



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PLAT DATAR
SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN DI DEPAN
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA
TURBIN ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk $(L/D) = 1,16$; $Re = 3.0 \times 10^4$; 6.0×10^4 ; dan 9.0×10^4 ”

Mukhammad Ubaidillah
NRP 2113 100 152

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
FLAT PLATE AS FLOW DISTURBANCE IN
FRONT OF RETURNING BLADE TO THE
SAVONIUS TYPE WIND TURBINE
PERFORMANCE**

**“Case Study For $(L/D) = 1,16$; $Re = 3.0 \times 10^4$;
 6.0×10^4 ; and 9.0×10^4 ”**

Mukhammad Ubaidillah
NRP 2113 100 152

Advisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

Studi Eksperimen Pengaruh Plat Datar sebagai Pengganggu Aliran di Depan Returning Blade terhadap Performa Turbin Angin Savonius

“Studi Kasus untuk $(L/D) = 1,16$; $Re = 3.0 \times 10^4$, 6.0×10^4 , dan 9.0×10^4 ”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUKHAMMAD UBaidillah

NRP. 2113 100 152

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Triyogi Yuwono, DEA
(NIP. 196001291987011001) (Pembimbing)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD
(NIP. 196412281990031002) (Penguji I)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT
(NIP. 197104051997021001) (Penguji II)
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto
(NIP. 196202161995121001) (Penguji III)

SURABAYA
JULI 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH PLAT DATAR
SEBAGAI PENGGANGGU ALIRAN DI DEPAN
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk $(L/D) = 1,16$; $Re = 3.0 \times 10^4$; 6.0×10^4 ; dan
 9.0×10^4 ”

Nama Mahasiswa : Mukhammad Ubaidillah
NRP : 2113 100 152
Departemen : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyono Yuwono, DEA

ABSTRAK

Krisis Energi merupakan permasalahan besar yang harus diselesaikan. Energi angin adalah salah satu solusi sumber energi yang dapat diperbarui di Indonesia. Turbin angin Savonius merupakan alat yang dapat mengubah energi angin menjadi torsi dan putaran yang dapat dihubungkan dengan generator untuk menghasilkan energi listrik. Turbin angin Savonius menghasilkan putaran akibat perbedaan gaya drag pada sisi upstream advancing blade dan returning blade. Pada penelitian ini selisih gaya drag pada kedua sudu diperbesar agar performa turbin meningkat dengan menutup aliran fluida yang menuju returning blade, dan aliran tersebut diarahkan ke advancing blade menggunakan plat datar yang diletakkan di depan returning blade dengan sudut kedudukan plat datar yang divariasikan.

Eksperimen menggunakan permodelan turbin Savonius dengan diameter (D) 101,6 mm dan diameter overlap (b) 13 mm dengan metode aliran eksternal yang dihasilkan oleh axial fan. Honeycomb diletakkan di depan axial fan untuk mengurangi efek swirl dan membantu agar aliran lebih uniform sebelum aliran menumbuk benda uji. Pengganggu berupa plat datar dengan tinggi 300 mm dan rasio $L/D = 1.16$. Sudut plat divariasikan setiap 5° dari 0° hingga 90° terhadap bidang tegak lurus aliran udara.

Penelitian ini dilakukan pada bilangan Reynolds = 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 berdasarkan kecepatan aliran udara dan panjang karakteristik turbin ($d = 2D-b$). Putaran turbin diukur menggunakan tachometer, torsi dinamis diukur dengan mekanisme brake dynamometer, sedangkan torsi statis diukur menggunakan torquemeter. Daya turbin dapat diketahui dari torsi dinamis dan putaran poros turbin sehingga dipilih CoP terbesar ketika pembebanan hingga turbin berhenti.

Untuk $Re = 6.0 \times 10^4$, penggunaan plat dengan $L/D = 1,16$ pada $\theta = 40^\circ$, terbukti paling efektif untuk meningkatkan performa turbin Savonius. Pada posisi tersebut didapatkan nilai putaran 1,365 kali lebih tinggi dan coefficient of power menjadi 1,64 kali lebih tinggi daripada penggunaan turbin Savonius tanpa plat pengganggu. Sedangkan, untuk nilai torsi statis menjadi 2,84 kali lebih tinggi dibandingkan turbin Savonius tanpa plat pengganggu pada $Re = 9.0 \times 10^4$ dan posisi $\theta = 35^\circ$.

Kata Kunci : turbin Savonius, putaran turbin, torsi statis, coefficient of power

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF FLAT PLATE AS FLOW DISTURBANCE IN FRONT OF RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS TYPE WIND TURBINE PERFORMANCE

“Case Study for $(L/D) = 1.16$; $Re = 3.0 \times 10^4$; 6.0×10^4 ; dan 9.0×10^4 “

Student's Name : Mukhammad Ubaidillah
NRP : 2113 100 152
Department : Mechanical Engineering FTI ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyono Yuwono, DEA

Abstract

The energy crisis is a big problem to be solved. Wind energy is one of the renewable energy source solutions in Indonesia. The Savonius wind turbine is one example of an exploration of renewable energy that is environmentally friendly. The difference of drag force between the returning blade and the advancing blade will result in a total drag to rotate the Savonius turbine, and finally to generate power to drive the generator producing electrical energy. It has more simple design and low cost than other type of wind turbine. Unfortunately, the Savonius wind turbine has poor efficiency. Therefore, in order to increase the performance of the Savonius wind turbine in this study, an obstacle plate has been placed in front of returning blade.

The study was done in an external flow flowing from an axial fan. The turbine have of 101,6 mm blade diameter and of 300 mm height. As disturbance a flat plate having L/D ratio of 1.16 was used and placed in front of the returning blade. The angle position was varied in range of $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ with 5° increment. The present study was done in Reynolds number of $Re = 3.0 \times 10^4$, 6.0×10^4 , and 9.0×10^4 based on turbine's characteristic length $d=2D-b$ (where b is turbine's overlap length) and the free stream velocity. The free stream velocity was measured using an anemometer. The rotational speed was

measured using a tachometer and the static torque was measured using a torque meter. As for the dynamic torque, the measurement was done using a brake dynamometer system with gradual load.

The results show that for $Re = 6.0 \times 10^4$, placing the plate at $\theta = 40^\circ$, is the most effective for improving the performance of the Savonius turbine. In that position, the value of rotation attained of 1,365 times higher than if the turbine without plate, and the coefficient of power is becomes 1.64 times higher than without plate. Meanwhile, the value of static torque attained of 2.84 times higher than the Savonius turbine without plate at $Re = 9 \times 10^4$ and the position of $\theta = 35^\circ$.

Keywords : Savonius turbine, turbine rotation, static torsion and coefficient of power

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan petunjuk sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Sholawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW.

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

1. Orang tua penulis, M. Mansur dan Siti Sa'adah, atas segala kasih sayang, dukungan, dan doa yang selalu dipanjatkan untuk anak-anaknya.
2. Kakak kandung penulis Ima K.S. , Yulianti M. , Adik Kandung penulis M. Alfian Affandy, dan Sulfiani Mustika A. serta seluruh keluarga besar penulis atas nasihat yang selalu memotivasi penulis untuk menjadi sosok yang lebih baik.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah mencurahkan ilmu, waktu, tenaga, bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD, Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, dan Dr. Ir. Heru Mirmanto selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
5. Pak Nur dan Pak Tris selaku karyawan Laboratorium Mekanika Fluida atas bantuan dan nasehatnya dalam pembuatan peralatan eksperimen Tugas Akhir ini.
6. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak sekali bantuan selama penulis menuntut ilmu di ITS baik dalam bidang akademik maupun non akademik.

7. Rekan-rekan satu topik Tugas Akhir Annas, Citro, Ulfah, Erik, Aip dan Nabila yang selalu bersama-sama dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Kelima Badan Pengurus Harian LBMM (Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin) ITS 2016-2017, Alham, Adul, Toni, Mbek, dan Bokir serta BEGALS atas kesetiannya menemani penulis berorganisasi.
9. Seluruh pengurus dan mantan pengurus Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin atas canda tawa, kerja sama dan ilmu dalam berorganisasi.
10. Teman-teman M56 Mesin ITS atas kebersamaan dan kekeluargaan di kampus perjuangan ini.
11. Semua pihak yang turut membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini dan tidak dapat penulis sebut satu persatu.

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

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	5
1.3. Batasan Masalah	6
1.4. Tujuan Penelitian	7
1.5. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Turbin Angin	9
2.2. Turbin Angin Savonius	10
2.3. Bilangan <i>Reynolds</i>	11
2.4. Gaya Drag	12
2.5. <i>Coefficient of Power</i>	15
2.6. <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	17
2.7. Penelitian Terdahulu	19
2.7.1. Studi Eksperimen Turbin Angin Savonius Berpengganggu	19
2.7.2. Membandingkan Performa Turbin Savonius Dua Sudu dan Tiga Sudu dengan Pemberian Plat Pengganggu	22
2.7.3. Analisa Performa Pemberian Plat Penggangu dan Variasi Bentuk Sudu pada Turbin Savonius Menggunakan	

	Simulasi <i>Computational Fluid Dynamics</i>	24
2.7.3.	Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan <i>Returning Blade</i> Terhadap Performa Turbin Angin <i>Savonius</i>	26
BAB III	METODE PENELITIAN	29
3.1.	Parameter Pengukuran.....	29
3.2.	Analisa Dimensi <i>Coefficient of Power</i>	30
3.3.	Peralatan.....	33
3.3.1.	<i>axial fan</i>	33
3.3.2.	Benda Uji.....	35
3.3.3.	Alat Ukur	36
3.4.	Prosedur Penelitian.....	44
3.5.	Flowchart Penelitian.....	46
3.6.	Urutan Langkah Penelitian	48
BAB IV	ANALISA DATA	49
4.1.	Data Penelitian.....	49
4.1.1.	Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	49
4.2.	Contoh Perhitungan.....	51
4.2.1.	Perhitungan Torsi Dinamis	51
4.2.2.	Perhitungan <i>Coefficient of Power</i> (CoP)	52
4.2.3.	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	52
4.3.	Analisa Performa Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Pengganggu	53
4.3.1.	Data Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Pengganggu	53
4.3.2.	Putaran Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Pengganggu (n_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	54
4.3.3.	Torsi Statis Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Pengganggu (T_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	55

4.3.4. <i>Coefficient of Power Turbin Savonius</i> Tanpa Plat Datar Pengganggu (CoP _o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	56
4.4 Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> Menggunakan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$	58
4.4.1. Putaran Turbin <i>Savonius</i> sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (θ)	58
4.4.2. Torsi Statis Turbin <i>Savonius</i> (T) sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (θ)	63
4.4.2.1. Torsi Statis Turbin <i>Savonius</i> (T) sebagai fungsi Sudut Bukaan Sudu Turbin (α)	68
4.4.3. <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin <i>Savonius</i> sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (θ)	70
4.4.4. <i>Coefficient of Power</i> (CoP) Turbin <i>Savonius</i> sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	76
4.5. Simulasi Aliran pada Turbin Angin <i>Savonius</i> Berpengganggu dengan menggunakan <i>Software</i>	78
BAB V PENUTUP	85
5.1. Kesimpulan.....	85
5.1. Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA	87
LAMPIRAN	89
BIODATA PENULIS	95

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen Penyusun Gaya Drag	13
Gambar 2.2	Grafik Hubungan antara Koefisien Daya dan <i>Tip Speed Ratio</i>	18
Gambar 2.3	Skema Turbin Angin Savonius Berpengganggu	19
Gambar 2.4	Pengaruh panjang curtain terhadap <i>Coefficient of Power</i>	21
Gambar 2.5	Pengaruh variasi <i>Curtain Length</i> terhadap <i>Coefficient of Power</i>	21
Gambar 2.6	Skema pengujian performa turbin Savonius dengan dua sudu turbin dan tiga sudu	22
Gambar 2.7	Perbandingan struktur aliran pada saat <i>self starting</i> dengan <i>speed ratio</i> (λ) = 0,7; a = turbin dua sudu ; b = turbin tiga sudu	23
Gambar 2.8	Grafik performa turbin Savonius dengan dua sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu .	23
Gambar 2.9	Grafik performa turbin Savonius tiga sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu	24
Gambar 2.10	Skema turbin Savonius dengan sudu setengah lingkaran dan sudu bentuk optimal	25
Gambar 2.11	Grafik perbandingan koefisien torsi dan koefisien daya turbin Savonius dengan pemberian plat pengganggu menggunakan sudu klasik dan sudu bentuk optimal	25
Gambar 2.12	Skema instalasi penelitian	26
Gambar 2.13	Grafik torsi statis turbin savonius (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α) ...	27
Gambar 2.14	Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α)	28
Gambar 3.1	Skema penelitian (pandangan atas)	29
Gambar 3.2	Foto <i>axial fan</i>	34
Gambar 3.3	Skema penelitian dan dimensi alat	35
Gambar 3.4	Turbin angin Savonius	35
Gambar 3.5	Plat penghalang	36

Gambar 3.6 Skema pengukuran <i>brake dynamometer</i>	37
Gambar 3.7 <i>Free body diagram pulley brake dynamometer</i>	38
Gambar 3.8 Benang Nilon DAMYL	40
Gambar 3.9 Timbangan Shimadzu ELB300.....	40
Gambar 3.10 Beban yang dipakai pada <i>brake dynamometer</i>	40
Gambar 3.11 Tachometer OMEGA seri HHT12	41
Gambar 3.12 Omega HHF141 Handled Rotating Vane Anemometer	42
Gambar 3.13 Torque meter LUTRON model TQ-8800	43
Gambar 3.14 Honeycomb yang digunakan dalam penelitian.....	44
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> tanpa plat datar pengganggu (n_o) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	54
Gambar 4.2 Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_o) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	55
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> tanpa plat datar pengganggu (CoP_o) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	57
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (θ)	59
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Putaran (n/n_o) sebagai fungsi sudut bukaan plat pengganggu (θ).....	61
Gambar 4.6 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (θ).....	64
Gambar 4.7 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (θ)	66
Gambar 4.8 Grafik torsi statis turbin angin <i>Savonius</i> berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin (α) pada $\theta = 35^\circ$	68
Gambar 4.9 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)	70
Gambar 4.10 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	73
Gambar 4.11 Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP/CoP_o) sebagai	

	fungsi sudut halang (θ).....	74
Gambar 4.12	Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (<i>CoP</i>) sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) untuk $Re = 6 \times 10^4$	77
Gambar 4.13	Skema pengujian simulasi aliran pada turbin angin <i>Savonius</i>	79
Gambar 4.14	Simulasi <i>pressure gradient</i> pada turbin angin <i>Savonius</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> 9×10^4 tanpa plat penghalang	79
Gambar 4.15	Simulasi <i>pressure gradient</i> pada turbin angin <i>Savonius</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 0°	80
Gambar 4.16	Simulasi <i>pressure gradient</i> pada turbin angin <i>Savonius</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 40°	81
Gambar 4.17	Simulasi <i>pressure gradient</i> pada turbin angin <i>Savonius</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 35°	82
Gambar 4.18	Simulasi <i>velocity vector</i> turbin angin <i>Savonius</i> pada bilangan <i>Reynolds</i> 9×10^4 dengan sudut bukaan plat $\theta = 40^\circ$	84

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai koefisien drag pada beberapa bentuk geometri	14
Tabel 2.2 Dimensi dari penyusunan plat pengganggu	20
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>axial fan</i> CKE SPV-19	34
Tabel 3.2 Spesifikasi pegas	39
Tabel 3.3 Spesifikasi benang nilon DAMYL.....	39
Tabel 3.4 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300.....	39
Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT112	41
Tabel 3.6 Spesifikasi Omega HHF141 Handled Rotating Vane Anemometer	42
Tabel 3.7 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800	43
Tabel 3.8 Timeline pelaksanaan penelitian.....	48
Tabel 4.1 Data Turbin Savonius tanpa Plat Datar Pengganggu.....	53

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

ρ	densitas fluida (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (N.s/m^2)
U_∞	kecepatan freestream udara (m/s)
D	diameter sudu turbin Savonius (m)
L	lebar plat pengganggu (m)
H	tinggi turbin Savonius (m)
b	diameter overlap (m)
θ	sudut bukaan plat pengganggu (deg)
α	sudut sudu turbin (deg)
S	lebar proyeksi plat pengganggu (m)
t	tebal plat pengganggu (m)
z	jarak antara poros turbin dan poros plat pengganggu (m)
j	tinggi plat pengganggu (m)
d	panjang karakteristik turbin (m)
Re	bilangan Reynolds
g	gaya gravitasi (m/s^2)
n	putaran turbin (rpm)
n_0	putaran turbin tanpa plat pengganggu (rpm)
n_b	putaran turbin dengan pembebanan (rpm)
m	massa pemberat mekanisme <i>brake dynamometer</i> (g)
s	beban pegas mekanisme <i>brake dynamometer</i> (g)
P_{out}	daya <i>output</i> turbin (W)
P_{in}	daya <i>input</i> (W)
ω	kecepatan sudut turbin (rad/s)
T	torsi statis (N.cm)
T_0	torsi statis turbin tanpa plat pengganggu (N.cm)
CoP	<i>coefficient of power</i>
λ	<i>tip speed ratio</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu permasalahan serius yang sedang dihadapi dunia saat ini adalah krisis energi. Sumber energi yang selama ini digunakan oleh mayoritas masyarakat adalah energi fosil. Penggunaan energi fosil oleh perusahaan industri di beberapa negara di dunia semakin memperburuk keadaan stok energi fosil. Ketersediaan energi fosil tersebut semakin menipis. Padahal energi fosil merupakan energi yang membutuhkan waktu hingga jutaan tahun untuk diperbarui. Hal tersebut memicu beberapa negara untuk mengembangkan sumber energi alternatif agar tetap mendapatkan suplai energi.

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia. Indonesia memiliki 18.306 pulau dan luas lautan 3.544.743,9 km². Dengan luas lautan tersebut, potensi angin di Indonesia sangat tinggi. Selain itu Indonesia memiliki dataran dengan ketinggian yang variatif jika ditinjau dari permukaan air laut. Dari karakteristik pada segi geografis ini, Indonesia memiliki potensi angin yang besar. Data yang didapatkan dari sumber menyatakan bahwa Indonesia memiliki kecepatan angin rata – rata 3.4 m/s hingga 8,11 m/s. Namun dengan potensi angin tersebut Indonesia masih kurang bisa dimanfaatkan dengan pembangkitan listrik dari energi angin.

Pembangkitan energi listrik menggunakan angin dapat dilakukan menggunakan turbin angin. Turbin angin yang diberi aliran udara akan berputar dan putaran poros turbin tersebut akan ditransmisikan menuju generator untuk membangkitkan suatu energi listrik. Salah satu jenis turbin yang dapat digunakan yaitu turbin angin *Savonius*. Pemanfaatan turbin angin *Savonius* sangat sesuai untuk digunakan di wilayah negara Indonesia. Turbin

tersebut dapat berputar dengan kecepatan angin yang rendah. Namun turbin ini memiliki efisiensi yang rendah sehingga diperlukan modifikasi untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin *Savonius*.

Turbin *Savonius* merupakan rotor angin dengan sumbu tegak (*vertical*) yang dikembangkan oleh *engineer* asal Finlandia, Singuard *Savonius* pada tahun 1920. Turbin *Savonius* konvensional yang paling sederhana dibuat menggunakan plat silinder yang dibelah dua pada bagian tengah dan disatukan dengan poros sehingga membuat penampang huruf S. Pada turbin *Savonius* terdapat dua jenis *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. Pada saat turbin *Savonius* konvensional bekerja, dorongan dari angin yang mengalir menyebabkan adanya gaya drag pada kedua *blade* turbin. Tetapi gaya drag yang timbul pada *advancing* dan *returning blade* memiliki perbedaan nilai disebabkan oleh bentuk dari kedua *blade* tersebut terhadap aliran angin. Perbedaan gaya drag pada kedua *blade* tersebut menyebabkan adanya torsi yang dapat memutar turbin *Savonius*. Apabila torsi yang dihasilkan tersebut dikalikan dengan kecepatan angular turbin maka akan didapatkan daya turbin *Savonius*. Sehingga semakin besar perbedaan gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Salah satu cara untuk memperbesar perbedaan gaya drag tersebut dapat dilakukan dengan memberi penghalang didepan *returning blade* sehingga dapat mengurangi gaya drag pada *blade* tersebut. Selain itu dapat juga dengan cara mengarahkan aliran udara dari sisi *returning blade* ke *advancing blade* sehingga dapat memperbesar gaya drag pada *advancing blade*. Maka dari itu penghalang yang sesuai digunakan yaitu plat datar.

Sebelumnya terdapat beberapa penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan performa turbin *Savonius* yaitu **Altan et al (2008)** dilakukan percobaan dengan memberikan plat penghalang didepan *returning blade* dan plat pengarah aliran menuju

advancing blade. Pada percobaan ini digunakan tiga buah variasi panjang dan sudut pada plat penghalang serta plat pengarah. Hasil yang didapatkan yaitu nilai daya terbesar terletak pada turbin *Savonius* dengan plat penghalang yang paling panjang dimana jika tanpa adanya plat penghalang turbin menghasilkan koefisien daya sebesar 0,16 dan dengan adanya penghalang koefisien dayanya naik sebesar 38,5%.

Pada penelitian **Mohammed et al (2010)** mensimulasikan pemberian plat pengganggu didepan *returning blade* turbin *Savonius* menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan variasi besar sudut plat (β) dan speed ratio (λ). Pada penelitian ini plat penghalang diletakkan pada posisi ($X_1/R = -1.2383$, $Y_1/R = -0.4539$, $X_2/R = -1.0999$ dan $Y_2/R = -1.1770$, dengan sudut $\beta = 100.8^\circ$). Hasil yang diperoleh adalah pada turbin *Savonius* yang telah diberi penghalang terjadi kenaikan daya output sebesar 38,9% pada $\lambda = 0,7$ dan juga terjadi kenaikan torsi sebesar 75,4% pada $\lambda = 1,4$ dibandingkan tanpa pemberian plat pengganggu.

Pada penelitian **Mohamed et al (2010)** membandingkan antara turbin *Savonius* yang menggunakan dua sudu dan tiga sudu dimana masing-masing turbin diberi plat penghalang didepan *returning blade* dengan variasi besar sudut plat (β) dan *speed ratio* (λ). Analisa dalam penelitian ini digunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Hasil yang didapat adalah dengan penambahan plat pengganggu dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* pada turbin *Savonius* dua sudu maupun tiga sudu. Adanya pemberian plat penghalang meningkatkan koefisien daya yang dihasilkan sebesar 27,3% pada turbin *Savonius* dengan menggunakan dua sudu dan meningkatkan koefisien daya sebesar 27,5% pada turbin *Savonius* dengan menggunakan tiga sudu.

Penelitian terakhir dilakukan oleh **Wilis (2016)** yaitu memberikan plat datar sebagai perhalang yang diletakkan di

depan sisi *returning blade*. Dengan beberapa variasi pada panjang plat dan sudut penghalang, penelitian ini memiliki kesimpulan yaitu Plat pengganggu dengan $L/D = 1,16$ paling efektif digunakan untuk meningkatkan putaran turbin *Savonius* bila diletakkan pada sudut 40° dan *Reynolds Number* 90.000 dengan kenaikan mencapai 2,74 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu. Sedangkan untuk meningkatkan torsi statis turbin *Savonius*, diletakkan pada sudut 0° dan *Reynold Number* 90.000 dengan kenaikan mencapai 2,55 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu. Untuk meningkatkan *coefficient of power* turbin *Savonius* diletakkan pada sudut 40° dan *Reynolds Number* 60.000 dengan kenaikan mencapai 16,68 kali dibandingkan tanpa menggunakan plat pengganggu. Namun penelitian ini masih diragukan dikarenakan penelitian ini dilakukan menggunakan turbin *Savonius* yang diuji di dalam *wind tunnel* dengan *blockage area* 11%.

Blockage area adalah rasio antara *frontal area* dari bodi dan *cross section area* dari bagian *wind tunnel* untuk pengujian. *Blockage ratio correction* yang dilakukan pada percobaan turbin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* untuk *closed test- section low speed wind wind tunnel* tidak mengalami masalah pada rasio 2 – 3,5 %. Namun hasil menunjukkan pada rasio 8 dan 10% akan menyebabkan beberapa perbedaan hasil karena besar *pressure drop* dan kurva kecepatan angin di bawah certain tertentu tidak lagi bersatu (Ian J. Ross, 2010).

Dengan banyaknya referensi diatas maka masih perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa turbin *Savonius*. Dalam penelitian ini akan dilakukan peningkatan performa turbin *Savonius* dengan cara menggunakan plat datar penghalang persegi panjang di depan sisi *returning blade* turbin *Savonius* dengan menggunakan variasi sudut antara plat penghalang dan bidang tegak lurus aliran udara pada *Reynolds number* 3×10^4 ; 6×10^4 dan 9×10^4 . Penelitian ini dilakukan dengan metode aliran fluida eksternal.

1.2 Perumusan Masalah

Turbin angin *Savonius* memiliki dua sudu turbin yaitu *advancing blade* dan *returning blade*. *Advancing blade* berbentuk cekung dan *returning blade* berbentuk cembung apabila dilihat dari arah aliran udara yang datang ke arah turbin *Savonius*. Kedua sudu tersebut memiliki gaya drag yang timbul karena adanya aliran udara yang menabrak kedua sudu. Gaya drag yang diterima oleh masing-masing sudu memiliki nilai yang berbeda akibat perbedaan koefisien drag yang dimiliki oleh masing – masing bentuk dimana gaya drag yang terbesar diterima oleh *advancing blade* sehingga menyebabkan turbin *Savonius* berputar terhadap porosnya. Selisih gaya drag tersebut apabila dikalikan dengan panjang lengan pada turbin akan menghasilkan torsi. Apabila torsi dikalikan dengan kecepatan putaran turbin akan menghasilkan daya output dari turbin. Sehingga apabila selisih gaya drag pada kedua sudu turbin tersebut semakin besar, akan menghasilkan daya output turbin yang semakin besar juga.

Pada berbagai penelitian telah didapatkan berbagai cara untuk meningkatkan daya output dari turbin angin *Savonius*. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi tersebut dengan meletakkan benda pengganggu berupa plat di depan *returning blade* dengan variasi sudut kemiringan plat terhadap bidang tegak lurus aliran fluida yang menggerakkan turbin. Hipotesa dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemberian plat pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* akan berpengaruh terhadap gaya drag yang dialami oleh *returning blade*. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* akan menyebabkan meningkatnya selisih torsi di antara kedua sisi turbin *Savonius*. Hasil dari selisih torsi pada kedua sisi turbin yang meningkat, maka torsi yang dihasilkan rotor turbin *Savonius* akan meningkat. Dengan meningkatnya torsi maka koefisien daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

2. Variasi sudut dari plat pengganggu dapat berpengaruh terhadap gaya drag dari *advancing blade*, selain untuk menutup aliran yang menabrak sisi *returning blade*, hal ini bertujuan untuk mengarahkan aliran udara dari sisi *returning blade* ke *advancing blade* sehingga akan menambah gaya drag pada sisi *advancing blade*. Dengan demikian selisih gaya drag antara *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar. Dengan meningkatnya selisih gaya drag maka torsi pada rotor turbin *Savonius* akan semakin besar dan koefisien daya yang dihasilkan juga akan semakin besar. Namun semakin besar sudut plat penghalang terhadap turbin tidak menjamin daya yang dihasilkan turbin juga semakin besar. Bila sudut bukaan plat pengganggu semakin besar melebihi sudut optimumnya untuk menutup sisi *returning*, akan mengakibatkan selisih gaya drag pada kedua sudu menurun. Hal ini terjadi karena timbulnya gaya drag pada sudu *returning* oleh angin yang menerobos di sisi ujung plat pengganggu yang semakin membuka.

Untuk membuktikan hipotesa diatas, maka akan dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin *Savonius* dengan diameter (D) = 101.6 mm serta plat pengganggu dengan lebar (L) = 117,32 mm dengan *Reynolds Number* = 3×10^4 ; 6×10^4 dan 9×10^4 .

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini agar hasil yang didapat sesuai dengan tujuan yang diharapkan adalah sebagai berikut:

1. Fluida yang mengalir adalah udara yang memiliki karakteristik *steady flow*, *incompressible flow*, serta *uniform* pada sisi *upstream*, dengan *Reynolds Number* = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$ dan $9,0 \times 10^4$.
2. Analisa arah aliran yang dilakukan yaitu aliran dua dimensi.

3. Analisa dilakukan pada bagian *returning blade* turbin angin *Savonius* dengan diameter (D) = 101.6 mm dan pengganggu berupa plat datar dengan perbandingan $L/D = 1,16$ ($L = 117,32$ mm).
4. Variasi sudut antara plat datar dengan bidang tegak lurus aliran fluida yang menabrak turbin dengan interval $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ dengan variasi sudut 5° .
5. Perpindahan panas dapat diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemberian plat pengganggu di depan *returning blade* terhadap performa turbin *Savonius*. Plat pengganggu berbentuk persegi panjang akan diletakkan didepan *returning blade* turbin *Savonius* dengan variasi sudut antara plat pengganggu dengan bidang tegak lurus aliran fluida pada *Reynolds Number* = $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$ dan 9×10^4 . Pada penelitian ini akan diukur sebagai berikut :

1. Putaran turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.
2. Torsi statis turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.
3. Torsi dinamis turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.
4. *Coefficient of Power* turbin angin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan *Reynolds Number* tertentu.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian turbin *Savonius* dengan pemberian plat pengganggu di depan *returning blade* ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui spesifikasi yang tepat dengan variasi yang dilakukan.
2. Mampu menjelaskan pengaruh pemberian plat pengganggu terhadap nilai daya, torsi, putaran, dan *coefficient of power* turbin *Savonius*.
3. Mampu menjelaskan pengaruh sudut antara plat pengganggu dan bidang tegak lurus aliran fluida terhadap nilai torsi, putaran, dan *coefficient of power* turbin *Savonius*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Angin

Turbin Angin adalah suatu alat yang digunakan untuk mengkonversi energi kinetik yang diperoleh dari angin menjadi energi mekanik yang berguna. Energi mekanik yang diperoleh dari turbin tersebut merupakan putaran poros yang selanjutnya dimanfaatkan untuk hal tertentu. Seiring perkembangan zaman, maka dibuatlah turbin angin yang juga didefinisikan sebagai *Wind Energy Conversion System (WECS)* atau jika digunakan untuk memproduksi energi listrik disebut sebagai *Wind Turbine Generator (WTG)*. Berbagai desain turbin angin telah dikembangkan dan sebagian besar dari desain tersebut memutar *propellernya* dengan *lift force* atau *drag force* yang merupakan hasil dari interaksi dengan angin. Berdasarkan posisi sumbu rotornya, turbin angin dibagi menjadi dua, yaitu turbin angin dengan sumbu vertikal atau disebut *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)* dan turbin angin dengan sumbu horizontal atau disebut *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*.

Horizontal wind turbine atau (*HAWT*) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Secara umum jenis turbin ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Turbin ini berputar dikarenakan adanya gaya *lift* (gaya angkat) pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Turbin ini cocok digunakan pada tipe angin kecepatan sedang dan tinggi, dan banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar. Jumlah *blade* pada *HAWT* bervariasi tergantung pada kebutuhan dan kondisi angin, mulai dari satu *blade*, dua *blade*, tiga *blade* dan banyak *blade*. Secara umum semakin banyak jumlah *blade*, semakin tinggi putaran

yang dihasilkan turbin. Setiap desain turbin memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin jenis ini yaitu memiliki efisiensi yang tinggi dan semakin tinggi menara turbin, maka semakin besar kecepatan angin. Kekurangannya, yaitu semakin tinggi menara dan semakin panjang sudu, maka semakin besar biaya instalasi dan perawatannya. Selain itu, konstruksi menara yang besar dibutuhkan untuk menyangga *gearbox*, sudu dan generator.

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) memiliki kemampuan untuk menerima angin dari berbagai arah dan menggerakkan generator di permukaan tanah. Turbin angin sumbu vertikal tipe *Savonius* memiliki kecepatan rendah adalah tipe yang digunakan untuk mesin sederhana dengan efisiensi dan *rotation per minute* (rpm) rendah. Untuk menggerakkan turbin angin tipe *Savonius*, dibutuhkan gaya *drag*. Sedangkan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus akan menghasilkan keuntungan yang lebih besar dibandingkan tipe *Savonius*. Tipe ini membutuhkan gaya *lift* untuk menggerakkan turbinnya. Sumbu rotasi dari rotor turbin jenis ini tegak lurus terhadap permukaan tanah.

2.2. Turbin Angin *Savonius*

Turbin angin *Savonius* pertama kali diperkenalkan pada tahun 1922 oleh seorang Insinyur dari Finlandia bernama Sigurd Johannes *Savonius*. Turbin yang memiliki sumbu vertikal ini rotornya berbentuk setengah silinder yang bentuknya menyerupai huruf “S”. Turbin ini merupakan turbin berjenis VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) sehingga memanfaatkan gaya *drag* untuk memutar porosnya. Ada dua sisi di turbin ini, yaitu sisi yang berbentuk cembung atau disebut *returning blade* dan sisi lain yang berbentuk cekung disebut *advancing blade*. Sisi *returning blade* membelakangi arah datangnya angin, sedangkan sisi *advancing blade* akan menangkap angin. Dikarenakan koefisien hambat dari sisi *advancing blade* lebih besar dari pada sisi

returning blade, maka dari itu gaya drag yang diterima pada sisi *advancing blade* lebih besar di dibandingkan dengan gaya drag yang di terima pada sisi *returning blade*. Perbedaan gaya drag pada kedua *blade* tersebut menyebabkan adanya torsi yang dapat memutar turbin *Savonius*. Apabila torsi yang dihasilkan tersebut dikalikan dengan kecepatan angular turbin maka akan didapatkan daya turbin *Savonius*. Sehingga semakin besar perbedaan gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

2.3. Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* adalah suatu bilangan tak berdimensi yang menyatakan rasio antara gaya inersia terhadap gaya viscous yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan digunakan untuk menentukan suatu aliran sebagai aliran *laminar* atau *turbulent* pada aliran *incompressible*.

Pada perhitungan bilangan *Reynolds* untuk aliran eksternal digunakan persamaan berikut :

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \quad (2.1)$$

dimana,

$$\text{Gaya Inersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.2)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \quad (2.3)$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right)} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu} \quad (2.4)$$

dengan keterangan:

- ρ : densitas fluida
- U_{∞} : kecepatan *free stream flow* di fluida
- μ : viskositas dinamis fluida
- L : panjang karakteristik

Dalam studi eksperimen ini panjang karakteristik yang dimaksud adalah diameter turbin (d) dengan persamaan $d=2D-b$ dimana :

D = diameter sudu turbin

b = lebar *overlap* antara kedua sudu turbin.

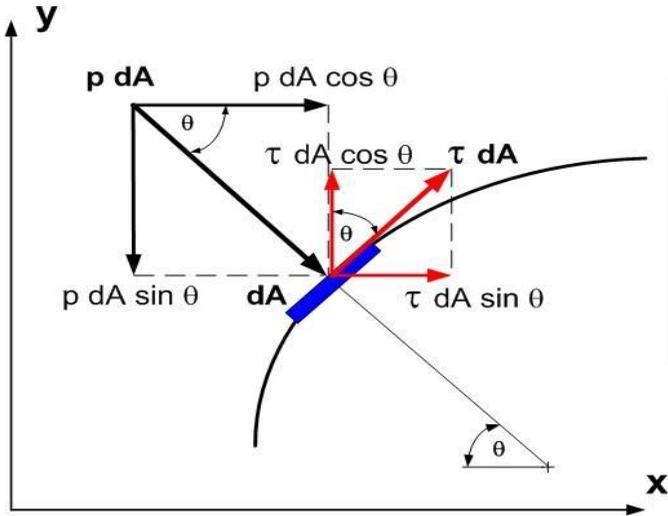
Maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot d}{\mu} = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot (2D-b)}{\mu} \quad (2.5)$$

2.4. Gaya Drag

Gaya drag merupakan gaya yang sejajar horisontal dengan arah aliran. Terdapat dua gaya yang diakibatkan oleh aliran fluida terhadap benda. Selain gaya drag, terdapat gaya yang arahnya tegak lurus dengan arah aliran disebut gaya lift. Pada gaya drag terdapat dua komponen yaitu *skin friction drag* dan *pressure drag*.

Skin friction drag merupakan gaya hambat yang diakibatkan oleh tegangan geser antara fluida dan permukaan benda sedangkan *pressure drag* yaitu gaya hambat yang diakibatkan adanya tekanan fluida dan arahnya tegak lurus terhadap permukaan benda. Gaya drag total merupakan resultan antara *friction drag* dan *pressure drag*. Komponen gaya tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Komponen Penyusun Gaya Drag

Komponen gaya searah sumbu – x adalah gaya hambat, sedangkan searah sumbu-y adalah gaya lift, gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df} \quad (2.6)$$

$$F_D = \int \cos\theta.(p.dA) + \int \sin\theta.(\tau.dA) \quad (2.7)$$

Gaya hambat sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* (C_D), Oleh karena itu persamaan untuk mengetahui gaya drag ini dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A} \quad (2.8)$$

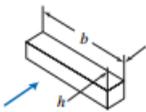
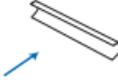
$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A \quad (2.9)$$

dimana :

$$\begin{aligned}
 A &= \text{Luas permukaan benda (m}^2\text{)} \\
 F_D &= \text{Gaya Drag (Newton)} \\
 \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 &= \text{Tekanan dinamis aliran bebas}
 \end{aligned}$$

Besar dari C_D bergantung dari bentuk geometri dari benda tersebut. Nilai C_D dari masing-masing geometri terlihat di tabel berikut.

Tabel 2.1 Nilai Koefisien Drag pada Beberapa Bentuk Geometri

Object	Diagram		$C_D(Re \approx 10^3)$
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

^aData from Hoerner [16].

^bBased on ring area.

2.5. Coefficient of Power (CoP)

Koefisien daya atau disebut juga *Coefficient of Power* adalah perhitungan untuk menentukan besarnya performa suatu alat. *Coefficient of Power* didapatkan dengan cara membandingkan antara daya input yang diberikan ke suatu alat dengan daya yang dihasilkan alat tersebut. Pada penelitian turbin *Savonius* ini, daya input yang diberikan ke turbin yaitu momentum aliran fluida yang bergerak menabrak turbin. Sedangkan daya yang dihasilkan turbin *Savonius* yaitu daya yang keluar dari poros turbin berupa torsi dan putaran turbin.

Turbin dapat mengkonversikan energi angin menjadi energi putaran poros turbin. Mekanismenya yaitu aliran angin menabrak turbin dengan kecepatan masuk (U_1) kemudian turbin akan berputar dengan kecepatan tertentu (U_2) dan kecepatan angin setelah menabrak turbin adalah sebesar (U_3). Dengan asumsi pada sistem tidak terjadi perubahan energi dalam maka laju aliran massa (*mass flow rate*) secara matematik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\dot{m} = \rho \cdot Q = \rho \cdot U_{\infty} \cdot A \quad (2.10)$$

Sehingga daya input yaitu dari angin (P) yang menabrak turbin berdasarkan energi kinetiknya adalah sebagai berikut :

$$P_{in} = \frac{W}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} (U_{\infty}^2)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} \dot{m} (U_{\infty}^2)$$

$$P_{in} = \frac{1}{2} (\rho A U_{\infty}) (U_{\infty}^2) = \frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3 \quad (2.11)$$

Nilai A merupakan luas penampang aliran fluida yang menabrak turbin. Luasan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A = d \cdot H = (2.D-b) \cdot H \quad (2.12)$$

Dengan : A = Luas penampang aliran
 d = Panjang karakteristik
 b = Diameter overlap
 D = Diameter sudu turbin
 H = Tinggi turbin

Nilai daya pada persamaan 2.5 adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum melewati turbin.

Untuk mengukur nilai daya riil yang dihasilkan dapat dilakukan dengan mengukur putaran dan torsi yang dihasilkan turbin. Daya turbin tersebut secara perumusan dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{out} = T \cdot n \quad (2.13)$$

dimana: P_{out} = daya turbin *Savonius* (watt)
 T = torsi dinamis turbin (N.m)
 n = putaran poros turbin (rpm)

Pada perhitungan daya riil turbin *Savonius*, torsi yang dimaksud yaitu torsi dinamis. Torsi dinamis didapatkan dari mekanisme *brake dynamometer* dengan pembebanan massa yang dihubungkan dengan benang nilon yang telah dililitkan ke poros turbin dan ujung yang lain dikaitkan menuju pegas. Dari mekanisme *brake dynamometer*, didapatkan persamaan untuk mendapatkan nilai torsi dinamis sebagai berikut :

$$T = \{(m - s)g\} \times r \quad (2.14)$$

dimana:

m : massa beban (gram)

s : beban pegas pada neraca pegas (gram)

g : gravitasi bumi (9,81 m/s²)

r : jari-jari *disc* penghambat turbin = 0,0105 m.

Sehingga pada penelitian ini nilai coefficient of power yang digunakan yaitu perbandingan antara daya turbin yang dihasilkan dengan daya angin yang menuju turbin *Savonius* atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_{op} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2}\rho A U_{\infty}^3} \quad (2.15)$$

$$C_{op} = \frac{\{(m-s)g\} \times r \cdot n}{\frac{1}{2}\rho A U_{\infty}^3} \quad (2.16)$$

2.6. Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan *free stream* udara yang menabrak sudu turbin. TSR dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{U_{\infty}} \quad (2.17)$$

dengan:

λ = *tip speed ratio*

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

R = jari-jari putaran turbin (m)

U_{∞} = kecepatan angin (m/s)

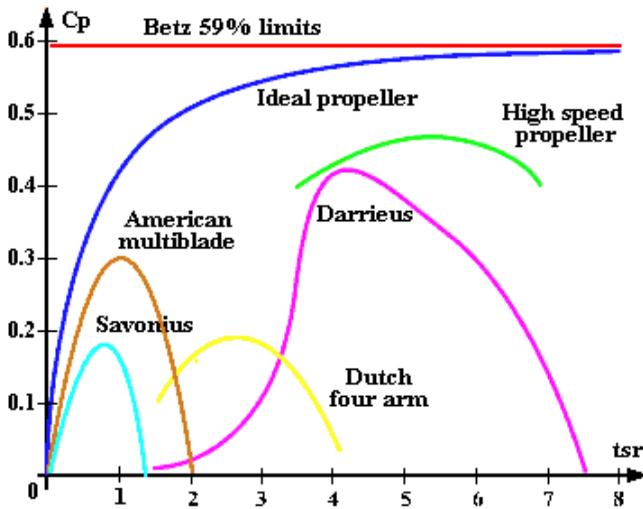
Selain menggunakan persamaan (2.16), TSR juga dapat diperoleh dari persamaan:

$$\lambda = \frac{\text{blade tip speed}}{U_{\infty}} \quad (2.18)$$

Blade tip speed merupakan kecepatan ujung *blade* atau rotor, dimana :

$$\text{Blade tip speed} = \frac{\text{rotational speed (rpm)} \times \pi \times D}{60}$$

Setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari TSR juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.2 berikut:



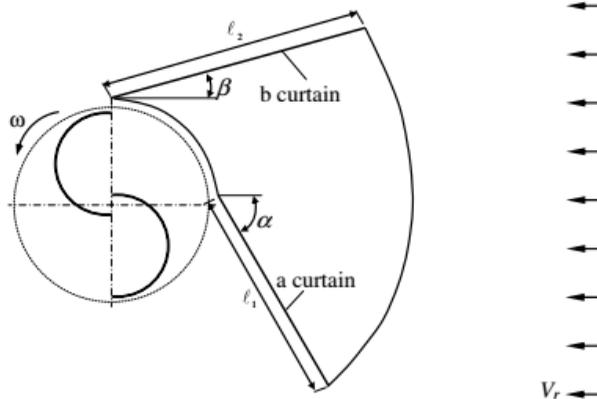
Gambar 2.2 Grafik Hubungan antara Koefisien Daya dan *Tip Speed Ratio* (Al-Shemmeri,2010)

2.7. Penelitian Terdahulu

2.7.1. Studi Eksperimen Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu

Penelitian mengenai studi eksperimen ini telah dilakukan oleh **Burçin Deda Altan, et al (2008)** mengenai peningkatan performa turbin angin *Savonius* dengan menambahkan pengganggu berupa plat yang berfungsi untuk mendefleksi angin. *Power Performance* dari turbin angin *Savonius* hanya $CoP \approx 15\%$. Ini relatif lebih kecil jika dibandingkan dengan *horizontal axis wind turbine* yang memiliki $CoP \approx 25\%$ dan turbin angin Darrieus dengan $CoP \approx 35\%$.

Karena torsi di *returning blade* lebih kecil daripada di *advancing blade*, rotor akan berputar ke arah torsi yang positif. Untuk menaikkan *power*, maka torsi yang negatif harus dikurangi atau dihilangkan. Maka, plat ini diletakkan di depan *returning blade* untuk mengurangi torsi yang negatif tersebut. Skemanya terlihat di gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Turbin Angin *Savonius* Berpengganggu (Altan et al, 2008)

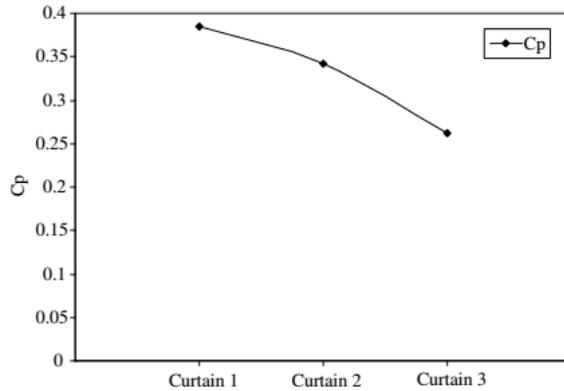
Ada tiga macam variasi panjang plat di ℓ_1 dan ℓ_2 dari plat pengganggu yang digunakan. Ketiga jenisnya ditunjukkan di tabel 2.2 dibawah ini.

Tabel 2.2 Dimensi dari Penyusunan Plat Pengganggu (Altan et al, 2008)

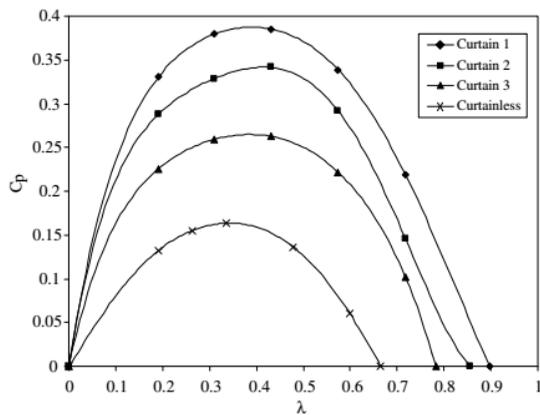
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Untuk melakukan penelitian ini, *Wind tunnel* yang digunakan adalah tipe *open-circuit* dengan *power capacity* sebesar 5,7 kW. Peletakkan turbin angin *Savonius* adalah $L \cong 5 \text{ m}$ sebelum pintu keluar *wind tunnel*. Kecepatan angin rata-rata sebesar 7 m/s dengan Bilangan Reynold sebesar $1,5 \times 10^5$. Selain memvariasikan ℓ_1 dan ℓ_2 , variasi sudut α dari 30° hingga 60° dan sudut β dari 0° hingga 15° .

Setelah dilakukan percobaan, hasil yang *Coefficient of Power* optimal adalah menggunakan *curtain 1* ($\ell_1 = 45\text{cm}$ dan $\ell_2 = 52\text{cm}$) dengan variasi sudut α sebesar 45° dan β sebesar 15° . Dengan variasi yang optimal ini didapatkan *Coefficient of Power* sebesar 38,5%. Hasilnya dapat dilihat di gambar 2.4 dan 2.5.



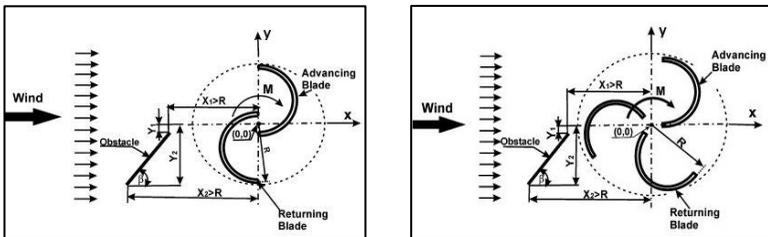
Gambar 2.4 Pengaruh Panjang Curtain Terhadap Coefficient of Power (Altan et al, 2008)



Gambar 2.5 Pengaruh Variasi Curtain Length Terhadap Coefficient of Power (Altan et al, 2008)

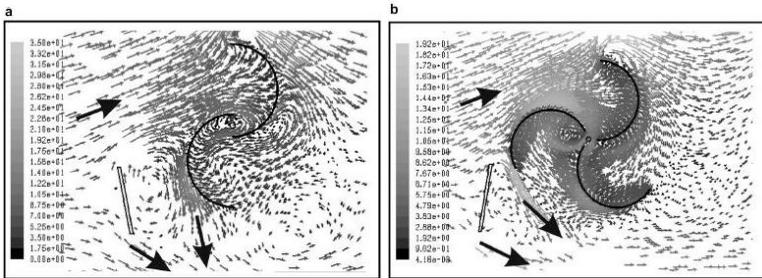
2.7.2 Membandingkan Performa Turbin *Savonius* Dua Sudu dan Tiga Sudu dengan Pemberian Plat Pengganggu

Mohamed et al (2010) melakukan penelitian untuk meningkatkan daya yang dikeluarkan turbin angin *Savonius* dengan desain turbin menggunakan dua sudu dan tiga sudu dengan simulasi pada *software* ANSYS-FLUENT. Eksperimen dilakukan dengan menempatkan plat pengganggu dengan variasi sudut tertentu (β) di depan *returning blade* dan *speed ratio* (λ). Kecepatan angin 10 m/s. Posisi plat pengganggu dan turbin *Savonius* diletakkan seperti pada **Gambar 2.6** dibawah ini.



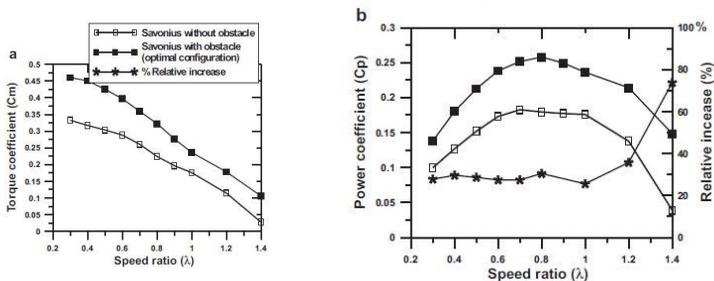
Gambar 2.6 Skema Pengujian Performa Turbin *Savonius* dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)

Hasil dari simulasi didapatkan bahwa jumlah sudu berpengaruh terhadap kemampuan *self starting* yang dimiliki oleh turbin *Savonius*. Aliran fluida pada turbin *Savonius* berdasarkan simulasi pada saat melakukan *self starting* dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.

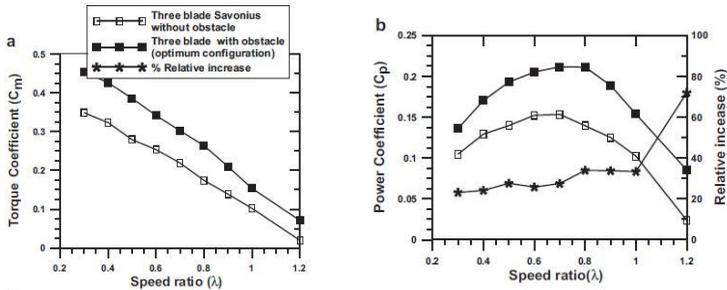


Gambar 2.7 Perbandingan struktur aliran pada saat *self starting* dengan *speed ratio* (λ) = 0,7; a = turbin dua sudu ; b = turbin tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

Pada gambar diatas dapat dilihat bahwa turbin dengan dua sudu memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik daripada turbin tiga sudu. Selain pada kemampuan *self starting*, penambahan plat pengganggu juga berpengaruh terhadap nilai koefisien torsi dan koefisien daya dari kedua turbin tersebut. Grafik nilai koefisien torsi dan daya dapat dilihat pada **Gambar 2.8** untuk dua sudu dan **Gambar 2.9** untuk tiga sudu.



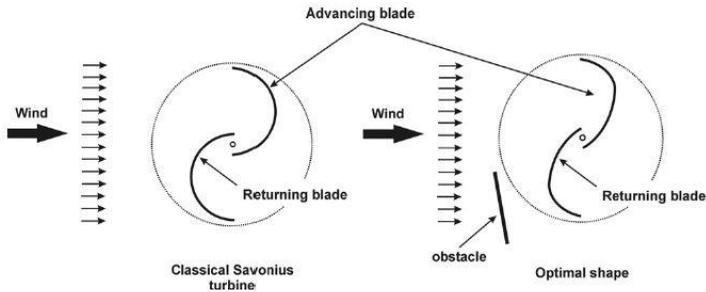
Gambar 2.8 Grafik performa turbin *Savonius* dengan dua sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2.9 Grafik performa turbin *Savonius* tiga sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu (Mohamed et al, 2010)

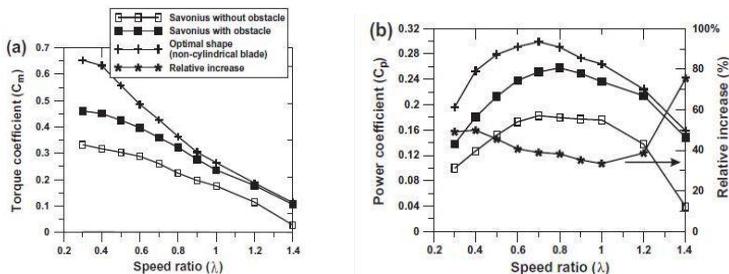
2.7.3 Analisa Performa Pemberian Plat Pengganggu dan Variasi Bentuk Sudu pada Turbin *Savonius* Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamics*

Penelitian pemberian plat pengganggu pada turbin *Savonius* juga dilakukan oleh **Mohamed (2010)**. Pada penelitian ini menganalisa pengaruh pemberian penghalang dan pengaruh bentuk turbin terhadap performa turbin *Savonius* dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics*. Turbin *Savonius* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan dua bentuk sudu yaitu sudu setengah lingkaran dan sudu bentuk optimal. Gambar skema turbin *Savonius* dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Skema turbin *Savonius* dengan sudu setengah lingkaran dan sudu bentuk optimal (Mohamed, 2010)

Pada penelitian ini akan diukur nilai koefisien torsi, koefisien daya dan koefisien torsi statis berdasarkan *speed ratio* (λ). Hasil yang diperoleh pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.11.



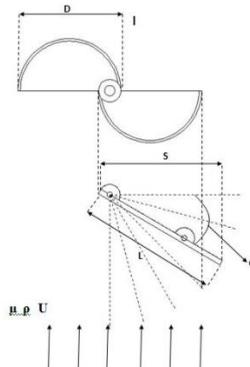
Gambar 2.11 Grafik perbandingan koefisien torsi dan koefisien daya turbin *Savonius* dengan pemberian plat pengganggu menggunakan sudu klasik dan sudu bentuk optimal (Mohamed, 2010)

Hasil yang didapat pada penelitian ini menunjukkan bahwa turbin *Savonius* dengan menggunakan sudu bentuk optimal dan pemberian plat pengganggu memiliki nilai koefisien torsi, koefisien daya dan koefisien torsi statis yang lebih besar daripada

turbin yang tanpa menggunakan pengganggu maupun turbin yang menggunakan sudu setengah lingkaran. Pada gambar 2.11 menunjukkan turbin *Savonius* yang telah diberi penghalang terjadi kenaikan daya output sebesar 38,9% pada $\lambda = 0,7$ dan terjadi kenaikan daya sebesar 75,4% pada $\lambda = 1,4$ dibandingkan tanpa pemberian plat pengganggu.

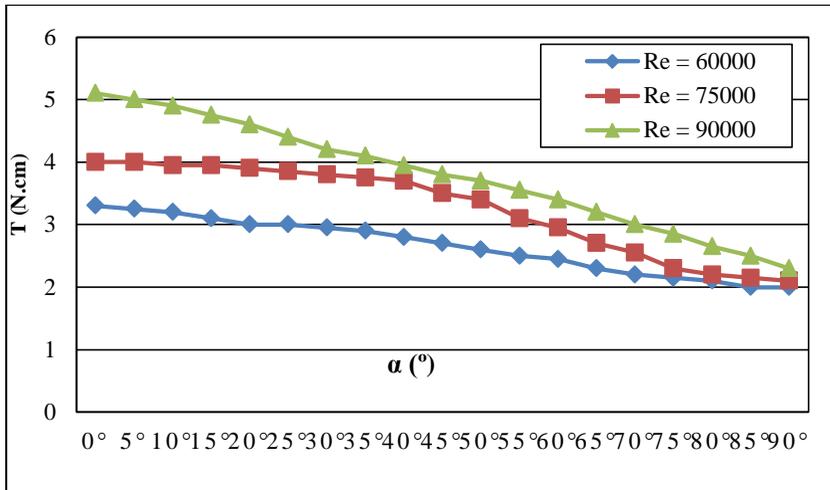
2.7.4 Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan *Returning Blade* Terhadap Performa Turbin Angin *Savonius*

Penelitian lainnya dilakukan oleh **Wilis (2016)** dengan cara meletakkan plat pengganggu di depan *returning blade* untuk meningkatkan performa turbin angin *Savonius*.. Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah variasi sudut penempatan plat pengganggu = $0^\circ - 90^\circ$ dengan interval 5° , serta variasi bilangan *Reynolds* = 6.0×10^4 ; 7.5×10^4 ; dan 9.0×10^4 . Studi eksperimen ini dilakukan menggunakan *wind tunnel sub sonic*. skema instalasi turbin angin *Savonius* dapat dilihat pada gambar 2.12.

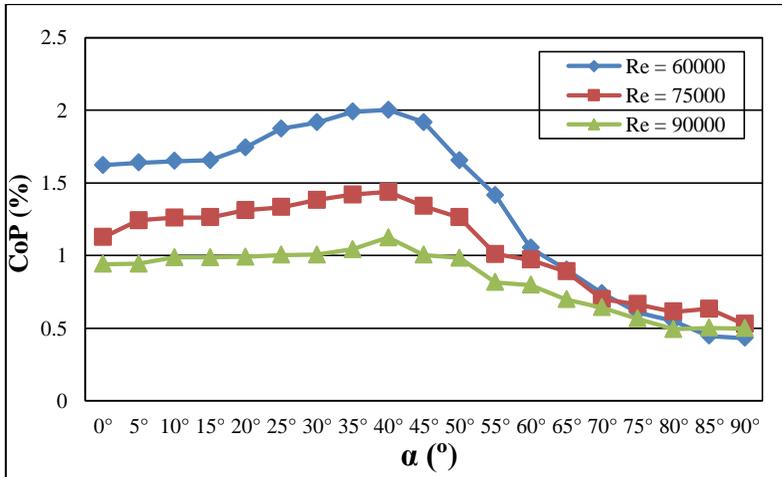


Gambar 2.12 Skema instalasi penelitian (Wilis, 2016)

Dari studi eksperimen ini didapatkan Grafik pengaruh torsi dan koefisien daya turbin angin *Savonius* terhadap sudut plat datar pengganggu dapat dilihat pada gambar 2.13 dan 2.14.



Gambar 2.13 Grafik torsi statis turbin *Savonius* (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α) (Wilis, 2016)



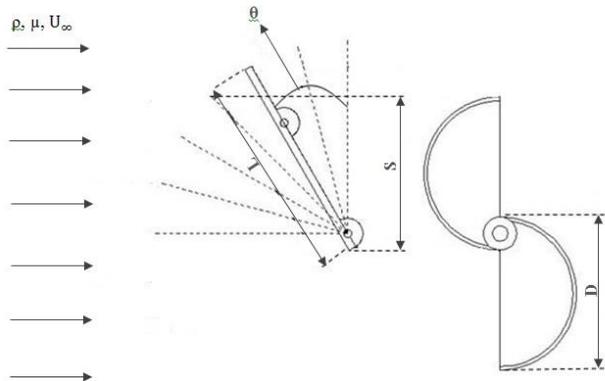
Gambar 2. 14 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α) (Wilis, 2016)

Hasil penelitian ini menunjukkan kenaikan putaran sebesar 274% dan *Coefficient of Power* (CoP) sebesar 1668% pada bilangan Reynolds 6×10^4 dan $\alpha=40^\circ$. Namun pada penelitian yang dilakukan Wilis et al dimensi dari turbin angin *Savonius* melebihi batas yang diizinkan untuk ketentuan dari penggunaan *wind tunnel* yaitu *blockage ratio* sebesar 11%. Hal ini menimbulkan efek *blockage* pada lorong *wind tunnel* yang digunakan terlalu besar, sehingga hasil dari eksperimen tidak akurat dan perlu dilakukan eksperimen ulang.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter Pengukuran

Analisa dimensi diperlukan pada sebuah penelitian untuk mengetahui parameter-parameter yang berpengaruh terhadap hasil penelitian. Beberapa parameter yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida pada penelitian ini yaitu viskositas fluida (μ), densitas fluida (ρ), kecepatan fluida (U_∞), diameter sudu turbin *Savonius* (D), tinggi turbin *Savonius* (H), diameter overlap (b), lebar plat pengganggu (L) dan sudut plat pengganggu (θ). Skema penelitian dan parameter-parameter pengujian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema penelitian (pandangan atas)

Dari skema penelitian pada gambar 3.1, diperkirakan bahwa nilai *coefficient of power* tergantung pada :

- ρ = densitas fluida (N/m^3)
- μ = viskositas udara (Ns/m^2)
- U_∞ = kecepatan aliran udara (m/s)

- D = diameter sudu turbin *Savonius* (m)
 S = proyeksi lebar plat pada turbin *Savonius* (m)
 L = lebar plat pengganggu (m)
 θ = sudut plat pengganggu (θ)
 H = tinggi turbin *Savonius* (m)
 b = diameter overlap (m)

3.2. Analisa Dimensi *Coefficient of Power*

Analisa dimensi pada nilai *coefficient of power* memerlukan langkah langkah sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, U_\infty, D, L, S, H, b, n)$$

Jumlah parameter (n) = 10 parameter yaitu :

P = Power, J/s

ρ = densitas udara, kg/m^3

μ = viskositas absolut udara, N.s/m^2

U_∞ = kecepatan aliran udara, m/s

D = diameter sudu turbin *Savonius*, m

L = lebar plat pengganggu, m

S = proyeksi lebar plat pada turbin *Savonius*, m

H = tinggi turbin *Savonius*, m

b = diameter overlap, m

n = putaran turbin *Savonius*, rpm

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisa.
Dipilih M, L, t.
3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih.

Parameter	P	ρ	μ	U_∞	D	L	S	H	b	n
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Memilih parameter berulang yang jumlahnya (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu : ρ , U_∞ , D.
Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = n-m = 10 - 3 = 7 grup tanpa dimensi.

$$i. \quad \pi_1 = \rho^a U_\infty^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dengan keterangan :

$$M : a + 1 = 0$$

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

$$t : -b - 3 = 0$$

sehingga didapatkan :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

didapatkan :

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

$$\text{atau } \pi_1 = \frac{P}{\rho U_\infty^3 D^2}$$

- ii. Dengan melakukan langkah yang sama akan diperoleh :

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho U_\infty D}$$

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

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

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

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

$$\pi_7 = \frac{n D}{U_\infty}$$

Dari analisa dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

$\pi_1 = \text{Coefficient of Power}$

$\pi_2 = \text{bilangan Reynolds}$

$\pi_3 = \text{ratio lebar plat pengganggu dengan diameter sudu turbin Savonius}$

$\pi_4 = \text{ratio lebar proyeksi plat pada turbin Savonius dengan diameter sudu turbin}$

$\pi_5 = \text{ratio tinggi turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius}$

$\pi_6 = \text{ratio diameter overlap turbin Savonius dengan diameter sudu turbin Savonius}$

$\pi_7 = \text{Tip Speed Ratio}$

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

$$\frac{P}{\rho U_{\infty}^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{L}{D}, \frac{S}{D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}, \frac{n D}{U_{\infty}} \right)$$

Dalam penelitian ini, $\frac{L}{D}$, $\frac{b}{D}$ dan $\frac{H}{D}$ merupakan variabel tetap. Sedangkan $\frac{\mu}{\rho U_{\infty} D}$, $\frac{S}{D}$ dan $\frac{n D}{U_{\infty}}$ merupakan variabel yang divariasikan untuk diketahui pengaruhnya terhadap *coefficient of power* turbin angin *Savonius*, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{P}{\rho U_{\infty}^3 D^2} = f_2 \left(\frac{\mu}{\rho U_{\infty} D}, \frac{S}{D}, \frac{n D}{U_{\infty}} \right)$$

Dimana nilai $S = L \cos \theta$ dengan nilai L yang tetap dan $L = 2D - b$ dengan b bernilai tetap, maka:

$$\frac{P}{\rho U_{\infty}^3 D^2} = f_3 (Re, \theta, TSR)$$

3.3 Peralatan

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

3.3.1 Axial fan

Pada penelitian ini menggunakan *axial fan* untuk menghasilkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam pengujian performa turbin angin *Savonius*. *Axial fan* yang digunakan yaitu **CKE SPV-18**. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan foto *axial fan* dapat dilihat pada gambar 3.2.

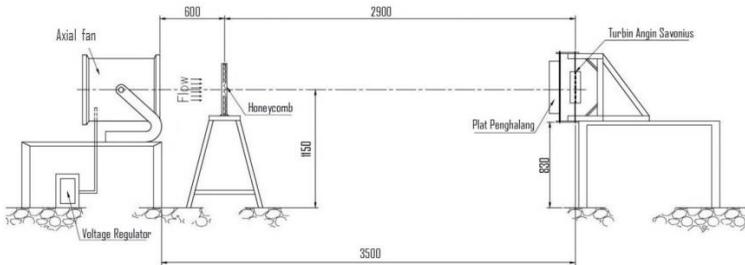


Gambar 3.2. Foto *Axial fan*

Tabel 3.1 Spesifikasi *Axial fan* CKE SPV-19

	SPECIFICATIONS
Diameter	18 inch / 450 mm
Speed	2850 RPM
Air Flow	4413 CFM
Power	1700 Watt
ST Press	520 Pa
Phase	1
Voltage	220 – 240 V

Skema penelitian yang dilakukan adalah dengan meletakkan *axial fan* sejauh 3,5 meter di depan turbin angin *Savonius*, yang dapat dilihat pada gambar 3.3

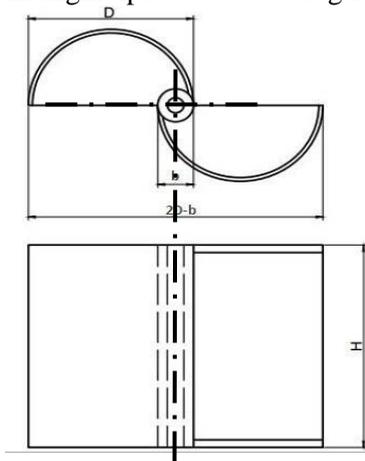


Gambar 3.3 Skema penelitian dan dimensi alat

3.3.2. Benda Uji

Pada penelitian ini, sebagai benda kerja digunakan turbin angin tipe *Savonius* dengan pengganggu berupa plat datar.

- a. Profil turbin angin tipe *Savonius* sebagai berikut :

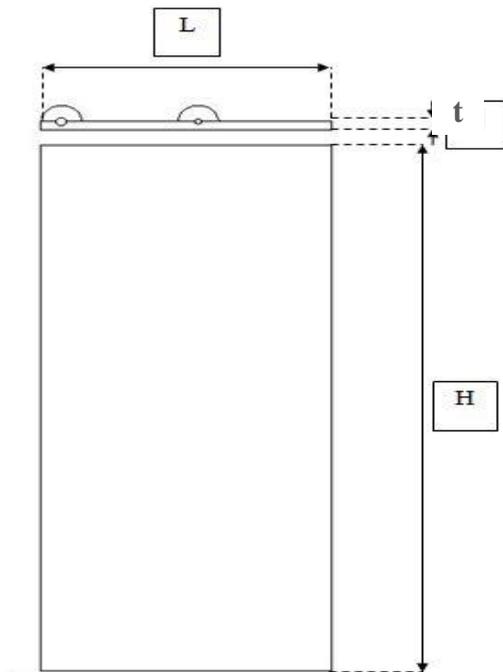


Gambar 3.4 Turbin angin *Savonius*

Diameter (D)	: 101,6 mm
Tinggi (H)	: 300 mm
Diameter Turbin (d)	: 190,2 mm
diameter overlap (b)	: 13 mm

b. Profil Plat Pengganggu sebagai berikut :

Lebar (L) : 117,32 mm
L/D : 1,16
Sudut (θ) : $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
Tinggi (j) : 300 mm
Tebal (t) : 3 mm



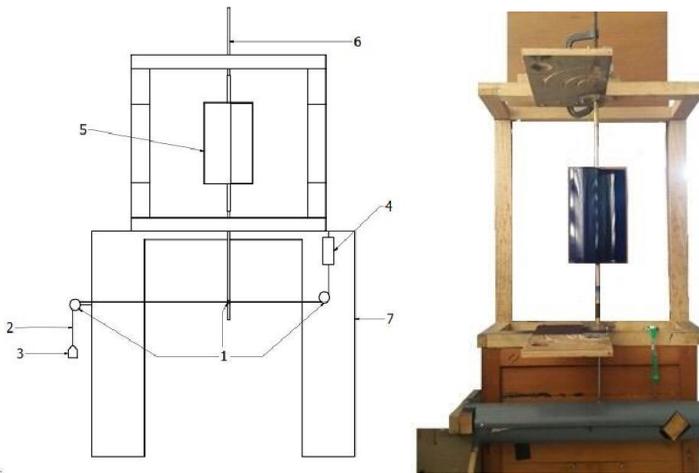
Gambar 3.5 Plat penghalang

3.3.3 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan beberapa alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran (rpm) dan torsi (N.m) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*.

a. *Brake Dynamometer*

Brake dynamometer merupakan sistem alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. Sistem alat ukur yang digunakan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2010)**. Skema *brake dynamometer* dan *free body diagram pulley* dapat dilihat pada gambar 3.6 dan 3.7.

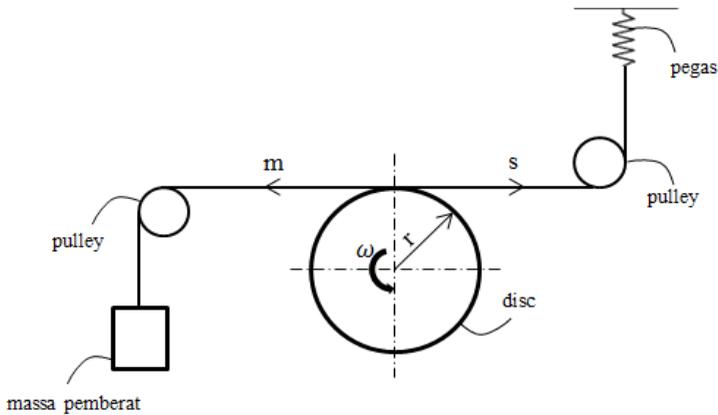


(a) Skema desain awal (b) Foto *brake dynamometer*

Gambar 3.6 Skema pengukuran *brake dynamometer*

Keterangan:

1. Sistem *pulley*
2. Benang Nilon
3. Massa pemberat (m)
4. Pegas (s)
5. Turbin angin *Savonius*
6. Poros turbin angin *Savonius*
7. Struktur Penyanggah turbin angin *Savonius*



Gambar 3.7 *Free body diagram pulley brake dynamometer (pandangan atas)*

Skema *brake dynamometer* yang disusun adalah dengan skema yang terdiri dari sistem *pulley*, massa pemberat dan pegas yang dihubungkan oleh benang nilon dengan merk **Optimum** yang menyelubungi dari poros turbin angin *Savonius*. Besarnya daya yang terukur sesuai dengan persamaan 2.13, dimana torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* dapat diukur oleh *brake dynamometer*. Torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* diukur ketika turbin berputar. Massa pemberat dengan jenis plat besi ditambahkan dengan berbagai variasi hingga turbin berhenti berputar, dengan berbagai nilai massa dari 1 gram, 2 gram, 5 gram, 10 gram, 25 gram, 50 gram dan 100 gram.

Tabel 3.2 Spesifikasi pegas

<i>SPECIFICATIONS</i>	
Range	0 to 5 N ; 0 to 500 g
Resolution	1 N ; 10 g

Tabel 3.3 Spesifikasi benang nilon DAMYL

<i>SPECIFICATIONS</i>	
Kekuatan	20 lbs
Diameter	0,45 mm

Untuk mengukur besarnya massa pemberat, dilakukan dengan menggunakan timbangan. Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Shimadzu ELB300**. Untuk spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB300

<i>SPECIFICATIONS</i>	
Weighing Capacity	300 g
Minimum Display	0,01 g
Standard deviation	0,01 g
Linearity errors	0,01 g
Pan size	110 mm



Gambar 3.8 Benang Nilon DAMYL



Gambar 3.9 Timbangan Shimadzu ELB300



Gambar 3.10 Beban yang dipakai pada *brake dynamometer*

b. Tachometer

Tachometer ini merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Tachometer yang digunakan, dapat dilihat pada gambar 3.11, yaitu pada penelitian ini yaitu ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA seri HHT12*** dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit dengan range pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm. Untuk Spesifikasi yang lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.5



Gambar 3.11 Tachometer OMEGA seri HHT12

Tabel 3.5 Spesifikasi Tachometer OMEGA seri HHT12

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

c. Anemometer

Anemometer adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur kecepatan dan temperatur angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah **Omega HHF141 Handled Rotating Vane Anemometer**. Pengukuran yang dapat dilakukan yaitu pengukuran kecepatan angin dengan satuan ft/min dan m/s. Gambar anemometer tersebut dapat dilihat pada gambar 3.12 dan tabel spesifikasi pada tabel 3.6.



Gambar 3.12 Omega HHF141 Handled Rotating Vane Anemometer

Tabel 3.6 Spesifikasi Omega HHF141 Handled Rotating Vane Anemometer

SPECIFICATIONS	
Range	0.2 to 40.00 m/sec (Air Probe AP275) 1.5 to 35.00 m/sec (Air Probe AP100)
Accuracy	±1.0 % of reading ±1 digit (AP275) ±(0.50% of F.S. +0.75 % of reading + 1 digit)
Operating Temperature	0° to 50° C (Instrument) -20° to 100°C (Probes)
Power Supply	3 AA Alkaline Batteries
Display	0.5"LCD, 4 digits, with LED backlight

d. Torque Meter

Torque meter ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm. Untuk mengukur torsi statis turbin *Savonius*, ujung *torque meter* dihubungkan dengan poros turbin. Setelah dipasang, *axial fan* dinyalakan sesuai bilangan *Reynolds* yang ditentukan.



Gambar 3.13 Torque meter LUTRON model TQ-8800

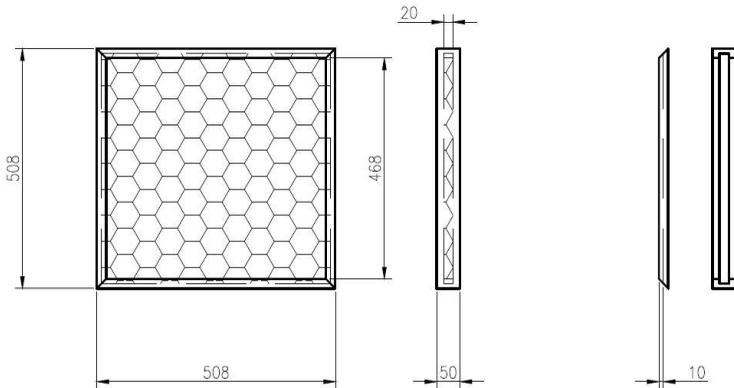
Tabel 3.7 Spesifikasi Torque meter LUTRON mode TQ-8800

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

e. *Honeycomb*

Pada penelitian ini, *honeycomb* digunakan untuk menyeragamkan aliran angin menuju turbin angin *Savonius*, mereduksi turbulensi, dan meminimalisir efek *swirl* yang dihasilkan *axial fan*. *Honeycomb* yang digunakan seperti pada

gambar 3.14 dan diletakkan di antara *axial fan* dengan turbin angin *Savonius* seperti pada gambar 3.3. Spesifikasi honeycomb yang digunakan yaitu 16 lubang/in².



Gambar 3.14 Honeycomb yang digunakan dalam penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

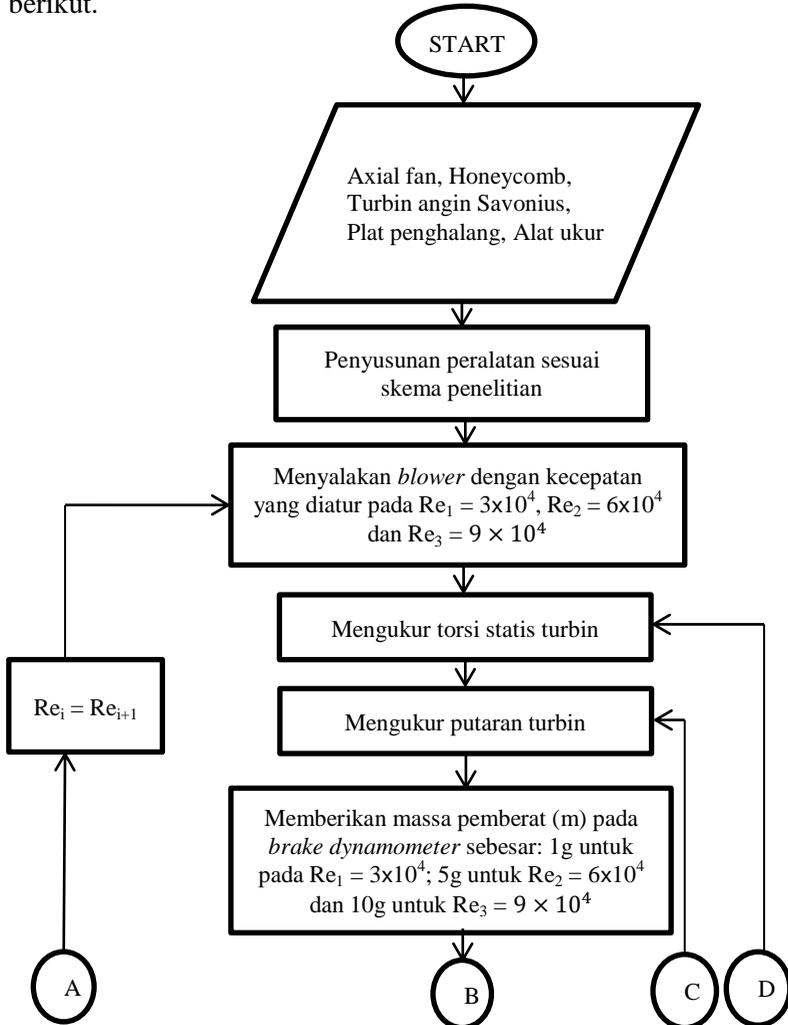
Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :
Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

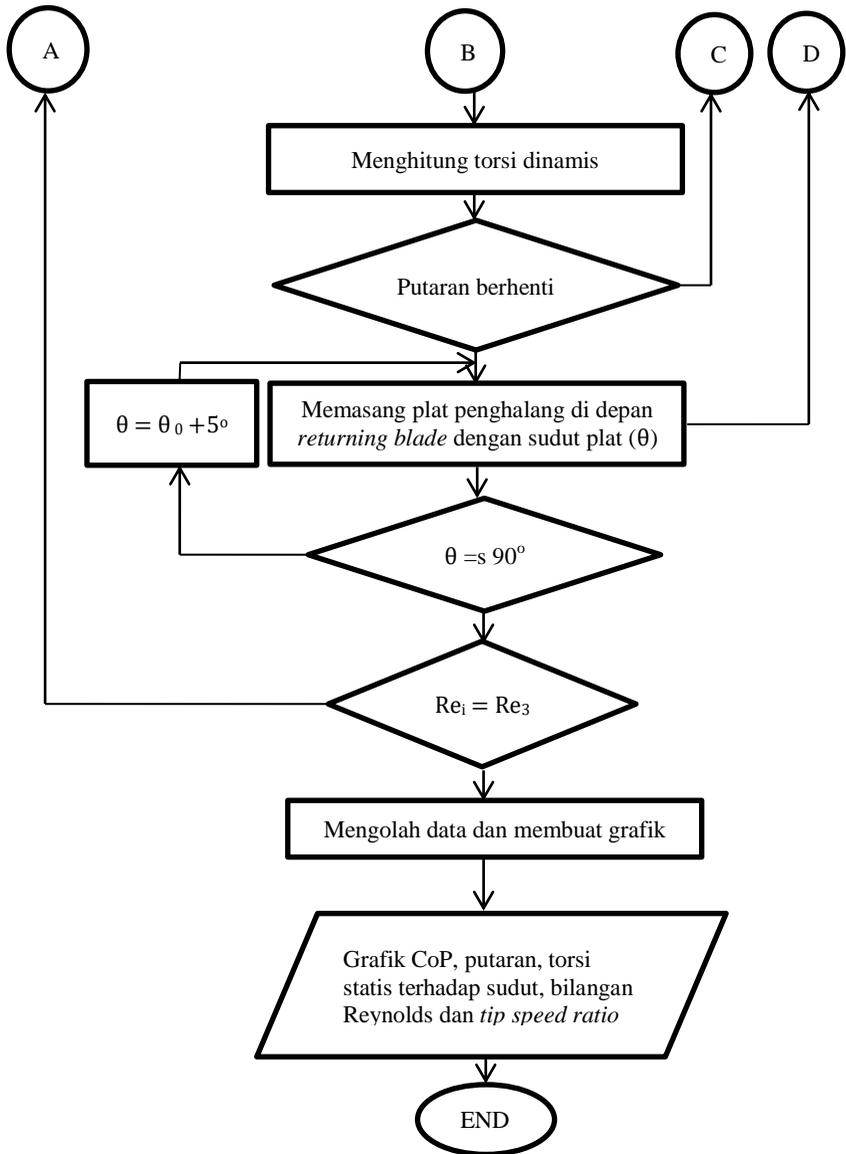
1. Perencanaan peralatan yang akan digunakan.
2. Pemasangan benda uji pada dudukan meja.
3. Menyalakan *axial fan* dan mengatur frekuensi dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan *free stream* yang diinginkan
4. Pengukuran temperatur menggunakan termometer
5. Pengukuran kecepatan angin menggunakan anemometer untuk mendapatkan bilangan *Reynolds* sebesar 3×10^4
6. Pengukuran putaran poros turbin menggunakan *tachometer*
7. Melakukan pengukuran torsi dinamis dan CoP menggunakan mekanisme *brake dynamometer* sebagai berikut :

- a. Pemberian massa pemberat secara bertahap yang terhubung dengan pegas menggunakan nilon yang telah dililitkan pada poros turbin. Pada $Re = 3 \times 10^4$ tahap pembebanan sebesar 1 gram, $Re = 6 \times 10^4$ tahap pembebanan sebesar 5 gram, $Re = 9 \times 10^4$ tahap pembebanan sebesar 10 gram
 - b. Pengukuran massa pemberat dan beban pegas
 - c. Pengukuran putaran poros turbin menggunakan *tachometer*
 - d. Mengulangi langkah a sampai c hingga turbin berhenti berputar
 - e. pemilihan nilai CoP tertinggi dari hasil perkalian torsi dinamis dan putaran pada kondisi beban yang sama.
8. Pengukuran torsi statis menggunakan *torque meter*
 9. Mematikan *axial fan*
 10. Melakukan kembali langkah 3 sampai 8 dengan mengubah bilangan *Reynolds* menjadi 6×10^4 dan 9×10^4
 11. Pemasangan plat datar pengganggu di depan *returning blade* dengan sudut 0° terhadap bidang tegak lurus arah aliran fluida.
 12. Melakukan kembali langkah 3 sampai 10 dengan mengubah sudut plat datar pengganggu dinaikkan 5° hingga didapatkan data sampai sudut 90°
 13. Mematikan *axial fan*
 14. Pengolahan data yang telah diperoleh yaitu putaran dan torsi dinamis sehingga didapatkan data putaran (rpm), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu dengan variasi bilangan *reynolds* dan *tip speed ratio*.

3.5 Flowchart Penelitian

Dalam sebuah penelitian diperlukan diagram alir untuk melakukan langkah – langkah percobaan. Urutan langkah pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan sebagai berikut.





BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

4.1.1 Perhitungan Bilangan *Reynolds*

❖ Massa Jenis Udara (ρ)

Dari persamaan ideal didapatkan bahwa :

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (4.1)$$

diketahui bahwa :

$$n = \frac{m}{M} \quad (4.2)$$

dimana:

P = tekanan absolut udara = $1,01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

V = Volume udara (m^3)

n = jumlah mol (mol)

R = tetapan gas = $8314 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T = temperatur pengukuran = $27,5^\circ\text{C} = 300,5 \text{ K}$

m = massa zat (kg)

M = massa atom relatif udara = $28,97 \text{ gr/mol}$

sehingga :

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

diketahui $V = \frac{m}{\rho}$, dibagi dengan massa zat sehingga didapatkan :

$$\frac{P}{\rho} = \frac{R \cdot T}{M} \quad (4.3)$$

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

$$\rho = \frac{1,01325 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 28,97 \text{gr/mol}}{8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \times 300,5 \text{K}} = 1,175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

❖ Viskositas Udara (μ)

Perhitungan viskositas udara dilakukan menggunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu_2 = \frac{b \cdot (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.4)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{0,5}}$$

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

T = temperatur saat penelitian = 300,5 K
sehingga:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{0,5}} \times (300,5)^{0,5}}{1 + \frac{110,4 \text{ K}}{300,5 \text{ K}}} \\ &= 1,848 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Aliran Udara (U_∞)

Berdasarkan persamaan 2.4, berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan aliran udara pada bilangan *Reynolds* $3,0 \times 10^4$:

$$U_\infty = \frac{Re \cdot \mu}{\rho_2 \cdot L}$$

dimana:

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini adalah diameter turbin (d). sehingga didapatkan :

$$U_{\infty} = \frac{30000 \times 1,848 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}}{1,175 \frac{kg}{m^3} \times 0,1902 m}$$

$$U_{\infty} = 2,48 m/s$$

4.2 Contoh Perhitungan

4.2.1 Perhitungan Torsi Dinamis

Persamaan torsi dinamis pada bagian sebelumnya telah dibahas yaitu pada persamaan 2.14. Berikut adalah contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai pada bilangan Reynolds 3×10^4 tanpa penempatan plat penghalang :

$$T = \{(m - s)g\} \times r$$

dimana:

m : massa beban pemberat (gram)

s : beban pegas pada neraca pegas (gram)

g : gravitasi bumi (9,81 m/s²)

r : jari-jari *disc* penghambat turbin = 0,0105 m

sehingga didapatkan nilai torsi dinamis:

$$T = \left\{ \left(\frac{6 - 20}{1000} \right) \right\} kg \cdot (9,81) m/s^2 \cdot 0,0105 m$$

$$= 0,1442 Ncm$$

4.2.2 Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*

Dari persamaan (2.1) didapatkan persamaan untuk perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* sebagai berikut :

$$\text{CoP} = \frac{\{(m-s)g\} \times r \cdot n}{\frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3}$$

Besar luasan A ditentukan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} A &= (2D-b) \times H \\ &= 0,1902 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} \\ &= 0,05706 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas maka nilai dari *Coefficient of Power (CoP)* pada pengukuran bilangan *Reynolds* 3×10^4 tanpa penempatan plat penghalang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{CoP} = \frac{\{(m-s)g\} \times r \cdot n}{\frac{1}{2} \rho A U_{\infty}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{CoP} &= \frac{\left(\frac{6-20}{1000}\right) \text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,0105 \text{m} \cdot 10,639 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{\frac{1}{2} \cdot 1,175 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,05706 \text{ m}^2 \cdot \left(2,48 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3} \\ &= 0,02995 \\ &= 2,995 \% \end{aligned}$$

4.2.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio (TSR)*

Tip Speed Ratio (TSR) dihitung dengan membandingkan antara kecepatan tip di ujung sudu dengan kecepatan aliran udara yang masuk. Dalam persamaan 2.16 dinyatakan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{U_{\infty}}$$

dimana :

- λ : *Tip Speed Ratio (TSR)*
- ω : kecepatan putar turbin (rad/s)
- R : Jari-jari turbin (m)
- U_{∞} : kecepatan aliran fluida (m/s)

Dari hasil perhitungan di atas maka nilai dari *Tip Speed Ratio* (TSR) pengukuran pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 tanpa penempatan plat penghalang dapat dihitung sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\frac{2\pi}{60} \cdot 244,6 \times 0,0951m}{2,48 \text{ m/s}}$$

$$\lambda = 0,982$$

4.3 Analisis Performa Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu

Pada penelitian kali ini terlebih dahulu dilakukan pengambilan data awal performa turbin *Savonius* tanpa menggunakan plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade*. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh plat datar pengganggu terhadap performa turbin angin *Savonius* sehingga dapat dilakukan analisa terhadap indikator-indikator performa turbin angin *Savonius* yang dilakukan selama eksperimen.

4.3.1 Data Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu

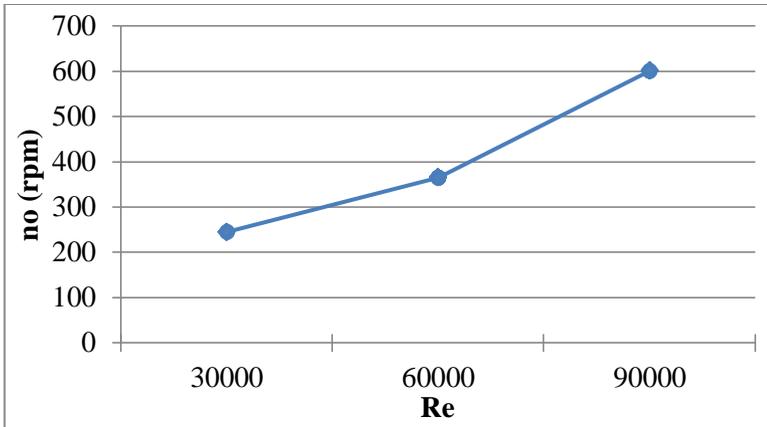
Berikut ini merupakan Tabel 4.1 yang menunjukkan data hasil pengukuran dari putaran, torsi statis dan nilai *Coefficient of power (CoP)* pada turbin *Savonius* tanpa plat pengganggu.

Tabel 4.1 Data Turbin *Savonius* tanpa Plat Datar Pengganggu

Bilangan Reynolds	U_{∞} (m/s)	n_0 (rpm)	T_0 (N.cm)	CoP ₀ (%)
3×10^4	2,48	244,6	0,5	2,995
6×10^4	4,96	365	1,26	4,73
9×10^4	7,45	600,4	3,24	2,79

4.3.2 Putaran Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu (n_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

Salah satu data awal yang didapatkan tanpa menggunakan plat datar adalah putaran turbin angin *Savonius* (n_o). Putaran turbin *Savonius* (n_o) diukur dengan menggunakan *non-contact optical tachometer* yang ditembakkan pada poros turbin yang telah diberikan *scotlight*. Data hasil pengukuran putaran pada turbin angin *Savonius* tersebut dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah ini.



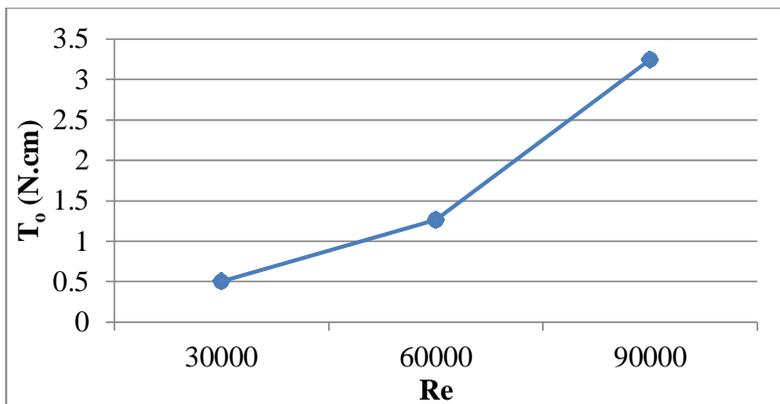
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu (n_o) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re)

Gambar 4.1 menunjukkan grafik putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada setiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* akan cenderung naik seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Didapatkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut putaran maksimal yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 244,6 rpm, 365 rpm, dan 600,4 rpm. Peningkatan putaran yang

dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Hal tersebut akan menyebabkan nilai dari *mass flow rate* yang mengenai turbin semakin besar sehingga putaran dari turbin akan meningkat.

4.3.3 Torsi Statis Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu (T_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

Dari pengambilan data awal yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T_o) turbin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Data hasil pengukuran torsi statis pada turbin angin *Savonius* tersebut menghasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini.



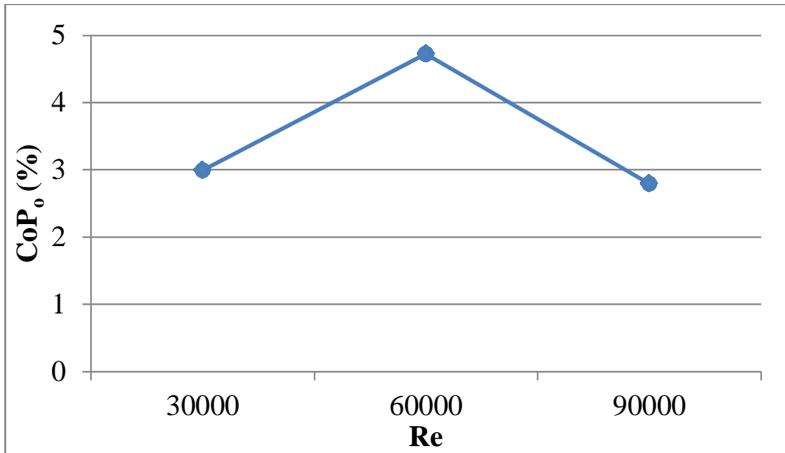
Gambar 4.2 Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_o) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re)

Gambar 4.2 menunjukkan grafik torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius* akan cenderung naik seiring dengan

meningkatnya bilangan *Reynolds*. Didapatkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut torsi statis (T_o) maksimal sebesar 0,5 *N.cm*, 1,26 *N.cm*, dan 3,24 *N.cm*. Peningkatan torsi statis yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Hal tersebut menyebabkan gaya *drag* yang mengenai turbin angin *Savonius* akan semakin besar sehingga torsi yang dihasilkan akan meningkat.

4.3.4 *Coefficient of Power Turbin Savonius Tanpa Plat Datar Pengganggu (CoP_o) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)*

Dari pengambilan data awal yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power* tanpa plat pengganggu (CoP_o) pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu dilakukan pada temperatur sebesar 27,5°C. Pengukuran daya *output* (P_r) dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari mekanisme *brake dynamometer* dengan pembebanan bertahap pada massa yang diberikan. Daya *output* (P_r) nantinya dibandingkan dengan daya teoritis (P_w) untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (CoP). Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dibawah ini.



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power* tanpa plat datar pengganggu (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Gambar 4.3 menunjukkan *Coefficient of Power* tanpa plat datar pengganggu (CoP_o) dari turbin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa *Coefficient of Power* yang dihasilkan dengan *design* dan ukuran turbin angin *Savonius* yang digunakan akan cenderung naik pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 hingga 6×10^4 lalu cenderung turun pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 hingga 9×10^4 . *Coefficient of Power* (CoP_o) yang dihasilkan masing – masing pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 adalah 2,995 %, 4,73 %, dan 2,79 %. Peningkatan *Coefficient of Power* (CoP_o) yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* hingga titik maksimumnya pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Namun setelah bilangan *Reynolds* 6×10^4 nilai *Coefficient of Power* (CoP_o) turun. *Coefficient of Power* adalah perbandingan antara daya *output* dari turbin terhadap daya *input* dari angin. Penurunan nilai CoP_o tersebut menandakan bahwa kenaikan daya *output* yang dihasilkan turbin *Savonius* sudah tidak sebanding

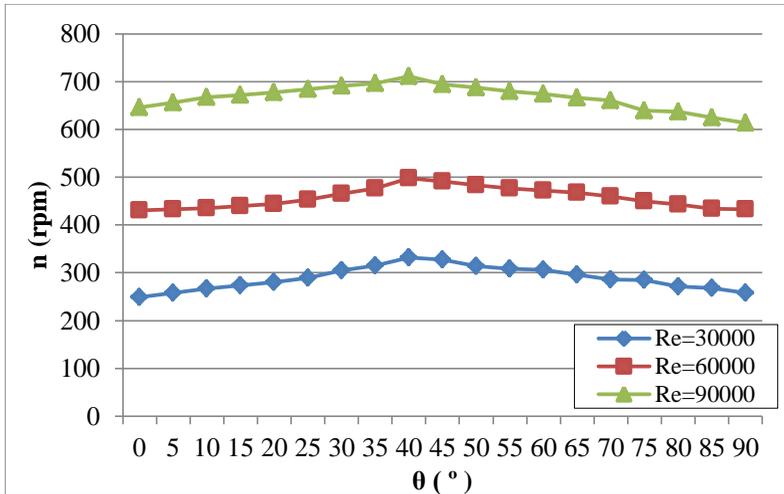
sebanding dengan peningkatan energi *input* dari aliran udara. Dimana nilai kenaikan daya *output* lebih kecil dari daya *input* .

4.4 Analisis Performa Turbin Savonius Menggunakan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

Untuk meningkatkan performa turbin *Savonius* pada penelitian kali ini dilakukan eksperimen dengan penempatan sebuah plat datar pengganggu berbentuk persegi panjang dengan dimensi $L/D = 1,16$ yang diletakkan di depan *returning blade* turbin *Savonius* dengan variasi perubahan sudut bukaan plat pengganggu (θ). Sudut bukaan plat datar pengganggu divariasikan setiap 5° dari 0° hingga 90° dengan bilangan *Reynolds* $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Agar dapat mengetahui peningkatan performa turbin angin *Savonius* dilakukan analisis terhadap indikator-indikator performa turbin angin *Savonius* di bawah ini.

4.4.1 Putaran Turbin Savonius (n) sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (θ)

Salah satu data yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah putaran turbin angin *Savonius* (n) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* $3,0 \times 10^4$; $6,0 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Putaran turbin *Savonius* (n) diukur dengan menggunakan *non-contact optical tachometer* yang ditembakkan pada salah satu bagian dari turbin yang telah diberikan *scotlight*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dibawah ini.



Gambar 4.4 Grafik putaran turbin *Savonius* (n) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (θ)

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat grafik yang menunjukkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu. Putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* hingga nilai tertentu dan selanjutnya mengalami penurunan

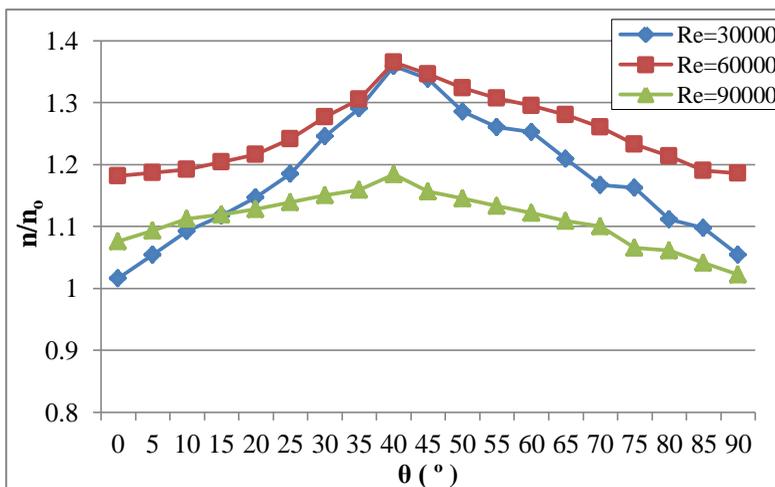
Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . Putaran yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar $248,6 \text{ rpm}$ pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar $332,4 \text{ rpm}$, kemudian putaran dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 258 rpm pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada

bilangan *Reynolds* 6×10^4 , putaran yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 431,2 *rpm* pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar 498,2 *rpm*, selanjutnya putaran dari turbin akan turun hingga 432,8 *rpm* pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , putaran yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 645,8 *rpm* pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar 711, *rpm* dan selanjutnya putaran dari turbin akan turun hingga 613,8 *rpm* pada sudut bukaan 90° .

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° terjadi kenaikan putaran yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi sudut bukaan plat datar pengganggu yang berada di depan *returning blade* menghalangi aliran udara sehingga menurunkan gaya *drag* pada sisi *returning blade*, di sisi lain arah bukaan plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke sisi *advancing blade* menjadi lebih banyak sehingga selisih torsi dari kedua sudu mengalami peningkatan dan terjadi kenaikan putaran dari turbin angin *Savonius* setiap kenaikan sudut bukaan plat pengganggu hingga sudut bukaan 40° . Sedangkan pada rentang sudut bukaan plat datar pengganggu antara 40° hingga 90° terjadi penurunan putaran dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan karena pada $\theta > 30^\circ$ plat datar pengganggu mulai membuka aliran fluida untuk menerobos menuju *returning blade* dan *flow rate* aliran fluida menuju *returning blade* semakin besar sehingga terjadi peningkatan gaya *drag* pada *returning blade* dan mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil. Namun yang terjadi pada eksperimen kali ini adalah sudut optimum untuk menghasilkan putaran turbin maksimal yaitu pada sudut plat datar 40° . Hal tersebut disebabkan karena walaupun pada sudut $\theta > 30^\circ$ aliran fluida menuju *returning blade* sudah mulai terbuka tetapi *flow rate* aliran

menuju *returnig blade* masih lebih sedikit dari pada aliran yang diarahkan oleh plat datar menuju *advancing blade*. Sehingga putaran turbin masih naik hingga sudut 40° . Namun setelah 40° *flow rate* fluida menuju *returning blade* semakin besar dan plat datar sudah kurang optimum mengarahkan fluida menuju *advancing blade*.

Dari data turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 244,6 *rpm*, 365 *rpm*, dan 600,4 *rpm*. Apabila dilakukan sebuah komparasi (n/n_0) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Putaran (n/n_0) sebagai fungsi sudut bukaan plat pengganggu (θ)

Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_0) tiap grafik akan mengalami *trend* naik pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 0° hingga 40° dan

akan turun pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 40° hingga 90° . Perbandingan putaran (n/n_0) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 1,02 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n/n_0) turbin sebesar 1,36 kali, kemudian perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 1,06 kali lipat pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan putaran (n/n_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,18 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n/n_0) turbin sebesar 1,37 kali lipat, selanjutnya perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin akan turun hingga 1,19 kali lipat pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan putaran (n/n_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,08 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n/n_0) turbin sebesar 1,18 kali lipat dan selanjutnya perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin akan turun hingga 1,02 kali lipat pada sudut bukaan 90° .

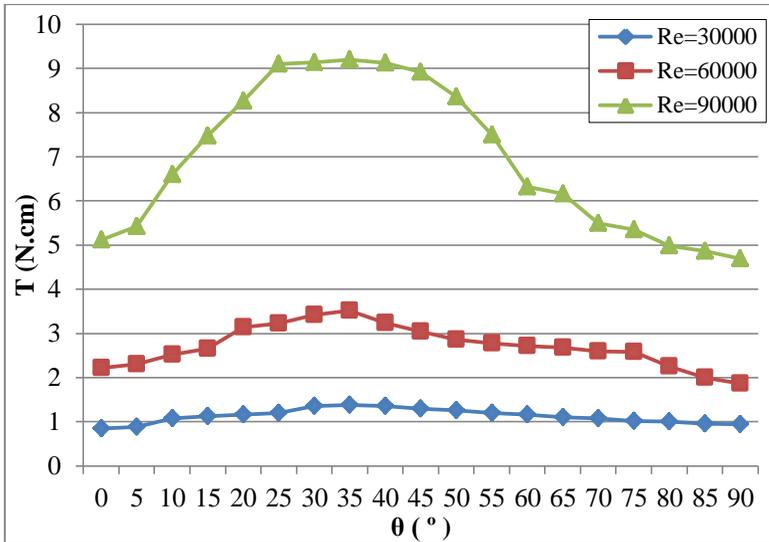
Ketika bukaan plat 90° nilai n/n_0 pada semua bilangan *Reynolds* lebih dari 1 yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan putaran turbin dibandingkan dengan kondisi tanpa plat. Hal ini disebabkan karena ketika plat pada posisi 90° , ketebalan plat dan poros engsel plat penghalang akan mengakibatkan *wake* pada aliran udara yang menumbuk turbin. Terbentuknya *wake* menyebabkan tekanan pada sisi *upstream returning blade* akan berkurang, dan tekanan pada sisi *upstream advancing blade* akan bernilai hampir sama dengan posisi tanpa plat. Akibat dari berkurangnya tekanan pada sisi *returning blade*, selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat dan akan meningkatkan nilai putaran turbin jika dibandingkan dengan kondisi tanpa plat penghalang.

Pada gambar 4.5 terlihat bahwa pada beberapa titik, nilai n/n_0 berhimpit. Hal ini dapat terjadi karena pada beberapa titik, rasio nilai putaran turbin angin Savonius dengan plat penghalang bernilai hampir sama karena plat penghalang memberikan efek kenaikan yang hampir sama pada tiap bilangan Reynolds. Selain itu, hal ini juga dapat terjadi dikarenakan adanya *error* kesalahan pembacaan data dan kesalahan dalam input data.

Dari masing-masing grafik bilangan *Reynolds* sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) didapatkan bahwa nilai perbandingan putaran (n/n_0) > 1. Hasil ini menunjukkan bahwa dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius* dalam pembahasan kali ini yaitu putaran turbin.

4.4.2 Torsi statis Turbin *Savonius* (T) sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (θ)

Data selanjutnya yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah berupa torsi statis (T) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 . Torsi statis (T) diukur dengan menahan sudu turbin pada setiap sudut bukaan sudu turbin 0° dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.6 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (θ)

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat grafik yang menunjukkan torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu. Torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* untuk setiap posisi sudut bukaan tertentu. Grafik di atas menunjukkan adanya *trendline* torsi statis turbin *Savonius* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

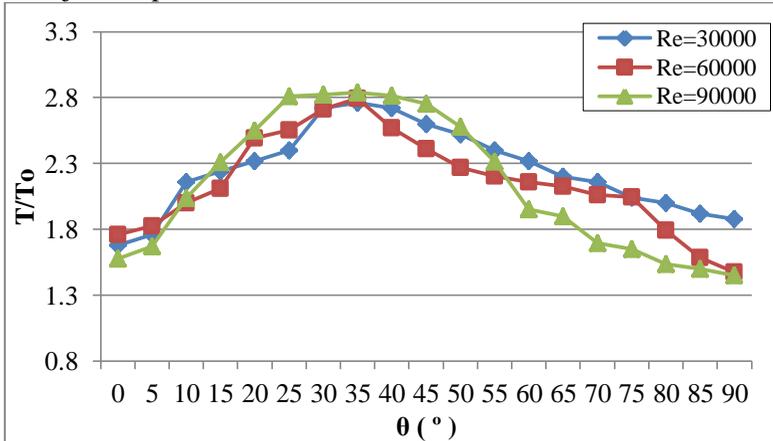
Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa torsi statis (T) turbin angin *Savonius* akan cenderung turun pada tiap sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 90° . Torsi statis (T) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* mencapai nilai sebesar $0,84$ N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 35° sebesar $1,38$ N.cm dan turun hingga nilai

terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 0,94 N.cm untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , torsi statis (*T*) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,22 N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 35° yaitu sebesar 3,52 N.cm dan akan cenderung turun hingga sudut bukaan 90° sebesar 1,86 N.cm. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , torsi statis (*T*) tertinggi yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 5,12 N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 30° sebesar 9,2 N.cm dan pada akhirnya turun hingga sudut bukaan 90° sebesar 4,7 N.cm.

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 35° terjadi kenaikan nilai torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini disebabkan aliran udara yang mengarah menuju *returning blade* dapat ditutup dan diarahkan menuju *advancing blade* sehingga selisih gaya drag yang diterima kedua sudu turbin meningkat dan torsi statis turbin dapat meningkat.

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 35° hingga 90° terjadi penurunan torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini disebabkan karena seiring sudut bukaan plat pengganggu yang semakin besar, maka aliran udara semakin menuju ke pusat poros turbin. Sedangkan di sisi yang lain, pada $\theta > 30^\circ$ bukaan plat datar penghalang juga menyebabkan aliran fluida menerobos menuju *returning blade* turbin *Savonius* dengan debit semakin besar seiring bertambahnya sudut bukaan plat pengganggu dan menyebabkan aliran yang diarahkan plat datar pengganggu menuju *advancing blade* akan lebih sedikit. Hal tersebut disebabkan karena pada $\theta > 30^\circ$ plat datar pengganggu mulai membuka aliran fluida untuk menerobos menuju *returning blade* sehingga terjadi peningkatan gaya drag pada *returning blade* dan mengakibatkan selisih gaya drag antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil dan torsi statis yang dihasilkan turbin akan semakin kecil juga.

Dari data turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T_0) maksimal sebesar 0,5 *N.cm*, 1,26 *N.cm*, dan 3,24 *N.cm*. Apabila dilakukan sebuah komparasi (T/T_0) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 di bawah ini.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut halang (θ)

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa perbandingan torsi statis turbin tipe *Savonius* (T/T_0) tiap grafik akan mengalami *trend* cenderung naik pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 0° hingga 35° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 35° hingga 90° . Perbandingan torsi statis (T/T_0) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 1,68 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 35° dengan perbandingan torsi statis (T/T_0) turbin sebesar 2,76 kali, kemudian perbandingan torsi statis (T/T_0) dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 1,88 kali lipat pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada bilangan

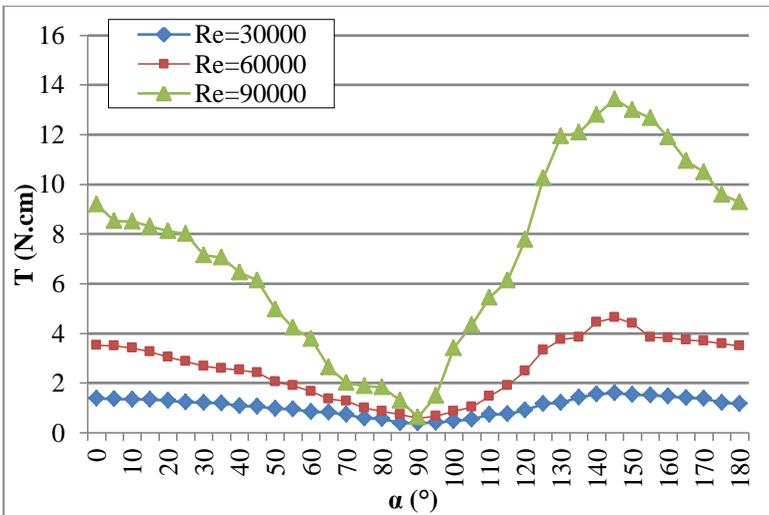
Reynolds 6×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,76 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 35° dengan perbandingan torsi statis (T/T_0) turbin sebesar 2,79 kali lipat, selanjutnya perbandingan torsi statis (T/T_0) dari turbin akan turun hingga 1,48 kali lipat pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,58 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 35° dengan perbandingan torsi statis (T/T_0) turbin sebesar 2,84 kali lipat dan selanjutnya perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin akan turun hingga 1,45 kali lipat pada sudut bukaan 90° .

Pada sudut bukaan plat 90° nilai T/T_0 pada semua bilangan *Reynolds* lebih dari 1, yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan torsi statis turbin jika dibandingkan dengan kondisi tanpa plat. Hal ini disebabkan karena ketika plat pada posisi 90° , ketebalan plat dan poros engsel plat penghalang akan menyebabkan *wake* pada aliran udara yang mengalir menuju turbin. Terbentuknya *wake* menyebabkan tekanan pada sisi *upstream returning blade* akan berkurang, dan tekanan pada sisi *upstream advancing blade* akan bernilai hampir sama dengan posisi tanpa plat. Akibat dari berkurangnya tekanan pada sisi *returning blade* yaitu selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat yang akan meningkatkan nilai torsi statis turbin jika dibandingkan dengan kondisi tanpa menggunakan plat penghalang.

Dari masing-masing grafik bilangan *Reynolds* sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) didapatkan bahwa nilai perbandingan torsi statis (T/T_0) > 1 . Hasil ini menunjukkan bahwa dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius*.

4.4.2.1 Torsi Statis Turbin *Savonius* (T) sebagai Fungsi Sudut Bukaannya (α)

Gambar 4.9 menunjukkan grafik torsi statis turbin angin *Savonius* dengan pengganggu silinder sirkular (T) dengan diameter (d) = 101,6 mm dan pada kondisi bilangan Reynolds sebesar 3×10^4 , 6×10^4 dan 9×10^4 , dimana torsi statis adalah torsi yang diukur ketika turbin angin berada dalam keadaan tidak berputar. Grafik tersebut ditampilkan dalam nilai torsi statis sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin pada sudut $\theta = 35^\circ$ dimana pada bukaan sudut plat pengganggu tersebut memiliki torsi statis paling besar pada masing – masing bilangan *Reynolds*. Penelitian dilakukan dengan sudut bukaan sudu pada rentang 0° sampai dengan 180° dengan kenaikan 5° tiap pengambilan data.



Gambar 4.8 Grafik torsi statis turbin angin *Savonius* berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut bukaan sudu turbin (α) pada $\theta = 35^\circ$

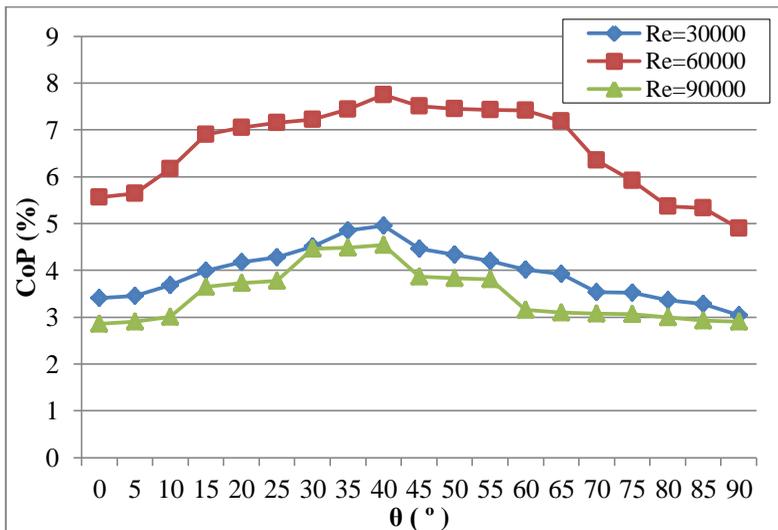
Dari gambar 4.8 dapat dilihat bahwa seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds, maka torsi statis dari turbin angin Savonius berpengganggu juga semakin tinggi. Kecepatan angin yang menabrak turbin angin Savonius berpengganggu sangat berpengaruh terhadap torsi statis dari turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka gaya yang digunakan untuk menahan turbin juga semakin tinggi. Sehingga torsi yang dihasilkan juga semakin besar. Nilai torsi statis pada bilangan Reynolds 3×10^4 dengan bukaan sudut plat datar 35° adalah sebesar 1,38 N.cm, sedangkan pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ dengan bukaan sudut plat datar 35° nilai torsi statisnya sebesar 9,2 N.cm.

Selain itu, gambar 4.9 juga memperlihatkan bahwa pada masing – masing bilangan Reynolds 3×10^4 ; 6×10^4 dan 9×10^4 nilai torsi statis mengalami kenaikan dan penurunan pada bukaan sudu turbin. Pada sudut 0° sampai dengan 90° nilai torsi statis mengalami penurunan. Sedangkan pada sudut 90° sampai dengan sudut 145° nilai torsi statis mengalami kenaikan. Dari sudut 145° sampai dengan 180° nilai dari torsi statis ini kembali menurun, dimana pada titik 180° memiliki nilai yang hampir sama dengan bukaan sudut 0° . Perubahan posisi sudu mempengaruhi koefisien *drag* untuk tiap sudu. *Advancing blade* dengan koefisien *drag* yang lebih besar akan memberikan gaya dorong yang lebih besar dibandingkan dengan *returning blade*. Momentum masing-masing sudu saling berlawanan, sehingga nilai torsi statis terbesar dan terkecil akan didapat pada posisi sudut tertentu.

Untuk ketiga bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini, semuanya menunjukkan bahwa nilai puncak (*peak value*) dari torsi statis turbin angin Savonius berpengganggu berada pada sudut 145° dan memiliki nilai paling Rendah pada bukaan sudut 90° . Hal Ini menunjukkan bahwa pada posisi sudut 145° memberikan kinerja yang optimal pada turbin Savonius berpengganggu plat datar.

4.4.3 *Coefficient of Power (CoP) Turbin Savonius sebagai fungsi Sudut Buka Plat Pengganggu (θ)*

Data selanjutnya yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah berupa *Coefficient of Power* dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 . Pengukuran daya output (P_r) dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari mekanisme *brake dynamometer* yang telah dibahas pada bagian sebelumnya. Daya output (P_r) nantinya dibandingkan dengan daya teoritis (P_w) untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 dibawah ini.



Gambar 4.9 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi sudut plat pengganggu (θ)

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat grafik yang menunjukkan *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan

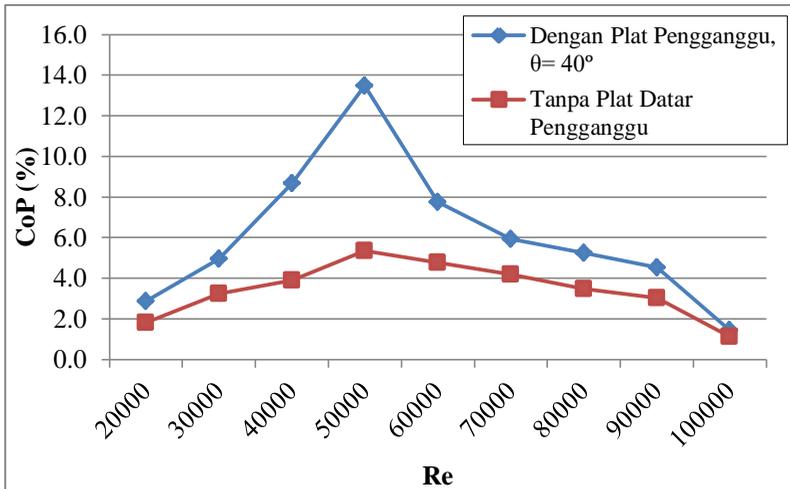
plat datar pengganggu. *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* untuk setiap bukaan sudut plat tertentu. Grafik di atas menunjukkan adanya *trendline Coefficient of Power (CoP)* turbin *Savonius* dimana masing-masing grafik bilangan *Reynolds* mengalami penurunan setelah mencapai nilai tertingginya seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa *Coefficient of Power (CoP)* turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 3,41% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 4,96%, kemudian *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 3,04% pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 5,56% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 7,75%, selanjutnya *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin akan turun hingga 4,9% pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,85% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 4,54% dan selanjutnya *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin akan turun hingga 2,9% pada sudut bukaan 90° .

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi sudut bukaan

plat datar pengganggu yang berada di depan *returning blade* menghalangi aliran udara sehingga menurunkan gaya *drag* pada sisi *returning blade*. Di sisi lain arah bukaan plat datar pengganggu yang membentuk sudut mampu mengarahkan aliran udara menuju sisi *advancing blade* pada titik gaya yang menimbulkan torsi pada *advancing blade* meningkat sehingga selisih torsi dari kedua sudu mengalami peningkatan dan terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius*. Hal tersebut terjadi pada setiap kenaikan sudut bukaan plat datar pengganggu hingga sudut bukaan plat sebesar 40° dimana aliran udara yang diarahkan plat pengganggu dapat meningkatkan torsi *advancing blade* secara maksimal karena aliran diarahkan pada titik gaya *advancing blade* yang dapat menghasilkan torsi yang besar. Sedangkan pada rentang sudut bukaan plat datar penghalang antara 40° hingga 90° terjadi penurunan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan karena pada $\theta > 30^\circ$ plat datar pengganggu mulai membuka aliran fluida untuk menerobos menuju *returning blade* dan *flow rate* aliran fluida menuju *returning blade* semakin besar dan juga menyebabkan aliran yang diarahkan plat datar pengganggu menuju *advancing blade* akan lebih sedikit sehingga terjadi peningkatan gaya *drag* pada *returning blade* dan mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil.

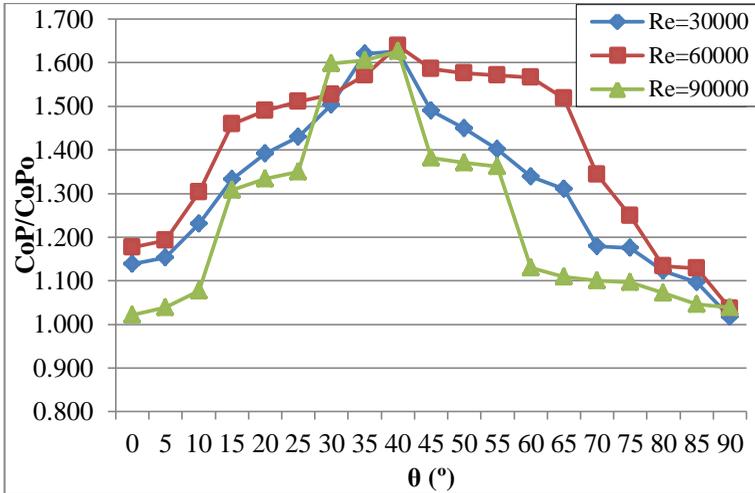
Dapat diketahui dari data *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan, nilai tertinggi *Coefficient of Power (CoP)* didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Hal ini dikarenakan nilai bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini (3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4) berada pada rentang bilangan *Reynolds* optimum yang menghasilkan *CoP* maksimum. Hal tersebut juga dibuktikan dari grafik yang dibuat dengan pengambilan data performa turbin untuk rentang bilangan *Reynolds* 2×10^4 hingga 10×10^4 tanpa plat datar dan juga menggunakan plat datar pengganggu dengan sudut bukaan 40° yang ditunjukkan Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re)

Bilangan *Reynolds* yang digunakan pada penelitian kali ini adalah 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 . Sedangkan pada Gambar 4.10, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) dengan plat pengganggu akan cenderung turun dari bilangan *Reynolds* 2×10^4 hingga bilangan *Reynolds* 10×10^4 . Nilai tertinggi *Coefficient of Power* pada bilangan *Reynolds* 5×10^4 sebesar 13,47%.

Dari data turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 , 6×10^4 , dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power* tanpa plat pengganggu (CoP_o) maksimal sebesar 3%, 4,73%, dan 2,79%. Apabila dilakukan sebuah komparasi (CoP/CoP_o) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 di bawah ini.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut halang (θ)

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat grafik yang menunjukkan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan plat datar pengganggu. Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap grafik menunjukkan adanya *trendline* perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin *Savonius*. Masing-masing grafik bilangan *Reynolds* mengalami penurunan setelah mencapai nilai tertingginya seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan

turbin angin *Savonius* sebesar 1,14 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) turbin sebesar 1,63 kali lipat, kemudian perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 1,02 kali lipat pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 3×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,18% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) turbin sebesar 1,64 kali lipat, selanjutnya perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) dari turbin akan turun hingga 1,04 kali lipat pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,02 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) turbin sebesar 1,63 kali lipat dan selanjutnya perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) dari turbin akan turun hingga 1,04 kali lipat pada sudut bukaan 90° .

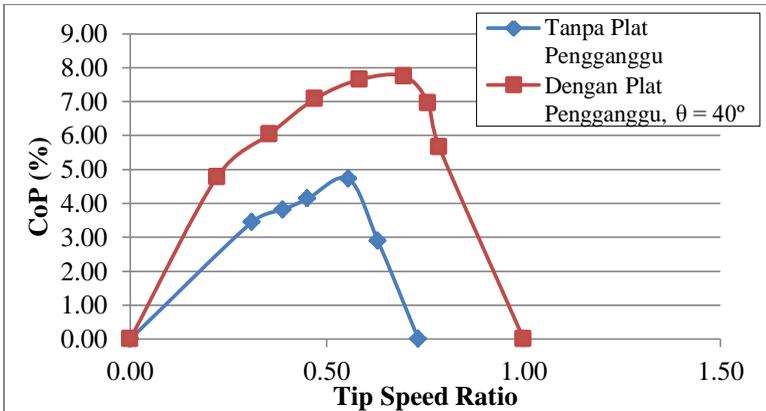
Pada sudut bukaan plat 90° nilai CoP/CoP_0 pada semua bilangan *Reynolds* lebih dari 1, yang menunjukkan bahwa terjadi kenaikan CoP turbin jika dibandingkan dengan kondisi tanpa plat. Hal ini disebabkan karena ketika plat penghalang pada posisi 90° , ketebalan plat dan poros engsel dari plat penghalang akan mengakibatkan *wake* pada aliran udara yang menumbuk turbin. Terbentuknya *wake* menyebabkan tekanan pada sisi *upstream returning blade* akan berkurang, dan tekanan pada sisi *upstream advancing blade* akan bernilai hampir sama dengan posisi tanpa plat. Akibat dari berkurangnya tekanan pada sisi *upstream returning blade* adalah selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan meningkat dan akan meningkatkan nilai CoP turbin jika

dibandingkan dengan kondisi tanpa menggunakan plat penghalang.

Dari masing-masing grafik bilangan *Reynolds* sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) didapatkan bahwa nilai perbandingan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) >1 . Hasil ini menunjukkan bahwa dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa dari turbin angin *Savonius*.

4.4.4 *Coefficient of Power* (*CoP*) Turbin *Savonius* sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Data yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah daya turbin angin *Savonius* (*CoP*) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 ; 6×10^4 ; dan 9×10^4 . Daya *output* didapat dari pengukuran menggunakan mekanisme *brake dynamometer*. Perbandingan daya keluaran yang dihasilkan turbin *Savonius* (P_r) dengan daya angin diolah menjadi *Coefficient of Power*. *Tip Speed Ratio* (λ) adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan hasil bagi dari pengukuran kecepatan putar dari turbin *Savonius* dengan kecepatan aliran angin yang masuk. Data *Coefficient of Power* kemudian dibuat grafik fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada sudut optimum yaitu $\theta = 40^\circ$ pada masing – masing bilangan *Reynolds* yang ditunjukkan pada Gambar 4.12 dibawah ini.



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk $Re = 6 \times 10^4$

Gambar 4.12 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius pada setiap bilangan Reynolds terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu dibandingkan dengan nilai dari *Tip Speed Ratio* (λ). *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* (λ) dan setiap grafik menunjukkan adanya *trendline* yang memiliki kemiripan satu sama lain.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin angin Savonius akan cenderung naik. Pada bilangan Reynolds 6×10^4 tanpa plat pengganggu, *CoP* yang dihasilkan dari turbin Savonius sebesar 0% pada posisi $\lambda = 0,73$ yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada posisi $\lambda = 0,55$ dengan *CoP* turbin sebesar 4,73% dan akan cenderung turun kembali hingga $\lambda = 0$ dengan besar *CoP* 0%. Pada bilangan Reynolds 6×10^4 dengan plat datar pengganggu pada sudut 40° , *CoP* yang dihasilkan dari turbin Savonius sebesar 0% pada posisi $\lambda = 1$ yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada posisi $\lambda = 0,695$ dengan *CoP* turbin sebesar 7,75% dan turun kembali hingga $\lambda = 0$ dengan *CoP* sebesar 0%.

Adapun peningkatan *Coefficient of Power (CoP)* disebabkan oleh terjadinya kenaikan putaran dan torsi dari turbin *Savonius* yang menyebabkan daya *output* semakin meningkat, sedangkan daya *input* dari aliran angin akan tetap sama. Kenaikan putaran dan torsi dari turbin *Savonius* dipengaruhi oleh penurunan gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang disebabkan oleh plat datar pengganggu. Sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu semakin besar, hal itu menyebabkan torsi yang dihasilkan semakin besar. *Tip Speed Ratio (λ)* dipengaruhi besarnya dari hasil bagi pengukuran kecepatan putar dari turbin *Savonius* dengan kecepatan aliran angin yang masuk.

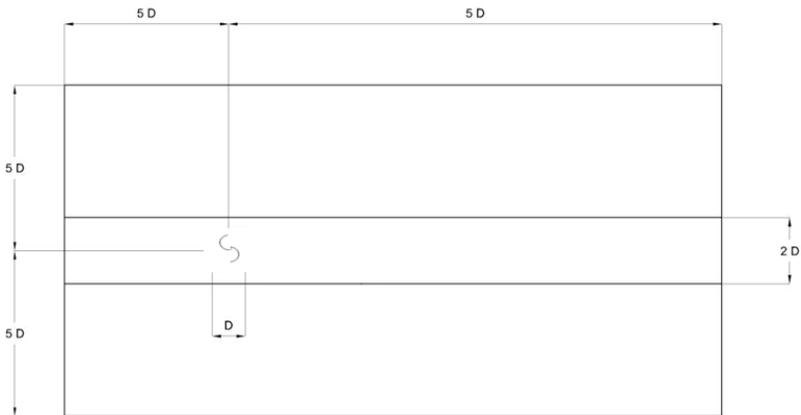
Gambar 4.12 memiliki karakteristik bahwa turbin *Savonius* setelah diletakkan plat datar pengganggu di depan *returning blade* mengalami peningkatan *Coefficient of Power (CoP)* dan memiliki daerah luasan yang lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi tanpa menggunakan plat pengganggu. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin angin *Savonius* mengalami peningkatan performa setelah diberi plat datar pengganggu di dipan *returning blade*.

Grafik pada Gambar 4.12 telah sesuai jika dikomparasikan dengan *Betz Limit Law* pada Gambar 2.2. Pada Gambar 4.12 kontur garis pada grafik tersebut masih memiliki kesamaan pola dengan Hukum tersebut. Selain itu garis yang dibuat oleh grafik tersebut masih dibawah batas grafik Turbin *Savonius* pada hukum tersebut. Hal ini dapat disimpulkan bahwa penelitian kali ini masih sesuai dengan hukum yang ada.

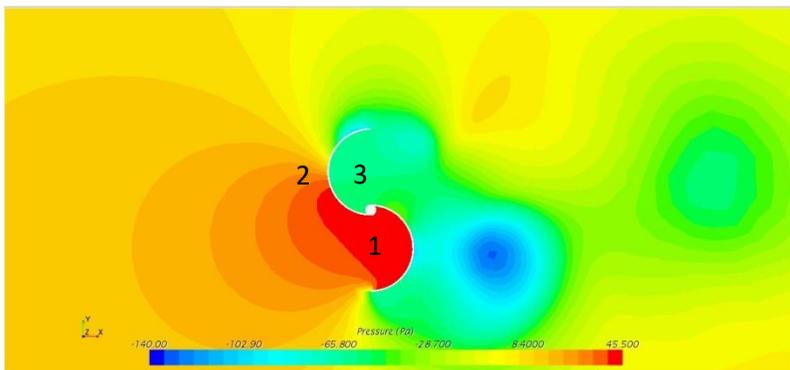
4.5 Simulasi Aliran pada Turbin Angin Savonius Berganggu dengan menggunakan Software

Simulasi dilakukan menggunakan *software* Star – CCM+ dengan benda uji turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan beberapa kondisi yaitu tanpa plat penghalang, menggunakan plat penghalang dengan sudut 0° , 35° dan 40° dengan $(L/D) = 1,16$. Simulasi berikut dilakukan dengan tujuan melakukan analisa terhadap aliran udara. Simulasi dilakukan

dengan *tetrahedral meshing*, menggunakan *turbulence modelling k-epsilon realizable*, dengan skema diskretisasi *second order upwind*. mengaplikasikan fitur statis, aliran udara yang digunakan bersifat *implicit unstrady, constant density, segregated flow*, mempunyai kecepatan 7,45 m/s. Skema pengujian simulasi ditampilkan pada gambar 4.13.

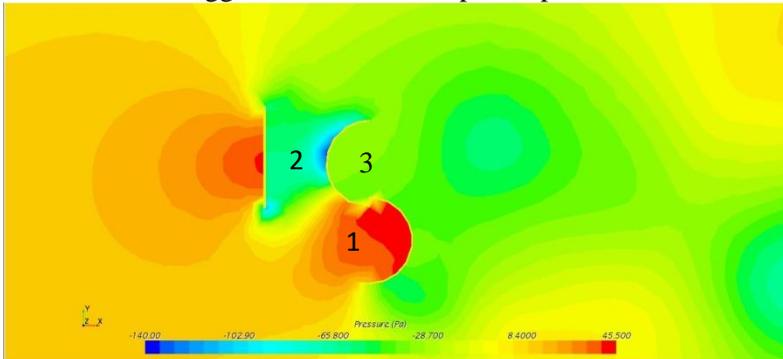


Gambar 4.13 Skema pengujian simulasi aliran pada turbin angin Savonius



Gambar 4.14 Simulasi *pressure gradient* pada turbin angin Savonius pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 tanpa plat penghalang

Gambar 4.14 menunjukkan gradien tekanan yang terjadi pada turbin angin Savonius dengan kondisi tanpa plat penghalang pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 . Terlihat bahwa tekanan aliran udara pada sisi *upstream advancing blade* (1) dipenuhi dengan warna merah dengan indikasi tekanan 45,5 Pa. Sedangkan sisi *upstream returning blade* (2) tekanan aliran udara dipenuhi oleh berwarna orange, hijau dan merah yang menunjukkan tekanan tersebut masih lebih kecil jika dibandingkan tekanan pada daerah (1). Tekanan pada daerah (3) atau sisi *downstream returning blade* berwarna biru yang menunjukkan tekanan pada daerah tersebut masih rendah. Dari gambar 4.14 terlihat perbedaan tekanan aliran udara yang diterima oleh kedua sudu dan sisi *upstream advancing blade* menerima tekanan yang lebih tinggi. Tekanan tersebut menunjukkan juga gaya drag yang diterima kedua sudu sehingga turbin tersebut dapat berputar.

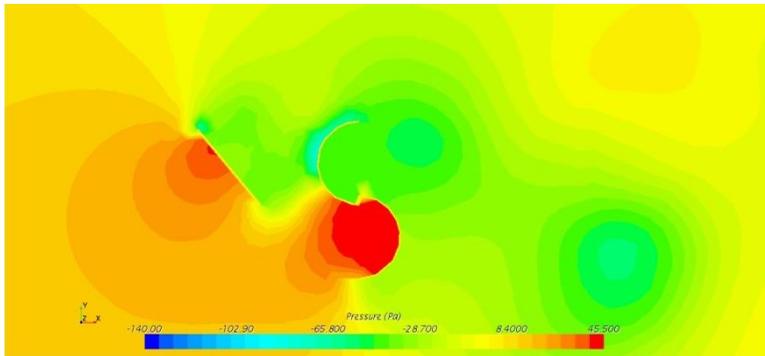


Gambar 4.15 Simulasi *pressure gradient* pada turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 0°

Pada gambar 4.15 terlihat kondisi turbin menggunakan plat datar penghalang dengan sudut 0° pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 . Tekanan yang diterima sisi *upstream* plat datar berwarna merah di tengah plat dan di ujung plat berwarna orange kemerahan menunjukkan tekanan yang diterima oleh plat datar cukup tinggi. Sedangkan pada daerah 2 tekanan pada sisi

upstream returning blade dipenuhi warna biru dengan range tekanan yang rendah. Di sisi *downstream returning blade* (daerah 3) dipenuhi dengan warna hijau. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan pada sisi *downstream returning blade* lebih tinggi jika dibandingkan dengan tekanan di sisi *upstream returning blade*.

Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa perbedaan gaya drag yang diterima oleh sisi *upstream* kedua sudu akan meningkat jika dibandingkan dengan kondisi tanpa plat penghalang pada gambar 4.14. Kondisi tersebut sesuai dengan pembahasan pada eksperimen yang dilakukan yaitu performa turbin pada kondisi plat datar dengan sudut 0° memiliki peningkatan jika dibandingkan dengan kondisi tanpa plat datar penghalang. Hal tersebut terjadi akibat debit aliran udara yang diterima oleh *returning blade* berkurang karena daerah di sisi *upstream returning blade* merupakan daerah *wake* dari plat datar penghalang dengan tekanan aliran udara yang cukup rendah.

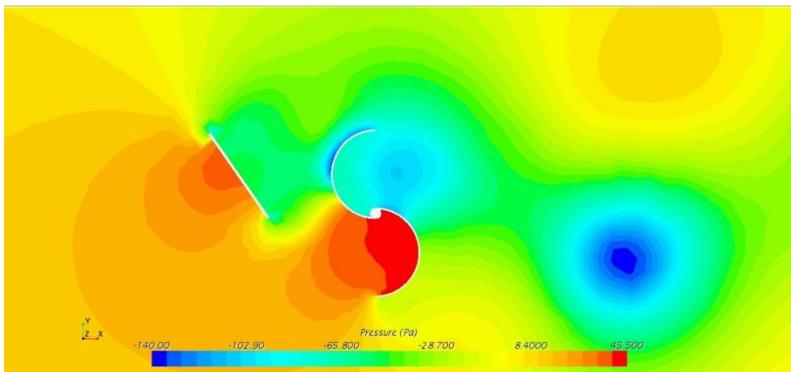


Gambar 4.16 Simulasi *pressure gradient* pada turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 40°

Pada gambar 4.15 simulasi dilakukan dengan kondisi sudut plat datar 40° pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 yang memiliki nilai CoP terbesar jika dibandingkan dengan sudut bukaan plat lainnya. Terlihat bahwa tekanan aliran pada sisi

upstream advancing blade dipenuhi dengan warna merah dengan indikasi tekanan sebesar 45,5 Pa. Pada sisi *upstream returning blade* terlihat tekanan aliran dipenuhi dengan kondisi warna biru dengan indikasi tekanan range sekitar -102 Pa sehingga terlihat gaya drag yang diterima *advancing blade* lebih besar daripada *returning blade*.

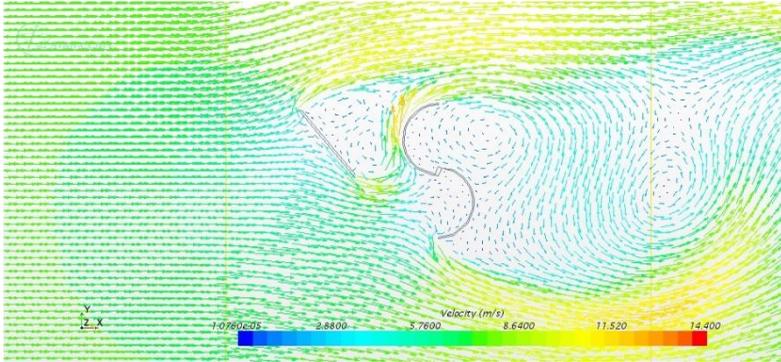
Pada gambar 4.16 terlihat tekanan aliran udara pada sisi *upstream returning blade* lebih rendah jika dibandingkan dengan gambar 4.15 yaitu kondisi plat datar dengan penempatan sudut 0° . Selain itu pada gambar 4.16 kondisi tekanan yang diterima oleh *advancing blade* terlihat lebih tinggi jika dibandingkan dengan kondisi sudut plat datar 0° pada gambar 4.15. Hal tersebut terjadi akibat sudut plat datar selain menutup aliran menuju *returning blade*, sudut tersebut juga dapat mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade*. Penurunan gaya drag yang diterima oleh *returning blade* dan peningkatan yang terjadi pada *advancing blade* mengakibatkan selisih gaya drag pada kedua sudu lebih tinggi sehingga menyebabkan peningkatan torsi dan putaran dari turbin. Peningkatan putaran dan torsi tersebut menghasilkan efisiensi dari turbin angin Savonius meningkat.



Gambar 4.17 Simulasi *pressure gradient* pada turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan sudut plat penghalang 35°

Pada gambar 4.17 simulasi selanjutnya dilakukan dengan kondisi sudut plat datar 35° pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 yang memiliki nilai torsi statis terbesar jika dibandingkan dengan sudut bukaan plat yang lain. Terlihat bahwa tekanan aliran pada sisi *upstream advancing blade* dipenuhi dengan warna merah dengan indikasi tekanan 45,5 Pa. Pada sisi *upstream returning blade* dipenuhi dengan warna biru gelap dengan indikasi tekanan -140 Pa.

Pada gambar 4.17 terlihat tekanan aliran udara pada sisi *upstream returning blade* lebih rendah jika dibandingkan dengan gambar 4.16 yaitu kondisi plat datar dengan penempatan sudut 40° . Selain itu pada gambar 4.17 kondisi tekanan yang diterima pada sisi *upstream advancing blade* terlihat lebih tinggi jika dibandingkan dengan kondisi sudut plat datar 40° pada gambar 4.16. Walaupun luasan warna merah di depan *advancing blade* pada sudut bukaan 35° lebih kecil, warna merah tersebut hanya memenuhi sisi *upstream advancing blade*. Berbeda dengan sudut bukaan 40° , luasan warna merah masih didapatkan pada sisi *upstream returning blade*. Hal tersebut terjadi akibat sudut plat datar selain menutup aliran menuju *returning blade*, sudut tersebut juga dapat mengarahkan aliran udara secara efektif menuju *advancing blade*. Penurunan gaya drag yang diterima oleh *returning blade* dan peningkatan yang terjadi pada *advancing blade* mengakibatkan selisih gaya drag pada kedua sudu lebih tinggi sehingga menyebabkan peningkatan torsi statis meningkat jika dibandingkan dengan sudut bukaan 40° .



Gambar 4.18 Simulasi *velocity vector* turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan sudut bukaan plat $\theta = 40^\circ$

Selain analisa aliran melalui gradien tekanan, pada gambar 4.18 menunjukkan hasil simulasi aliran menggunakan *velocity vector* untuk menunjukkan arah kecepatan aliran pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan sudut bukaan plat $\theta = 40^\circ$. Dari gambar 4.18 terlihat sudut plat datar pengganggu selain dapat menutup aliran menuju *returning blade*, vektor kecepatan aliran terlihat diarahkan oleh plat datar menuju *advancing blade*. Hal tersebut menyebabkan gaya drag yang diterima oleh *advancing blade* akan semakin besar sehingga performa turbin berupa nilai torsi dan putaran akan meningkat.

BAB V

PENUTUP

5.1 *Kesimpulan*

Pada eksperimen pengaruh sudut bukaan plat penghalang (θ) dengan nilai $L/D = 1,16$ terhadap performa turbin angin *Savonius* didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemberian plat penghalang dengan $L/D = 1,16$ di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 3×10^4 ; 6×10^4 dan 9×10^4 efektif untuk meningkatkan performa turbin angin *Savonius* yang diteliti, ditandai dengan meningkatnya nilai putaran (n), torsi statis (T_{statis}), dan *Coefficient of Power* (CoP) yang dihasilkan turbin pada setiap sudut bukaan plat penghalang dibandingkan dengan performa turbin tanpa plat penghalang.
2. Putaran terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* (n) diperoleh saat $\theta = 40^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 9×10^4 , yaitu senilai 711 rpm. Sedangkan peningkatan terbesar putaran turbin angin *Savonius* dengan plat penghalang (n/n_0) diperoleh saat $\theta = 40^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 dengan peningkatan sebesar 1,365 kali.
3. Torsi statis turbin angin *Savonius* (T) terbesar dihasilkan saat $\theta = 35^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 9×10^4 , yaitu senilai 9,2 N.cm. Sedangkan peningkatan terbesar torsi statis turbin angin *Savonius* dengan plat penghalang (T/T_0) diperoleh saat $\theta = 35^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 9×10^4 dengan peningkatan sebesar 2,84 kali. Torsi statis maksimal jika ditinjau dari sudut bukaan sudu turbin yaitu pada bilangan

Reynolds 9×10^4 saat $\theta = 35^\circ$ pada $\alpha = 145^\circ$ dengan nilai sebesar 13,42 N.cm.

4. *Coefficient of Power* terbesar yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* (CoP) diperoleh saat $\theta = 40^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 dan pada *Tip Speed Ratio* 0,695 yaitu senilai 7,75%. Sedangkan peningkatan terbesar putaran turbin angin *Savonius* dengan plat penghalang (CoP/CoP₀) diperoleh saat $\theta = 40^\circ$ dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 dengan peningkatan sebesar 1,64 kali. Namun jika dibandingkan pada $\theta = 40^\circ$ dengan rentang bilangan *Reynolds* 2×10^4 hingga 10×10^4 CoP terbesar terletak pada bilangan *Reynolds* 5×10^4 .
5. Pada eksperimen kali ini, *design* dan ukuran turbin yang digunakan memiliki performa maksimal pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 dibandingkan dengan bilangan *Reynolds* 3×10^4 dan 9×10^4 .

5.2 *Saran*

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan mungkin dapat berguna untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Perlu diperhatikan *balancing* pada turbin angin *Savonius* setiap sebelum pengambilan data untuk mendukung validitas data.
2. Setiap pengambilan data perlu diperhatikan kondisi parameter yang berhubungan dengan data yang diambil.
3. Untuk penelitian selanjutnya, dimensi benda uji perlu diperbesar agar faktor kesalahan dari pengukuran dapat diperkecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., Atilgan, M., Ozdamar Aydogan, 2008. **An Experimental Study on Improvement of a Savonius Rotor Performance with Curtaining.** Experimental Thermal and Fluid Science 32, 08:1673-1678.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., April 2010. **Optimization of Savonius Turbines Using an Obstacle Shielding the Returning Blade.** Renewable Energy 35, 10:2618-2626.
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., Thevenin, D., June 2010. **Optimal Blade Shape of a Modified Savonius Turbine Using an Obstacle Shielding the Returning Blade.** Energy Conversion and Management 52, 11:236-242.
- Wilis, Rizkiardi. 2016. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan Returning Blade terhadap Performa Turbin Angin Savonius.** Surabaya: Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
- Ross Ian J., 2010. **Wind Tunnel Blockage Corrections : An Application to Vertical - Axis Wind Turbines.** Dayton: Master of Science in Aerospace Engineering University of Dayton.
- Anonim. 2015. **Jenis-jenis Turbin Angin Serta Kelebihan dan Kekurangannya.** <URL: <http://www.satuenergi.com/2015/10/jenis-jenis-turbin-angin-serta.html>>
- Fox, Robert W., McDonald, Alain T., dan Pritchard, Philip J., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics, Fifth Edition,** John Wiley & Sons, Inc.
- Mahmoud, N. H., El-Haroun, A.A., Wahba, E., Nasef, M.H., November 2010. **An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance.** Alexandria Engineering Journal 51, 12:19-25.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Tabel A1. Data putaran turbin Savonius

Θ	n			n/n₀		
	Re = 30.000	Re = 60.000	Re = 90.000	Re = 30.000	Re = 60.000	Re = 90.000
TANPA PLAT	244.6	365.0	600.4	1.00	1.00	1.00
0	248.6	431.2	645.8	1.02	1.18	1.08
5	258.0	433.2	656.2	1.05	1.19	1.09
10	267.2	435.0	667.8	1.09	1.19	1.11
15	273.4	439.4	672.0	1.12	1.20	1.12
20	280.6	444.0	677.2	1.15	1.22	1.13
25	289.8	453.2	684.2	1.18	1.24	1.14
30	304.2	466.0	690.8	1.25	1.28	1.15
35	315.6	476.4	696.2	1.29	1.31	1.16
40	332.4	498.2	711.0	1.36	1.36	1.18
45	327.4	491.2	694.6	1.34	1.35	1.16
50	314.4	483.0	687.8	1.29	1.32	1.15
55	308.2	477.0	680.2	1.26	1.31	1.13
60	306.4	472.6	673.8	1.25	1.29	1.12
65	295.8	467.2	666.0	1.21	1.28	1.11
70	285.4	460.2	660.4	1.17	1.26	1.10
75	284.4	450.0	639.6	1.16	1.23	1.07
80	271.8	443.0	637.2	1.11	1.21	1.06
85	268.4	434.6	625.4	1.10	1.19	1.04
90	258.0	432.8	613.8	1.05	1.19	1.02

Tabel A2. Data torsi statis turbin Savonius

Θ	T			T/T ₀		
	Re = 30.000	Re = 60.000	Re = 90.000	Re = 30.000	Re = 60.000	Re = 90.000
TANPA PLAT	0.50	1.26	3.24	1.00	1.00	1.00
0	0.84	2.22	5.12	1.68	1.76	1.58
5	0.88	2.3	5.42	1.76	1.83	1.67
10	1.08	2.52	6.60	2.16	2.00	2.04
15	1.12	2.66	7.48	2.24	2.11	2.31
20	1.16	3.14	8.26	2.32	2.49	2.55
25	1.20	3.22	9.10	2.40	2.56	2.81
30	1.36	3.42	9.14	2.72	2.71	2.82
35	1.38	3.52	9.20	2.76	2.79	2.84
40	1.36	3.24	9.12	2.72	2.57	2.81
45	1.30	3.04	8.92	2.60	2.41	2.75
50	1.26	2.86	8.36	2.52	2.27	2.58
55	1.20	2.78	7.50	2.40	2.21	2.31
60	1.16	2.72	6.32	2.32	2.16	1.95
65	1.10	2.68	6.16	2.20	2.13	1.90
70	1.08	2.6	5.50	2.16	2.06	1.70
75	1.02	2.58	5.35	2.04	2.05	1.65
80	1.00	2.26	4.98	2.00	1.79	1.54
85	0.96	2.00	4.86	1.92	1.59	1.50
90	0.94	1.86	4.70	1.88	1.48	1.45

Tabel A3. Data perhitungan CoP dan TSR pada $Re = 3 \times 10^4$

Θ	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	ω (rad/s)	T (Nm)	COP (%)	TSR	COP /COP ₀
TANPA PLAT	101.60	6	20	10.64	0.00144	3.00	0.41	1.00
0	108.00	5	20	11.31	0.00155	3.41	0.43	1.14
5	117.20	6	20	12.27	0.00144	3.45	0.47	1.15
10	125.00	6	20	13.09	0.00144	3.68	0.50	1.23
15	126.40	5	20	13.24	0.00155	3.99	0.51	1.33
20	132.00	5	20	13.82	0.00155	4.17	0.53	1.39
25	135.60	5	20	14.20	0.00155	4.28	0.54	1.43
30	152.80	6	20	16.00	0.00144	4.50	0.61	1.50
35	153.60	5	20	16.08	0.00155	4.85	0.62	1.62
40	154.20	5	20	16.15	0.00155	4.87	0.62	1.63
45	151.40	6	20	15.85	0.00144	4.46	0.61	1.49
50	147.20	6	20	15.41	0.00144	4.34	0.59	1.45
55	142.40	6	20	14.91	0.00144	4.20	0.57	1.40
60	136.00	6	20	14.24	0.00144	4.01	0.55	1.34
65	133.20	6	20	13.95	0.00144	3.93	0.53	1.31
70	129.00	7	20	13.51	0.00134	3.53	0.52	1.18
75	119.40	6	20	12.50	0.00144	3.52	0.48	1.18
80	114.00	6	20	11.94	0.00144	3.36	0.46	1.12
85	111.40	6	20	11.67	0.00144	3.28	0.45	1.10
90	111.20	7	20	11.64	0.00134	3.04	0.45	1.02

Tabel A4. Data perhitungan CoP dan TSR pada $Re = 6 \times 10^4$

Θ	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	ω (rad/s)	T (Nm)	COP (%)	TSR	COP /COP ₀
TANPA PLAT	276.20	10	75	28.92	0.0067	4.73	0.55	1.00
0	281.80	5	80	29.51	0.0077	5.56	0.57	1.18
5	285.60	10	85	29.91	0.0077	5.64	0.57	1.19
10	292.60	10	90	30.64	0.0082	6.16	0.59	1.30
15	308.60	5	90	32.32	0.0088	6.90	0.62	1.46
20	315.00	5	90	32.99	0.0088	7.05	0.63	1.49
25	315.60	10	95	33.05	0.0088	7.15	0.64	1.51
30	319.00	10	95	33.41	0.0088	7.22	0.64	1.53
35	332.20	15	100	34.79	0.0088	7.43	0.67	1.57
40	346.40	15	100	36.27	0.0088	7.75	0.70	1.64
45	335.40	10	95	35.12	0.0088	7.50	0.67	1.59
50	333.20	10	95	34.89	0.0088	7.45	0.67	1.58
55	313.60	10	100	32.84	0.0093	7.43	0.63	1.57
60	309.00	15	105	32.36	0.0093	7.41	0.62	1.57
65	303.20	10	100	31.75	0.0093	7.18	0.61	1.52
70	301.80	10	90	31.60	0.0082	6.35	0.61	1.34
75	299.40	10	85	31.35	0.0077	5.91	0.60	1.25
80	291.00	10	80	30.47	0.0072	5.36	0.58	1.13
85	289.60	5	75	30.33	0.0072	5.34	0.58	1.13
90	286.40	10	75	29.99	0.0067	4.90	0.58	1.04

Tabel A5. Data perhitungan CoP dan TSR pada $Re = 9 \times 10^4$

Θ	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	ω (rad/s)	T (Nm)	COP (%)	TSR	COP/ COP ₀
TANPA PLAT	359.60	80	180	37.66	0.0103	2.79	0.48	1.000
0	367.40	80	180	38.47	0.0103	2.85	0.49	1.022
5	373.60	60	160	39.12	0.0103	2.90	0.50	1.039
10	387.20	100	200	40.55	0.0103	3.01	0.52	1.077
15	391.80	80	200	41.03	0.0124	3.65	0.52	1.307
20	399.60	60	180	41.85	0.0124	3.72	0.53	1.333
25	404.40	80	200	42.35	0.0124	3.77	0.54	1.349
30	410.40	80	220	42.98	0.0144	4.46	0.55	1.598
35	412.40	80	220	43.19	0.0144	4.48	0.55	1.606
40	417.60	100	240	43.73	0.0144	4.54	0.56	1.626
45	414.20	100	220	43.37	0.0124	3.86	0.55	1.382
50	410.60	100	220	43.00	0.0124	3.83	0.55	1.370
55	408.20	80	200	42.75	0.0124	3.80	0.55	1.362
60	406.20	100	200	42.54	0.0103	3.16	0.54	1.130
65	398.60	80	180	41.74	0.0103	3.10	0.53	1.108
70	395.80	100	200	41.45	0.0103	3.07	0.53	1.101
75	394.20	100	200	41.28	0.0103	3.06	0.53	1.096
80	385.40	80	180	40.36	0.0103	2.99	0.52	1.072
85	376.20	100	200	39.40	0.0103	2.92	0.50	1.046
90	373.40	80	180	39.10	0.0103	2.90	0.50	1.038

Halama ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis, Mukhammad Ubaidillah merupakan anak ketiga dari empat bersaudara, yang lahir pada tanggal 7 Juli 1995 di Kabupaten Pasuruan. Penulis memulai pendidikannya di RA Perwanida (1999-2001). Kemudian melanjutkan pendidikan di SDN Kepulungan 1 (2001-2007), SMPN 1 Pandaan (2007-2010), SMAN 1 Pandaan (2010-2013). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi di S1 Teknik Mesin ITS (2013-2017) melalui SBMPTN jalur tes tulis.

Semasa SMA penulis aktif dalam Ekstrakurikuler Agama Islam SMA N 1 Pandaan (EKSAGIS) sebagai wakil ketua umum (2011-2012). Sedangkan semasa kuliah, Penulis aktif di organisasi mahasiswa Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM-ITS) dan berperan sebagai Ketua LBMM (2016-2017). Prestasi yang pernah diraih semasa SMA yaitu juara 1 Teater tingkat Kabupaten Pasuruan (2012).

Halaman ini sengaja dikosongkan