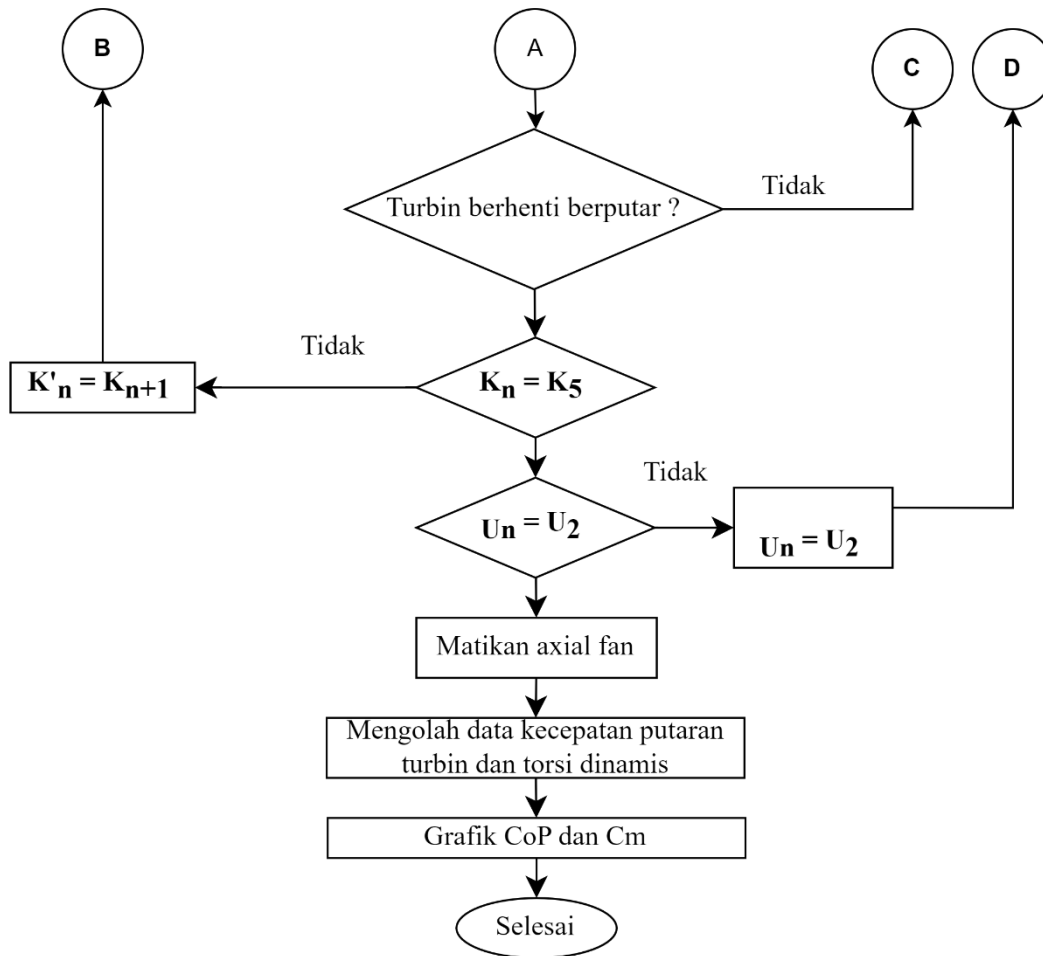


Gambar 3. 16 Flowchart Torsi Statis

3.6.2 Flowchart Torsi Dinamis

Flowchart pengambilan data torsi dinamis untuk penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 3.17 berikut ini:

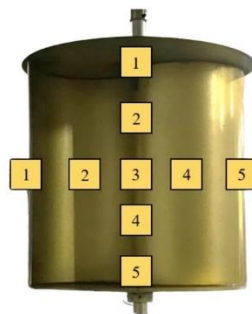




Gambar 3. 17 Flowchart Torsi Dinamis

3.7 Uji Uniformity

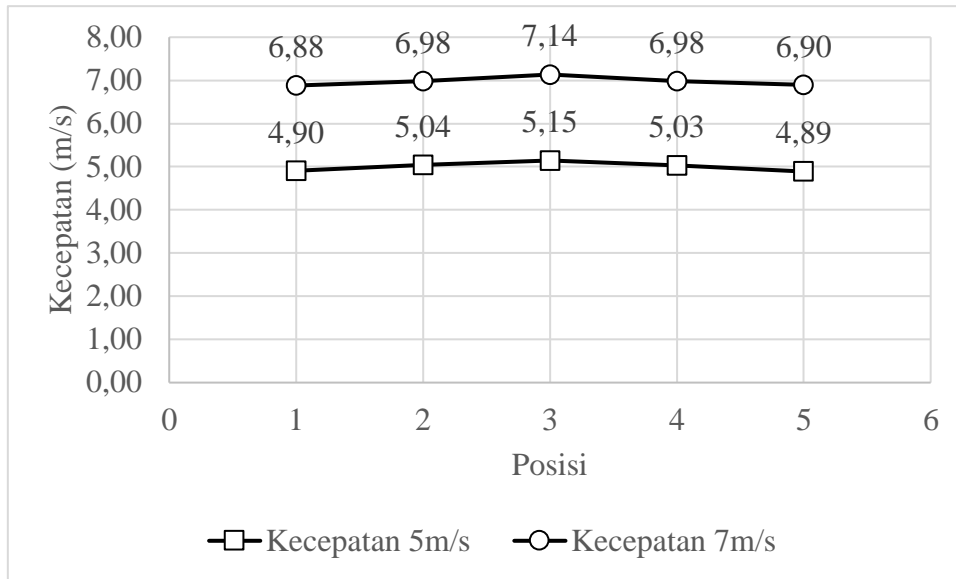
Untuk mendapatkan hasil penelitian yang baik dan valid, maka sebelum pengambilan data dilakukan, diperlukan pengujian keseragaman kecepatan aliran angin yang dihasilkan oleh *fan*. Tingkat keseragaman angin akan merupakan salah satu parameter yang penting dalam memengaruhi kinerja turbin sehingga diperlukan tingkat fluktuasi kecepatan angin yang rendah (Handayani : 2014).



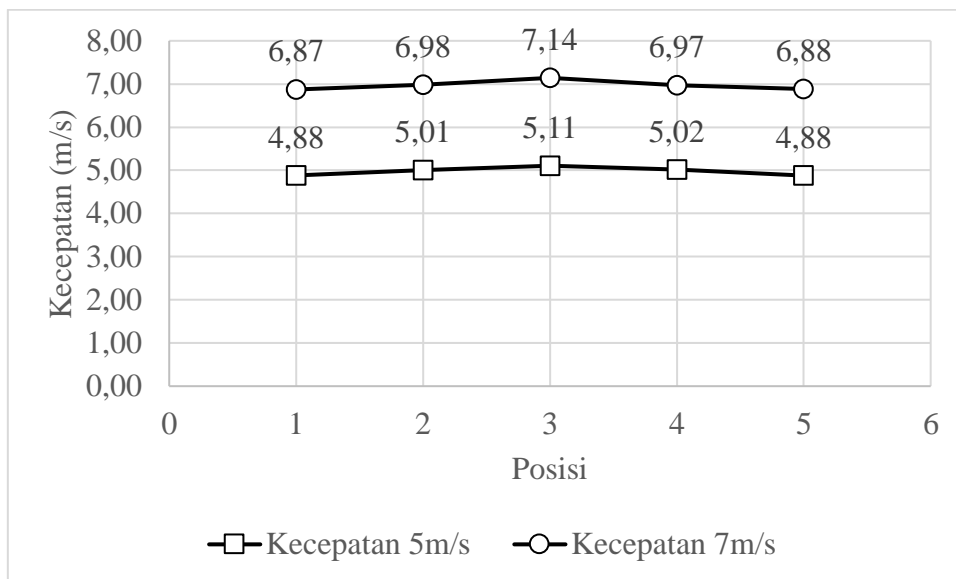
Gambar 3. 18 Titik Uji Keseragaman Aliran Angin

Pada umumnya untuk mendapatkan kecepatan angin yang seragam atau *uniform*, penelitian dilakukan dengan benda uji yang berada di dalam *wind tunnel*. Namun, untuk mendapatkan efek yang lebih mendekati keadaan nyata, maka turbin Savonius pada penelitian ini diletakkan di luar *wind tunnel*. Meskipun demikian, uji keseragaman dilakukan hanya pada sisi *upstream* dari turbin. Hal ini disebabkan karena, pengaruh dari pada deflektor yang telah

diinstalasikan hanya pada aliran angin sisi *upstream*. Uji ini dilakukan pada beberapa titik vertikal dan horizontal pada turbin Savonius. Jarak antar titik yaitu $4,5D$ atau $743,4$ mm. Posisi titik sampel pengujian ditunjukkan oleh gambar 3.19. Adapun hasil dari uji uniformity dapat dilihat pada gambar 3.20 dan 3.21 sebagai berikut :



Gambar 3. 19 Hasil Uji *Uniformity* Posisi Horizontal Kecepatan 5 m/s dan Kecepatan 7 m/s



Gambar 3. 20 Hasil Uji *Uniformity* Posisi Vertikal Kecepatan 5 m/s dan Kecepatan 7 m/s

3.8 Uncertainty

Dalam melakukan pengukuran, ketidakpastian akan selalu ada dan menjadi parameter yang penting untuk diperhatikan. Maka dari itu, perlu dilakukan perhitungan *uncertainty* yang berguna sebagai validasi data apabila terjadi error dalam pengukuran yang dilakukan. Adapun nilai error dalam pengukuran, error dapat digolongkan menjadi dua jenis, yaitu *fixed error* dan *random error*. *Fixed error* merupakan eror yang bernilai tetap yang terjadi pada setiap pembacaan data. Error ini biasa terjadi pada teknik pengukuran yang salah, atau faktor lingkungan dan alat ukur yang digunakan. Kesalahan pada alat ukur dapat dihilangkan dengan melakukan kalibrasi pada alat ukur tersebut. Jenis error kedua, yaitu *random error* merupakan error yang dapat terjadi pada pembacaan data dengan nilai yang berbeda beda dan tidak pasti. Nilai error ini juga turut berkontribusi dalam ketidakpastian total penelitian. Melakukan pengukuran berulang dan menggunakan analisis statistik dapat membantu memperkirakan dan mengurangi *uncertainty* yang disebabkan oleh random error. Oleh karena itu, penting dilakukan perhitungan *uncertainty* yang merupakan indikator penting untuk menilai kualitas pengukuran. Semakin kecil *uncertainty*, semakin tinggi kepercayaan kita terhadap hasil pengukuran. Berdasarkan nilai coefficient of power maksimum konfigurasi turbin angin Savonius tanpa deflektor dengan kecepatan 5 m/s, maka dapat diperoleh parameter-parameter yang digunakan pada perhitungan uncertainty sebagai berikut :

3.8.1 Uncertainty pada Perhitungan Tip Speed Ratio ($u\lambda$)

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

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

Maka ;

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

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

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

Sehingga nilai *uncertainty* pada setiap komponen TSR:

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

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

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

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

Uncertainty pada pembacaan kecepatan putaran turbin (u_{ω}) dengan nilai putaran turbin sebesar 155,3 rpm yang diperoleh dari variasi konvensional pada kecepatan 5m/s dan akurasi *tachometer* sebesar ± 1 digit rpm.

$$u_{\omega} = \pm [(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{1}{155,3} = \pm 0,00644$$

Uncertainty pada pembacaan jari-jari turbin (u_R) dengan nilai jari-jari turbin sebesar 152,7 mm dan akurasi pembacaan jari-jari sebesar 0,1 mm.

$$u_R = \pm [(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{152,7} = \pm 0,000655$$

Uncertainty pada pembacaan kecepatan angin (u_U) dengan nilai kecepatan angin 5 m/s dan akurasi pembacaan anemometer pada 1%.

$$u_U = \pm [(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,01}{5} = \pm 0,002$$

Sehingga, nilai dari *uncertainty* pada perhitungan tipspeed ratio sebesar :

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

$$u_\lambda = \pm [(0,00644)^2 + (0,000655)^2 + (-0,002)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_\lambda = \pm 0,00678 \text{ atau setara dengan } \pm 0,68\%$$

3.8.2 *Uncertainty* pada Perhitungan Massa Jenis Udara (u_ρ)

$$\rho T = C \leftrightarrow \rho = \frac{C}{T} \text{ atau } \rho = CT^{-1}$$

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial T} dT$$

$$d\rho = -CT^{-2} dT$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -CT^{-2}$$

$$u_{\rho,T} = \frac{\partial \rho_T}{\rho} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} u_T = -u_T$$

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

Maka diperlukan *uncertainty* pada pembacaan temperatur dengan akurasi 0,1 derajat pada suhu yang diperoleh yaitu 28,3^o celcius.

$$u_T = \pm [(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{28,3} = \pm 0,00353$$

Sehingga, *uncertainty* perhitungan massa jenis udara sebesar :

$$u_\rho = \pm [(-u_T)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm [(0,00353)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,00353$$

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

3.8.3 *Uncertainty* pada Perhitungan Viskositas Dinamik Udara (u_μ)

Dengan persamaan viskositas dinamik, dapat dicari *uncertainty* dengan cara sebagai berikut ini :

$$\mu = \frac{bT^{\frac{3}{2}}}{S+T}$$

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

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

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

$$u_\mu = \pm \left[\left(\frac{\frac{3}{2}(S+T) - T}{S+T} u_T \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{\mu} = \pm \left[\left(\frac{3}{2} \frac{(110,4 + 301,35) - 301,35}{110,4 + 301,35} \cdot 0,00353 \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,00273$$

$$u_{\mu} = \pm 0,27 \%$$

3.8.4 Uncertainty pada Perhitungan Bilangan Reynolds (u_{Re})

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \rho UL \mu^{-1}$$

$$dRe = \frac{\partial Re}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial Re}{\partial U} dU + \frac{\partial Re}{\partial L} dL + \frac{\partial Re}{\partial \mu} d\mu$$

$$dRe = UL\mu^{-1}d\rho + \rho L\mu^{-1}dU + \rho U\mu^{-1}dL - \rho UL\mu^{-2}d\mu$$

Maka turunan parsial dari bilangan Reynolds adalah sebagai berikut :

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = UL\mu^{-1}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial U} = \rho L\mu^{-1}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial L} = \rho U\mu^{-1}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \mu} = -\rho UL\mu^{-2}$$

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

$$u_{Re,U} = \frac{\partial Re_U}{Re} = \frac{U}{Re} \frac{\partial Re}{\partial U} u_U = u_U$$

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

$$u_{Re,\mu} = \frac{\partial Re_{\mu}}{Re} = \frac{\mu}{Re} \frac{\partial Re}{\partial \mu} u_{\mu} = -u_{\mu}$$

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

Uncertainty pada pembacaan panjang karakteristik aliran (u_L) dengan nilai sebesar 305,4 mm dan akurasi pembacaan jari-jari sebesar 0,1 mm.

$$u_L = \pm [(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{305,4} = \pm 0,000327$$

Dengan menggunakan *uncertainty* pada massa jenis, kecepatan angin dan viskositas dinamik yang telah diperoleh pada perhitungan sebelumnya, *uncertainty* pada perhitungan bilangan Reynolds (u_{Re}) yaitu :

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

$$u_{Re} = \pm [(0,00353)^2 + (0,002)^2 + (0,000327)^2 + (0,00273)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{Re} = \pm 0,00492$$

$$u_{Re} = \pm 0,49\%$$

3.8.5 Uncertainty pada Perhitungan Luas Penampang Turbin yang Terkena Angin (u_A)

$$A = LH$$

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

$$dA = HdL + LdH$$

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

$$u_{A,H} = \frac{\partial A_H}{A} = \frac{H}{A} \frac{\partial A}{\partial H} u_H = u_H$$

$$u_A = \pm[(u_L)^2 + (u_H)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Maka *uncertainty* pada pembacaan tinggi turbin (u_H) dengan nilai sebesar 295 mm dan akurasi pembacaan ketinggian sebesar 0,1 mm.

$$u_H = \pm[(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{295} = \pm 0,000339$$

Sehingga *uncertainty* pada perhitungan luas penampang turbin yang terkena angin (u_A)

$$u_A = \pm[(u_L)^2 + (u_H)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm[(0,000327 + (0,000339)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_A = \pm 0,000471 = \pm 0,0471\%$$

3.8.6 *Uncertainty* pada Perhitungan Torsi Dinamis (u_{TD})

$$T_D = (s - m)gr$$

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

$$dT_D = grd(s - m) + (s - m)gdr$$

Sehingga turunan parsial dari torsi dinamis sebagai berikut :

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

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

$$u_{T_D,(s-m)} = \frac{\partial T_{D(s-m)}}{T_D} = \frac{(s - m)}{T_D} \frac{\partial T_D}{\partial (s - m)} u_{(s-m)} = u_{(s-m)}$$

$$u_{T_D,(r)} = \frac{\partial T_{Dr}}{T_D} = \frac{r}{T_D} \frac{\partial T_D}{\partial r} u_r = u_r$$

$$u_{T_D} = \pm[(u_{(s-m)})^2 + (u_r)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Untuk mendapatkan nilai *uncertainty* pada torsi dinamis, maka diperlukan *uncertainty* pada pembacaan selisih massa neraca pegas dan pemberat serta jari jari poros turbin. Adapun nilai *uncertainty* pada pembacaan selisih massa pegas dan pemberat dengan nilai massa pada neraca pegas sebesar 170 gram dan ketelitian 10 gram. Sedangkan untuk massa pemberat yang digunakan sebanyak 25 gram dengan ketelitian 0,01 gram.

$$u_{(s-m)} = \pm[(u_s)^2 + (-u_m)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm\left[\left(\frac{10}{170}\right)^2 + \left(\frac{0,01}{25}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,0588$$

Uncertainty pada jari-jari poros turbin (u_r) dengan nilai sebesar 12,5 mm dan akurasi pembacaan ketinggian sebesar 0,1 mm.

$$u_r = \pm[(u_n)^2]^{\frac{1}{2}} = u_n = \pm \frac{0,1}{12,5} = \pm 0,008$$

Maka, *uncertainty* perhitungan torsi dinamis sebesar :

$$u_{T_D} = \pm[(u_{(s-m)})^2 + (u_r)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm[(0,0588)^2 + (0,008)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,058$$

$$u_{T_D} = \pm 5,8\%$$

3.8.7 *Uncertainty* pada Perhitungan Coefficient of Moment (u_{CM})

$$C_M = \frac{T_d}{T_t} = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R} = 2T_d \rho^{-1} U^{-2} A^{-1} R^{-1}$$

$$dC_M = \frac{\partial C_M}{\partial T_D} dT_D + \frac{\partial C_M}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial C_M}{\partial U} dU + \frac{\partial C_M}{\partial A} dA + \frac{\partial C_M}{\partial R} dR$$

Maka ;

$$\frac{\partial C_M}{\partial T_D} = 2\rho^{-1}U^{-2}A^{-1}R^{-1}$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial \rho} = -2T_d\rho^{-2}U^{-2}A^{-1}R^{-1}$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial U} = -4T_d\rho^{-1}U^{-3}A^{-1}R^{-1}$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial A} = -2T_d\rho^{-1}U^{-2}A^{-2}R^{-1}$$

$$\frac{\partial C_M}{\partial R} = -2T_d\rho^{-1}U^{-2}A^{-1}R^{-2}$$

$$u_{C_M, T_D} = \frac{\partial C_{M, T_D}}{C_M} = \frac{T_D}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial T_D} u_{T_D} = u_{T_D}$$

$$u_{C_M, \rho} = \frac{\partial C_{M, \rho}}{C_M} = \frac{\rho}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial \rho} u_{\rho} = u_{\rho}$$

$$u_{C_M, U} = \frac{\partial C_{M, U}}{C_M} = \frac{U}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial U} u_U = u_U$$

$$u_{C_M, A} = \frac{\partial C_{M, A}}{C_M} = \frac{A}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial A} u_A = u_A$$

$$u_{C_M, R} = \frac{\partial C_{M, R}}{C_M} = \frac{R}{C_M} \frac{\partial C_M}{\partial R} u_R = u_R$$

Sehingga nilai dari uncertainty dari Cm adalah sebagai berikut :

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

$$u_{C_M} = \pm[(0,058)^2 + (0,00353)^2 + (-2(0,002))^2 + (0,000471)^2 + (0,00065)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$u_{C_M} = \pm 0,0582 = \pm 5,82\%$$

3.8.8 Uncertainty pada Perhitungan Coefficient of Power (u_{CoP})

$$CoP = C_M \lambda$$

$$dCoP = \frac{\partial CoP}{\partial C_M} dC_M + \frac{\partial CoP}{\partial \lambda} d\lambda$$

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

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

$$u_{CoP} = \pm[(u_{C_M})^2 + (u_{\lambda})^2]^{\frac{1}{2}} = \pm[(0,0594)^2 + (0,00678)^2]^{\frac{1}{2}} = \pm 0,0585$$

$$u_{CoP} = \pm 5,98\%$$

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, Nilai *uncertainty* yang diperoleh untuk parameter perhitungan CoP dirangkum dalam tabel 3.17 berikut ini.

Tabel 3. 16 Nilai *Uncertainty* untuk Parameter Perhitungan CoP dengan $U = 5$ m/s

Parameter	Uncertainty
Bilangan Reynolds (Re)	0,49%
<i>Tip speed ratio</i> (λ)	0,68%
<i>Coefficient of moment</i> (CM)	5,94%
<i>Coefficient of power</i> (CoP)	5,98%

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Adapun hasil penelitian yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel yang disematkan dalam bentuk lampiran.

4.2 Contoh Perhitungan

Data yang diperoleh dari penelitian ini antara lain kecepatan putaran turbin (n), torsi dinamis (Td), torsi statis (Ts), yang kemudian diolah dengan perhitungan yang akan menghasilkan *coefficient of power* (CoP), *coefficient of moment* (CM), dan *coefficient of static torque* (CTS). Pada penelitian ini, digunakan fluida kerja udara yang alirannya diasumsikan steady dan incompressible dengan properties sebagai berikut :

1. Tekanan absolut udara dalam keadaan standar (p_{std}) = $1,01325 \times 10^5$ N/m²
2. Temperatur udara dalam keadaan standar (T_{std}) = 288 K
3. Massa jenis udara dalam keadaan standar (ρ_{std}) = 1,225 kg/m³

4.2.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

Untuk mendapatkan nilai dari bilangan Reynolds tahapan yang dapat dilakukan, yaitu dengan perhitungan :

1. Massa Jenis Udara

Dengan properties yang telah diasumsikan sebelumnya. Nilai massa jenis bergantung kepada beberapa parameter yang dapat dilihat dalam persamaan Boyle-Gay Lussac. Persamaan ini menjelaskan hubungan antara temperatur, tekanan, dan volume gas yang dirumuskan oleh persamaan 4.1 di bawah ini :

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (4.1)$$

Dengan nilai $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan diatas dapat dinyatakan sebagai persamaan 4.2 dibawah ini

$$\frac{p_1 m_1}{T_1 \rho_1} = \frac{p_2 m_2}{T_2 \rho_2} \quad (4.2)$$

Karena pada keadaan 1 dan 2 tidak memiliki perbedaan elevasi, maka tekanannya bernilai konstan atau $p_1 = p_2$. Selain itu nilai massa keduanya juga bernilai sama atau $m_1 = m_2$. Sehingga persamaan 4.2 diatas dapat disederhanakan kedalam persamaan 4.3 di bawah ini :

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

Pada penelitian ini, temperatur yang tercatat saat pengambilan data sebesar 28,2 °C atau 301,35 K. Maka massa jenis udara saat pengambilan data penelitian dapat dicari, yaitu :

$$\rho_2 = \frac{288 \text{ K} \times 1,225 \text{ kg/m}^3}{301,35 \text{ K}} = 1,171 \text{ kg/m}^3$$

2. Perhitungan Viskositas Dinamik Udara

Viskositas dinamik udara dapat dihitung menggunakan persamaan Sutherland yang ditunjukkan oleh persamaan 4.4.

$$\mu = \frac{bT^{\frac{3}{2}}}{S + T}$$

dimana untuk udara

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

$$S = 110,4 \text{ K}$$

$$T = \text{temperatur saat penelitian} = 301,35 \text{ K}$$

Nilai besaran di atas dapat di substitusikan ke dalam persamaan 4.4 sehingga diperoleh nilai viskositas dinamik udara sebesar :

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{\frac{1}{2}}} (301,35 \text{ K})^{\frac{3}{2}}}{110,4 \text{ K} + 301,35 \text{ K}} = 1,852 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

3. Perhitungan Bilangan Reynolds

Berdasarkan persamaan 2.1, bilangan Reynolds fluida dipengaruhi oleh beberapa parameter yang dapat dilihat hubungannya dalam persamaan di bawah ini :

$$Re_L = \frac{\rho UL}{\mu}$$

dengan panjang karakteristik dari turbin angin Savonius sebesar

$$L = (2D - 2t - d_p) = 2(165,2) - 2(3) - 19 = 305,4 \text{ mm} = 0,3054 \text{ m}$$

Nilai panjang karakteristik tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 2.1 sehingga diperoleh bilangan Reynolds untuk kecepatan 5 m/s sebesar :

$$Re_L = \frac{(1,171) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0,3054 \text{ m})}{1,852 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} = 9,65 \times 10^4$$

Dengan melakukan perhitungan yang sama dengan nilai kecepatan 7 m/s maka diperoleh nilai bilangan Reynolds sebesar $1,35 \times 10^5$.

4.2.2 Perhitungan Tip Speed Ratio

Dengan menggunakan persamaan 2.20, dapat diperoleh nilai dari *Tip Speed Ratio*. Adapun persamaannya yaitu sebagai berikut :

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

Contoh perhitungan dilakukan dengan menggunakan data pada kecepatan 5 m/s pada CoP tertinggi sebagai berikut. $n = 155,3 \text{ rpm}$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2(\pi 155,3)}{60} = 16,263 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$R = \frac{L}{2} = \frac{0,3054}{2} = 0,1527 \text{ m}$$

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

Nilai nilai diatas kemudian dapat disubstitusikan kedalam persamaan 2.20 untuk mendapat nilai *tip speed ratio*.

$$\lambda = \frac{16,263 \frac{\text{rad}}{\text{s}} 0,1527 \text{ m}}{5 \text{ m/s}} = 0,4966$$

4.2.3 Perhitungan *Coefficient of Power*

Dengan menggunakan persamaan 2.21, dapat diperoleh nilai dari *coefficient of power (CoP)*. Adapun persamaannya sebagai berikut :

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

Untuk memperoleh nilai *CoP*, digunakan contoh perhitungan pada kecepatan 5 m/s sebagai berikut :

$$s = 0,17 \text{ kg} = 170 \text{ g}$$

$$m = 25,0 \text{ g} = 0,0250 \text{ kg}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$r = 0,0125 \text{ m}$$

$$\omega = 16,263 \text{ rad/s}$$

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

$$A = LH = (0,3054)(0,293) = 0,08979 \text{ m}^2$$

$$U = \text{kecepatan aliran angin} = 5 \text{ m/s}$$

Nilai besaran di atas kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 2.21 sehingga diperoleh nilai *CoP* sebesar :

$$CoP = \frac{(0,17 \text{ kg} - 0,025 \text{ kg}) (9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(0,0125 \text{ m}) (16,263 \frac{\text{rad}}{\text{s}})}{\frac{1}{2} (1,171 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0,08979 \text{ m}^2)(5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3}$$

$$CoP = 0,0441 \text{ atau } 4,41\%$$

4.2.4 Perhitungan *Coefficient of Moment*

Persamaan 2.22 dapat digunakan untuk mendapatkan nilai *coefficient of moment*. Persamaan tersebut merupakan perbandingan antara torsi dinamis yang dihasilkan turbin dengan torsi teoritis yang dihasilkan oleh angin.

$$C_M = \frac{T_d}{T_t} = \frac{(s - m)gr}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R}$$

Persamaan diatas dapat dihubungkan dengan *tip speed ratio* dan *CoP* untuk mengetahui hubungan antara *coefficient of moment* dan *CoP*. Maka diperoleh persamaan 2.23 di bawah ini :

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

Sehingga dari data hasil perhitungan yang telah dilakukan, dapat disubstitusi nilai *CoP* dan *TSR* yang diperoleh dan dapat dicari nilai *coefficient of moment* sebagai berikut :

$$C_M = \frac{0,0441}{0,4996} = 0,0886 = 8,86\%$$

4.2.5 Perhitungan *Coefficient of Static Torque*

Nilai *coefficient of static torque (CTS)* dinyatakan dalam persamaan 2.24 sebagai berikut :

$$CTS = \frac{T_S}{T_t} = \frac{T_S}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A \cdot R}$$

Dengan menggunakan data yang diperoleh saat $U = 5 \text{ m/s}$ pada saat nilai torsi statis tertinggi, dengan menggunakan data dibawah ini untuk perhitungan :

$$T_S = 1,19 \text{ N.cm} = 0,0119 \text{ N.m}$$

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

$$A = 0,08979 \text{ m}^2$$

$$R = 0,1527 \text{ m}$$

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

Nilai nilai diatas dapat disubstitusikan ke dalam persamaan 2.24 yang akan menghasilkan nilai CTS sebagai berikut :

$$CTS = \frac{0,0119 \text{ N.m}}{\frac{1}{2} \cdot (1,171 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \cdot (5 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \cdot (0,08979 \text{ m}) \cdot (0,1527 \text{ m})} = 0,059$$

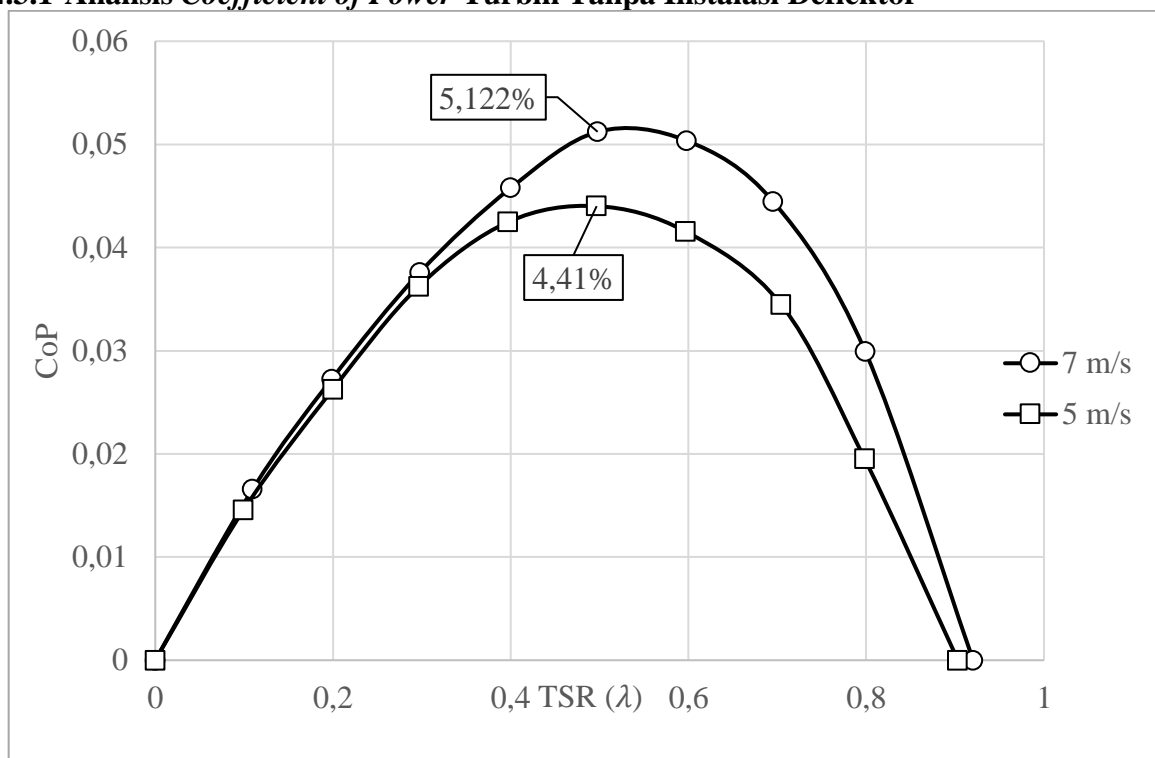
Untuk perhitungan *tip speed ratio*, *coefficient of moment*, *coefficient of power*, dan *coefficient of static torque* untuk data lainnya telah disusun dalam tabel yang terlampir dalam lampiran.

4.3 Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius Tanpa Instalasi Deflektor

Analisis kinerja turbin dilakukan dengan meninjau beberapa parameter, yaitu *coefficient of power* yang dianalisa untuk mengetahui seberapa baik performa turbin dalam mengonversi daya yang dimiliki oleh angin yang mengenainya. Selanjutnya yaitu, *coefficient of moment* yang menunjukkan seberapa baik turbin angin menghasilkan momen dari momen yang dimiliki oleh angin. Parameter terakhir yaitu *coefficient of static torque* yang berfungsi untuk mengetahui seberapa baik kemampuan self starting yang dimiliki oleh turbin.

Data yang dianalisis dimulai dari data turbin konvensional yang tidak dimodifikasi dengan penambahan instalasi pengganggu aliran berupa deflektor. Kemudian analisis dilanjutkan dengan data turbin yang dilengkapi dengan deflektor.

4.3.1 Analisis Coefficient of Power Turbin Tanpa Instalasi Deflektor



Gambar 4. 1 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa Deflektor

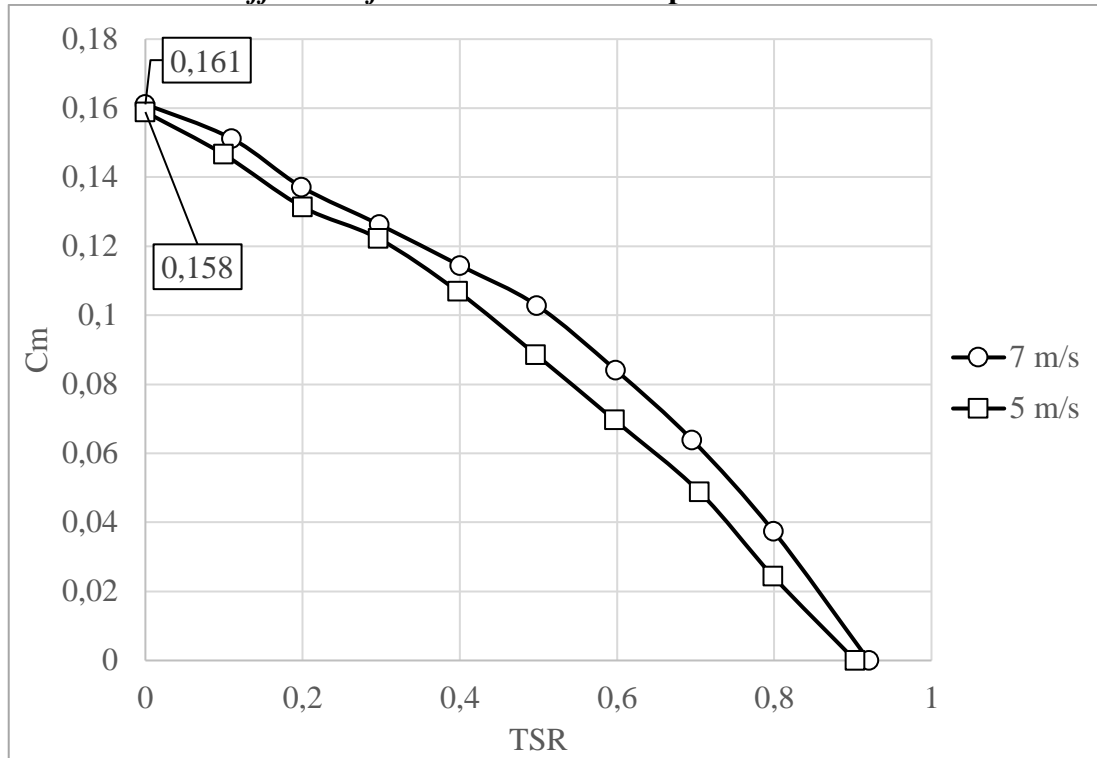
Grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.1 menunjukkan hubungan *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa adanya modifikasi penambahan instalasi pengganggu aliran berupa deflektor. Seperti perhitungan yang telah dilakukan, nilai CoP diperoleh dari persamaan 2.21 yang merupakan rasio dari daya aktual turbin dengan daya teoritis angin. Daya aktual turbin diperoleh dari perhitungan yang menggunakan data kecepatan sudut turbin dan selisih pembebanan dengan nilai

yang ditunjukkan oleh neraca pegas. Sedangkan nilai TSR diperoleh dari persamaan 2.20 yang merupakan kecepatan pada ujung dari sudu turbin. Perubahan nilai *tip speed ratio* merupakan akibat dari variasi pembebanan yang diberikan pada skema *brake dynamometer*. Penambahan beban ini dilakukan sedikit demi sedikit hingga turbin berhenti berputar atau saat $TSR = 0$.

Berdasarkan gambar 4.1 di atas, grafik *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) untuk seluruh variasi kecepatan angin berbentuk kurva parabolik terbuka ke bawah karena adanya pembebanan pada *brake dynamometer*. Pada λ_{max} , kecepatan putaran turbin bernilai maksimum sedangkan torsi dinamisnya bernilai nol karena tidak ada pembebanan pada *brake dynamometer*. Tidak adanya pembebanan juga berarti bahwa nilai torsi dinamis yang dihasilkan bernilai nol sehingga nilai CoP bernilai rendah. Dengan dimulainya penambahan beban, nilai kecepatan putaran turbin menurun sehingga nilai λ juga menurun. Hal ini berkebalikan dengan nilai torsi dinamis yang meningkat sehingga nilai CoP juga meningkat hingga mencapai nilai puncaknya pada CoP_{max} . Pada keadaan CoP_{max} tersebut, nilai *tip speed ratio* dapat disebut sebagai $\lambda_{optimum}$. Jika penambahan beban pada *brake dynamometer* tetap dilanjutkan, maka akan terjadi penurunan nilai CoP yang pada akhirnya bernilai nol saat turbin berhenti berputar pada $\lambda = 0$ atau λ_{min} . Bentuk kurva yang diperoleh disebabkan karena turbin angin Savonius memiliki kondisi optimalnya dalam beroperasi, yang dalam hal ini tersebut dapat dipengaruhi oleh bentuk geometri, adanya pembebanan dan perubahan aliran angin. Kondisi maksimal ini ditandai dengan nilai CoP yang lebih tinggi dibanding kondisi lainnya. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa $\lambda_{optimum}$ untuk keempat variasi kecepatan angin kira-kira berada pada rentang 0,4-0,6. Nilai λ yang terlalu tinggi akan menyebabkan penurunan nilai efisiensi karena adanya efek solid wall dimana turbin yang berputar dengan kecepatan tinggi seolah-olah membentuk silinder pejal sehingga aliran angin tidak dapat mengenai sudu turbin secara sempurna. Selain itu, seiring dengan peningkatan kecepatan putaran turbin, *mechanical losses* yang terjadi juga meningkat. Gabungan kedua fenomena tersebut mengakibatkan daya teoritis angin yang diterima tidak dapat dimanfaatkan secara optimal sehingga nilai CoP menurun pada λ yang lebih tinggi dibandingkan $\lambda_{optimum}$. Berdasarkan gambar 4.1, nilai CoP_{max} untuk kecepatan 5 m/s sebesar 4,41% pada λ sebesar 0,5 dan untuk kecepatan 7 m/s sebesar 5,12% pada λ sebesar 0,5. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa turbin angin Savonius bekerja pada rentang λ tertentu untuk dapat mencapai kondisi optimal.

Diketahui pula dari gambar 4.1, bahwa dengan melakukan peningkatan kecepatan angin dari 5 m/s menjadi 7 m/s, nilai CoP juga meningkat. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kecepatan angin meningkatkan kecepatan putaran turbin dan selisih gaya drag antara sudu *advancing* dan *returning* sehingga torsi positif turbin meningkat. Keduanya akan meningkatkan nilai dari CoP turbin. Adapun penurunan nilai CoP karena kecepatan angin yang terlalu tinggi tidak terjadi karena variasi kecepatan yang digunakan hanya satu variasi saja yang berada pada rentang 5 m/s dan 7 m/s. Maka nilai kecepatan yang digunakan tidak tergolong dalam rentang kecepatan angin yang menyebabkan nilai penurunan CoP. Hal ini bersesuaian dengan pernyataan Mahmoud dkk (2010) yang mengutip dari Menet dkk (2004) bahwa turbin Savonius memiliki kecepatan angin optimal di kisaran 5-10 m/s. Adapun turbin Savonius yang digunakan memiliki aspek rasio 4 dan overlap 0,25. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai CoP telah terbukti.

4.3.2 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin Tanpa Instalasi Deflektor



Gambar 4. 2 Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa Deflektor

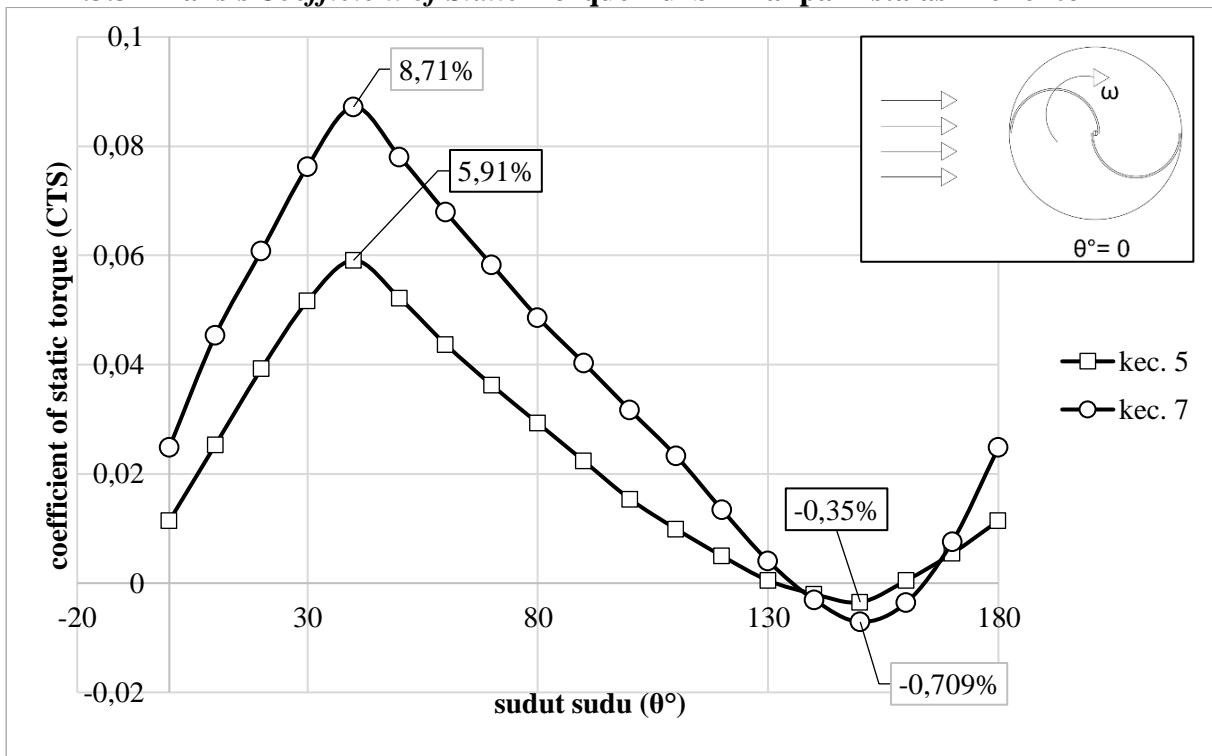
Gambar 4.2 merupakan grafik *coefficient of moment* (C_M) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa instalasi deflektor untuk variasi kecepatan angin 5 dan 7 m/s. Nilai C_M diperoleh dari persamaan 2.22 yang merupakan rasio torsi dinamis turbin terhadap torsi teoritis turbin. Nilai torsi dinamis turbin diperoleh dari perhitungan yang melibatkan data antara selisih massa pemberat yang digunakan dengan nilai massa yang ditunjukkan oleh neraca pegas. Sedangkan nilai TSR diperoleh dari persamaan 2.20 yang merupakan kecepatan pada ujung dari sudu turbin. Perubahan nilai *tip speed ratio* merupakan akibat dari variasi pembebanan yang diberikan pada skema *brake dynamometer*. Penambahan beban ini dilakukan sedikit demi sedikit hingga turbin berhenti berputar atau saat $TSR = 0$.

Diperoleh dari gambar 4.2, bahwa grafik untuk seluruh variasi kecepatan angin memiliki *trendline* menurun. Seiring dengan peningkatan nilai λ , nilai C_M juga akan semakin menurun. Ketika nilai λ tinggi, kecepatan putaran turbin juga tinggi. Namun pada keadaan tersebut tidak terjadi atau hanya sedikit pembebanan yang diberikan. Sehingga apabila pembebanan pada *brake dynamometer* rendah, nilai torsi dinamis yang dihasilkan juga rendah. Diketahui bahwa nilai C_M berbanding lurus dengan nilai torsi dinamis, maka ketika nilai torsi dinamis rendah, nilai C_M yang dihasilkan juga rendah. Nilai C_{Mmax} untuk kecepatan 5 m/s sebesar 15,8% dan untuk kecepatan 7 m/s sebesar 16,1%.

Berdasarkan gambar 4.2, diketahui pula bahwa seiring dengan peningkatan kecepatan angin, nilai C_M juga semakin meningkat. Hal ini dapat dilihat dari nilai C_{Mmax} yang semakin tinggi pada kecepatan 7 m/s. Peristiwa ini dapat terjadi karena peningkatan kecepatan angin dapat meningkatkan selisih gaya drag antara sudu advancing dan returning sehingga torsi positif turbin akan meningkat. Maka dari itu nilai C_M dapat meningkat hingga ke titik optimalnya. Apabila kecepatan angin terus ditingkatkan akan terjadi penurunan nilai C_M karena akan ada efek *solidwall* sehingga angin tidak dapat menumbuk sudu turbin dengan sempurna. Penurunan nilai C_M akibat peningkatan kecepatan angin tidak terjadi pada grafik tersebut mengingat kecepatan angin yang

digunakan pada penelitian ini berada pada rentang 5-7 m/s yang merupakan kecepatan angin yang tergolong rendah. Sedangkan menurut Altan dkk (2010), turbin Savonius bekerja dengan baik pada kecepatan angin yang tergolong rendah. Menet dkk (2004) menemukan bahwa turbin Savonius memiliki kecepatan angin optimal di kisaran 5-10 m/s. Adapun turbin Savonius yang digunakan memiliki aspek rasio 4 dan overlap 0,25. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai C_M telah terbukti.

4.3.3 Analisis *Coefficient of Static Torque* Turbin Tanpa Instalasi Deflektor

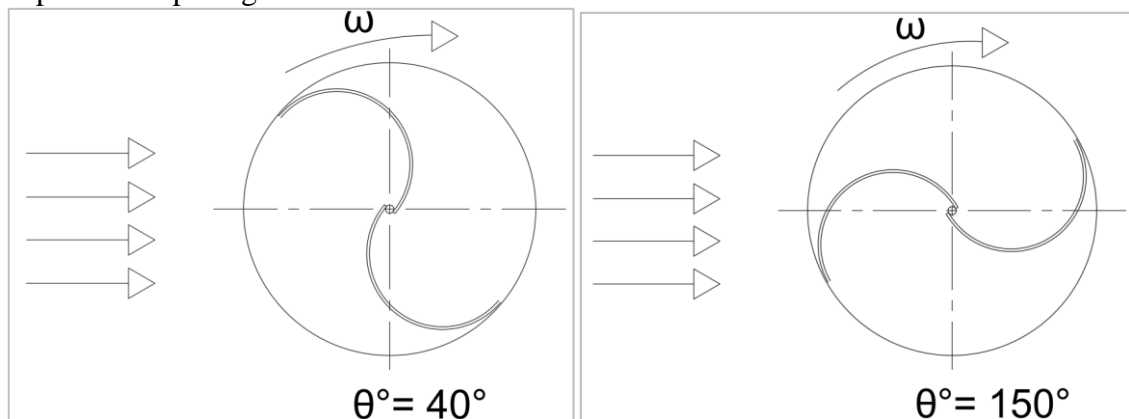


Gambar 4. 3 Grafik *Coefficient of Static Torque* (CTS) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa Deflektor

Gambar 4.3 merupakan grafik *coefficient of static torque* (CTS) sebagai fungsi sudut sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa instalasi deflektor untuk variasi kecepatan angin 5 dan 7 m/s. Nilai CTS diperoleh dari persamaan 2.24 yang merupakan rasio torsi statis terhadap torsi teoritis turbin. Nilai torsi statis diperoleh dari hasil pembacaan torquemeter yang dipasang pada poros turbin dan diukur pada saat sudut sudu turbin berada di posisi tertentu. Posisi ini memiliki rentang 0-180° dengan pengulangan pengukuran setiap interval kenaikan sudut sebesar 10°. Nilai CTS menjelaskan kemampuan turbin dalam mengonversi torsi yang dihasilkan oleh angin menjadi torsi statis yang berfungsi untuk menggerakkan turbin dari keadaan diamnya. Nilai CTS ini dipengaruhi oleh geometri dan arah orientasi turbin terhadap arah datangnya angin.

Berdasarkan gambar 4.3, diketahui bahwa grafik seluruh variasi kecepatan angin berbentuk sinusoidal dengan nilai CTS_{max} terjadi pada sudut 40° dan nilai CTS_{min} terjadi pada sudut 150°. Untuk kecepatan angin 5 m/s, diperoleh nilai CTS_{max} sebesar 5,9% dan nilai CTS_{min} sebesar -0,35%. Lalu, untuk kecepatan angin 7 m/s, diperoleh nilai CTS_{max} sebesar 8,7% dan nilai CTS_{min} sebesar -0,71%. Torsi statis yang bernilai positif menunjukkan bahwa turbin memiliki kemampuan *self-starting* yang baik, sedangkan torsi statis yang bernilai negatif menunjukkan bahwa turbin tidak memiliki kemampuan *self-starting* sehingga memerlukan gaya eksternal tambahan untuk dapat memulai putaran. Berdasarkan grafik pada gambar 4.3, pada kedua grafik variasi kecepatan angin terjadi

tren peningkatan pada sudut $0-40^\circ$ dan $150^\circ-180^\circ$. Hal ini terjadi karena pada sudut tersebut, sudu advancing berada lebih dekat dengan arah datangnya angin dan menerima lebih banyak hantaman angin dibandingkan sudu returning. Oleh karena itu, gaya drag yang diterima oleh sudu advancing lebih besar dibandingkan sudu returning sehingga selisih gaya drag antara kedua sudu tersebut meningkat begitu pula dengan torsi. Sementara itu, pada sudut $40-150^\circ$, gaya drag yang diterima oleh sudu returning meningkat karena sudu returning semakin mendekat dengan arah datangnya angin. Ketika gaya drag yang diterima oleh sudu returning lebih besar dibandingkan sudu advancing, torsi statis akan bernilai negatif dan menyebabkan turbin kehilangan kemampuan self-starting. Hal ini memiliki arti bahwa untuk menggerakkan turbin pada posisi tersebut diperlukan gaya eksternal. Adapun ilustrasi posisi sudu turbin pada keadaan keduanya, dapat dilihat pada gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 4. 4 Ilustrasi Posisi Turbin saat $\theta = 40^\circ$ dan $\theta = 150^\circ$ Tanpa Deflektor

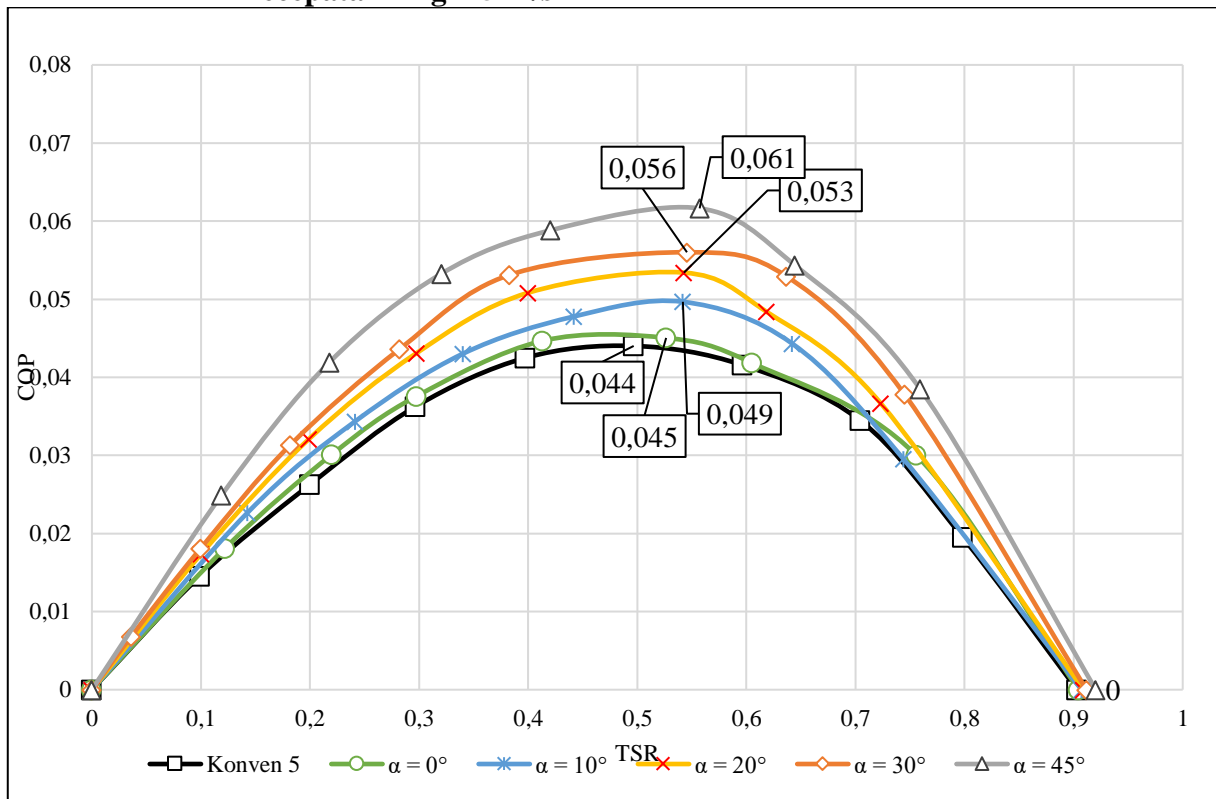
Berdasarkan gambar 4.3, diketahui pula bahwa seiring dengan peningkatan kecepatan angin, nilai CTS juga semakin meningkat. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kecepatan angin meningkatkan selisih gaya drag antara sudu advancing dan returning sehingga torsi positif turbin meningkat begitu pula dengan nilai CTS-nya. Kemudian, secara umum, penurunan nilai CTS akibat peningkatan kecepatan angin cenderung tidak terjadi pada grafik tersebut mengingat kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini berada pada rentang 5-7 m/s. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud dkk. (2012), penurunan nilai Cts atau CTS mulai terjadi pada kecepatan angin di atas 10,5 m/s. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai CTS telah terbukti.

4.4 Analisis Kinerja Turbin Angin Savonius dengan Instalasi Deflektor

Analisis kinerja turbin angin Savonius dengan instalasi deflektor ini dilakukan untuk mengetahui kinerja turbin setelah diinstalasikan dua buah deflektor, yang terletak di depan sudu advancing dan returning. Adapun posisi deflektor di depan sudu returning tidak divariasikan dan hanya diletakkan dengan sudut 0° terhadap garis sumbu yang tegak lurus terhadap arah datangnya angin. Sedangkan untuk deflektor di depan sudu advancing, variasi sudu dilakukan dengan variasi $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ,$ dan 45° . Variasi posisi deflektor tersebut dilakukan pada keadaan kecepatan angin 5 dan 7 m/s. Maka dari itu untuk mengetahui pengaruh instalasi deflektor terhadap kinerja turbin, dilakukan analisis dengan menggunakan grafik *coefficient of power* (CoP) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ), *coefficient of moment* (C_M) sebagai fungsi λ , dan *coefficient of static torque* (CTS) sebagai fungsi sudut sudu turbin (θ°) berikut ini.

4.4.1 Analisis *Coefficient of Power* Turbin dengan Instalasi Deflektor Ketika Kecepatan angin 5 dan 7 m/s

4.4.1.1 Analisis *Coefficient of Power* Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 5 m/s



Gambar 4. 5 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s

Grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.5 menunjukkan hubungan *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan adanya modifikasi penambahan instalasi pengganggu aliran berupa deflektor dengan kecepatan angin sebesar 5 m/s. Seperti perhitungan yang telah dilakukan, nilai CoP diperoleh dari persamaan 2.21 yang merupakan rasio dari daya aktual turbin dengan daya teoritis angin. Daya aktual turbin diperoleh dari perhitungan yang menggunakan data kecepatan sudut turbin dan selisih pembebanan dengan nilai yang ditunjukkan oleh neraca pegas. Sedangkan nilai TSR diperoleh dari persamaan 2.20 yang merupakan kecepatan pada ujung dari sudu turbin. Perubahan nilai tip speed ratio merupakan akibat dari variasi pembebanan yang diberikan pada skema *brake dynamometer*. Penambahan beban ini dilakukan sedikit demi sedikit hingga turbin berhenti berputar atau saat TSR = 0.

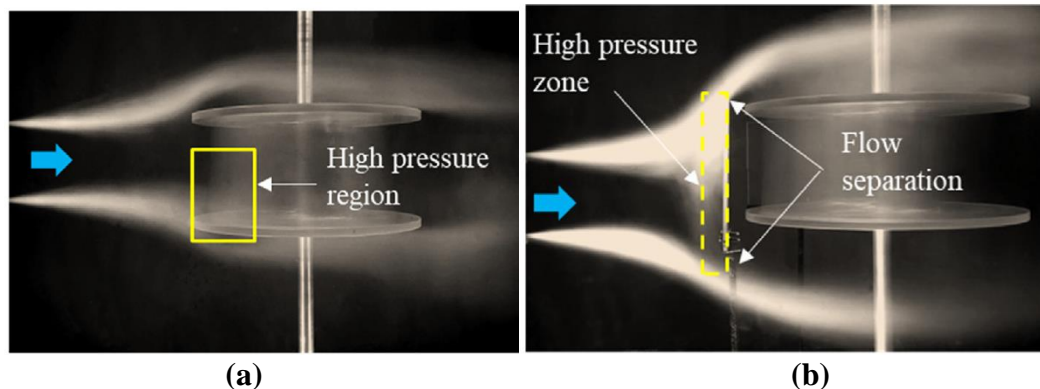
Pada pembebanan tertentu akan diperoleh nilai CoP_{max} pada $\lambda_{optimum}$ yang disebut sebagai titik puncak parabolik. Nilai CoP_{max} untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor) adalah sebesar 4,41% pada λ sebesar 0,5. Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° . Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai CoP sebesar 4,50% pada λ sebesar 0,52; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai CoP sebesar 4,70% pada λ sebesar 0,54; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai CoP sebesar 5,30% pada λ sebesar 0,54; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai CoP sebesar 5,60% pada λ sebesar 0,54; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai CoP sebesar 6,10% pada λ sebesar 0,56. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa turbin angin Savonius bekerja pada rentang λ tertentu untuk dapat mencapai kondisi

optimal. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa λ_{optimum} untuk konfigurasi konvensional kira-kira berada pada rentang 0,5-0,6. Dari data hasil percobaan tersebut ditemukan bahwa pengaruh adanya instalasi deflektor di depan sudu *advancing* dan *returning* memiliki pengaruh yang positif sehingga dapat meningkatkan nilai CoP dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa dapat dilihat dari beberapa titik pada grafik di gambar 4.5. Pertama, posisi puncak CoP yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan grafik turbin konvensional. Peningkatan nilai CoP dimulai dari 2,05% pada $\alpha = 0^\circ$, 6,5% pada $\alpha = 10^\circ$, 20,18% pada $\alpha = 20^\circ$, 26,98% pada $\alpha = 30^\circ$, 38,32% pada $\alpha = 45^\circ$. Peningkatan CoP tertinggi terdapat pada konfigurasi $\alpha = 45^\circ$ dan peningkatan terendah pada saat $\alpha = 0^\circ$. Kedua, perubahan posisi λ , hal ini dapat dipantau pada posisi λ_{max} dan pada λ saat CoP maksimal. Terlihat bahwa ada pergeseran nilai λ pada keduanya. Hal ini menunjukkan bahwa grafik mengalami pergeseran ke arah λ yang lebih besar. Pergeseran ini dipengaruhi oleh adanya efek *nozzle* yang disebabkan oleh keberadaan deflektor. Kecepatan angin akan mengalami peningkatan setelah melewati kedua deflektor. Peningkatan sudut α pada deflektor sudu *advancing* juga semakin meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai TSR pada CoP_{max} memiliki nilai yang berbeda dan mengalami peningkatan. Hal ini dapat diamati pada nilai TSR yang semakin meningkat yaitu dari nilai konvensional sebesar 0,5 menjadi 0,52 pada sudut $\alpha = 10^\circ$; 0,54 pada sudut $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, \text{ dan } 30^\circ$; dan 0,56 pada $\alpha = 45^\circ$.

Hal ini juga bersesuaian dengan studi eksperimental yang dilakukan oleh Salleh (2022). Dengan adanya penambahan deflektor, kinerja dari turbin angin Savonius mengalami perubahan. Meski tidak semuanya mengalami perubahan yang baik, namun dengan adanya instalasi tersebut, banyak konfigurasi yang mengalami perubahan yang baik. Salleh (2022) menggunakan turbin Savonius dengan aspek rasio sebesar 0,401 dan memiliki overlap rasio sebesar 0,109. Adapun kecepatan angin yang digunakan sebesar 7 m/s. Deflektor yang digunakan memiliki tinggi = 0,132 m dan lebar = 0,183 m yang diletakkan didepan sudu *advancing* dan *returning*. Dengan gap antara turbin dan deflektor sebesar 0,018 m. Posisi deflektor *advancing* adalah 1,204 R, sedangkan deflektor pada *returning blade*. Diposisikan secara longitudinal sebesar 1,204 R dari pusat turbin. Peningkatan CoP tertinggi sebesar 61,53% terhadap CoP turbin konvensional atau tanpa deflektor. Sedangkan penurunan nilai CoP tertinggi di -45% dari CoP turbin konvensional. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Altan (2010) yang menginstalasikan deflektor di depan sudu *returning* dan didekat sudu *advancing*. Altan menemukan bahwa peningkatan nilai CoP sebesar hampir dua kali lipat jika dibandingkan performa turbin jika tanpa instalasi deflektor.

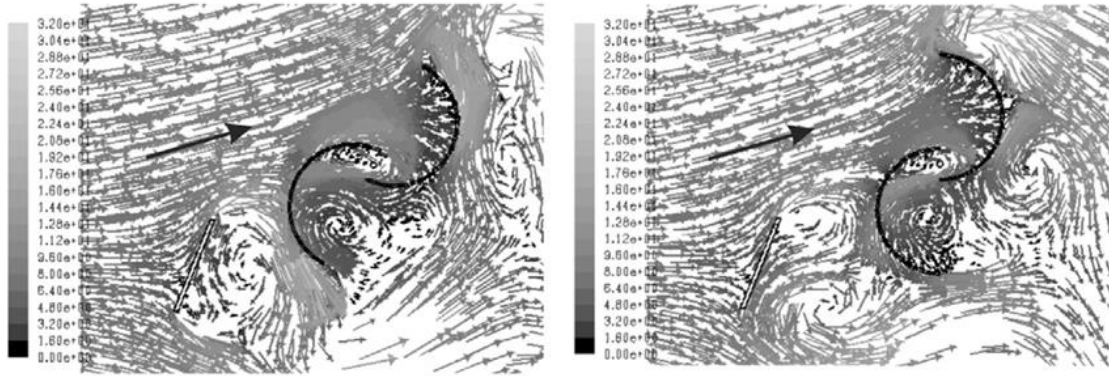
Peningkatan CoP pada penelitian ini dipengaruhi oleh instalasi dua deflektor. Pada deflektor *returning blade* yang diinstalasikan dalam posisi $\beta = 0^\circ$, dan memiliki jarak terhadap turbin sebesar 5 mm. Hal ini menyebabkan deflektor menutupi *returning blade* secara sempurna dari angin. Instalasi tersebut tentu saja mengurangi torsi negatif turbin angin yang dikarenakan tumbukan angin pada *returning blade* sehingga dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Salleh (2020) menambahkan *smoke* pada aliran angin untuk mengetahui interaksi aliran angin dengan deflektor. Ilustrasi *flow pattern* di sekitar *returning blade* turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 4.6. Dalam penelitian tersebut terlihat bahwa pada *flow pattern* turbin tanpa deflektor, aliran angin menabrak langsung permukaan cembung dari *returning blade* yang dapat dilihat pada gambar 4.5 (a). Hal tersebut menghasilkan adanya zona dengan tekanan tinggi di depan *returning*

blade yang diindikasikan dengan kotak berwarna kuning. Adanya daerah bertekanan tinggi ini menyebabkan terjadinya torsi negatif yang mendorong turbin untuk berputar ke arah sebaliknya yang memiliki tekanan yang lebih rendah.



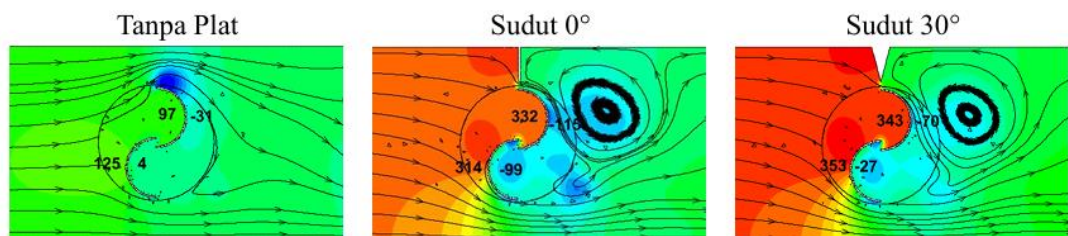
Gambar 4. 6 Flowpattern di sekitar sudu *returning* turbin angin Savonius (a) Konvensional (b) Deflektor $\beta = 0^\circ$ (Salleh dkk, 2022)

Pada gambar 4.6 (b) terlihat pola aliran pada deflektor yang diletakkan di depan sudu *returning* turbin dengan sudut kemiringan $\beta = 0^\circ$. Pada pola aliran pada gambar 4.6 terlihat bahwa terjadi separasi aliran yang terlihat pada daerah diatas dan dibawah deflektor. Saat aliran angin mengenai deflektor, akan terjadi daerah dengan tekanan tinggi akibat dari tumbukan angin dengan deflektor. Daerah tersebut terletak pada upstream deflektor yang ditandai dengan kotak berwarna kuning. Umumnya jika ada *flat plate* yang tegak lurus dengan arah aliran, jika aliran terseparasi pada ujung dari deflektor maka akan membentuk vortex di belakang deflektor. Namun pada kasus ini, vortex tidak terbentuk karena ukuran *gap* antara tirbin dan deflektor sangat kecil sehingga dapat menjaga daerah dengan tekanan yang rendah di bagian *downstream* deflektor. Dalam penelitian ini, deflektor menutup penuh daerah antara penyangga turbin bagian atas dan bawah, sehingga aliran angin akan terseparasi secara horizontal setelah menubruk deflektor. Sehingga deflektor secara efektif mencegah aliran yang terpisah mengenai sudu *returning*, sehingga sudu mengalami torsi negatif yang kecil. Studi numerik yang dilakukan oleh Mohamed dkk (2021) menunjukkan perilaku pola aliran yang sama, jika *gap* antara turbin angin dan deflektor memiliki jarak yang besar. Aliran yang terseparasi akan tersedot ke daerah bertekanan rendah di belakang deflektor akibat terbentuknya vortex, hal ini menyebabkan adanya *pressure recovery* sehingga meningkatkan tekanan di daerah *gap* turbin dengan deflektor. Peristiwa tersebut dapat terlihat pada gambar 4.7 dibawah ini. Sehingga dengan adanya deflektor yang diposisikan sedekat mungkin dengan *returning blade* dan menutupi seluruh bagaian sudu dari aliran angin, dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh instalasi deflektor pada sudu *returning* terhadap nilai CoP telah terbukti



Gambar 4. 7 *Flowpattern* di sekitar turbin angin Savonius (Mohamed dkk, 2021)

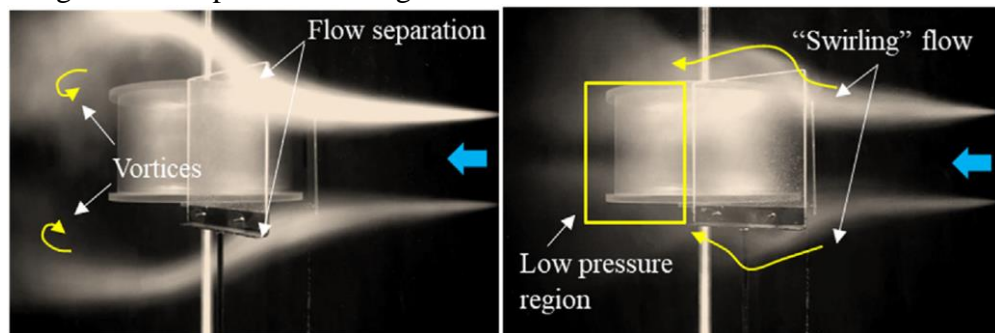
Pada deflektor lainnya, yaitu deflektor pada *advancing blade* dengan variasi sudut 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° menunjukkan hasil CoP yang berbeda-beda. Nilai CoP yang tercatat mengalami *trendline* yang terus naik hingga sudut tertinggi. Nilai CoP bervariasi dari 0,045 hingga 0,061 yang semuanya mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan CoP dari turbin konvensional tanpa deflektor. Hal ini dapat disebabkan karena instalasi deflektor pada sudut *advancing* menyebabkan adanya daerah bertekanan tinggi tepat di bagian *upstream* deflektor akibat adanya tekanan stagnasi aliran yang menumbuk deflektor. Adanya daerah bertekanan tinggi di bagian *upstream* ini akan mengakibatkan daerah bertekanan rendah di bagian *downstream* deflektor relatif terhadap bagian *upstream*. Perbedaan tekanan antara kedua daerah ini akan meningkatkan torsi positif yang searah dengan putaran turbin sehingga dapat meningkatkan performa turbin. Salleh (2021) dalam studi eksperimentalnya menemukan bahwa adanya daerah bertekanan rendah pada sisi *downstream* deflektor dapat disebabkan oleh adanya aliran angin yang mengalami percepatan setelah melewati deflektor. Tekanan daerah *downstream* yang lebih rendah dari sisi *upstream* ini akan mengakibatkan bertambahnya torsi positif turbin. Huda (2024) melakukan penelitian numerik mengenai pengaruh penambahan plat segitiga di dekat sudut *advancing* dengan beberapa variasi sudut sudut 0° hingga 150° . Model aliran turbulen yang digunakan adalah *realizable K- ϵ* dengan *enhance wall treatment*. Fluida kerja adalah air dengan kecepatan yang digunakan adalah 0,2 m/s dan 0,4 m/s. Pada gambar 4.8 yang dihasilkan dari studi numerik tersebut, daerah bertekanan rendah pada sisi *downstream* juga ditemukan. Dengan adanya penambahan deflektor pada sudut *advancing* terbukti memperbesar tekanan statis di depan sudut *advancing* dan mengecilkan tekanan di belakang sudut jika dibandingkan dengan variasi tanpa penambahan deflektor.



Gambar 4. 8 Kontur Tekanan Statis Variasi Sudut Puncak pada Sudut Azimuth 0° (Huda, 2024)

Peningkatan nilai CoP juga terjadi pada saat sudut deflektor ditingkatkan, keselarasan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salleh (2021) pada

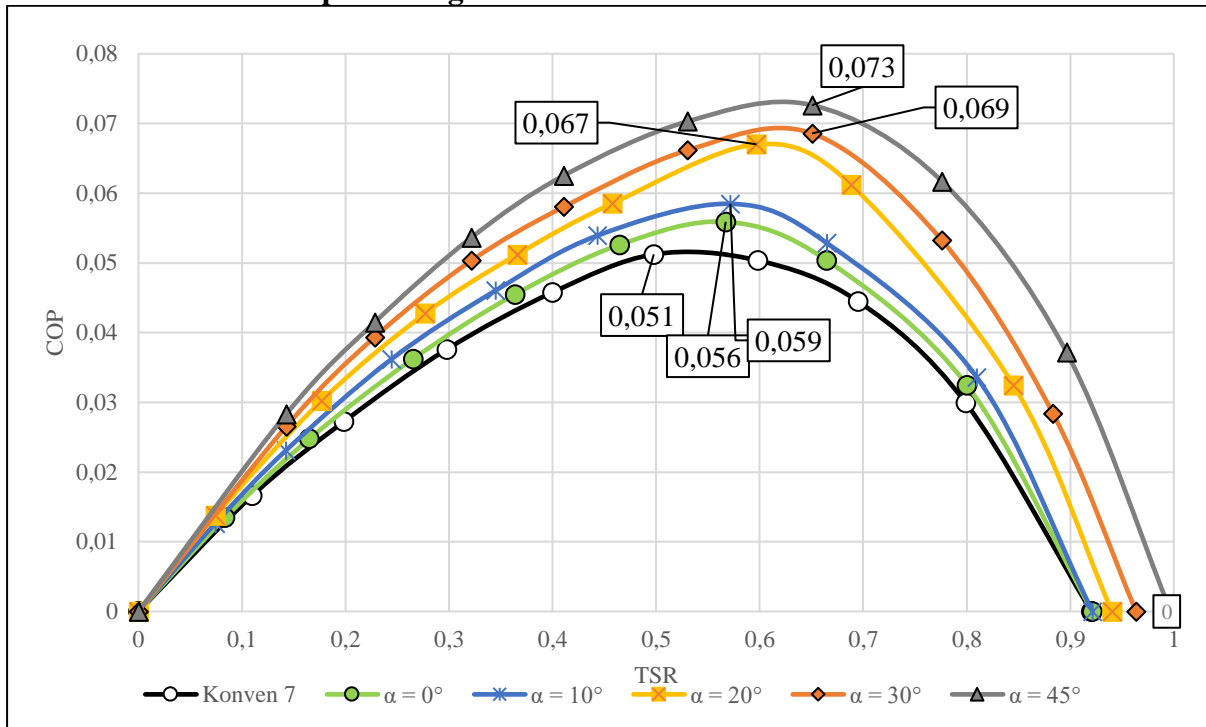
penelitiannya, menambahkan asap untuk menemukan pola aliran ketika angin berinteraksi dengan deflektor pada posisi sudut yang berbeda. Pada sudut kecil, posisi deflektor mendekati posisi tegak lurus terhadap aliran sehingga tidak dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing* jika dibandingkan dengan sudut yang lebih besar. Maka dari itu peningkatan jumlah aliran angin yang menuju sudu *advancing* dapat membantu peningkatan CoP dari turbin angin Savonius. Selanjutnya, variasi sudu turbin yang semakin mendekati tegak lurus dengan arah aliran juga menyebabkan terbentuknya *wake* yang lebih besar jika dibandingkan dengan sudut yang lebih besar. Separasi aliran pada deflektor yang memiliki sudut kemiringan lebih kecil akan menyebabkan *wake* yang lebih besar pada sisi *downstream* dan menyebabkan adanya aliran resirkulasi yang dapat memberikan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan yang CoP yang diberikan tidak sebaik ketika sudut deflektor menjadi lebih besar. Pola aliran ketika berinteraksi dengan deflektor dengan sudut kecil ($\alpha = 30^\circ$) yang dilakukan oleh Salleh (2021) dapat dilihat pada gambar 4.9 (a) di bawah ini. Sedangkan pola aliran ketika berinteraksi dengan deflektor dengan sudut lebih besar ($\alpha = 60^\circ$) dapat dilihat pada gambar 4.9 (b). Kedua pernyataan oleh Salleh (2021) di atas bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan, dimana dengan penambahan sudut deflektor pada sudu *advancing* berpengaruh terhadap peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.



Gambar 4. 9 Pola Aliran di sekitar sudu *advancing* pada sudut deflektor (a) 30° dan (b) 60° (Salleh, 2021)

Maka dari itu berdasarkan gambar grafik 4.5, diketahui bahwa instalasi deflektor pada sudu *advancing* dan *returning* dapat meningkatkan CoP_{max} dengan peningkatan maksimal sebesar 38,32% terhadap CoP konvensional pada konfigurasi sudut $\alpha = 45^\circ$. Hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan hipotesis yang diajukan, dan juga hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Salleh (2021). Meskipun belum ada simulasi numerik untuk menjelaskan fenomena atau karakteristik aliran angin yang relevan dengan penelitian ini, peningkatan nilai CoP yang selaras dengan peningkatan besar sudut deflektor dapat disebabkan oleh *wake* region yang semakin kecil terbentuk pada sisi *downstream* deflektor sehingga dapat menurunkan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat meningkatkan torsi positif yang berefek pada peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.

4.4.1.2 Analisis *Coefficient of Power* Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 7 m/s



Gambar 4. 10 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s

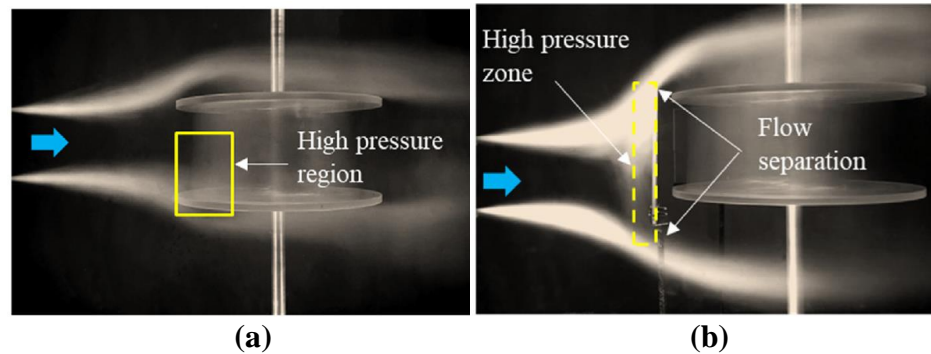
Grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.10 menunjukkan hubungan *coefficient of power* (CoP) terhadap *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius dengan adanya modifikasi penambahan instalasi pengganggu aliran berupa deflektor dengan kecepatan angin 7 m/s. Seperti perhitungan yang telah dilakukan, nilai CoP diperoleh dari persamaan 2.21 yang merupakan rasio dari daya aktual turbin dengan daya teoritis angin. Daya aktual turbin diperoleh dari perhitungan yang menggunakan data kecepatan sudut turbin dan selisih pembebanan dengan nilai yang ditunjukkan oleh neraca pegas. Sedangkan nilai TSR diperoleh dari persamaan 2.20 yang merupakan kecepatan pada ujung dari sudu turbin. Perubahan nilai *tip speed ratio* merupakan akibat dari variasi pembebanan yang diberikan pada skema *brake dynamometer*. Penambahan beban ini dilakukan sedikit demi sedikit hingga turbin berhenti berputar atau saat TSR = 0.

Pada pembebanan tertentu akan diperoleh nilai CoP_{max} pada $\lambda_{optimum}$ yang disebut sebagai titik puncak parabolik. Nilai CoP_{max} untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor) adalah sebesar 5,1% pada λ sebesar 0,5. Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° . Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai CoP sebesar 5,60% pada λ sebesar 0,56; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai CoP sebesar 5,97% pada λ sebesar 0,57; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai CoP sebesar 6,7% pada λ sebesar 0,59; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai CoP sebesar 6,90% pada λ sebesar 0,65; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai CoP sebesar 7,3% pada λ sebesar 0,67. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa turbin angin Savonius bekerja pada rentang λ tertentu untuk dapat mencapai kondisi optimal. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa $\lambda_{optimum}$ untuk konfigurasi konvensional kira-kira berada pada rentang 0,5-0,6. Dari data hasil percobaan tersebut ditemukan bahwa pengaruh adanya instalasi deflektor di depan sudu

advancing dan returning memiliki pengaruh yang positif sehingga dapat meningkatkan nilai CoP dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa dapat dilihat dari beberapa titik pada grafik di gambar 4.5. Pertama, posisi puncak CoP yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan grafik turbin konvensional. Peningkatan nilai CoP dimulai dari 9,8% pada $\alpha = 0^\circ$, 15,68% pada $\alpha = 10^\circ$, 31,37% pada $\alpha = 20^\circ$, 35,29% pada $\alpha = 30^\circ$, 43,13% pada $\alpha = 45^\circ$. Peningkatan CoP tertinggi terdapat pada konfigurasi $\alpha = 45^\circ$ dan peningkatan terendah pada saat $\alpha = 0^\circ$. Kedua, perubahan posisi λ , hal ini dapat dipantau pada posisi λ_{max} dan pada λ saat CoP maksimal. Pergeseran ini dipengaruhi oleh adanya efek *nozzle* yang disebabkan oleh keberadaan deflektor. Kecepatan angin akan mengalami peningkatan setelah melewati kedua deflektor. Peningkatan sudut α pada deflektor sudu *advancing* juga semakin meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai TSR pada CoP_{max} memiliki nilai yang berbeda dan mengalami peningkatan. Hal ini dapat diamati pada nilai TSR yang semakin meningkat yaitu dari nilai konvensional sebesar 0,5 menjadi 0,56 pada sudut $\alpha = 0^\circ$; 0,57 pada sudut $\alpha = 10^\circ$; 0,59 pada sudut $\alpha = 20^\circ$; 0,65 pada sudut $\alpha = 30^\circ$ dan 0,67 pada $\alpha = 45^\circ$.

Pengaruh dari instalasi deflektor pada kecepatan 7 m/s memiliki pola yang sama dengan kecepatan 5 m/s. Terjadi peningkatan CoP pada seluruh variasi sudut deflektor. Hal ini juga bersesuaian dengan studi eksperimental yang dilakukan oleh Mahmoud dkk (2012) yang menemukan bahwa turbin angin Savonius dapat beroperasi secara optimal pada kecepatan angin yang tergolong rendah dengan nilai TSR yang tidak terlalu tinggi. Kecepatan yang tergolong rendah tersebut berada pada kisaran 6 – 11 m/s. Kecepatan angin ini juga bergantung pada geometri turbin. Salleh (2022) melakukan studi eksperimental, dengan adanya penambahan deflektor, kinerja dari turbin angin Savonius mengalami perubahan. Meski tidak semuanya mengalami perubahan yang baik, namun dengan adanya instalasi tersebut, banyak konfigurasi yang mengalami perubahan yang baik, terutama pada sudut $\beta = 0^\circ$. Salleh (2022) menggunakan turbin Savonius dengan aspek rasio sebesar 0,401 dan memiliki overlap rasio sebesar 0,109. Adapun kecepatan angin yang digunakan sebesar 7 m/s. Deflektor yang digunakan memiliki tinggi = 0,132 m dan lebar = 0,183 m yang diletakkan di depan sudu *advancing* dan *returning*. Dengan gap antara turbin dan deflektor sebesar 0,018 m. Posisi deflektor *advancing* adalah 1,204 R, sedangkan deflektor pada *returning blade*. Diposisikan secara longitudinal sebesar 1,204 R dari pusat turbin. Peningkatan CoP tertinggi sebesar 61,53% terhadap CoP turbin konvensional atau tanpa deflektor. Sedangkan penurunan nilai CoP tertinggi di -45% dari CoP turbin konvensional. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Altan (2010) yang menginstalasikan deflektor di depan sudu *returning* dan di dekat sudu *advancing*. Altan menemukan bahwa peningkatan nilai CoP sebesar hampir dua kali lipat jika dibandingkan performa turbin jika tanpa instalasi deflektor.

Peningkatan CoP pada penelitian ini dipengaruhi oleh instalasi dua deflektor. Pada deflektor *returning blade* yang diinstalasikan dalam posisi $\beta = 0^\circ$, dan memiliki jarak terhadap turbin sebesar 5 mm. Hal ini menyebabkan deflektor menutupi *returning blade* secara sempurna dari angin. Instalasi tersebut tentu saja mengurangi torsi negatif turbin angin yang dikarenakan tumbukan angin pada *returning blade* sehingga dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Hal ini dapat dilihat dari hasil penelitian Salleh (2020) yang menambahkan *smoke* pada aliran angin untuk mengetahui interaksi aliran angin dengan deflektor. Ilustrasi *flow pattern* di sekitar *returning blade* turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 4.11 (a).

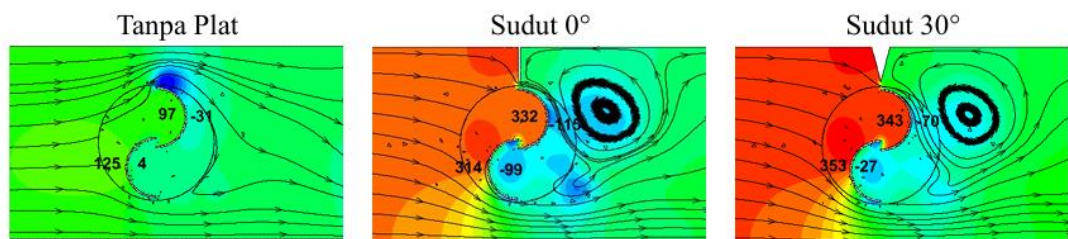


Gambar 4. 11 *Flowpattern* di sekitar sudu *returning* turbin angin Savonius (a) Konvensional (b) Deflektor $\beta = 0^\circ$ (Salleh dkk, 2022)

Pada gambar 4.11 (b) terlihat pola aliran pada deflektor yang diletakkan di depan sudu *returning* turbin dengan sudut kemiringan $\beta = 0^\circ$. Pada pola aliran pada gambar 4.11 terlihat bahwa terjadi separasi aliran yang terlihat pada daerah diatas dan dibawah deflektor. Saat aliran angin mengenai deflektor, akan terjadi daerah dengan tekanan tinggi akibat dari tumbukan angin dengan deflektor. Daerah tersebut terletak pada upstream deflektor yang ditandai dengan kotak berwarna kuning. Umumnya jika ada *flat plate* yang tegak lurus dengan arah aliran, jika aliran terseparasi pada ujung dari deflektor maka akan membentuk vortex di belakang deflektor. Namun pada kasus ini, vortex tidak terbentuk karena ukuran *gap* antara tirbin dan deflektor sangat kecil sehingga dapat menjaga daerah dengan tekanan yang rendah di bagian *downstream* deflektor. Dalam penelitian ini, deflektor menutup penuh daerah antara penyangga turbin bagian atas dan bawah, sehingga aliran angin akan terseparasi secara horizontal setelah menubruk deflektor. Sehingga deflektor secara efektif mencegah aliran yang terpisah mengenai sudu *returning*, sehingga sudu mengalami torsi negatif yang kecil. Studi numerik yang dilakukan oleh Mohamed dkk (2021) menunjukkan perilaku pola aliran yang sama, jika *gap* antara turbin angin dan deflektor memiliki jarak yang besar. Aliran yang terseparasi akan tersedot ke daerah bertekanan rendah di belakang deflektor akibat terbentuknya vortex, hal ini menyebabkan adanya *pressure recovery* sehingga meningkatkan tekanan di daerah *gap* turbin dengan deflektor. Sehingga dengan adanya deflektor yang diposisikan sedekat mungkin dengan *returning blade* dan menutupi seluruh bagaian sudu dari aliran angin, dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh instalasi deflektor pada sudu *returning* terhadap nilai CoP telah terbukti

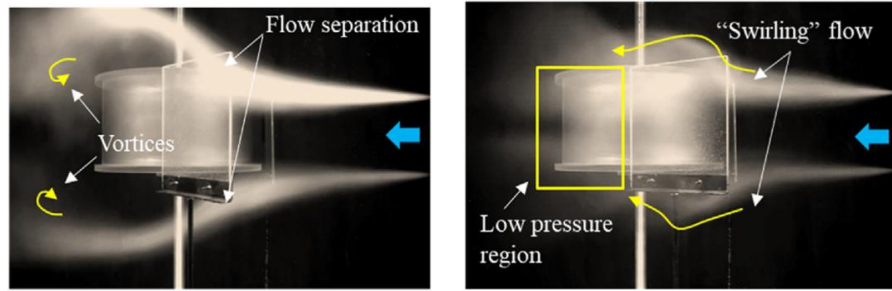
Pada deflektor lainnya, yaitu deflektor pada *advancing blade* dengan variasi sudut 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° menunjukkan hasil CoP yang berbeda-beda. Nilai CoP yang tercatat mengalami *trendline* yang terus naik hingga sudut tertinggi. Nilai CoP bervariasi dari 0,056 hingga 0,073 yang semuanya mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan CoP dari turbin konvensional tanpa deflektor. Hal ini dapat disebabkan karena instalasi deflektor pada sudu *advancing* menyebabkan adanya daerah bertekanan tinggi tepat di bagian *upstream* deflektor akibat adanya tekanan stagnasi aliran yang menubruk deflektor. Adanya daerah bertekanan tinggi di bagian *upstream* ini akan mengakibatkan daerah bertekanan rendah di bagian *downstream* deflektor relatif terhadap bagian *upstream*. Perbedaan tekanan antara kedua daerah ini akan meningkatkan torsi positif yang searah dengan putaran turbin sehingga dapat meningkatkan performa turbin.

Salleh (2021) dalam studi eksperimentalnya menemukan bahwa adanya daerah bertekanan rendah pada sisi *downstream* deflektor dapat disebabkan oleh adanya aliran angin yang mengalami percepatan setelah melewati deflektor. Tekanan daerah *downstream* yang lebih rendah dari sisi *upstream* ini akan mengakibatkan bertambahnya torsi positif turbin. Huda (2024) melakukan penelitian numerik mengenai pengaruh penambahan plat segitiga di dekat sudu *advancing* dengan beberapa variasi sudut sudut 0° hingga 150° . Fluida kerja adalah air dengan kecepatan yang digunakan adalah $0,2 \text{ m/s}$ dan $0,4 \text{ m/s}$. Pada gambar 4.12 yang dihasilkan dari studi numerik tersebut, daerah bertekanan rendah pada sisi *downstream* juga ditemukan Dengan adanya penambahan deflektor pada sudu *advancing* terbukti memperbesar tekanan statis di depan sudu *advancing* dan mengecilkan tekanan di belakang sudu jika dibandingkan dengan variasi tanpa penambahan deflektor.



Gambar 4. 12 Kontur Tekanan Statis Variasi Sudut Puncak pada Sudut Azimuth 0° (Huda, 2024)

Peningkatan nilai CoP juga terjadi pada saat sudut deflektor ditingkatkan, keselarasan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salleh (2021) pada penelitiannya, menambahkan asap untuk menemukan pola aliran ketika angin berinteraksi dengan deflektor pada posisi sudut yang berbeda. Pada sudut kecil, posisi deflektor mendekati posisi tegak lurus terhadap aliran sehingga tidak dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing* jika dibandingkan dengan sudut yang lebih besar. Maka dari itu peningkatan jumlah aliran angin yang menuju sudu *advancing* dapat membantu peningkatan CoP dari turbin angin Savonius. Selanjutnya, variasi sudu turbin yang semakin mendekati tegak lurus dengan arah aliran juga menyebabkan terbentuknya *wake* yang lebih besar jika dibandingkan dengan sudut yang lebih besar. Separasi aliran pada deflektor yang memiliki sudut kemiringan lebih kecil akan menyebabkan *wake* yang lebih besar pada sisi *downstream* dan menyebabkan adanya aliran resirkulasi yang dapat memberikan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan yang CoP yang diberikan tidak sebaik ketika sudut deflektor menjadi lebih besar. Pola aliran ketika berinteraksi dengan deflektor dengan sudut kecil ($\alpha = 30^\circ$) yang dilakukan oleh Salleh (2021) dapat dilihat pada gambar 4.13 (a) di bawah ini. Sedangkan pola aliran ketika berinteraksi dengan deflektor dengan sudut lebih besar ($\alpha = 60^\circ$) dapat dilihat pada gambar 4.13 (b). Kedua pernyataan oleh Salleh (2021) di atas bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan, dimana dengan penambahan sudut deflektor pada sudu *advancing* berpengaruh terhadap peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.

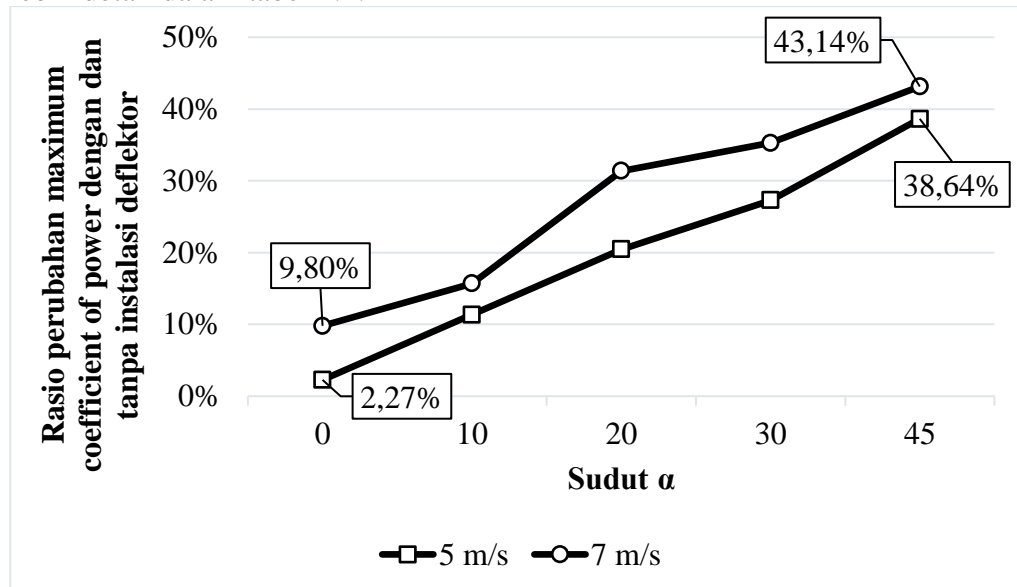


Gambar 4. 13 Pola Aliran di sekitar sudu *advancing* pada sudut deflektor (a) 30° dan (b) 60° (Salleh, 2021)

Maka dari itu berdasarkan gambar grafik 4.5, diketahui bahwa instalasi deflektor pada sudu *advancing* dan *returning* dapat meningkatkan CoP_{max} dengan peningkatan maksimal sebesar 43,13% terhadap CoP konvensional pada konfigurasi sudut $\alpha = 45^\circ$. Hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan hipotesis yang diajukan, dan juga hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Salleh (2021). Meskipun belum ada simulasi numerik untuk menjelaskan fenomena atau karakteristik aliran angin yang relevan dengan penelitian ini, peningkatan nilai CoP yang selaras dengan peningkatan besar sudut deflektor dapat disebabkan oleh *wake region* yang semakin kecil terbentik pada sisi *downstream* deflektor sehingga dapat menurunkan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat meningkatkan torsi positif yang berefek pada peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.

4.4.1.3 Perbandingan Nilai CoP Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Dari data CoP yang telah diperoleh, dapat disusun grafik yang membandingkan pengaruh instalasi Deflektor terhadap CoP turbin pada setiap konfigurasi pada kecepatan 5 dan 7 m/s. Perbandingan nilai CoP turbin tanpa dan dengan instalasi deflektor beserta rasio peningkatan untuk seluruh variasi kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.14 dibawah ini dan telah dirangkum secara lebih detail dalam tabel 4.1.



Gambar 4. 14 Grafik Rasio Perubahan *Coefficient of Power* (CoP) terhadap Sudut α

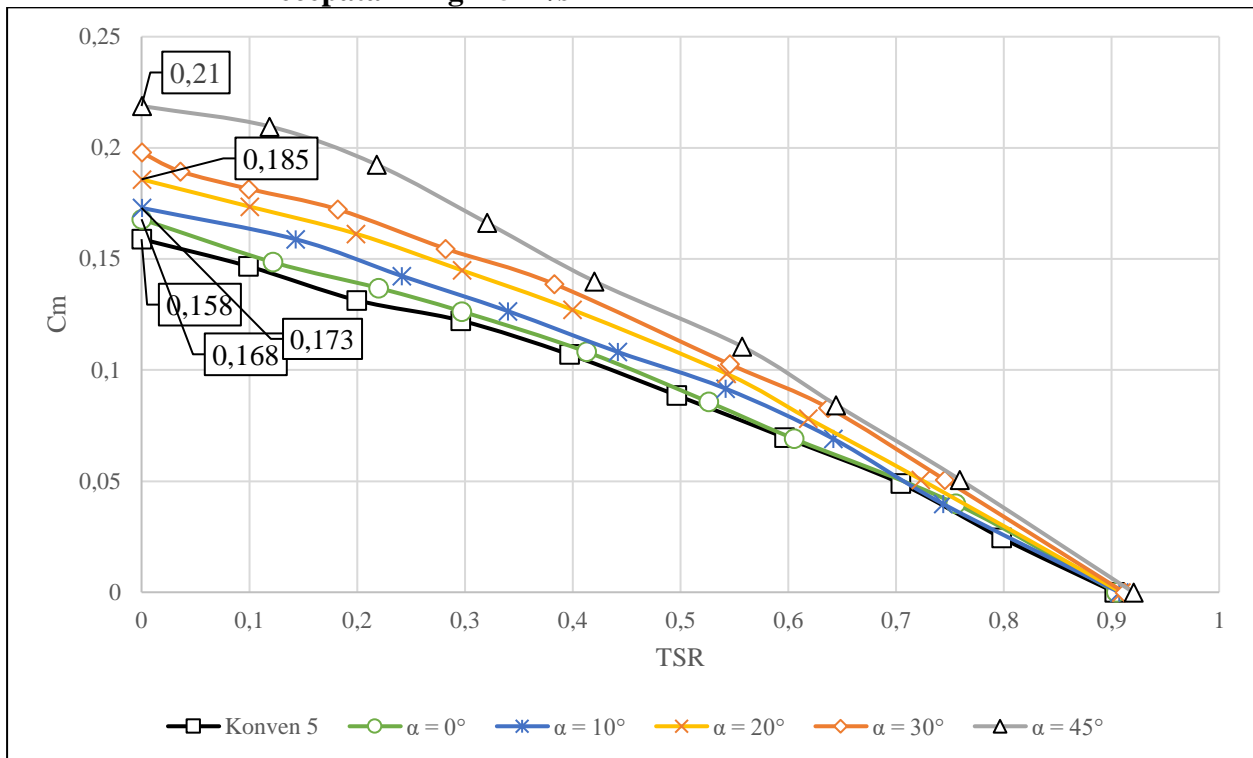
Tabel 4. 1 Perbandingan Nilai CoP Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Konfigurasi	Kecepatan Angin					
	5 m/s			7 m/s		
	CoP _{max}	TSR	$\frac{\Delta CoP_{max}}{CoP_{max0}}$	CoP _{max}	TSR	$\frac{\Delta CoP_{max}}{CoP_{max0}}$
Konvensional	4,40%	0,5	-	5,10%	0,5	-
$\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	4,50%	0,5	2,27%	5,60%	0,5	9,80%
$\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	4,90%	0,5	11,36%	5,90%	0,5	15,69%
$\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	5,30%	0,5	20,45%	6,70%	0,5	31,37%
$\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	5,60%	0,5	27,27%	6,90%	0,6	35,29%
$\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	6,10%	0,5	38,64%	7,30%	0,6	43,14%

Perbandingan nilai CoP turbin tanpa dan dengan instalasi deflektor beserta rasio peningkatannya untuk seluruh konfigurasi sudut dan kecepatan dirangkum dalam tabel 4.1. Berdasarkan gambar 4.14 di atas, diketahui bahwa seiring dengan peningkatan kecepatan angin, nilai CoP juga semakin meningkat. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kecepatan angin akan meningkatkan kecepatan putaran turbin. Kecepatan angin yang mengalami peningkatan juga meningkatkan selisih gaya drag antara sudu advancing dan returning sehingga torsi positif turbin akan meningkat begitu pula dengan nilai CoP-nya. Kemudian, penurunan nilai CoP akibat peningkatan kecepatan angin tidak terjadi pada grafik tersebut mengingat kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini berada pada rentang 5 dan 7 m/s. Kecepatan tersebut, menurut Mahmoud dkk. (2012), kecepatan tersebut termasuk dalam kecepatan yang optimal untuk prngoperasian turbin. Berdasarkan studi eksperimental tersebut penurunan nilai Cp atau CoP kemungkinan terjadi pada kecepatan angin di atas 7 m/s. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai CoP telah terbukti.

4.4.2 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin dengan Instalasi Deflektor Ketika Kecepatan angin 5 dan 7 m/s

4.4.2.1 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 5 m/s



Gambar 4. 15 Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap Tip Speed Ratio (λ)

Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s

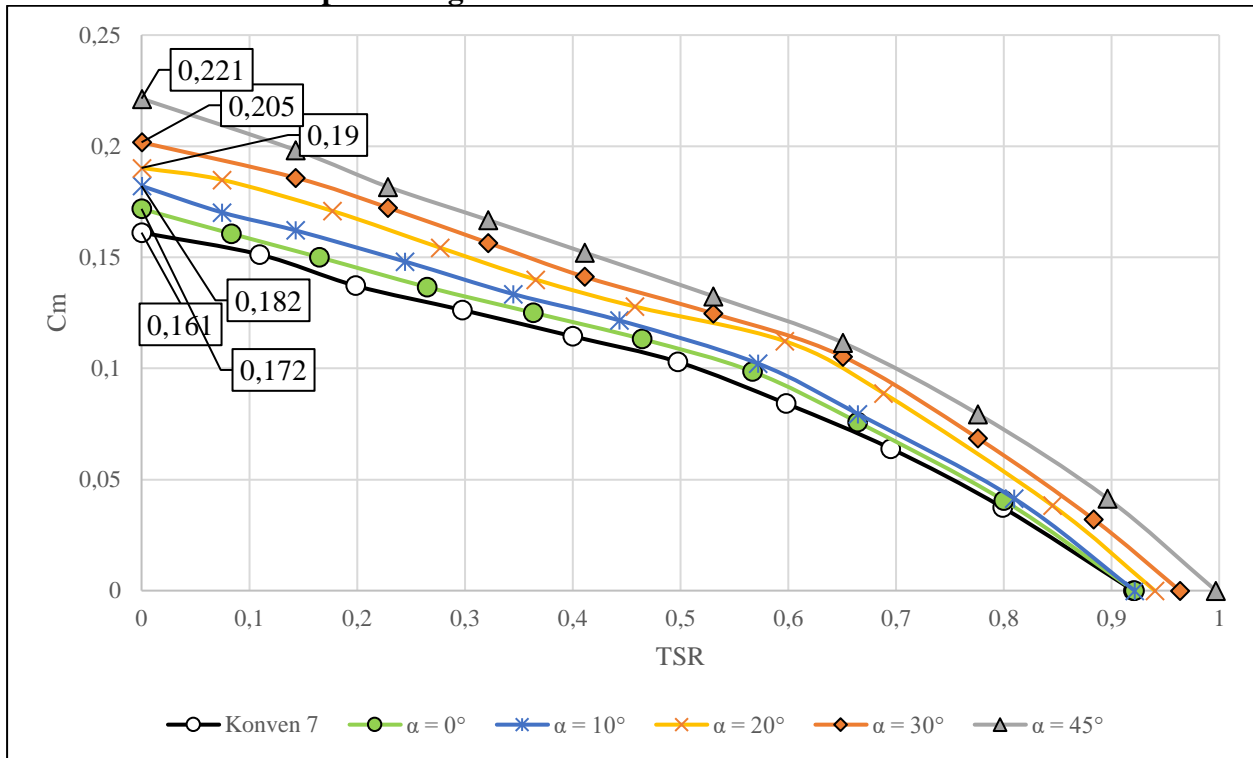
Gambar 4.15 merupakan grafik *coefficient of moment* (C_M) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa dan dengan instalasi deflektor untuk kecepatan angin 5 m/s. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa grafik untuk seluruh konfigurasi memiliki tren menurun. Seiring dengan peningkatan nilai λ , nilai C_M akan semakin menurun. Ketika nilai λ tinggi, kecepatan putaran turbin juga tinggi. Kecepatan putaran turbin yang tinggi terjadi ketika pembebanan yang diberikan pada *brake dynamometer* rendah atau bahkan tidak ada, sehingga torsi dinamis yang dihasilkan juga rendah. Karena nilai C_M berbanding lurus dengan nilai torsi dinamis, maka ketika nilai torsi dinamis rendah, nilai C_M yang dihasilkan juga rendah. Nilai C_{Mmax} untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor) adalah sebesar 15,8% dengan λ_{max} sebesar 0,9; Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° . Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai C_M sebesar 16,80% dengan λ_{max} sebesar 0,904; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai C_M sebesar 17,30% dengan λ_{max} sebesar 0,907; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai C_M sebesar 18,50% dengan λ_{max} sebesar 0,909; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai C_M sebesar 19,80% dengan λ_{max} sebesar 0,91; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai C_M sebesar 21,2% dengan λ_{max} sebesar 0,92. Dari data hasil percobaan pada gambar 4.13 diatas, ditemukan bahwa pengaruh adanya instalasi deflektor di depan sudu advancing dan returning memiliki pengaruh yang positif sehingga dapat meningkatkan nilai C_M dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa dapat dilihat dari beberapa titik pada grafik di gambar 4.13. Pertama, posisi puncak C_M yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan grafik turbin konvensional. Peningkatan nilai C_M dimulai dari 6,33% pada $\alpha = 0^\circ$, 9,49%

pada $\alpha = 10^\circ$, 17,09% pada $\alpha = 20^\circ$, 25,32% pada $\alpha = 30^\circ$, 40,51% pada $\alpha = 45^\circ$. Peningkatan CoP tertinggi terdapat pada konfigurasi $\alpha = 45^\circ$ dan peningkatan terendah pada saat $\alpha = 0^\circ$. Kedua, perubahan posisi λ , hal ini dapat dipantau pada posisi λ maksimal. Terlihat bahwa ada pergeseran nilai λ pada yang bernilai positif setiap kenaikan besar sudut α . Hal ini menunjukkan bahwa grafik mengalami pergeseran ke arah λ yang lebih besar. Pergeseran ini dipengaruhi oleh adanya efek *nozzle* yang disebabkan oleh keberadaan deflektor. Kecepatan angin akan mengalami peningkatan setelah melewati kedua deflektor. Peningkatan sudut α pada deflektor sudu *advancing* juga semakin meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai TSR pada C_{Mmin} memiliki nilai yang berbeda dan mengalami peningkatan.

Hal ini juga bersesuaian dengan studi eksperimental yang dilakukan oleh Salleh (2022). Dengan adanya penambahan deflektor, kinerja dari turbin angin Savonius mengalami perubahan pada nilai nilai C_M nya. Meski tidak semuanya mengalami perubahan yang baik, namun dengan adanya instalasi tersebut, banyak konfigurasi yang mengalami perubahan yang baik. Peningkatan nilai C_M terjadi pada seluruh konfigurasi dengan nilai $\beta = 0^\circ$. Instalasi deflektor dengan posisi $\beta = 0^\circ$ memberikan perlindungan secara menyeluruh kepada *returning blade* dari aliran angin. Instalasi tersebut tentu saja mengurangi torsi negatif turbin angin yang dikarenakan tumbukan angin pada *returning blade* sehingga dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Didukung dengan gap antara deflektor dan turbin yang sangat minim, sebesar 5 mm yang dapat mencegah adanya *pressure recovery effect* yang dapat meningkatkan torsi negatif pada sudu *returning*.

Dari gambar 4.15 juga dapat terlihat bahwa, adanya peningkatan nilai sudut α turut meningkatkan nilai C_M dari turbin. Peningkatan nilai C_M ini memiliki sesuai dengan studi yang dilakukan oleh Salleh (2021), dimana nilai C_M pada seluruh konfigurasi $\beta = 0^\circ$ mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan C_M konvensional. Peningkatan C_M ini tidak lepas dari posisi deflektor pada sudu *advancing* terhadap arah datangnya angin. Semakin posisinya tegak lurus terhadap arah aliran angin, maka semakin besar *wake region* yang terbentuk dibelakang deflektor. Hal tersebut dapat memungkinkan terjadinya aliran resirkulasi yang dapat menghambat pergerakan dari sudu *advancing* sehingga dapat menurunkan kinerja turbin. Maka jika dibandingkan nilai C_M dari setiap konfigurasi, nilai C_M pada $\alpha = 45^\circ$ merupakan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan yang lainnya. Namun jika sudut α tetap diperbesar, maka deflektor tidak akan memiliki kemampuan untuk mengarahkan aliran angin atau membuat *pressure gradient* relatif terhadap daerah *upstream*. Meskipun belum ada simulasi numerik untuk menjelaskan fenomena atau karakteristik aliran angin yang relevan dengan penelitian ini, peningkatan nilai C_M yang selaras dengan peningkatan besar sudut deflektor dapat disebabkan oleh *wake region* yang semakin kecil terbentuk pada sisi *downstream* deflektor sehingga dapat menurunkan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat meningkatkan torsi positif yang berefek pada peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.

4.4.2.2 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 7 m/s



Gambar 4. 16 Grafik *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s

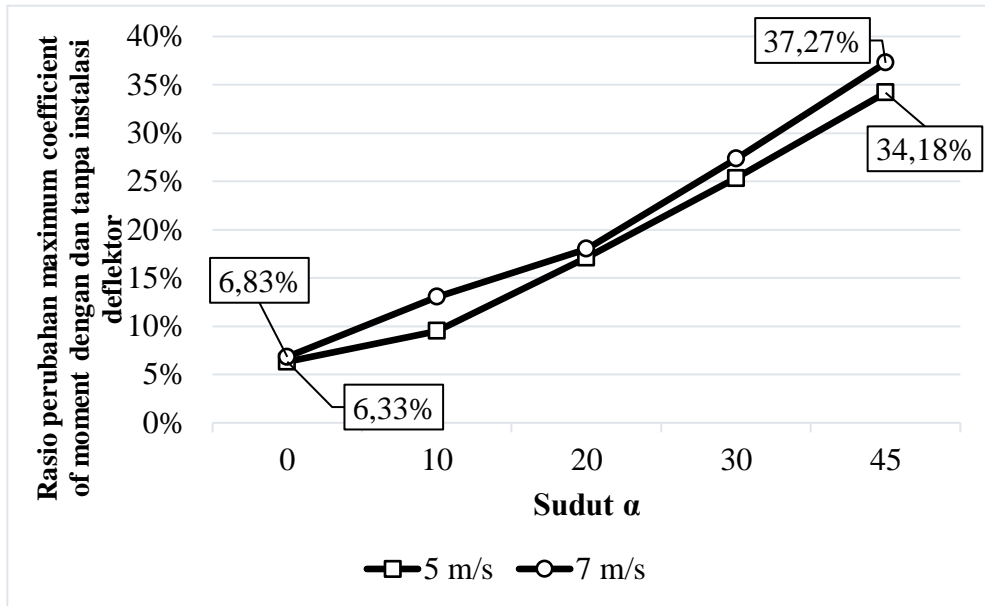
Gambar 4.16 merupakan grafik *coefficient of moment* (C_M) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) turbin angin Savonius tanpa dan dengan instalasi deflektor untuk kecepatan angin 7 m/s. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa grafik untuk seluruh konfigurasi memiliki tren menurun. Seiring dengan peningkatan nilai λ , nilai C_M akan semakin menurun. Ketika nilai λ tinggi, kecepatan putaran turbin juga tinggi. Kecepatan putaran turbin yang tinggi terjadi ketika pembebanan yang diberikan pada *brake dynamometer* rendah atau bahkan tidak ada, sehingga torsi dinamis yang dihasilkan juga rendah. Karena nilai C_M berbanding lurus dengan nilai torsi dinamis, maka ketika nilai torsi dinamis rendah, nilai C_M yang dihasilkan juga rendah. Nilai C_{Mmax} untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor) adalah sebesar 16,1% dengan λ_{max} sebesar 0,9; Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° . Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai C_M sebesar 17,20% dengan λ_{max} sebesar 0,9; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai C_M sebesar 18,20% dengan λ_{max} sebesar 0,94; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai C_M sebesar 19,0% dengan λ_{max} sebesar 0,96; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai C_M sebesar 20,50% dengan λ_{max} sebesar 0,96; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai C_M sebesar 22,2% dengan λ_{max} sebesar 0,92. Dari data hasil percobaan pada gambar 4.16 diatas, ditemukan bahwa pengaruh adanya instalasi deflektor di depan sudu advancing dan returning memiliki pengaruh yang positif sehingga dapat meningkatkan nilai C_M dari turbin angin Savonius. Peningkatan performa dapat dilihat dari beberapa titik pada grafik di gambar 4.13. Pertama, posisi puncak C_M yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan grafik turbin konvensional. Peningkatan nilai C_M dimulai dari 6,83% pada $\alpha = 0^\circ$, 13,04% pada $\alpha = 10^\circ$, 18,20% pada $\alpha = 20^\circ$, 27,33% pada $\alpha = 30^\circ$, 37,27% pada $\alpha = 45^\circ$ terhadap nilai C_M konvensional. Peningkatan C_M tertinggi terdapat pada konfigurasi $\alpha = 45^\circ$ dan

peningkatan terendah pada saat $\alpha = 0^\circ$. Kedua, perubahan posisi λ , hal ini dapat dipantau pada posisi λ maksimal. Terlihat bahwa ada pergeseran nilai λ pada yang bernilai positif setiap kenaikan besar sudut α . Hal ini menunjukkan bahwa grafik mengalami pergeseran ke arah λ yang lebih besar. Pergeseran ini dipengaruhi oleh adanya efek *nozzle* yang disebabkan oleh keberadaan deflektor. Kecepatan angin akan mengalami peningkatan setelah melewati kedua deflektor. Peningkatan sudut α pada deflektor sudu *advancing* juga semakin meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai TSR pada C_{Mmin} memiliki nilai yang berbeda dan mengalami peningkatan.

Hal ini juga bersesuaian dengan studi eksperimental yang dilakukan oleh Salleh (2022). Dengan adanya penambahan deflektor, kinerja dari turbin angin Savonius mengalami perubahan pada nilai C_M nya. Peningkatan nilai C_M terjadi pada seluruh konfigurasi dengan nilai $\beta = 0^\circ$. Instalasi deflektor dengan posisi $\beta = 0^\circ$ memberikan perlindungan secara menyeluruh kepada *returning blade* dari aliran angin. Instalasi tersebut tentu saja mengurangi torsi negatif turbin angin yang dikarenakan tumbukan angin pada *returning blade* sehingga dapat meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Didukung dengan gap antara deflektor dan turbin yang sangat minim yang dapat mencegah adanya *pressure recovery effect* yang dapat meningkatkan torsi negatif pada sudu *returning*. Dari gambar 4.16 juga dapat terlihat bahwa, adanya peningkatan nilai sudut α turut meningkatkan nilai C_M dari turbin. Peningkatan C_M ini tidak lepas dari posisi deflektor pada sudu *advancing* terhadap arah datangnya angin. Semakin posisinya tegak lurus terhadap arah aliran angin, maka semakin besar *wake region* yang terbentuk dibelakang deflektor yang memungkinkan terjadinya aliran resirkulasi yang dapat menghambat pergerakan dari sudu *advancing*. Diperoleh nilai C_M pada $\alpha = 45^\circ$ yang merupakan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan yang lainnya. Namun jika sudut α tetap diperbesar, maka deflektor tidak akan memiliki kemampuan untuk mengarahkan aliran angin atau membuat *pressure gradient* relatif terhadap daerah *upstream*. Meskipun belum ada simulasi numerik untuk menjelaskan fenomena atau karakteristik aliran angin yang relevan dengan penelitian ini, peningkatan nilai C_M yang selaras dengan peningkatan besar sudut deflektor dapat disebabkan oleh *wake region* yang semakin kecil terbentuk pada sisi *downstream* deflektor sehingga dapat menurunkan hambatan pada sudu *advancing*. Hal ini dapat meningkatkan torsi positif yang berefek pada peningkatan CoP pada turbin angin Savonius.

4.4.2.3 Perbandingan Nilai C_M Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Dari data C_M yang telah diperoleh, dapat disusun grafik yang membandingkan pengaruh instalasi deflektor terhadap C_M turbin pada setiap konfigurasi pada kecepatan 5 dan 7 m/s. Perbandingan nilai C_M turbin tanpa dan dengan instalasi deflektor beserta rasio peningkatan untuk seluruh variasi kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.17 dibawah ini dan telah dirangkum secara lebih detail dalam tabel 4.2 di bawah ini.



Gambar 4. 17 Grafik Rasio Perubahan *Coefficient of Moment* (C_M) terhadap Sudut α

Tabel 4. 2 Perbandingan Nilai CoP Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

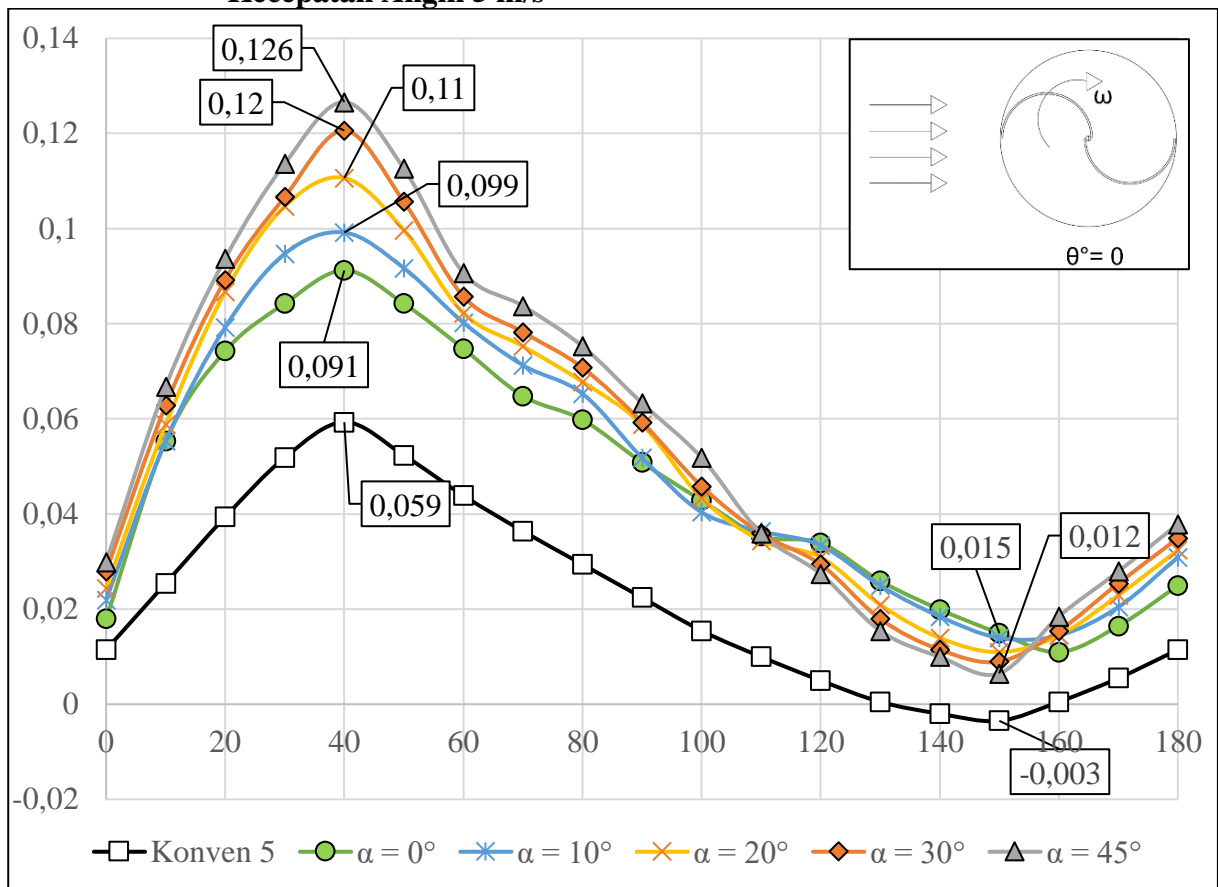
Konfigurasi	Kecepatan Angin					
	5 m/s			7 m/s		
	C_M Max	TSR_{max}	$\frac{\Delta C_{Mmax}}{C_{Mmax0}}$	C_M Max	TSR_{max}	$\frac{\Delta C_{Mmax}}{C_{Mmax0}}$
Konvensional	15,80%	0,9	-	16,10%	0,92	-
$\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	16,80%	0,9	6,33%	17,20%	0,92	6,83%
$\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	17,30%	0,9	9,49%	18,20%	0,92	13,04%
$\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	18,50%	0,9	17,09%	19,00%	0,94	18,01%
$\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	19,80%	0,91	25,32%	20,50%	0,96	27,33%
$\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	21,20%	0,92	34,18%	22,10%	0,99	37,27%

Perbandingan nilai C_M turbin tanpa dan dengan instalasi deflektor beserta rasio peningkatannya untuk seluruh konfigurasi sudut dan kecepatan dirangkum dalam tabel 4.2. Berdasarkan tabel tersebut, diketahui bahwa seiring dengan peningkatan kecepatan angin, nilai C_M juga semakin meningkat. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kecepatan angin akan meningkatkan kecepatan putaran turbin. dan selisih gaya drag antara sudu advancing dan returning. Akibatnya, torsi positif turbin akan meningkat begitu pula dengan nilai C_M -nya. Terjadi juga perubahan posisi λ pada saat C_{Mmax} pada kecepatan angin yang semakin meningkat dan juga peningkatan sudut α . Pergeseran ini dipengaruhi oleh adanya efek *nozzle* yang disebabkan oleh keberadaan deflektor. Kecepatan angin akan

mengalami peningkatan setelah melewati kedua deflektor. Peningkatan sudut α pada deflektor sudu *advancing* juga semakin meningkatkan kecepatan angin sehingga nilai TSR pada CoP_{max} memiliki nilai yang berbeda dan mengalami peningkatan. Kemudian, penurunan nilai C_M akibat peningkatan kecepatan angin tidak terjadi pada grafik tersebut mengingat kecepatan angin yang digunakan pada penelitian ini hanya 5 dan 7 m/s. Kecepatan tersebut, menurut Mahmoud dkk. (2012), kecepatan tersebut termasuk dalam kecepatan yang optimal untuk pengoperasian turbin. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai C_M telah terbukti.

4.4.3 Analisis Coefficient of Static Torque Turbin dengan Instalasi Deflektor Ketika Kecepatan Angin 5 m/s dan 7 m/s

4.4.3.1 Analisis Coefficient of Static Torque Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 5 m/s



Gambar 4. 18 Grafik Coefficient of Static Torque (CoP) terhadap Sudut Sudu (θ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 5 m/s

Berdasarkan gambar 4.18, merupakan grafik *coefficient Static Torque* (CTS) sebagai fungsi Sudut Sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa dan dengan instalasi deflektor untuk kecepatan angin 5 m/s. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa grafik untuk seluruh konfigurasi memiliki tren yang fluktuatif. CTS sendiri merupakan rasio perbandingan antara torsi statis yang dihasilkan oleh turbin pada posisi tertentu terhadap torsi yang dihasilkan oleh angin. Rasio perbandingan ini menunjukkan kemampuan turbin dalam mengonversi torsi yang dimiliki oleh angin menjadi torsi statis sebagai torsi penggerak turbin dalam keadaan diamnya. Dengan kata lain, CTS merupakan nilai yang menunjukkan kemampuan *self-starting* turbin. Variasi nilai CTS bergantung pada bentuk geometri turbin, posisi sudu turbin dan juga kecepatan angin. Dari gambar 4.18

diatas, dapat terlihat bahwa variasi nilai CTS bergantung pada posisi sudu turbin dengan geometri dan kecepatan angin yang sama.

Nilai CTS_{max} terjadi pada sudut 40° dan nilai CTS_{min} terjadi pada sudut 150° . Untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor), diperoleh nilai CTS_{max} sebesar 5,90% dan nilai CTS_{min} sebesar -0,30%. Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \text{ dan } 45^\circ$. Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 9,1% dan nilai CTS_{min} sebesar 1,50%; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 9,9% dan nilai CTS_{min} sebesar 1,40% ; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 11,% dan nilai CTS_{min} sebesar 1,1% ; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 12% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,90% ; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 12,6% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,06%. Berdasarkan gambar 4.16, diketahui pula bahwa pada sudut $0^\circ - 40^\circ$ terjadi peningkatan nilai CTS hingga mencapai nilai CTS_{max} , hal ini disebabkan karena posisi sudu turbin *advancing* yang semakin mendekat dan menghadap pada arah datangnya angin. Selanjutnya terjadi penurunan nilai CTS dimulai pada sudut 50° hingga mencapai nilai CTS_{min} pada sudut 150° . Penurunan ini disebabkan oleh posisi sudu *advancing* yang semakin menjauhi arah datangnya angin dan sudu *returning* semakin mendekat kepada aliran angin. Visualisasi posisi deflektor dapat dilihat pada gambar 4.4. Trendline selanjutnya pada sudut $150^\circ - 80^\circ$ menunjukkan gradien positif, dimana nilai CTS mengalami kenaikan hingga pada sudut terakhir. Hal ini tidak terlepas dari posisi sudu *advancing* yang kembali mendekat pada arah datangnya angin. Pada gambar grafik 4.18, terlihat bahwa adanya instalasi deflektor pada seluruh konfigurasi, meningkatkan nilai CTS turbin pada seluruh sudut dengan rasio peningkatan yang telah dirangkum dalam tabel 4.3 dibawah ini.

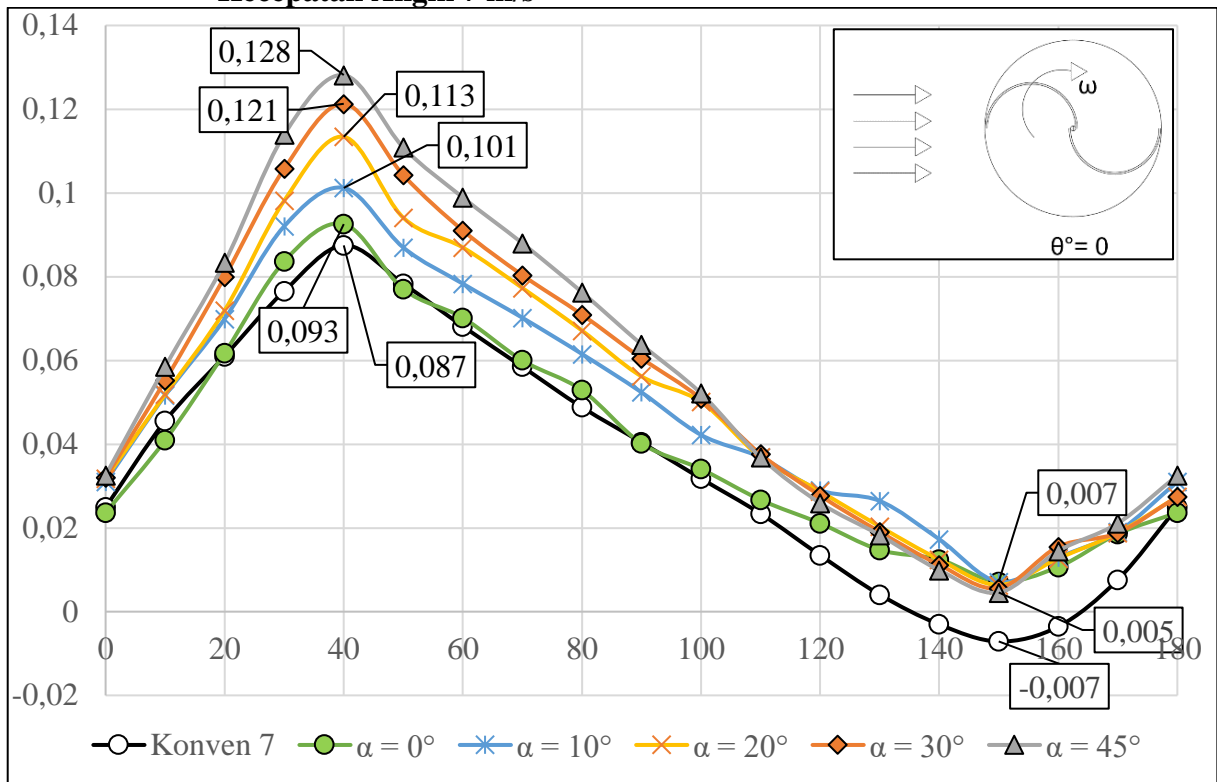
Tabel 4. 3 Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 5 m/s

Konfigurasi	Kecepatan Angin			
	5 m/s			
	CTS_{max}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$	CTS_{min}	$\frac{\Delta CTS_{min}}{CTS_{min0}}$
Konvensional	5,90%	-	-0,30%	-
(1) $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	9,10%	54,24%	1,50%	600,00%
(2) $\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	9,90%	67,80%	1,40%	566,67%
(3) $\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	11,00%	86,44%	1,10%	466,67%
(4) $\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	12,00%	103,39%	0,90%	400,00%
(5) $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	12,60%	113,56%	0,06%	120,00%

Dari tabel 4.3 diatas, terlihat bahwa terjadi peningkatan positif pada nilai seluruh konfigurasi CTS_{max} dan nilai CTS_{min} . Peningkatan pada konfigurasi 1 dimana nilai $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} terendah sebesar 54,24%. Peningkatan ini disebabkan oleh terhalangnya sudu *returning* secara menyeluruh oleh deflektor dengan sudut $\beta = 0^\circ$ sehingga torsi negatif yang disebabkan oleh aliran angin dapat dikurangi. Hal ini tentu saja dapat meningkatkan nilai CTS turbin. Namun karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang tegak lurus terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* yang besar pada daerah

downstream deflektor. Daerah wake yang besar tersebut dapat menyebabkan resirkulasi aliran yang akan menghambat sudu *advancing*. Maka peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai paling kecil. Hal ini sesuai dengan pola aliran yang diamati oleh Salleh (2021), dimana aliran pada daerah *downstream* deflektor menghasilkan *vortex* dan menghambat kinerja turbin. Selanjutnya, pada konfigurasi 2 dimana nilai $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 67,8%. Peningkatan ini relatif lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 1, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* relatif lebih kecil pada daerah *downstream* deflektor. Sehingga *vortex* yang dihasilkan pada daerah *downstream* akan lebih sedikit. Maka, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 1. Pola yang sama terlihat pada konfigurasi 3 dimana nilai $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 86,44%. Peningkatan ini relatif lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 2, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* relatif lebih kecil pada daerah *downstream* deflektor. Maka dari itu, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 2. Pada konfigurasi 4 dimana nilai $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 103,39%. Peningkatan ini relatif lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 3, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, Sehingga dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing*. Namun aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* pada daerah *downstream* deflektor. Sehingga *vortex* yang terbentuk pada daerah *downstream* akan menghambat sudu *advancing*. Maka, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 3 namun masih lebih rendah dari konfigurasi 4. Terakhir, pada konfigurasi 5 dimana nilai $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 113,39%. Peningkatan ini lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi lain, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing*. Adapun *wake region* pada daerah *downstream* deflektor yang dihasilkan oleh aliran angin, memiliki ukuran yang lebih kecil jika dibandingkan konfigurasi lain. Sehingga peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini. Meskipun belum ada simulasi numerik yang menjelaskan fenomena tersebut, hal tersebut kemungkinan disebabkan sudut α . Semakin besar α yang digunakan, separasi aliran akan lebih tertunda, kontur aliran angin pada ujung deflektor akan semakin mengecil sehingga *wake* yang dihasilkan relatif lebih kecil sehingga tidak menghambat pergerakan sudu *advancing*. Hal ini kan meningkatkan selisih gaya drag antara sudu *advancing* dan *returning* sehingga torsi positif turbin akan meningkat begitu pula CTS-nya. Namun Pada posisi sudut 150° terlihat bahwa nilai CTS memiliki nilai yang semakin menurun, seiring membesarnya sudut α yang digunakan. Hal ini sebagai akibat posisi turbin yang sudu *advancing*nya menjauhi arah datangnya angin, sedangkan momentum angin yang lebih besar dan pressure drag yang lebih tinggi akan menghasilkan nilai CTS yang juga lebih rendah. Hal ini menyebabkan nilai CTS turbin pada konfigurasi 1 menjadi yang tertinggi namun pada konfigurasi 5 menjadi yang terendah. Secara umum, berdasarkan nilai CTS-nya, instalasi deflektor dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin.

4.4.3.2 Analisis Coefficient of Static Torque Turbin dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 7 m/s



Gambar 4. 19 Grafik *Coefficient of Static Torque* (CoP) terhadap Sudut Sudu (θ) Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor untuk Kecepatan Angin 7 m/s

Gambar 4.19, merupakan grafik *coefficient Static Torque* (CTS) sebagai fungsi sudut sudu (θ) turbin angin Savonius tanpa dan dengan instalasi deflektor untuk kecepatan angin 7 m/s. Berdasarkan gambar tersebut, diketahui bahwa grafik untuk seluruh konfigurasi memiliki tren yang fluktuatif. CTS sendiri merupakan rasio perbandingan antara torsi statis yang dihasilkan oleh turbin pada posisi tertentu terhadap torsi yang dihasilkan oleh angin. Rasio perbandingan (CTS) merupakan nilai yang menunjukkan kemampuan *self-starting* turbin. Variasi nilai CTS bergantung pada bentuk geometri turbin, posisi sudu turbin dan juga kecepatan angin.

Nilai CTS_{max} terjadi pada sudut 40° dan nilai CTS_{min} terjadi pada sudut 150° . Untuk konfigurasi konvensional (tanpa instalasi deflektor), diperoleh nilai CTS_{max} sebesar 8,70% dan nilai CTS_{min} sebesar -0,70%. Untuk konfigurasi dengan menggunakan deflektor, nilai β , bernilai tetap sebesar $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai 0° , 10° , 20° , 30° , dan 45° . Pada konfigurasi untuk konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 9,3% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,71%; konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 10,1% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,70% ; konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 11,3% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,6% ; konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 12,1% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,56% ; dan konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, nilai CTS_{max} sebesar 12,8% dan nilai CTS_{min} sebesar 0,45%. Berdasarkan gambar 4.16, diketahui pula bahwa pada sudut 0° - 40° terjadi peningkatan nilai CTS hingga mencapai nilai CTS_{max} , hal ini disebabkan karena posisi sudu turbin *advancing* yang semakin mendekat dan menghadap pada arah datangnya angin. Selanjutnya terjadi penurunan nilai CTS dimulai pada sudut 50° hingga 150° . Penurunan ini disebabkan oleh posisi sudu *advancing* yang semakin menjauhi arah datangnya angin dan sudu *returning* semakin mendekat kepada

aliran angin. Visualisasi posisi deflektor dapat dilihat pada gambar 4.4. *Trendline* selanjutnya pada sudut 150° - 80° menunjukkan peningkatan, dimana nilai CTS mengalami kenaikan hingga pada sudut terakhir. Hal ini tidak terlepas dari posisi sudu *advancing* yang kembali mendekat pada arah datangnya angin. Pada gambar grafik 4.18, terlihat bahwa adanya instalasi deflektor pada seluruh konfigurasi, meningkatkan nilai CTS turbin pada seluruh sudut dengan rasio peningkatan yang telah dirangkum dalam tabel 4.4 dibawah ini.

Tabel 4. 4 Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor Kecepatan Angin 7 m/s

Konfigurasi	Kecepatan Angin			
	7 m/s			
	CTS_{max}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$	CTS_{min}	$\frac{\Delta CTS_{min}}{CTS_{min0}}$
Konvensional	8,70%	-	-0,70%	-
(1) $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	9,30%	6,90%	0,71%	201,43%
(2) $\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	10,10%	16,09%	0,70%	200,00%
(3) $\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	11,30%	29,89%	0,60%	185,71%
(4) $\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	12,10%	39,08%	0,56%	180,00%
(5) $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	12,80%	47,13%	0,45%	164,29%

Dari tabel 4.4 diatas, terlihat bahwa terjadi peningkatan positif pada nilai seluruh konfigurasi CTS_{max} dan nilai CTS_{min} . Peningkatan pada konfigurasi 1 dimana nilai $\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} terendah sebesar 6,9%. Peningkatan ini disebabkan oleh terhalangnya sudu *returning* secara menyeluruh oleh deflektor dengan sudut $\beta = 0^\circ$ sehingga torsi negatif yang disebabkan oleh aliran angin dapat dikurangi. Hal ini tentu saja dapat meningkatkan nilai CTS turbin. Namun karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang tegak lurus terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* yang besar pada daerah *downstream* deflektor. Daerah *wake* yang besar tersebut dapat menyebabkan resirkulasi aliran yang akan menghambat sudu *advancing*. Maka peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai paling kecil. Hal ini sesuai dengan pola aliran yang diamati oleh Salleh (2021), dimana aliran pada daerah *downstream* deflektor menghasilkan *vortex* dan menghambat kinerja turbin. Selanjutnya, pada konfigurasi 2 dimana nilai $\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 16,09%. Peningkatan ini relatif lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 1, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* relatif lebih kecil pada daerah *downstream* deflektor. Sehingga *vortex* yang dihasilkan pada daerah *downstream* akan lebih sedikit. Maka, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 1. Pola yang sama terlihat pada konfigurasi 3 dimana nilai $\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 29,89%. Peningkatan ini relatif lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 2, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* relatif lebih kecil pada daerah *downstream* deflektor. Maka dari itu, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 2. Pada konfigurasi 4 dimana nilai $\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 39,08%. Peningkatan ini relatif

lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi 3, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang lebih miring terhadap arah aliran angin, Sehingga dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing*. Namun aliran angin yang telah menabrak deflektor akan menghasilkan *wake region* pada daerah *downstream* deflektor. Sehingga *vortex* yang terbentuk pada daerah *downstream* akan menghambat sudu *advancing*. Maka, peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini bernilai lebih besar dari pada konfigurasi 3 namun masih lebih rendah dari konfigurasi 4. Terakhir, pada konfigurasi 5 dimana nilai $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$, memiliki peningkatan CTS_{max} sebesar 47,13%. Peningkatan ini lebih tinggi dari nilai CTS_{max} pada konfigurasi lain, hal ini dapat terjadi karena posisi dari deflektor sudu *advancing* yang dapat mengarahkan aliran angin menuju sudu *advancing*. Adapun *wake region* pada daerah *downstream* deflektor yang dihasilkan oleh aliran angin, memiliki ukuran yang lebih kecil jika dibandingkan konfigurasi lain. Sehingga peningkatan nilai CTS pada konfigurasi ini. Meskipun belum ada simulasi numerik yang menjelaskan fenomena tersebut, hal tersebut kemungkinan disebabkan sudut α . Semakin besar α yang digunakan, separasi aliran akan lebih tertunda, kontur aliran angin pada ujung deflektor akan semakin mengecil sehingga *wake* yang dihasilkan relatif lebih kecil sehingga tidak menghambat pergerakan sudu *advancing*. Hal ini kan meningkatkan selisih gaya drag antara sudu *advancing* dan *returning* sehingga torsi positif turbin akan meningkat begitu pula CTS-nya. Namun Pada posisi sudut 150° terlihat bahwa nilai CTS memiliki nilai yang semakin menurun, seiring membesarnya sudut α yang digunakan. Hal ini sebagai akibat posisi turbin yang sudu *advancing*nya menjauhi arah datangnya angin, sedangkan momentum angin yang lebih besar dan pressure drag yang lebih tinggi akan menghasilkan nilai CTS yang juga lebih rendah. Hal ini menyebabkan nilai CTS turbin pada konfigurasi 1 menjadi yang tertinggi namun pada konfigurasi 5 menjadi yang terendah. Secara umum, berdasarkan nilai CTS-nya, instalasi deflektor dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin.

4.4.3.3 Perbandingan Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Dari data CTS yang telah diperoleh, dapat disusun tabel yang membandingkan pengaruh instalasi deflektor terhadap CTS turbin pada setiap konfigurasi. Perbandingan nilai CTS turbin tanpa dan dengan instalasi deflektor beserta rasio peningkatan untuk seluruh variasi kecepatan dirangkum dalam tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4. 5 Perbandingan Nilai CTS Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Konfigurasi	Kecepatan Angin							
	5 m/s				7 m/s			
	CTS_{max}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$	CTS_{min}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$	CTS_{max}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$	CTS_{min}	$\frac{\Delta CTS_{max}}{CTS_{max0}}$
Konvensional	5,90%	-	-0,30%	-	8,70%	-	-0,70%	-
$\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	9,10%	54,24%	1,50%	600,00%	9,30%	6,90%	0,71%	201,43%
$\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	9,90%	67,80%	1,40%	566,67%	10,10%	16,09%	0,70%	200,00%
$\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	11,00%	86,44%	1,10%	466,67%	11,30%	29,89%	0,60%	185,71%
$\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	12,00%	103,39%	0,90%	400,00%	12,10%	39,08%	0,56%	180,00%
$\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	12,60%	113,56%	0,06%	120,00%	12,80%	47,13%	0,45%	164,29%

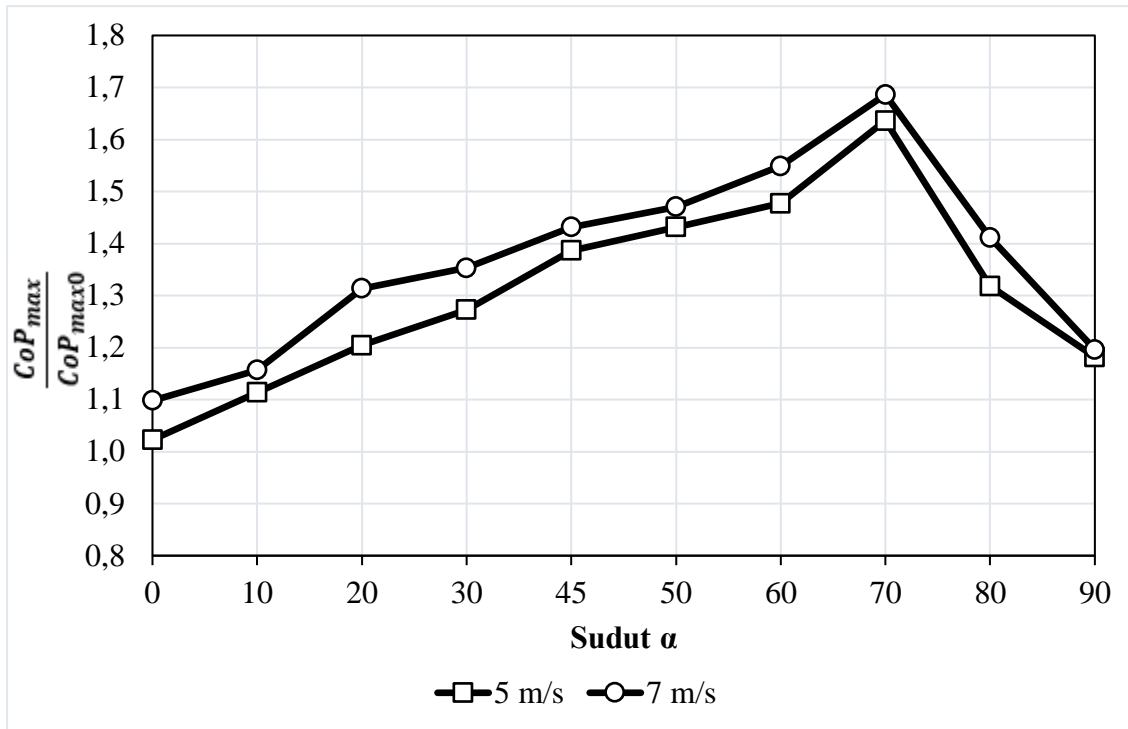
Perbandingan nilai CTS turbin tanpa dan dengan instalasi silinder elips beserta rasio peningkatan atau penurunannya untuk seluruh variasi kecepatan dirangkum dalam tabel 4.5. Berdasarkan tabel tersebut, diketahui bahwa seiring

dengan peningkatan kecepatan angin, nilai CTS secara umum menunjukkan hal yang sama. Hal tersebut terjadi karena peningkatan kecepatan angin akan meningkatkan selisih gaya drag antara sudu advancing dan returning sehingga torsi positif turbin akan meningkat begitu pula dengan nilai CTS-nya. Sesuai dengan hasil eksperimental oleh Mahmoud dkk. (2012), penurunan nilai Cts atau CTS kemungkinan terjadi pada kecepatan angin di atas 7 m/s. Dengan demikian, hipotesis mengenai pengaruh peningkatan kecepatan angin terhadap nilai CTS telah terbukti.

Namun, peningkatan nilai CTS terhadap nilai CTS konvensional pada kecepatan 7 m/s masih lebih rendah dari kecepatan 5 m/s. Hal tersebut dapat terjadi karena pada angin yang lebih turbulen, maka momentum yang dimiliki akan semakin besar pula, sehingga aliran utama yang seharusnya menumbuk sudu advancing dapat terganggu atau bahkan terhalang oleh aliran angin yang diarahkan oleh deflektor sudu advancing dan aliran angin yang berinteraksi dengan deflektor sudu returning. Hal ini berbeda pada kecepatan 5 m/s dimana peningkatan pada CTS_{max} sebesar dua kali lipat peningkatan pada CTS_{max} kecepatan angin 7 m/s. Peningkatan yang jauh lebih tinggi tersebut dikarenakan pada kecepatan angin yang lebih rendah, aliran angin akan lebih mudah diarahkan menuju sudu advancing sehingga peningkatan kemampuan self starting akan jauh lebih tinggi.

4.5 Analisis Perbandingan Maximum Coefficient of Power Turbin Angin Savonius dengan dan Tanpa Instalasi Deflektor terhadap Variasi Sudut Deflektor

Gambar 4.18 merupakan grafik rasio *maximum coefficient of power* turbin angin Savonius dengan dan tanpa instalasi deflektor ($\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$) sebagai fungsi sudut deflektor untuk variasi kecepatan angin 5 dan 7 m dengan nilai sudut $\beta = 0^\circ$ dan nilai α divariasikan dengan nilai $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ,$ dan 90° . Data nilai $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$ pada sudut $\alpha = 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ,$ dan 90° diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Irfan (2024) dengan menggunakan variasi kecepatan angin yang sama yaitu 5 dan 7 m/s. Irfan (2024) juga menggunakan deflektor pada sudu *returning* yang memiliki sudut 0° . Nilai ($\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$) diperoleh dari rasio nilai maksimum CoP turbin dengan instalasi deflektor terhadap nilai maksimum CoP turbin tanpa instalasi deflektor pada kecepatan yang sama. Nilai $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}} < 1$ berarti bahwa nilai CoP_{max} turbin dengan instalasi deflektor lebih rendah dibandingkan nilai CoP_{max} turbin tanpa instalasi deflektor atau dengan kata lain instalasi deflektor justru menurunkan nilai CoP_{max} turbin. Kemudian, nilai $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}} = 1$ berarti bahwa nilai CoP_{max} turbin dengan instalasi deflektor sama dengan nilai CoP_{max} turbin tanpa instalasi deflektor atau dengan kata lain instalasi deflektor tidak memiliki pengaruh terhadap nilai CoP_{max} turbin. Sementara itu, Nilai $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}} > 1$ berarti bahwa nilai CoP_{max} turbin dengan instalasi deflektor lebih tinggi dibandingkan nilai CoP_{max} turbin tanpa deflektor atau dengan kata lain instalasi deflektor meningkatkan nilai CoP_{max} turbin.



Gambar 4. 20 Grafik $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$ terhadap Variasi Sudut Deflektor α

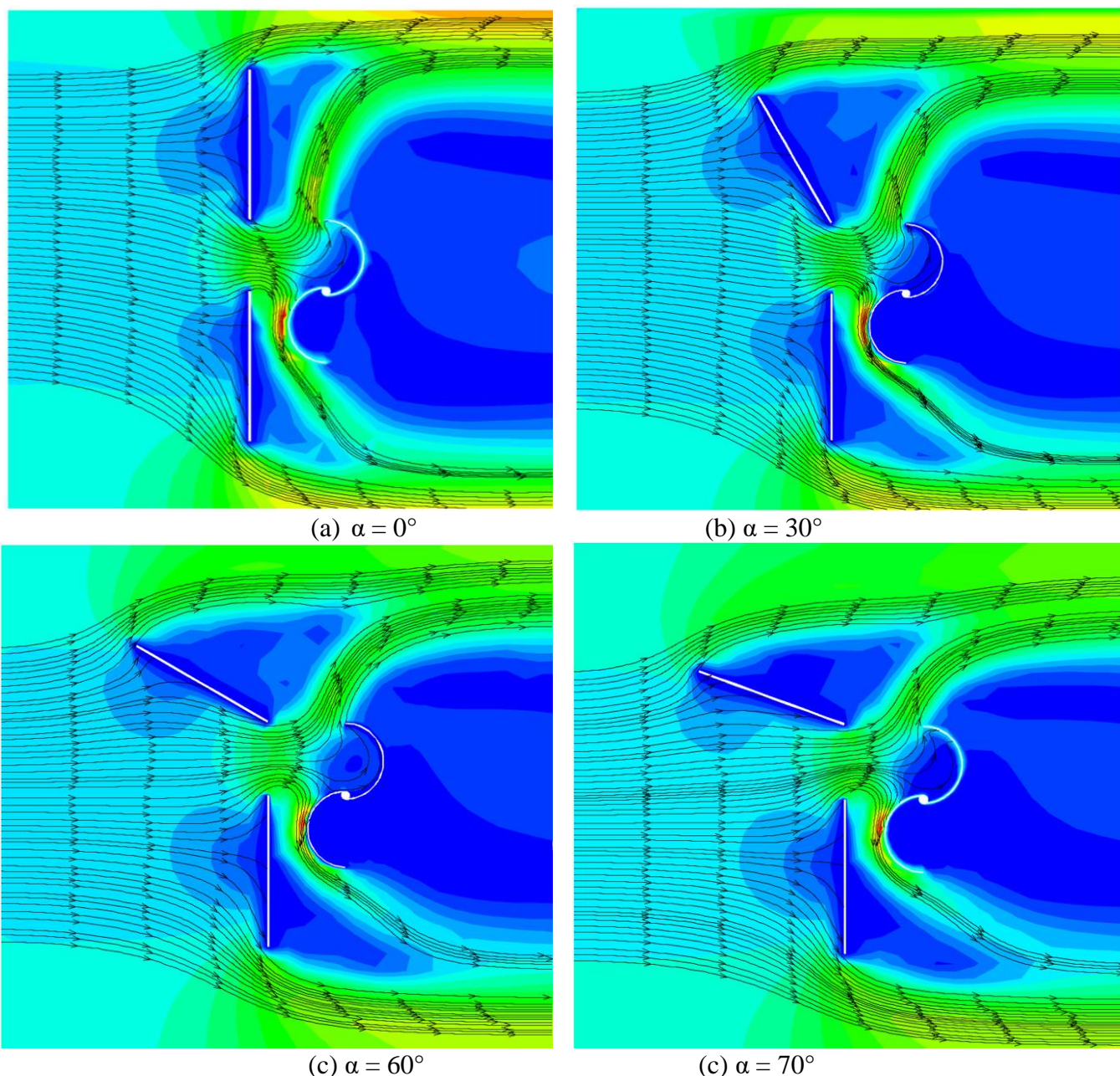
Tabel 4. 6 Perbandingan Nilai $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$ Turbin Tanpa dan dengan Instalasi Deflektor

Sumber	Konfigurasi	Kecepatan angin			
		5 m/s		7 m/s	
		CoP_{max}	$\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$	CoP_{max}	$\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$
	Konvensional	0,044	1,00	0,051	1,00
Penelitian ini	$\alpha = 0^\circ, \beta = 0^\circ$	0,045	1,02	0,056	1,10
	$\alpha = 10^\circ, \beta = 0^\circ$	0,049	1,11	0,059	1,16
	$\alpha = 20^\circ, \beta = 0^\circ$	0,053	1,20	0,067	1,31
	$\alpha = 30^\circ, \beta = 0^\circ$	0,056	1,27	0,069	1,35
	$\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$	0,061	1,39	0,073	1,43
Irfan (2024)	$\alpha = 50^\circ, \beta = 0^\circ$	0,063	1,43	0,075	1,47
	$\alpha = 60^\circ, \beta = 0^\circ$	0,065	1,48	0,079	1,55
	$\alpha = 70^\circ, \beta = 0^\circ$	0,072	1,64	0,086	1,69
	$\alpha = 80^\circ, \beta = 0^\circ$	0,058	1,32	0,072	1,41
	$\alpha = 90^\circ, \beta = 0^\circ$	0,052	1,18	0,061	1,20

Gambar 4.20 merupakan grafik $\frac{CoP_{max}}{CoP_{max0}}$ terhadap sudut α untuk seluruh variasi kecepatan angin. Secara lebih detail, gambar 4.20 dijelaskan pada tabel 4.6 diatas. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai CoP turbin terhadap CoP turbin konvensional, yaitu dari sudut 0° hingga 70° . Peningkatan ini dapat terjadi karena pada deflektor *returning blade*, aliran angin dihambat untuk mengenai sudu *returning*, sehingga menghasilkan daerah dengan tekanan tinggi di *upstream* deflektor. Hal ini menjadikan daerah *downstream* deflektor memiliki tekanan yang lebih rendah sehingga dapat mengurangi torsi negatif turbin.

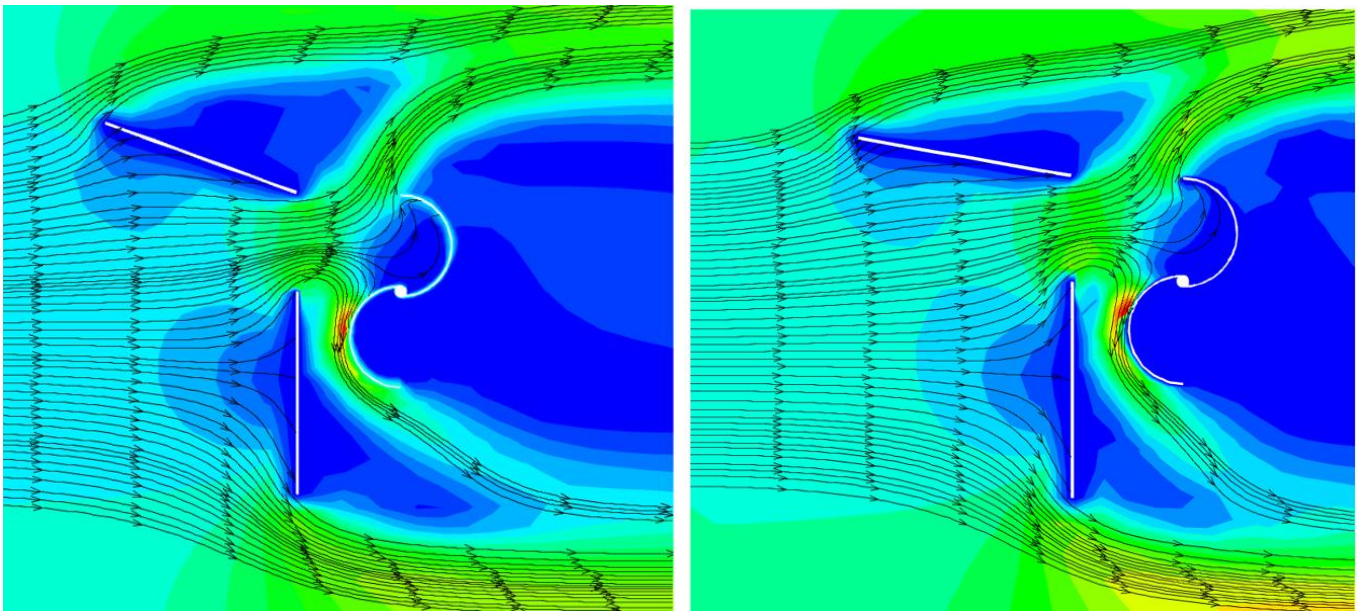
Selanjutnya pada deflektor *advancing blade*, setelah angin menubruk deflektor tersebut, tercipta daerah bertekanan tinggi di *upstream* deflektor, sehingga daerah *downstream* deflektor akan memiliki tekanan yang relatif rendah, hal ini memudahkan sudu *advancing* untuk bergerak. Selain itu semakin membesarnya nilai α , maka deflektor akan semakin efektif dalam mengarahkan angin menuju *advancing blade*, hal ini tentu saja meningkatkan momentum aliran yang menabrak sudu *advancing* sehingga dapat meningkatkan performa turbin. Sudut α yang besar juga akan menghasilkan *wake region* yang lebih kecil pada bagian belakang deflektor, sehingga mengurangi efek adanya *vortex* yang dapat menghambat pergerakan sudu *advancing*. Pada sudut α yang lebih kecil, karena posisinya yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran udara, maka *wake region* yang dihasilkan pada bagian *downstream* deflektor akan semakin besar, maka dapat dihasilkan aliran resirkulasi yang dapat mengganggu pergerakan sudu *advancing*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.13. Namun jika nilai α ditingkatkan terus menerus, maka pada suatu titik akan terjadi penurunan karena telah melewati batas optimalnya. Sudut yang terlalu besar, tidak akan mengarahkan aliran secara optimal menuju sudu *advancing*. Bahkan, aliran akan diarahkan hingga menuju sudu *returning*, hal ini dapat menyebabkan meningkatnya torsi negatif. Meningkatnya torsi negatif akan menurunkan performa dari turbin angin Savonius. Pada gambar 4.20 terlihat bahwa kedua grafik memiliki puncak yang sama pada sudut $\alpha = 70^\circ$, dan setelah sudut tersebut mengalami penurunan. Hal ini bersesuaian dengan studi eksperimental yang dilakukan oleh Salleh (2021) dimana sudut deflektor akan memiliki sudut optimal untuk meningkatkan performa dari turbin. Sudut α yang terlalu kecil dapat menyebabkan adanya separasi aliran yang menimbulkan *wake region* yang besar dan dapat menimbulkan aliran resirkulasi yang dapat menghambat sudu *advancing*. Sedangkan jika sudut α terlalu besar, tidak dapat mengalirkan aliran menuju sudu *advancing* bahkan dapat mengarahkan aliran menuju sudu *returning* yang dapat menurunkan performa turbin.

Penelitian Shademan dan Lahouti pada tahun 2020 juga turut mendukung pernyataan di atas. Penelitian secara numerik dilakukan untuk mengetahui pengaruh *inclination angle* pada plat datar terhadap *aerodynamics load*. Adapun hasil dari penelitian ini juga menemukan bahwa semakin besar sudut yang digunakan, maka *wake* pada bagian belakang deflektor juga mengecil. Sehingga tidak terlalu mengganggu pergerakan sudu *advancing*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.21 di atas yang mengilustrasikan aliran angin yang berinteraksi dengan deflektor dan turbin pada sudut α (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; dan (d) 70° . Pada sudut kecil dengan sudut $\alpha = 0^\circ$ dan sudut $\alpha = 30^\circ$, terlihat bahwa perbedaan tekanan antara *upstream* dan *downstream* deflektor lebih besar dibanding pada sudut $\alpha = 60^\circ$. Namun pada sudut yang semakin besar, aliran angin yang di arahkan semakin sedikit dan perbedaan tekanan yang dihasilkan antara daerah *upstream* dan *downstream* deflektor juga semakin mengecil dan deflektor semakin sedikit mengalirkan aliran angin menuju sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan menurunnya efektifitas yang dimiliki deflektor untuk meningkatkan gaya drag pada turbin angin. Sehingga nilai CoP turbin juga semakin menurun.



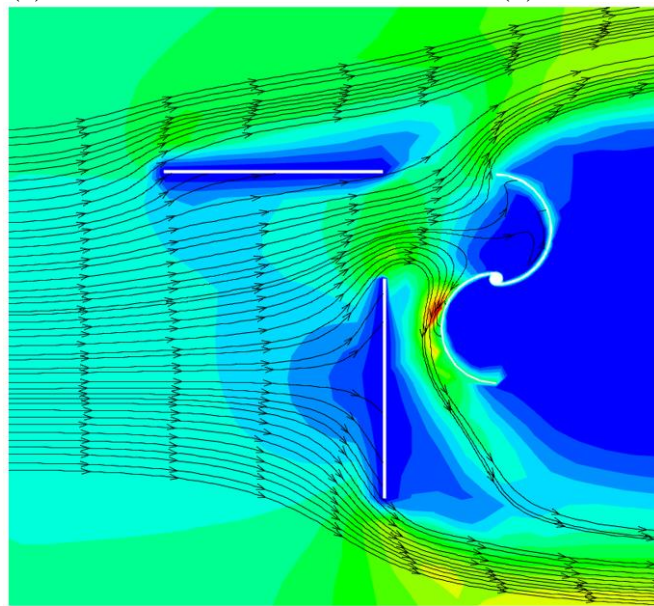
Gambar 4. 21 Ilustrasi Pola Aliran dan Kecepatan pada Sudut Deflektor (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; dan (d) 70°

Pola aliran yang melewati plat datar dengan sudut tertentu juga diamati oleh Lam dan Wei (2010), pada sudut plat yang besar, yaitu sudut $\alpha = 80^\circ$, *wake region* yang dihasilkan jauh lebih kecil, namun pada sudut ini juga, semakin sedikit aliran angin yang diarahkan menuju *advancing blade* sehingga gaya drag turbin dapat menurun. Selain itu perbedaan tekanan pada daerah hulu dan hilir deflektor juga semakin mengecil. Kedua hal tersebut dapat menyebabkan turbin angin memiliki performa yang semakin menurun. Pola aliran dan terbentuknya vortex pada sudut $\alpha = 80^\circ$, dapat dilihat pada gambar 4.22 di atas. Maka dari itu berdasarkan gambar 4.20 sampai gambar 4.22 dan tabel 4.6, peningkatan sudut deflektor sudu *advancing* tidak selalu mengalami peningkatan yang lebih besar, namun terdapat sudut optimal yang dapat meningkatkan CoP dengan nilai peningkatan paling tinggi yaitu pada sudut $\alpha = 70^\circ$.



(a) $\alpha = 70^\circ$

(b) $\alpha = 80^\circ$



(c) $\alpha = 90^\circ$

Gambar 4. 22 Ilustrasi Pola Aliran dan Kecepatan pada Sudut Deflektor (a) 70° ; (b) 80° dan (d) 90°

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut :

1. Secara umum, kehadiran deflektor di seluruh konfigurasi yang diteliti mampu meningkatkan kinerja turbin dibanding turbin konvensional, disamping itu peningkatan kecepatan angin juga mampu meningkatkan kinerja turbin.
2. Instalasi deflektor di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* turbin angin Savonius meningkatkan performa turbin. Ditandai dengan meningkatnya *coefficient of power* (CoP) dan *coefficient of moment* (CM) turbin pada kecepatan angin 5 dan 7 m/s dengan rasio peningkatan CoP_{max} maksimum pada masing-masing kecepatan angin sebesar 38,64% dan 43,14%. Adapun rasio peningkatan C_{Mmax} maksimum pada masing-masing kecepatan angin sebesar 34,18% dan 37,27%. Kedua rasio peningkatan maksimal tersebut pada konfigurasi sudut $\alpha = 45^\circ$.
3. Terjadi peningkatan kemampuan *self-starting* turbin, ditandai dengan adanya peningkatan *coefficient of static torque*. Pada data konvensional (tanpa deflektor) terdapat nilai CTS negatif yaitu pada sudut azimuth $140^\circ - 150^\circ$ namun pada konfigurasi dengan menggunakan deflektor, CTS bernilai positif pada seluruh sudut. Peningkatan CTS_{max} pada kecepatan angin 5 dan 7 m/s masing-masing sebesar 113,56% dan 47,13%. Peningkatan performa tertinggi diperoleh oleh konfigurasi ke 5 dimana nilai $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 0^\circ$.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian berikutnya, agar hasil penelitian lebih baik yaitu sebagai berikut :

1. Perawatan dan perbaikan pada peralatan uji dan alat ukur penting untuk diperhatikan. Pastikan dilakukan pembersihan secara berkala pada peralatan, seperti pada kedua bearing. Pemberian pelumas juga perlu dilakukan sehingga dapat mempertahankan performa turbin. Pengecekan kondisi alat ukur yang digunakan, perlu dilakukan secara berkala juga mengingat kondisinya yang semakin menurun seiring bertambahnya waktu penggunaannya.
2. Diperlukan studi numerik yang relevan dengan penelitian sebagai bahan validasi fenomena yang terjadi atau karakteristik aliran angin saat berinteraksi dengan deflektor dan turbin angin.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, Burçin D., Mehmet A., dan Aydog˘an Ö. 2008. *An Experimental Study on Improvement of A Savonius Rotor Performance With Curtaining*. Turki.
- Altan, Burçin D., dan Mehmet A. 2009. *The Use of A Curtain Design to Increase The Performance Level of A Savonius Wind Rotors*. Turki.
- Chen, Haibo., Jiawei Lu., dan Emma Serwaa Obobisa. 2023. *Striving towards 2050 net zero CO2 emissions: How critical are clean energy and financial sectors?*. Cel Press.
- Copernicus. (2024, 5 Maret). *Copernicus: February 2024 was globally the warmest on record – Global Sea Surface Temperatures at record high*. Diakses pada 21 Februari 2024 dari <https://climate.copernicus.eu/copernicus-february-2024-was-globally-warmest-record-global-sea-surface-temperatures-record-high>.
- Diaz, Argemiro P., Giovammi J.P., dan Khristina U.S. 2015. *Computational Model of Savonius Turbine*. Universitas Autónoma del Caribe. Colombia.
- Dinçer, Ibrahim., dan Dogan Erdemir. 2023. *Introduction to Energy Systems*. New Jersey. John Wiley and Sons, Inc.
- Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (Ditjen EBTKE). 2023. *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE Tahun 2023*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Jakarta. Indonesia.
- Fox, R. W., McDolald, A. T. & Pritchard, P. J., 2011. *Introduction to Fluid Mechanics*. 8 ed. New York City: John Wiley and Sons, Inc
- Giorgetti, Simone., Giulino Palegrini., dan Stefania Zanforlin. 2015. *CFD Investigation on The Aerodynamic Interferences Between Medium-Solidity Darrieus Vertical Axis Wind Turbine*. University of Pisa. Italia.
- Gipe, Paul., dan Erik Möllerström. 2022. *An Overview of the History of Wind Turbine Development: Part I—The Early Wind Turbines until The 1960s*. Wind Engineering Journal.
- Golecha, Kailaash., T.I Eldho., dan S.V. Prabhu. 2011. *Influence of The Deflector Plate on The Performance of Modified Savonius Water Turbine*.
- Handayani, Sri U. 2014. *Pengembangan dan Analisa Keseragaman Aliran Terowongan Angin Tipe Terbuka sebagai Sarana Pengujian Aerodinamika*. Semarang. Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang.
- Hidayat, T., et al. 2022. *Indonesia Post-Pandemic Outlook: Strategy Towards Net-Zero Emissions by 2060 From The Renewables And Carbon-Neutral Energy Perspectives* (109–132). BRIN Publishing.
- Hossain, Sourab. 2019. *Comparative Study on Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines*. Thesis. World University of Bangladesh.
- Jamdade, P.G., Santosh V.P., dan Vishal B.P. 2013. *Assessment of Power Coefficient of an Offline Wind Turbine Generator System*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT).
- Mahmoud, N., El-Haroun, A., Wahba, E. Nasef, M., 2012. *An experimental study on improvement of Savonius rotor performance*, s.l.: Alexandria Engineering Journal.
- Mathew, S., dan Philp G. S. 2012. *Wind Turbines: Evolution, Basic Principles, and Classifications*. Environmental Science, Engineering.
- Mohamed, Mohamed H., Alqurashi, Faris., dan thevenin, Dominique. 2021. *Performance enhancement of a Savonius Turbine Under Effect of Frontal Guiding Plate*.
- Palomo, Roberto Eduardo Q. 2019. *Operation and Faults Analysis of Energy-Saving Permanent Magnet Synchronous Generator for Small Wind Turbine*. PhD Thesis. Wrocław University of Science and Technology.
- Rapp, Bastian E. 2017. *Microfluidics: Modeling, Mechanics and Mathematics*. Elsevier Inc.

- Salleh, M. Badrul., Kamaruddin N.M., dan Zulfa M.K. 2020. *The Effects of Deflector Longitudinal Position And Height on The Power Performance of a Conventional Savonius Turbine*. Universiti Sains Malaysia.
- Salleh, M. Badrul., Kamaruddin N.M., dan Zulfa M.K. 2022. *Experimental Investigation on The Effects of Deflector Angles on The Power Performance of a Savonius Turbine for Hydrokinetic Applications in Small Rivers*. Universiti Sains Malaysia.
- Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional (Sekjen DEN). 2023. *Ketahanan Energi Indonesia 2023*. Dewan Energi Nasional (DEN). Jakarta. Indonesia
- Shamsuddin, M. S. M., dan Kamaruddin N. M. 2023. *Experimental Study on The Characterization Of The Self-Starting Capability of a Single and Double-Stage Savonius Turbine*. Elsevier Inc.
- Tian, Wenlong et al. 2022. Influence of a passive upstream deflector on the performance of the Savonius wind turbine.
- Tong, Wei. 2022. *Mechanical Design and Manufacturing of Electric Motors*. Boca Raton. CRC Press.
- Telles, Marco A. 2006. *Wind Energy*. New York. Nova Science Publishers, Inc.
- Wizelius, Tore. 2015. *Developing Wind Power Projects*. New York. Taylor & Francis.

LAMPIRAN

A. Data Torsi Dinamis dan Statis Konfigurasi Konvensional

Tabel A.1 Data Torsi Dinamis Konfigurasi Konvensional pada Kecepatan Angin 5 m/s

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	282,400	29,573	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,903	0,000	0,000	0,000
301,350	5	249,600	26,138	0,010	0,050	0,0898	1,171	0,798	0,005	0,024	0,020
301,350	5	220,300	23,070	0,010	0,090	0,0898	1,171	0,705	0,010	0,049	0,034
301,350	5	186,533	19,534	0,016	0,130	0,0898	1,171	0,597	0,014	0,070	0,042
301,350	5	155,300	16,263	0,025	0,170	0,0898	1,171	0,497	0,018	0,089	0,044
301,350	5	124,200	13,006	0,035	0,210	0,0898	1,171	0,397	0,021	0,107	0,042
301,350	5	92,700	9,708	0,050	0,250	0,0898	1,171	0,296	0,025	0,122	0,036
301,350	5	62,500	6,545	0,075	0,290	0,0898	1,171	0,200	0,026	0,131	0,026
301,350	5	31,000	3,246	0,080	0,320	0,0898	1,171	0,099	0,029	0,147	0,015
301,350	5	0,000	0,000	0,090	0,350	0,0898	1,171	0,000	0,032	0,159	0,000

Keterangan: Data digunakan untuk perhitungan uncertainty pada subbab 3.7 dan contoh perhitungan pada subbab 4.2

Tabel A.2 Data Torsi Dinamis Konfigurasi Konvensional pada Kecepatan Angin 7 m/s

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	402,867	42,188	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,920	0,000	0,000	0,000
301,350	5	349,800	36,631	0,020	0,140	0,0898	1,171	0,799	0,015	0,037	0,030
301,350	5	304,400	31,877	0,035	0,240	0,0898	1,171	0,695	0,025	0,064	0,044
301,350	5	261,800	27,416	0,050	0,320	0,0898	1,171	0,598	0,033	0,084	0,050
301,350	5	217,900	22,818	0,060	0,390	0,0898	1,171	0,498	0,040	0,103	0,051
301,350	5	175,100	18,336	0,063	0,430	0,0898	1,171	0,400	0,045	0,114	0,046
301,350	5	130,300	13,645	0,065	0,470	0,0898	1,171	0,298	0,050	0,126	0,038
301,350	5	86,967	9,107	0,070	0,510	0,0898	1,171	0,199	0,054	0,137	0,027
301,350	5	48,000	5,027	0,085	0,570	0,0898	1,171	0,110	0,059	0,151	0,017
301,350	5	0,000	0,000	0,100	0,617	0,0898	1,171	0,000	0,063	0,161	0,000

Tabel A.3 Data Torsi Statis Konfigurasi Konvensional

Sudut	5 m/s		7 m/s	
θ (°)	Ts (N.cm)	CTS	Ts (N.cm)	CTS
0	0,230	0,011	0,980	0,025
10	0,510	0,025	1,790	0,045
20	0,790	0,039	2,400	0,061
30	1,040	0,052	3,010	0,076
40	1,190	0,059	3,440	0,087
50	1,050	0,052	3,080	0,078
60	0,880	0,044	2,680	0,068
70	0,730	0,036	2,300	0,058
80	0,590	0,029	1,920	0,049
90	0,450	0,022	1,590	0,040
100	0,310	0,015	1,250	0,032
110	0,200	0,010	0,920	0,023
120	0,100	0,005	0,530	0,013
130	0,010	0,000	0,160	0,004
140	-0,040	-0,002	-0,120	-0,003
150	-0,070	-0,003	-0,280	-0,007
160	0,010	0,000	-0,140	-0,004
170	0,110	0,005	0,300	0,008
180	0,230	0,011	0,980	0,025

Keterangan: Data digunakan untuk contoh perhitungan pada subbab 4.2

B. Data Torsi Dinamis dengan Instalasi Deflektor pada Kecepatan Angin 5 m/s

Tabel B.1 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	282,867	29,622	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,905	0,000	0,000	0,000
301,350	5	236,300	24,745	0,005	0,070	0,0898	1,171	0,756	0,008	0,040	0,030
301,350	5	189,300	19,823	0,012	0,125	0,0898	1,171	0,605	0,014	0,069	0,042
301,350	5	164,600	17,237	0,020	0,160	0,0898	1,171	0,526	0,017	0,086	0,045
301,350	5	129,100	13,519	0,033	0,210	0,0898	1,171	0,413	0,022	0,108	0,045
301,350	5	93,000	9,739	0,043	0,250	0,0898	1,171	0,297	0,025	0,126	0,038
301,350	5	68,800	7,205	0,056	0,280	0,0898	1,171	0,220	0,027	0,137	0,030
301,350	5	38,100	3,990	0,077	0,320	0,0898	1,171	0,122	0,030	0,149	0,018
301,350	5	0,000	0,000	0,085	0,360	0,0898	1,171	0,000	0,034	0,168	0,000

Tabel B.2 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	283,667	29,706	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,907	0,000	0,000	0,000
301,350	5	232,600	24,358	0,005	0,070	0,0898	1,171	0,744	0,008	0,040	0,030
301,350	5	200,700	21,017	0,012	0,125	0,0898	1,171	0,642	0,014	0,069	0,044
301,350	5	169,400	17,740	0,020	0,170	0,0898	1,171	0,542	0,018	0,092	0,050
301,350	5	138,100	14,462	0,033	0,210	0,0898	1,171	0,442	0,022	0,108	0,048
301,350	5	106,300	11,132	0,043	0,250	0,0898	1,171	0,340	0,025	0,127	0,043
301,350	5	75,400	7,896	0,057	0,290	0,0898	1,171	0,241	0,029	0,142	0,034
301,350	5	44,600	4,671	0,080	0,340	0,0898	1,171	0,143	0,032	0,159	0,023
301,350	5	0,000	0,000	0,087	0,370	0,0898	1,171	0,000	0,035	0,173	0,000

Tabel B.3 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	284,233	29,765	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,909	0,000	0,000	0,000
301,350	5	226,100	23,677	0,007	0,090	0,0898	1,171	0,723	0,010	0,051	0,037
301,350	5	193,400	20,253	0,017	0,145	0,0898	1,171	0,619	0,016	0,078	0,048
301,350	5	169,700	17,771	0,024	0,185	0,0898	1,171	0,543	0,020	0,098	0,053
301,350	5	125,000	13,090	0,032	0,240	0,0898	1,171	0,400	0,026	0,127	0,051
301,350	5	93,000	9,739	0,043	0,280	0,0898	1,171	0,297	0,029	0,145	0,043
301,350	5	62,200	6,514	0,066	0,330	0,0898	1,171	0,199	0,032	0,161	0,032
301,350	5	31,300	3,278	0,096	0,380	0,0898	1,171	0,100	0,035	0,174	0,017
301,350	5	0,000	0,000	0,116	0,420	0,0898	1,171	0,000	0,037	0,186	0,000

Tabel B.4 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	285,100	29,856	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,912	0,000	0,000	0,000
301,350	5	232,967	24,396	0,007	0,090	0,0898	1,171	0,745	0,010	0,051	0,038
301,350	5	199,100	20,850	0,014	0,150	0,0898	1,171	0,637	0,017	0,083	0,053
301,350	5	170,567	17,862	0,017	0,185	0,0898	1,171	0,545	0,021	0,103	0,056
301,350	5	119,700	12,535	0,023	0,250	0,0898	1,171	0,383	0,028	0,139	0,053
301,350	5	88,200	9,236	0,027	0,280	0,0898	1,171	0,282	0,031	0,155	0,044
301,350	5	56,800	5,948	0,035	0,317	0,0898	1,171	0,182	0,035	0,172	0,031
301,350	5	31,100	3,257	0,053	0,350	0,0898	1,171	0,099	0,036	0,182	0,018
301,350	5	11,200	1,173	0,060	0,370	0,0898	1,171	0,036	0,038	0,189	0,007
301,350	5	0,000	0,000	0,076	0,400	0,0898	1,171	0,000	0,040	0,198	0,000

Tabel B.5 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T (K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,350	5	287,767	30,135	0,000	0,000	0,0898	1,171	0,920	0,000	0,000	0,000
301,350	5	237,400	24,860	0,007	0,090	0,0898	1,171	0,759	0,010	0,051	0,039
301,350	5	201,500	21,101	0,012	0,150	0,0898	1,171	0,644	0,017	0,084	0,054
301,350	5	174,200	18,242	0,017	0,198	0,0898	1,171	0,557	0,022	0,111	0,062
301,350	5	131,400	13,760	0,021	0,250	0,0898	1,171	0,420	0,028	0,140	0,059
301,350	5	100,200	10,493	0,026	0,298	0,0898	1,171	0,320	0,033	0,166	0,053
301,350	5	68,100	7,131	0,035	0,350	0,0898	1,171	0,218	0,039	0,193	0,042
301,350	5	37,100	3,885	0,047	0,390	0,0898	1,171	0,119	0,042	0,210	0,025
301,350	5	0,000	0,000	0,067	0,425	0,0898	1,171	0,000	0,044	0,219	0,000

C. Data Torsi Dinamis dengan Instalasi Deflektor pada Kecepatan Angin 7 m/s

Tabel C.1 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T(K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,35	7	403,300	42,233	0,000	0,000	0,090	1,171	0,921	0,000	0,000	0,000
301,35	7	350,333	36,687	0,010	0,140	0,090	1,171	0,800	0,016	0,041	0,032
301,35	7	291,000	30,473	0,027	0,270	0,090	1,171	0,665	0,030	0,076	0,050
301,35	7	248,300	26,002	0,034	0,350	0,090	1,171	0,567	0,039	0,099	0,056
301,35	7	203,400	21,300	0,047	0,410	0,090	1,171	0,465	0,045	0,113	0,053
301,35	7	159,200	16,671	0,059	0,460	0,090	1,171	0,364	0,049	0,125	0,045
301,35	7	116,100	12,158	0,082	0,520	0,090	1,171	0,265	0,054	0,137	0,036
301,35	7	72,300	7,571	0,099	0,580	0,090	1,171	0,165	0,059	0,150	0,025
301,35	7	36,600	3,833	0,110	0,625	0,090	1,171	0,084	0,063	0,161	0,013
301,35	7	0,000	0,000	0,129	0,680	0,090	1,171	0,000	0,068	0,172	0,000

Tabel C.2 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T(K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,35	7	403,400	42,244	0,000	0,000	0,090	1,171	0,922	0,000	0,000	0,000
301,35	7	354,467	37,120	0,017	0,150	0,090	1,171	0,810	0,016	0,041	0,034
301,35	7	291,000	30,473	0,035	0,290	0,090	1,171	0,665	0,031	0,080	0,053
301,35	7	250,267	26,208	0,042	0,370	0,090	1,171	0,572	0,040	0,102	0,058
301,35	7	194,100	20,326	0,060	0,450	0,090	1,171	0,443	0,048	0,122	0,054
301,35	7	151,000	15,813	0,072	0,500	0,090	1,171	0,345	0,052	0,133	0,046
301,35	7	107,000	11,205	0,085	0,560	0,090	1,171	0,244	0,058	0,148	0,036
301,35	7	62,400	6,535	0,120	0,640	0,090	1,171	0,143	0,064	0,162	0,023
301,35	7	32,500	3,403	0,144	0,690	0,090	1,171	0,074	0,067	0,170	0,013
301,35	7	0,000	0,000	0,136	0,720	0,090	1,171	0,000	0,072	0,182	0,000

Tabel C.3 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T(K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,35	7	411,600	43,103	0,000	0,000	0,090	1,171	0,940	0,000	0,000	0,000
301,35	7	370,000	38,746	0,017	0,140	0,090	1,171	0,845	0,015	0,038	0,032
301,35	7	301,400	31,563	0,035	0,320	0,090	1,171	0,689	0,035	0,089	0,061
301,35	7	261,300	27,363	0,040	0,400	0,090	1,171	0,597	0,044	0,112	0,067
301,35	7	200,400	20,986	0,060	0,470	0,090	1,171	0,458	0,050	0,128	0,059
301,35	7	160,100	16,766	0,071	0,520	0,090	1,171	0,366	0,055	0,140	0,051
301,35	7	121,200	12,692	0,085	0,580	0,090	1,171	0,277	0,061	0,154	0,043
301,35	7	77,500	8,116	0,117	0,665	0,090	1,171	0,177	0,067	0,171	0,030
301,35	7	32,500	3,403	0,132	0,725	0,090	1,171	0,074	0,073	0,185	0,014
301,35	7	0,000	0,000	0,140	0,750	0,090	1,171	0,000	0,075	0,190	0,000

Tabel C.4 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 30^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T(K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,35	7	421,800	44,171	0,000	0,000	0,090	1,171	0,964	0,000	0,000	0,000
301,35	7	386,700	40,495	0,017	0,120	0,090	1,171	0,883	0,013	0,032	0,028
301,35	7	339,700	35,573	0,035	0,255	0,090	1,171	0,776	0,027	0,069	0,053
301,35	7	284,800	29,824	0,042	0,380	0,090	1,171	0,651	0,041	0,105	0,069
301,35	7	232,200	24,316	0,060	0,460	0,090	1,171	0,530	0,049	0,125	0,066
301,35	7	179,900	18,839	0,072	0,525	0,090	1,171	0,411	0,056	0,141	0,058
301,35	7	140,700	14,734	0,085	0,587	0,090	1,171	0,321	0,062	0,157	0,050
301,35	7	99,900	10,462	0,117	0,670	0,090	1,171	0,228	0,068	0,172	0,039
301,35	7	62,500	6,545	0,144	0,740	0,090	1,171	0,143	0,073	0,186	0,027
301,35	7	0,000	0,000	0,153	0,800	0,090	1,171	0,000	0,079	0,202	0,000

Tabel C.5 Data Torsi Dinamis Konfigurasi $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 0^\circ$

T(K)	U (m/s)	n (rpm)	ω (rad)	m (kg)	s (kg)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	TSR	Td (N.m)	Cm	CoP
301,35	7	436,400	45,700	0,000	0,000	0,090	1,171	0,997	0,000	0,000	0,000
301,35	7	392,400	41,092	0,017	0,150	0,090	1,171	0,896	0,016	0,041	0,037
301,35	7	339,700	35,573	0,035	0,290	0,090	1,171	0,776	0,031	0,080	0,062
301,35	7	284,800	29,824	0,042	0,400	0,090	1,171	0,651	0,044	0,112	0,073
301,35	7	232,200	24,316	0,060	0,485	0,090	1,171	0,530	0,052	0,133	0,070
301,35	7	179,900	18,839	0,072	0,560	0,090	1,171	0,411	0,060	0,152	0,063
301,35	7	140,700	14,734	0,085	0,620	0,090	1,171	0,321	0,066	0,167	0,054
301,35	7	99,900	10,462	0,117	0,700	0,090	1,171	0,228	0,071	0,182	0,041
301,35	7	62,500	6,545	0,144	0,780	0,090	1,171	0,143	0,078	0,198	0,028
301,35	7	0,000	0,000	0,160	0,870	0,090	1,171	0,000	0,087	0,221	0,000

D. Data Torsi Statis

Tabel D.1 Data Torsi Statis Pada Kecepatan Angin 5 m/s

θ (°)	Ts (N.cm)					CTS				
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
0	0,36	0,44	0,49	0,56	0,6	0,018	0,022	0,024	0,028	0,030
10	1,11	1,11	1,18	1,26	1,34	0,055	0,055	0,059	0,063	0,067
20	1,49	1,59	1,74	1,79	1,88	0,074	0,079	0,087	0,089	0,094
30	1,69	1,9	2,1	2,14	2,28	0,084	0,095	0,105	0,107	0,114
40	1,83	1,99	2,22	2,42	2,54	0,091	0,099	0,111	0,121	0,127
50	1,69	1,84	2	2,12	2,26	0,084	0,092	0,100	0,106	0,113
60	1,5	1,61	1,65	1,72	1,82	0,075	0,080	0,082	0,086	0,091
70	1,3	1,43	1,51	1,57	1,68	0,065	0,071	0,075	0,078	0,084
80	1,2	1,31	1,36	1,42	1,51	0,060	0,065	0,068	0,071	0,075
90	1,02	1,04	1,18	1,19	1,27	0,051	0,052	0,059	0,059	0,063
100	0,86	0,81	0,87	0,92	1,04	0,043	0,040	0,043	0,046	0,052
110	0,71	0,73	0,69	0,72	0,72	0,035	0,036	0,034	0,036	0,036
120	0,68	0,67	0,62	0,59	0,55	0,034	0,033	0,031	0,029	0,027
130	0,52	0,5	0,42	0,36	0,31	0,026	0,025	0,021	0,018	0,015
140	0,4	0,37	0,28	0,23	0,2	0,020	0,018	0,014	0,011	0,010
150	0,3	0,28	0,22	0,18	0,13	0,015	0,014	0,011	0,009	0,006
160	0,22	0,29	0,29	0,31	0,37	0,011	0,014	0,014	0,015	0,018
170	0,33	0,41	0,46	0,51	0,56	0,016	0,020	0,023	0,025	0,028
180	0,5	0,62	0,65	0,7	0,76	0,025	0,031	0,032	0,035	0,038

Tabel D.2 Data Torsi Statis Pada Kecepatan Angin 7 m/s

θ (°)	Ts (N.cm)					CTS				
	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$
0	0,930	1,220	1,250	1,260	1,280	0,024	0,031	0,032	0,032	0,033
10	1,610	2,030	2,040	2,170	2,300	0,041	0,052	0,052	0,055	0,058
20	2,430	2,750	2,830	3,144	3,280	0,062	0,070	0,072	0,080	0,083
30	3,290	3,620	3,860	4,160	4,480	0,084	0,092	0,098	0,106	0,114
40	3,640	3,980	4,460	4,770	5,040	0,093	0,101	0,113	0,121	0,128
50	3,030	3,420	3,700	4,100	4,360	0,077	0,087	0,094	0,104	0,111
60	2,760	3,080	3,420	3,580	3,890	0,070	0,078	0,087	0,091	0,099
70	2,360	2,760	3,040	3,160	3,460	0,060	0,070	0,077	0,080	0,088
80	2,080	2,420	2,640	2,790	3,000	0,053	0,062	0,067	0,071	0,076
90	1,580	2,060	2,210	2,380	2,510	0,040	0,052	0,056	0,061	0,064
100	1,340	1,660	1,970	2,000	2,050	0,034	0,042	0,050	0,051	0,052
110	1,050	1,450	1,450	1,480	1,450	0,027	0,037	0,037	0,038	0,037
120	0,830	1,140	1,130	1,090	1,020	0,021	0,029	0,029	0,028	0,026
130	0,580	1,040	0,800	0,750	0,720	0,015	0,026	0,020	0,019	0,018
140	0,490	0,680	0,490	0,440	0,390	0,012	0,017	0,012	0,011	0,010
150	0,280	0,280	0,250	0,220	0,180	0,007	0,007	0,006	0,006	0,005
160	0,420	0,510	0,500	0,610	0,570	0,011	0,013	0,013	0,016	0,014
170	0,730	0,750	0,740	0,740	0,830	0,019	0,019	0,019	0,019	0,021
180	0,930	1,220	1,080	1,080	1,280	0,024	0,031	0,027	0,027	0,033

BIODATA PENULIS



Masyitha Zahroyana dilahirkan di Boyolali pada 15 Maret 2002. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN Pandian 1, SMPN 1 Sumenep, dan SMAN 1 Sumenep. Setelah lulus SMA pada tahun 2020, penulis diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS melalui jalur SNMPTN.

Selain menjalani perkuliahan di Departemen Teknik Mesin ITS, penulis juga sempat aktif di UKM Penalaran sebagai anggota pada periode 2020/2021. Kemudian, penulis juga aktif mengikuti beberapa organisasi kemahasiswaan di bidang keagamaan dan sosial masyarakat yaitu LKKI Ash-Shaf sebagai staff Syiar kreatif pada tahun 2022 dan Kepala Departemen SosMas di Forum Kemahasiswaan ITS Sumenep pada tahun 2022. Penulis aktif sebagai Asisten Praktikum Mesin Konversi Energi dan Mekanika Fluida yang dinaungi Laboratorium Mekanika dan Mesin mesin Fluida. Penulis juga mendapat beasiswa dari Yayasan Manarul Ilmi ITS sebagai mahasiswi penghafal Quran yang dibina oleh Ma'had Ahlul Quran Surabaya tahun 2022-2025. Selain itu, penulis juga sempat melakukan kerja praktik di PT PLN Indonesia Power Grati POMU, Pasuruan pada bagian Pemeliharaan Mesin Pembangkit. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email masyitha.zhro17@gmail.com