



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP
PERFORMA TURBIN ANGIN *SAVONIUS*
“Studi Kasus Untuk Rasio Panjang Plat
Pengganggu Relatif Terhadap Diameter Sudu
Turbin $(L/d) = 1,0353$ ”**

**AUDIYATRA AJI RISWANTARBI
NRP 2112 100 057**

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

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF
OBSTACLE PLATE ANGLE IN FRONT OF
RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND
TURBINE PERFORMANCE**

**“Case study for the ratio of length of obstacle
plate relative to the diameter of turbine
(L/d)=1,0353”**

**AUDIYATRA AJI RISWANTARBI
NRP 2112 100 057**

**Adviser
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty Of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute Of Technology
Surabaya 2016**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGGANGGU DI
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP
PERFORMA TURBIN ANGIN *SAVONIUS***

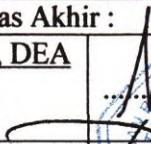
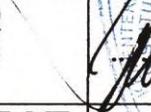
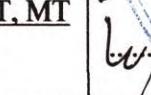
“Studi kasus untuk rasio panjang plat pengganggu relatif terhadap
diameter sudu turbin ($L/d = 1,0353$)”

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

AUDIYATRA AJI RISWANTARBI
NRP. 2112 100 057

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :	
1. <u>Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA</u> (NIP. 196001291987011001)	 (Pembimbing)
2. <u>Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD</u> (NIP. 196412281990031002)	 (Penguji I)
3. <u>Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT</u> (NIP. 197104051997021001)	 (Penguji II)

SURABAYA,
JULI 2016

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGGANGGU DI DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi kasus untuk rasio panjang plat pengganggu relatif terhadap diameter sudu turbin ($L/d = 1,0353$)”

Nama Mahasiswa : Audiyatra Aji Riswantarbi
NRP : 2112 100 057
Jurusan : Teknik Mesin FTI - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstrak

Turbin angin tipe Savonius adalah salah satu turbin angin yang ideal untuk wilayah dengan potensi energi angin seperti di Indonesia. Pada prinsipnya, turbin Savonius bekerja dengan memanfaatkan selisih gaya drag yang dihasilkan dari kedua sudu, yaitu advancing dan returning blade. Pada studi eksperimen ini, sebuah plat pengganggu diletakkan di depan returning blade untuk mengurangi gaya drag pada sudu tersebut, hal ini diharapkan dapat meningkatkan performa dari turbin Savonius yang digunakan.

Untuk meningkatkan performa dari turbin Savonius yang memiliki diameter sudu (D) 60 mm dan tinggi 80 mm, sebuah plat dengan lebar 62,118 mm dan tinggi 150 mm digunakan sebagai sebuah pengganggu yang diletakkan di depan returning blade. Pengganggu ini diposisikan dengan variasi sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Eksperimen ini dilakukan pada wind tunnel subsonic open circuit. Spesifikasi dari wind tunnel yang digunakan yaitu memiliki panjang 2980 mm dengan test section berukuran 304 mm x 304 mm. Kecepatan aliran udara pada wind tunnel dapat diatur pada 8,83 m/s, 11,03 m/s, 13,24 m/s, disesuaikan dengan bilangan Reynolds (Re) = 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 (berdasarkan pada panjang karakteristik $L = 2d-b$, dimana b adalah lebar overlap antara kedua sudu, dan kecepatan aliran udara). Kecepatan

aliran udara diukur dengan menggunakan pitot static tube yang dihubungkan dengan inclined manometer. Kecepatan putar dari turbin diukur dengan tachometer. Torsi statis diukur menggunakan torquemeter, dan yang terakhir daya output dari turbin didapatkan dengan pengukuran tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator yang dihubungkan dengan poros turbin Savonius.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa pemberian plat pengganggu dapat meningkatkan kinerja turbin, hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan Coefficient of Power (CoP) turbin Savonius yang dibandingkan dengan turbin tanpa diberi penghalang. Pada $Re = 6 \times 10^4$, posisi dari plat pengganggu saat $\alpha=35^\circ$ merupakan yang paling efektif untuk meningkatkan performa turbin Savonius yang digunakan pada penelitian ini. Dimana kecepatan putar turbin mencapai 2,6 kali lebih besar dan coefficient of power mencapai 15,8 kali lebih besar dibandingkan turbin Savonius tanpa pemberian plat pengganggu. Sementara itu, torsi statis turbin mencapai 2,52 kali lebih besar dibandingkan dengan torsi statis turbin Savonius tanpa plat pengganggu pada $Re = 9 \times 10^4$ dengan posisi plat pada $\alpha=0^\circ$.

(Kata kunci : performa turbin Savonius, plat datar pengganggu, sudut bukaan plat pengganggu)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF OBSTACLE PLATE ANGLE IN FRONT OF RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE

“Case study for the ratio of length of obstacle plate relative to the diameter of turbine ($L/d = 1,0353$)”

Name : Audiyatra Aji Riswantarbi
NRP : 2112 100 057
Major : Mechanical Engineering FTI – ITS
Adviser : Prof. Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstract

Savonius turbine is one of several types of wind turbines which is ideal for regions with wind energy potential such as in Indonesia. In principle, Savonius turbine works caused by the difference of the drag force generated by its blades, advancing and returning blades. In this experimental study, an obstacle plate is placed in front of the returning blade to reduce the drag force of the blade, it is expected can improve the performance of Savonius turbine used.

In order to increasing the performance of Savonius wind turbine having a diameter D of 60 mm and height h of 80 mm, a plate having a width of 62.118 mm and a height of 150 mm is used as a disturbance located in front of returning blade of turbine. This disturbance is located in various angle of $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. The experiments were carried out in a subsonic open circuit wind tunnel. This facility has a 2980 mm long, with test section 304 mm x 304 mm. The free stream velocity of wind tunnel could be adjusted to 8.83 m/s, 11.03 m/s, 13.24 m/s, corresponding respectively to Reynolds number $Re = 6.0 \times 10^4$, 7.5×10^4 , 9.0×10^4 (based on equivalent length of $L = 2D - b$, where b is the width of overlap of the two turbine blades, and the free stream velocity). The velocity of wind is measured using a pitot-static tube connected to the inclined manometer. The rotation of turbine is

measured by tachometer. The static torque is measured by torquemeter, and finally the power output of turbine is determined by measuring of voltage and electric current resulted by generator connecting to the shaft of Savonius turbine.

The experimental result show that installation of obstacle plate improves the performance of the turbine, it is based on the rise in rotation (n), static torque (T), and Coefficient of Power (CoP) compared with Savonius turbine without any obstacle. For $Re=6.0 \times 10^4$, the position of the obstacle plate at $\alpha=35^\circ$ is the most effective to improve the performance of the Savonius turbine used in this research. Where the rotation is reached 2.6 times greater and the coefficient of power becomes 15.8 times greater than if the Savonius turbine without any obstacle. Meanwhile, the static torque can reach 2.52 times greater than the static torque of the Savonius turbine without any obstacle for $Re=9.0 \times 10^4$ at the position of $\alpha=0^\circ$

(Keyword: Savonius turbine performance, obstacle plate, various angle)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	6
1.5. Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Distribusi Profil Kecepatan Angin di Indonesia.....	9
2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal.....	11
2.3 Turbin Angin <i>Savonius</i>	12
2.4 Koefisien Drag	13
2.5 Persamaan Kontinuitas	15
2.6 Perhitungan Performa Turbin	16
2.6.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis	17
2.6.2 Perhitungan Daya Turbin Berdasarkan Torsi	18
2.6.3 <i>Coefficient of Power</i>	18
2.6.4 <i>Tip Speed Ratio</i>	20
2.7 Bilangan <i>Reynolds</i>	21
2.8 Penelitian Terdahulu.....	22
2.8.1 Perhitungan Turbin Savonius Dengan Pengganggu Aliran.....	22

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Parameter yang Diukur.....	31
3.2. Analisa Dimensi	32
3.2.1. Analisa Dimensi untuk <i>Coefficient of Power</i>	32
3.3. Metode Eksperimen.....	35
3.3.1. <i>Wind Tunnel</i> (Terowongan Angin).....	36
3.3.2. Benda Uji.....	37
3.3.3. Alat Ukur.....	38
3.4 Prosedur Penelitian.....	43
3.5 Flowchart Penelitian.....	45
3.6 Urutan Langkah Penelitian.....	47
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Contoh Perhitungan.....	49
4.1.1 Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	49
4.1.2 Perhitungan <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	51
4.1.3 Perhitungan <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	52
4.1.4 Perhitungan <i>Error</i> Eksperimen (ϵ).....	53
4.2 Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Penggangu dengan bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4	55
4.2.1 Putaran Turbin <i>Savonius</i> (n_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	55
4.2.2 Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	56
4.2.3 <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)	58
4.3 Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> yang Diberikan Plat Datar Penggangu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ pada bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4	59
4.3.1 Putaran Turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai Fungsi Sudut Halang (α).....	59
4.3.2 Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)....	67
4.3.3 <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai Fungsi Sudut Halang (α).....	71

4.3.4 <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
3.1 Kesimpulan.....	81
3.2 Saran.....	82
DAFTAR PUSTAKA	83
LAMPIRAN	85
BIODATA PENULIS	

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Peta Potensi Angin di Indonesia.....	9
Gambar 2.2 Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal. (a) Turbin <i>Savonius</i> ; (b) Turbin <i>Darrieus</i> ; (c) Turbin <i>Giromill</i>	11
Gambar 2.3 Turbin <i>Savonius</i>	12
Gambar 2.4 Persebaran Angin Pada Turbin <i>Savonius</i>	13
Gambar 2.5 Aliran Melewati Sebuah Plat Datar yang Tegak Lurus Terhadap Arah Aliran.....	14
Gambar 2.6 Permodelan Aliran Ketika Melewati Penampang..	15
Gambar 2.7 Faktor Daya Sebagai Fungsi TSR Berbagai Jenis Turbin	21
Gambar 2.8 Skema Alat Penelitian pada Turbin Angin Tipe <i>Savonius</i> dengan Dua Sudu dan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010).....	23
Gambar 2.9 Grafik Hubungan antara <i>Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient (Cp)</i> pada Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Dua Sudu (Mohamed et al, 2010).....	24
Gambar 2.10 Grafik Hubungan antara <i>Speed Ratio</i> dan <i>Power Coefficient (Cp)</i> pada Turbin Angin <i>Savonius</i> dengan Tiga Sudu (Mohamed et al, 2010)	24
Gambar 2.11 Skema Alat Penelitian Optimasi Kinerja Turbin <i>Savonius</i> dengan Diberi Penghalang Berupa Plat Datar dengan Sudut Tertentu (Mohamed et al, 2010).....	25
Gambar 2.12 Grafik Pengaruh <i>Speed Ratio</i> Terhadap (a) <i>Torque Coefficient</i> dan (b) <i>Power Coefficient</i> (Mohamed et al, 2010)	26
Gambar 2.13 Hubungan Daya Input (Kinetik Angin) dengan Daya Rotor (Mekanik Turbin) tanpa <i>circular shield</i> (Haydarul et al, 2013)	27
Gambar 2.14 Hubungan tip speed ratio dengan <i>Cp</i> tanpa <i>circular shield</i> (Haydarul et al, 2013).....	28

Gambar 2.15 Hubungan Daya Input (Kinetik Angin) dengan Daya Rotor (Mekanik Turbin) dengan <i>circular shield</i> (Haydarul et al, 2013)	28
Gambar 2.16 Hubungan tip speed ratio dengan C_p dengan <i>circular shield</i> (Haydarul et al, 2013)	29
Gambar 3.1 Skema Penelitian	31
Gambar 3.2 Skema <i>Wind Tunnel Subsonic</i>	36
Gambar 3.3 Turbin Angin Savonius.....	37
Gambar 3.4 Plat sebagai Pengganggu	38
Gambar 3.5 Tachometer OMEGA seri HHT12	39
Gambar 3.6 Torque meter LUTRON model : TQ-880.....	39
Gambar 3.7 Thermometer	40
Gambar 3.8 Pitot Static Tube	41
Gambar 3.9 Manometer.....	41
Gambar 3.10 Sanwa Multimeter Digital CD-771.....	42
Gambar 3.11 Rangkaian Generator dan Beban Lampu.....	43
Gambar 3.12 Flowchart Pengambilan Data.....	46
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re).....	56
Gambar 4.2 Grafik Torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	57
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re).....	58
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai fungsi sudut halang (α)	60
Gambar 4.5 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut halang (α)	62
Gambar 4.6 posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90°	64
Gambar 4.7 Kontur kecepatan hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	65
Gambar 4.8 Kontur <i>pressure</i> hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	66

Gambar 4.9 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut halang (α).....	67
Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (α)	69
Gambar 4.11 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α).....	71
Gambar 4.12 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re).....	74
Gambar 4.13 Grafik perbandingan <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut halang (α).....	75
Gambar 4.14 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	77
Gambar 4.15 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	79

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Potensi Beberapa Wilayah di Indonesia.....	10
Tabel 2.2 <i>Drag Coefficient</i> untuk Berbagai Bentuk Benda pada $Re \geq 1000$	15
Tabel 3.1 <i>Table Planner</i> Penelitian.....	47

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL DAN SATUAN

D	diameter turbin Savonius (m)
H	tinggi turbin Savonius (m)
A	luas sapuan pada turbin Savonius yang ditabrak oleh angin (m^2)
d	diameter sudu turbin <i>Savonius</i> (m)
L	lebar plat datar pengganggu (m)
T	tinggi plat pengganggu (m)
a	lebar <i>overlap</i> (m)
b	tebal plat penghalang (m)
S	proyeksi lebar plat datar terhadap sudut pada penghalang (m)
α	Sudut penempatan plat datar pengganggu
D	panjang karakteristik turbin Savonius (m)
R	jari-jari turbin Savonius (m)
C_D	koefisien <i>drag</i>
F_D	gaya <i>drag</i> (N)
V	tegangan listrik (volt)
I	arus listrik (ampere)
P	daya (Watt)
CoP	<i>Coefficient of Power</i>
CoP_0	<i>Coefficient of Power</i> standar
n	putaran poros turbin (rpm)
n_0	putaran poros turbin standar (rpm)
T	torsi statis turbin (Ncm)
T_0	torsi statis turbin standar (Ncm)
Re	bilangan Reynolds
ρ	Densitas fluida (kg/m^3)
μ	viskositas fluida (Ns/m^2)
Re	bilangan Reynolds
\dot{m}	laju aliran massa (kg/s)
U_∞	kecepatan <i>freestream</i> (m/s)
TSR	<i>tip speed ratio</i>
ω	kecepatan angular turbin Savonius (rad/s)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

didapatkan 15,8 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa penghalang pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$.

5.2 Saran

Adapun saran perihal eksperimen yang telah dilakukan ini adalah sebagai berikut :

1. Dalam penelitian ini diperlukan rangkaian alat dalam pengukuran torsi dinamis dari turbin angin tipe *Savonius* yang akan dikonversikan menjadi daya *output* sehingga dapat dibandingkan dengan hasil daya *output* yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan rangkaian pembebanan lampu.
2. Dimensi dari turbin angin *Savonius* dalam eksperimen ini terlalu besar sehingga melanggar ketentuan dari penggunaan *windtunnel* yaitu *blockage ratio* sebesar 12%. Hal tersebut menimbulkan efek *blockage* pada rongga *wind tunnel* yang digunakan, maka perlu dilakukan eksperimen ulang dengan mereduksi dimensi turbin *Savonius* ataupun memanfaatkan *windtunnel* dengan rongga yang lebih besar sehingga ketentuan *blockage ratio* masih dalam batas toleransi.

DAFTAR PUSTAKA

- Daryanto, Y., 2007. **Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu**. Balai PPTAGG - UPT-LAGG.
- DESDM. 2005. **Rasio Cadangan Dibanding Produksi Minyak Bumi di Indonesia dalam Kurun Waktu 18 Tahun**. Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Fox, Robert W. Dan Mc.Donald, Alan T. 1998. **Introduction to Fluid Mechanics**. John Wiley and Son, Inc.
- Haydarul, M.H., 2013. Rancang Bangun Turbin Angin Vertikal Jenis Savonius dengan Variasi Jumlah *Blade* Terintegrasi *Circular Shield* untuk Memperoleh Daya Maksimum. **JURNAL TEKNIK POMITS** Vol. 7, No. 7, 1-6.
- Johnson, Gary L. 2001. **Wind Energy Systems**. Wind Energy Systems Electronic Edition:Chapter 1,2,3,4. Manhattan, KS.
- Khan, N.I., Iqbal, M.T., Hinchey, Michael, dan Masek, Vlastimil. 2009. Performance of Savonius Rotor As A Water Current Turbine. **Journal of Ocean Technology** Vol. 4, No. 2, pp. 71-83.
- LAPAN. 2005. **Data Kecepatan Angin di Pulau Jawa**. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional.
- M.H. Mohammed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thevenin. 2010. Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. **Proceedings of ASME-ICFDP 9 Ninth International Congress of Fluid Dynamics and Propulsion**, 3-8.
- M.H. Mohammed, G. Janiga, E. Pap, and D. Thevenin. 2010. Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. **Renewable Energy** 35, 2618-2626.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi manusia di dunia saat ini semakin bertambah dan mendorong pemanfaatan energi fosil secara besar – besaran. Eksploitasi energi fosil berdampak terhadap semakin menipisnya persediaan energi tersebut di muka bumi mengingat pembentukannya yang lama. Berdasarkan penelitian di tahun 2005, cadangan minyak bumi di Indonesia pada tahun 2004 diperkirakan akan habis dalam kurun waktu 18 tahun dengan rasio cadangan dibanding produksi pada tahun tersebut (**DESDM,2005**). Semakin menipisnya energi fosil telah mendorong negara – negara untuk memunculkan energi alternatif guna menanggulangi energi fosil yang semakin menipis dengan memanfaatkan energi angin.

Angin merupakan gerakan udara dari daerah yang memiliki tekanan udara lebih tinggi ke daerah dengan tekanan udara yang lebih rendah dan karena bergerak, angin memiliki energi kinetik. Energi angin dapat dikonversi atau ditransfer ke dalam bentuk energi lain seperti listrik atau mekanik dengan menggunakan kincir atau turbin angin. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angin (**Daryanto, 2007**). Indonesia merupakan negara dengan potensi energi angin yang cukup memadai karena kecepatan angin rata-rata berkisar 3,5 – 7 m/s. Berdasarkan hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) di pulau Jawa kecepatan angin rata-rata berkisar 2,5 – 4,0 m/s (**LAPAN,2005**). Turbin angin tipe *Savonius* adalah salah satu dari sekian jenis turbin angin yang cukup ideal untuk wilayah dengan potensi energi angin seperti di Indonesia.

Turbin angin tipe *Savonius* dikenalkan untuk pertama kali pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia Sigurd J. *Savonius*.

Turbin tersebut merupakan turbin jenis VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau elips) yang disusun sehingga membentuk seperti huruf 'S' ketika dilihat dari atas. Turbin *Savonius* ini dapat berputar disebabkan oleh adanya perbedaan gaya yang diterima oleh masing-masing sudu dari turbin. Gaya yang bekerja pada turbin *Savonius* adalah gaya hambat (*drag*), gaya ini sejajar dengan arah hembusan angin dan bekerja pada permukaan sudu (*blades*) turbin. Sudu dari turbin *Savonius* (*Savonius Blade*) diklasifikasikan menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*. Gaya *drag* yang diterima pada bagian *advancing blade* akan lebih besar dibandingkan dengan yang diterima pada bagian *returning blade*. Gaya yang diterima pada bagian *advancing blade* akan menghasilkan torsi positif dan gaya yang diterima pada bagian *returning blade* akan menghasilkan torsi negatif. Selisih dari torsi tersebut apabila dikalikan dengan kecepatan putar akan menghasilkan daya turbin. Apabila selisih torsi semakin besar, maka daya yang dihasilkan akan semakin besar pula. Salah satu cara untuk memperbesar selisih torsi adalah mengurangi torsi negatif yang bekerja pada *returning blade* dengan cara memperkecil gaya *drag* yang bekerja pada bagian tersebut. Gaya *drag* dapat diperkecil dengan cara menempatkan pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius*.

Terdapat sejumlah penelitian yang telah dilakukan terkait dalam peningkatan performa turbin angin tipe *Savonius*. Pada penelitian **Mohamed et al (2010)** juga mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe *Savonius* menggunakan *software* CFD dan diberi penghalang di depan *returning blade* berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta *speed ratio* (λ) dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/s. Penelitian ini membandingkan antara turbin *Savonius* dengan dua buah sudu dan tiga buah sudu serta diberi penghalang berupa plat datar di depan *returning blade* pada masing-masing turbin. Hasil simulasi didapatkan bahwa *power output coefficient* (C_p) dari turbin *Savonius* dengan dua sudu yang diberi penghalang dapat

meningkat hingga 27,3% pada *speed ratio* (λ) = 0,7 dan besar sudut $\beta = 100,83^\circ$. Sedangkan turbin *Savonius* dengan tiga sudu yang diberi penghalang didapatkan bahwa *power output coefficient* (C_p) meningkat hingga 27,5% pada *speed ratio* (λ) = 0,7 dan besar sudut $\beta = 80,52^\circ$.

Penelitian **Mohamed et al (2010)** mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe *Savonius* menggunakan *software* CFD dan diberi penghalang di depan *returning blade* berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta *speed ratio* (λ) dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/s. Penelitian ini membandingkan antara turbin *Savonius* konvensional tidak diberi penghalang dengan turbin *Savonius* yang telah dimodifikasi sudu turbinnya dengan menempatkan sebuah penghalang di depan *returning blade*. Dari hasil simulasi di dapatkan *power output coefficient* (C_p) dari turbin *Savonius* yang telah dimodifikasi sudunya dan diberi penghalang dapat meningkat hingga 38,9% pada *speed ratio* (λ) = 0,7 dibandingkan dengan turbin *Savonius* konvensional tanpa penghalang.

Penelitian yang lain dari **Haydarul et al (2013)** menggunakan turbin angin tipe *Savonius* yang memiliki variasi jumlah sudu 2, 3, dan 4 dengan atau tidak diberi penghalang berbentuk lengkung (*circular*). Hasil dari penelitian tersebut didapatkan bahwa turbin dengan 2 sudu dengan diberi *circular shield* menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan turbin angin lebih dari 2 sudu. Hal ini dikarenakan *circular shield* mampu menambah dan meningkatkan torsi awal untuk memulai putaran awal turbin dan mampu menambah rpm turbin secara signifikan. Nilai C_p meningkat cukup tinggi dengan rata-rata peningkatan sebesar 80%.

Dalam hal optimalisasi performa dari turbin angin, masih banyak variasi yang dapat dilakukan dalam penelitian. Sehingga dalam penelitian kali ini memiliki fokus pada kenaikan performa turbin angin dengan menempatkan pengganggu berupa sebuah plat datar yang berbentuk persegi di depan *returning blade* turbin angin. Plat datar tersebut dipasang dengan sudut kemiringan

antara 0° sampai dengan 90° pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 .

1.2 Perumusan Masalah

Sudu dari turbin *Savonius* (*Savonius Blade*) diklasifikasikan menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*. Perbedaan yang dapat diamati antara kedua *blade* tersebut terletak pada kelengkungan dari sudu turbin. *Advancing blade* memiliki kelengkungan berbentuk cekung terhadap arah aliran yang seakan menangkap aliran angin dan memutar turbin angin tersebut dengan poros di bagian tengah sebagai sumbu putarnya. Sedangkan bagian *returning blade* memiliki bentuk cembung terhadap arah aliran yang seakan mendefleksikan arah aliran ke sekitarnya. Gaya *drag* yang dihasilkan pada sisi *returning blade* lebih kecil daripada sisi *advancing blade*, sehingga torsi negatif yang dihasilkan oleh *returning blade* lebih kecil bila dibandingkan dengan torsi positif yang dihasilkan *advancing blade* dan akan menyebabkan turbin *Savonius* berputar. Telah banyak penelitian yang dilakukan dalam hal peningkatan efisiensi dari turbin angin tipe *Savonius* yaitu salah satunya dengan cara menempatkan sebuah plat pengganggu di depan bagian *returning blade*.

Penempatan plat pengganggu tersebut dipasang tegak lurus terhadap arah aliran angin dan diberi sudut tertentu. Plat pengganggu tersebut diharapkan dapat memperkecil torsi negatif yang dihasilkan oleh *returning blade* serta sebagai pengarah aliran angin. Aliran angin yang menuju ke bagian *returning blade* akan membentur plat tersebut dan akan di belokkan menuju ke *advancing blade* sehingga gaya *drag* akan meningkat. Ketika hal tersebut diterapkan pada turbin angin tipe *Savonius* yang diberikan penghalang di depan bagian *returning blade*, gaya *drag* yang diterima *returning blade* akan berkurang serta torsi negatif akan berkurang pula, sementara gaya *drag* pada bagian *advancing blade* akan bertambah besar akibat penambahan udara yang diarahkan oleh plat.

Pada penelitian kali ini akan digunakan turbin angin tipe *Savonius* yang diberi pengganggu berupa plat datar berbentuk persegi panjang dengan lebar (L/d) tertentu serta jarak antara *returning blade* turbin angin dengan plat pengganggu yang telah ditentukan. Hal yang akan divariasikan adalah penempatan plat pengganggu dengan sudut yang berbeda-beda. Hipotesa awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Turbin angin yang disusun secara vertikal dan plat datar berbentuk persegi diletakkan di depan *returning blade* sebagai pengganggu aliran angin. Hal ini diharapkan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade* akan berkurang karena bagian depan *returning blade* tertutup oleh plat datar berbentuk persegi dan berakibat pada kenaikan selisih torsi yang dihasilkan sehingga daya yang dihasilkan akan meningkat pula.

2. Variasi sudut halang penempatan plat datar pengganggu sebagai pengarah aliran fluida atau angin sehingga aliran yang menuju ke bagian *advancing blade* akan lebih banyak. Hal tersebut diduga akan berpengaruh terhadap peningkatan gaya *drag* yang diterima *advancing blade*. Sehingga akan berdampak terhadap kenaikan torsi positif yang dihasilkan oleh *advancing blade*.

Untuk membuktikan hipotesa diatas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin tipe *Savonius* dengan diameter sudu turbin (d) = 60 mm serta plat pengganggu berupa plat persegi dengan lebar (L) = 62,118 mm . Sudut penempatan plat pengganggu divariasikan dari 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari studi eksperimental yaitu optimalisasi performa dari turbin angin tipe *Savonius* dan mengetahui pengaruh pemberian plat pengganggu di depan *returning blade* terhadap performa turbin *Savonius*. Plat datar pengganggu berbentuk persegi panjang dengan nilai $L/d = 1,0353$ akan

diletakkan didepan *returning blade* turbin *Savonius* dengan variasi perubahan sudut (α) halang penempatan plat pengganggu dengan bidang tegak lurus aliran fluida. Pada penelitian ini akan dilakukan beberapa pengukuran sebagai berikut :

1. Putaran dari turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
2. Torsi statis dari turbin *Savonius* ketika diberi aliran udara dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
3. Nilai tegangan dan arus dari generator listrik untuk mendapatkan nilai daya yang dihasilkan.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah sehingga bahasan yang akan dilakukan tidak melebar dari tujuan yang ada. Adapun batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada sisi *upstream*, dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .
2. Analisa dilakukan pada turbin angin tipe *Savonius* dengan $L/d = 1,0353$ dimana dalam eksperimen ini digunakan diameter sudu turbin (d) = 60 mm dan pengganggu berupa plat datar berbentuk persegi panjang dengan lebar (L) = 62,118 mm dan tinggi (h) = 150 mm.
3. Variasi sudut halang penempatan plat datar pengganggu yang digunakan sebesar 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° .
4. Analisa aliran yang dilakukan adalah *external flow*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan energi terbarukan khususnya energi angin di Indonesia.
2. Mengetahui hasil konfigurasi yang tepat dengan variasi yang dilakukan.

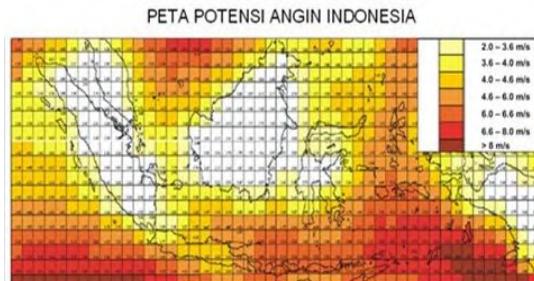
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Distribusi Profil Kecepatan Angin di Indonesia

Matahari merupakan bintang tata surya yang selalu mengirimkan sinar cahaya dan sebagian energi radiasi ke permukaan bumi. Radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi akan berbeda pada suatu tempat dengan yang lainnya. Perbedaan tersebut akan mengakibatkan adanya perbedaan suhu udara. Daerah yang menerima lebih banyak penyinaran matahari akan memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah lainnya sehingga menyebabkan udara bergerak mengembang dan tekanannya menjadi rendah. Sedangkan pada daerah yang bersuhu rendah memiliki tekanan yang tinggi. Dari perbedaan tekanan udara ini akan mengakibatkan terjadinya gerakan udara dari daerah yang tekanan udaranya lebih tinggi ke daerah yang tekanan udaranya lebih rendah. Pergerakan udara ini disebut angin.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak antara 11° Lintang Utara (LU) sampai 6° Lintang Selatan (LS) dan 96° Bujur Barat (BB) sampai 141° Bujur Timur (BT). Berdasarkan letakcastronomis tersebut wilayah Indonesia dilewati oleh garis khatulistiwa yang menyebabkan Indonesia mempunyai iklim tropis dan mendapatkan sinar matahari sepanjang tahun. Gambar dibawah ini merupakan peta persebaran angin di Indonesia.



Gambar 2.1 Peta potensi angin di Indonesia

Dari data Blueprint Energi Nasional Departemen ESDM RI, dapat dilihat bahwa potensi PLTB di Indonesia sangat menarik untuk dikembangkan karena dari potensi sebesar 9,29 GW, baru sekitar 1,6 MW yang dikembangkan, yang berarti baru sekitar 0,017%. Dari peta persebaran diatas dapat dilihat bahwa di daerah sepanjang garis khatulistiwa memiliki kecepatan angin yang rendah dibanding daerah NTT dan Lombok. Iklim tropis ini menyebabkan Indonesia memiliki kecepatan angin yang rendah karena memiliki suhu yang tinggi. Akibatnya potensi angin pada daerah khatulistiwa sangat kecil. Hal ini menjadi masalah bagi pengembangan pembangkit energi angin di Indonesia yaitu pengembangan tidak bisa dilakukan secara optimal. Permasalahan yang dihadapi yaitu rendahnya distribusi kecepatan angin di Indonesia dan besarnya fluktuasi kecepatan angin di Indonesia. Fluktuasi yang dimaksudkan adalah kecepatan angin yang sering melonjak beberapa saat.

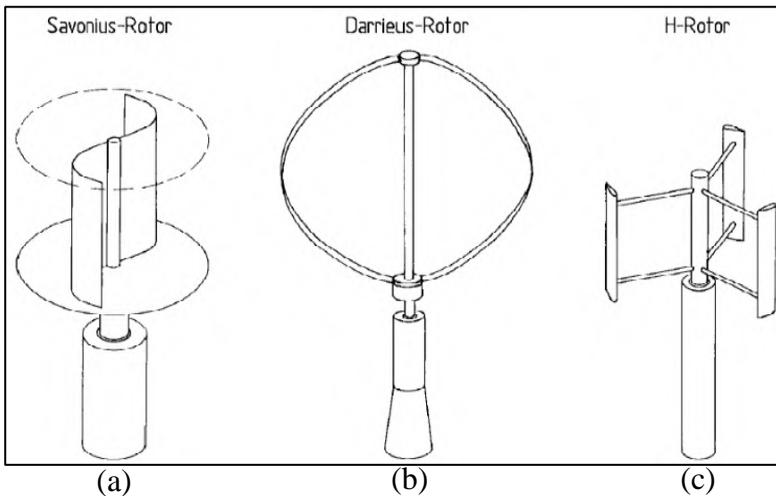
Tabel 2.1 Potensi beberapa wilayah di Indonesia

Resources potential	Wind Speed at 50 m , (m/s)	Wind Power density, at 50 m , (W/m ²)	Number of sites	Provinces
Marginal	3,0 – 4,0	< 75	84	Maluku, Papua, Sumba, Mentawai, Bengkulu, Jambi, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi, North Sumatera, Central Java, Maluku, DIY, Lampung, Kalimantan
Fair	4,0 – 5,0	75 - 150	34	Central and East Java, DIY, Bali, Bengkulu, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi
good	> 5,0	> 150	35	Banten, DKI, Central and West Java, DIY, East and West Nusa Tenggara, South and North Sulawesi, Maluku

Source: LAPAN Wind Data .

2.2 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal (atau TASV) adalah sebuah turbin angin dengan poros atau sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus terhadap arah datangnya aliran angin. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif sehingga sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. Berikut merupakan beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



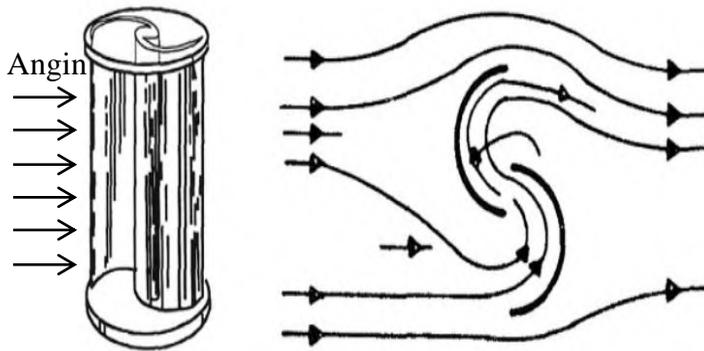
Gambar 2.2 Jenis Turbin Angin Sumbu Vertikal. (a) Turbin *Savonius*; (b) Turbin *Darrieus*; (c) Turbin *Giromill*

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah sehingga sebuah menara tidak diperlukan untuk menyokong dan lebih mudah diakses untuk keperluan *maintenance*, akan tetapi hal tersebut menyebabkan sejumlah desain menghasilkan tenaga putaran yang berfluktuasi. Karena sukar di pasang di atas menara, turbin sumbu tegak sering dipasang lebih dekat ke dasar tempat turbin tersebut diletakkan, seperti tanah atau puncak atap sebuah bangunan. Kecepatan angin

lebih rendah pada ketinggian yang rendah, sehingga energi angin yang tersedia juga akan lebih kecil. Aliran udara mampu menyebabkan berbagai permasalahan yang berkaitan dengan getaran, diantaranya kebisingan dan *bearing wear* yang akan meningkatkan biaya *maintenance* atau mempersingkat umur turbin angin. Jika tinggi puncak atap yang dipasang menara turbin kira-kira 50% dari tinggi bangunan, ini merupakan titik optimal bagi energi angin yang maksimal dan turbulensi angin yang minimal.

2.3 Turbin Angin Savonius

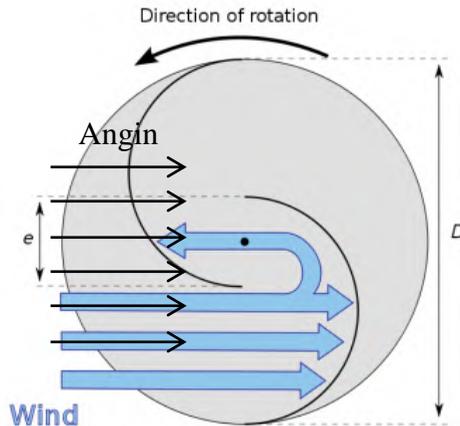
Turbin angin tipe *Savonius* dikenalkan untuk pertama kali pada tahun 1922 oleh insinyur Finlandia Sigurd J. *Savonius*. Turbin tersebut merupakan turbin jenis *VAWT* (*Vertical Axis Wind Turbine*) yang terdiri dari dua sudu berbentuk setengah silinder (atau elips) yang disusun sehingga membentuk seperti huruf 'S' ketika dilihat dari atas seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Turbin *Savonius*

Berdasarkan prinsip aerodinamis, rotor turbin ini memanfaatkan gaya hambat (*drag*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin seperti pada gambar 2.4. Sudu dari turbin *Savonius* (*Savonius Blade*) diklasifikasikan

menjadi dua yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*.



Gambar 2.4 Persebaran angin pada turbin *Savonius*

Koefisien hambat permukaan cekung (*advancing blade*) lebih besar dari pada permukaan cembung (*returning blade*). Oleh karena itu, gaya *drag* yang diterima pada bagian *advancing blade* akan lebih besar dibandingkan dengan yang diterima pada bagian *returning blade* dan akan menyebabkan turbin berputar. Setiap turbin angin yang memanfaatkan potensi angin dengan gaya hambat memiliki efisiensi yang terbatas karena kecepatan sudu tidak dapat melebihi kecepatan angin yang melaluinya.

2.4 Koefisien Drag

Setiap benda yang bergerak melalui sebuah fluida, akan mengalami suatu interaksi melalui tekanan dan tegangan geser. Gaya resultan dalam arah yang sama dengan kecepatan hulu disebut sebagai *drag* (gaya hambat), sedangkan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan hulu disebut sebagai *lift* (gaya angkat). Gaya hambat (*drag*) seringkali ditunjukkan dengan koefisien *drag* (C_D) yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang

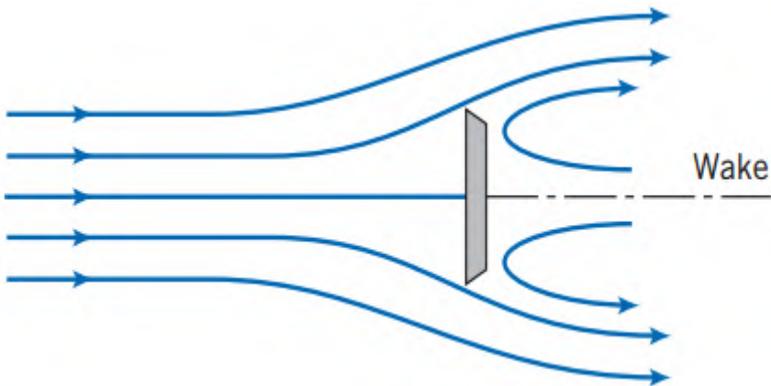
digunakan untuk mengetahui gaya hambat dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 A} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana :

F_D	= Gaya <i>Drag</i>
$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$	= Tekanan dinamis aliran bebas
A	= Luas permukaan benda

Sebagian besar informasi yang tersedia mengenai *drag* (gaya hambat) pada sebuah benda adalah hasil dari eksperimen yang banyak dilakukan dengan *wind tunnel*, *water tunnel*, *towing tank*, dan peralatan lainnya. Hasil dari eksperimen-eksperimen ditunjukkan di beberapa gambar sebagai berikut.



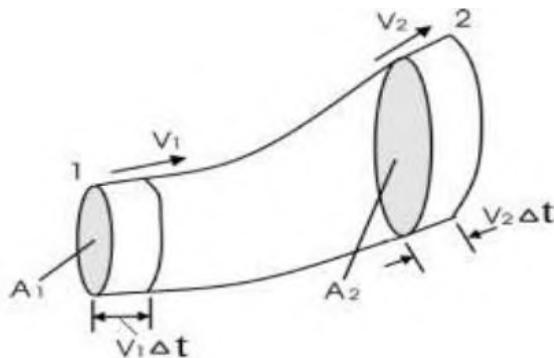
Gambar 2.5 Aliran melewati sebuah plat datar yang tegak lurus terhadap arah aliran

Tabel 2.2 Drag coefficient untuk berbagai bentuk benda pada $Re \geq 1000$ (Fox,1998)

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

2.5 Persamaan Kontinuitas

Massa fluida yang bergerak tidak berubah ketika mengalir. Fakta ini membimbing kita pada hubungan kuantitatif penting yang disebut dengan persamaan kontinuitas (*continuity equation*).



Gambar 2.6 Permodelan aliran ketika melewati penampang

Perhatikan bagian tabung aliran antara dua penampang lintang stasioner dengan luas A_1 dan A_2 (lihat Gambar 2.6) serta laju fluida pada bagian ini berturut-turut adalah v_1 dan v_2 . Apabila aliran terjadi dalam tabung dengan luas penampang yang berbeda, maka kelajuan fluida pada setiap titik pun akan berbeda. Keadaan tersebut bisa diartikan terdapat sejumlah massa dari keadaan 1 berpindah ke keadaan 2 dengan waktu yang diperlukan sebesar Δt .

Ditinjau untuk kasus pada fluida inkompresibel; densitasnya sulit diubah, sehingga densitas (ρ) memiliki besar yang sama disetiap titik. Massa dm_1 yang mengalir ke dalam tabung melalui A_1 dalam waktu dt adalah $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$. Dengan cara yang sama, massa dm_2 yang mengalir ke dalam tabung melalui A_2 dalam waktu yang sama adalah $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$. Dalam aliran tunak (*steady flow*), yaitu pola aliran tidak berubah terhadap waktu, massa total di dalam tabung adalah konstan, sehingga :

$$dm_1 = dm_2$$

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \dots\dots\dots (2.2)$$

Untuk fluida kompresibel; densitasnya berubah, persamaan kontinuitasnya adalah:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \dots\dots\dots (2.3)$$

2.6 Perhitungan Performa Turbin

Prinsip utama dari turbin angin adalah kemampuan untuk memanfaatkan energi angin dan mengonversi menjadi energi mekanik. Performa dari turbin angin secara umum ditunjukkan oleh tiga indikator utama yaitu daya, torsi dan *thrust* yang bervariasi dengan kecepatan angin. Daya menentukan jumlah energi angin yang ditangkap oleh rotor, torsi yang dihasilkan menentukan desain komponen yang akan digerakkan oleh rotor, dan *thrust* memiliki pengaruh besar pada desain struktur menara.

2.6.1 Perhitungan Daya Turbin Teoritis

Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan adanya perbedaan tekanan. Udara akan mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan lebih rendah. Perbedaan tekanan udara dipengaruhi oleh sinar matahari. Daerah yang banyak terkena paparan sinar matahari akan memiliki temperatur yang lebih tinggi daripada daerah yang sedikit terkena paparan sinar matahari. Menurut hukum gas ideal, temperatur berbanding terbalik dengan tekanan, dimana temperatur yang tinggi akan memiliki tekanan yang rendah, dan sebaliknya. Udara yang memiliki massa (m) dan kecepatan (v) akan menghasilkan energi kinetik sebesar:

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \dots\dots\dots (2.4)$$

Massa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan ρ , yaitu:

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \dots\dots\dots (2.5)$$

Sehingga energi kinetik angin yang berhembus dalam satuan waktu (daya angin) adalah:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \times v^2$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dengan:

Ek	= energi kinetic (Joule)
P_w	= daya angin (watt)
ρ	= massa jenis udara (kg/m^3)
A	= luas penampang turbin (m^2)
v	= kecepatan udara (m/s)

Besar daya di atas adalah daya yang dimiliki oleh angin sebelum dikonversi atau sebelum melewati turbin angin. Dari daya tersebut tidak semuanya dapat dikonversi menjadi energi mekanik oleh turbin.

2.6.2 Perhitungan Daya Turbin Berdasarkan Torsi

Torsi merupakan ukuran kuantitatif dari kecendrungan sebuah gaya untuk menyebabkan atau mengubah gerak rotasi dari suatu benda. Pada turbin, besar torsi bergantung pada kecepatan angin dan sudu turbin serta dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = F_D \cdot R \dots\dots\dots (2.7)$$

Berdasarkan persamaan 2.1 dan 2.7 maka Torsi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \dots\dots\dots (2.8)$$

dimana :

- T = Torsi yang dihasilkan dari putaran poros (N.m)
- F_D = Gaya drag (N)
- R = Jari-jari sudu turbin (m)

Torsi dengan kecepatan sudut memiliki hubungan dengan daya turbin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_T = T \cdot \omega \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$P_T = C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \cdot \frac{\pi \cdot n}{60} \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana :

- P_T = Daya yang dihasilkan turbin (watt)
- ω = Kecepatan angular dari turbin (rad/s)
- n = Putaran poros (rpm)
- C_D = Coefficient of Drag
- v = Kecepatan aliran bebas (m/s)
- A = D.H = Luas permukaan turbin (m²)

2.6.3 Coefficient of Power

Desain aerodinamik pada turbin angin memerlukan banyak pengetahuan fisika dasar tentang hukum konversi energi. Seorang perancang akan menghadapi permasalahan tentang hubungan antara bentuk sudu, jumlah sudu, dan sifat-sifat aerodinamik. Seorang ilmuwan Jerman yaitu *Betz* memudahkan

teori momentum pada sudu turbin dengan cara pemodelan aliran dua dimensi. Gerakan dari angin ini akan menggerakkan sudu sehingga timbul gerak putar pada sudu turbin.

Secara teori momentum, *coefficient of power* dari turbin harus lebih kecil daripada nilai yang ditentukan oleh Betz yaitu sekitar 0,593 dan hal tersebut disebabkan oleh adanya *losses* pada mekanisme gerak turbin angin. *Coefficient of Power (CoP)* adalah perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh gaya hambat pada aliran udara terhadap daya yang dihasilkan secara mekanik pada sudu akibat gaya angin. Secara matematis, hubungan ini dapat dituliskan:

$$CoP = \frac{P_T}{P_w}$$

$$CoP = \frac{C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \cdot \frac{\pi \cdot n}{60}}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

$$CoP = \frac{C_D \cdot R \cdot \pi \cdot n}{30 v} \dots\dots\dots (2.12)$$

Daya sesungguhnya pada turbin juga dapat dihitung berdasarkan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin. Hubungan antara tegangan (V) dan arus (I) dapat dituliskan pada persamaan 2.13 dibawah ini :

$$P_G = V \cdot I \dots\dots\dots (2.13)$$

Sehingga pada studi eksperimen ini *Coefficient of Power (CoP)* yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$CoP = \frac{P_G}{P_w} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$CoP = \frac{V \cdot I}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dari persamaan 2.15, maka untuk daya *riil* yang dihasilkan turbin dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_R = CoP \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \dots\dots\dots (2.16)$$

2.6.4 Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar turbin terhadap kecepatan angin. *TSR* dilambangkan dengan λ .

$$TSR = \frac{\omega R}{v_w} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan:

- TSR = *tip speed ratio*
- ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)
- R = jari-jari turbin (m)
- v_w = kecepatan angin (m/s)

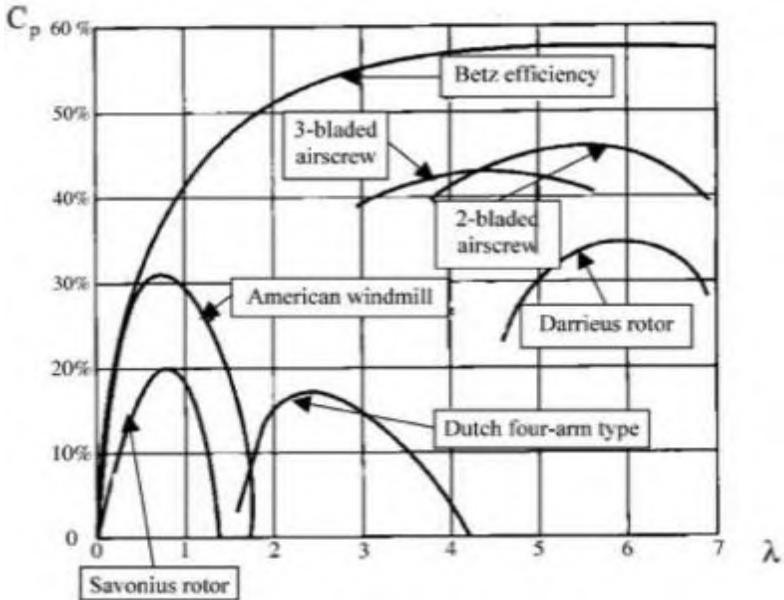
Selain menggunakan persamaan (2.17), *TSR* juga dapat diperoleh dari persamaan:

$$TSR = \frac{\text{blade tip speed}}{v_w} \dots\dots\dots (2.18)$$

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

$$\text{Blade tip speed} = \frac{\text{rotational speed (rpm)} \times \pi \times D}{60} \dots\dots\dots (2.19)$$

Karena setiap tipe turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda-beda, maka faktor daya sebagai fungsi dari *TSR* juga berbeda sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 2.7 berikut:



Gambar 2.7 Faktor daya sebagai fungsi *TSR* berbagai jenis turbin (Khan, 2009)

2.7 Bilangan Reynolds

Pada aliran *incompressible*, pembagian aliran *laminar* atau *turbulent* dapat dinyatakan dengan bilangan tak berdimensi yaitu bilangan *Reynolds*. Jenis lapis batas pada aliran udara yang mengalir suatu obyek juga sangat ditentukan oleh bilangan *Reynolds* (*Re*). Hal ini dapat dijelaskan bahwa dalam lapis batas, gaya *viscous* dan gaya inersia sangat penting. Sementara bilangan *Reynolds* sendiri menunjukkan rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \dots\dots\dots (2.20)$$

dimana,

$$\text{Gaya Inersia} = \rho \times A = \rho \cdot v_{\infty}^2 \cdot L^2 \dots\dots\dots (2.21)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot v_{\infty}}{L}\right)L^2 \dots\dots\dots (2.22)$$

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot v_{\infty}}{L}\right)L^2} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots (2.23)$$

dimana,

ρ = Densitas fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan *free stream* fluida (m/s)

L = Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)

μ = Viskositas dinamis fluida (N.s/m^2)

Dalam studi eksperimen ini panjang karakteristik yang dimaksud adalah diameter turbin (D) dengan persamaan $D=2d-a$, dimana d =diameter sudu turbin dan a =lebar *overlap* antara kedua sudu turbin. Maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

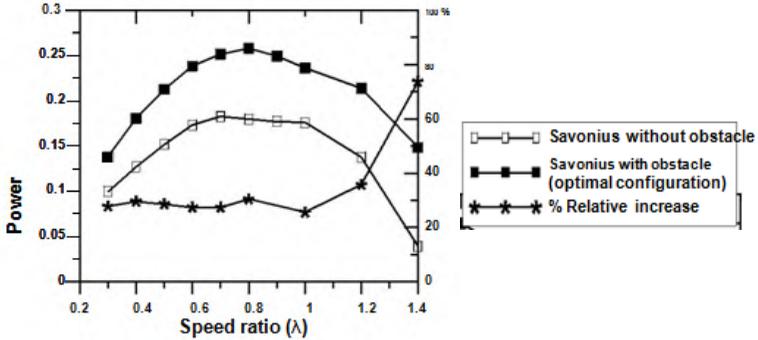
$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{\rho \cdot v \cdot (2d-a)}{\mu} \dots\dots\dots (2.24)$$

2.8 Penelitian Terdahulu

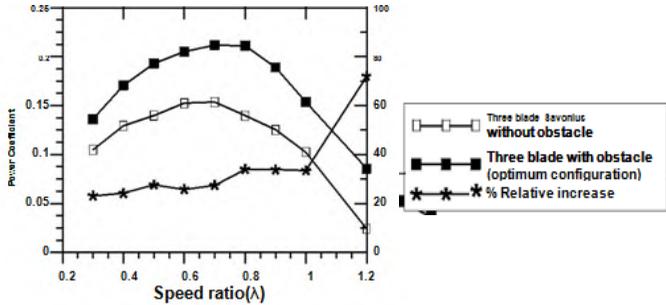
Dalam melakukan studi eksperimen ini, adapun beberapa referensi dari penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dan menunjang penelitian yang akan dilakukan. Beberapa penelitian tersebut yang akan dijabarkan antara lain

2.8.1 Penelitian Turbin Savonius Dengan Pengganggu Aliran

Penelitian dari **Mohamed et al (2010)** mengenai peningkatan performa dari turbin angin tipe *Savonius* menggunakan *software* CFD dan diberi penghalang di depan *returning blade* berupa plat datar dengan penempatan besar sudut (β) serta *speed ratio (TSR)* dengan kecepatan aliran angin (U) sebesar 10 m/ Simulasi ini membandingkan antara turbin *Savonius* dengan dua sudu dan tiga sudu serta masing-masing dengan atau tanpa diberi pengganggu.

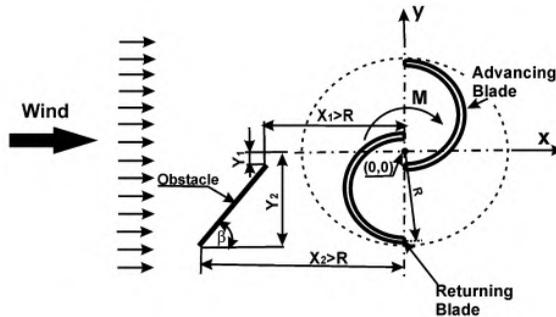


Gambar 2.9 Grafik hubungan antara *speed ratio* dan *power coefficient (CoP)* pada turbin angin Savonius dengan dua sudu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2.10 Grafik hubungan antara *speed ratio* dan *power coefficient (CoP)* pada turbin angin Savonius dengan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

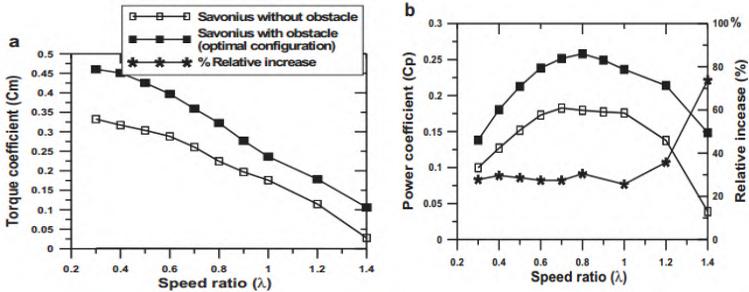
Penelitian lain untuk meningkatkan performa turbin Savonius dari Mohamed et al, 2010 diberi penghalang di depan *returning blade* berupa plat datar dengan sudut benda penghalang (β). Variasi yang digunakan adalah nilai *speed ratio (TSR)* pada rentang 0,3 – 1,4. Data yang diambil untuk mendukung penelitian ini adalah nilai *torque coefficient (Cm)* dan *power coefficient (CoP)*.



Gambar 2.11 Skema alat penelitian optimasi kinerja turbin Savonius dengan diberi penghalang berupa plat datar dengan sudut tertentu (Mohamed et al, 2010)

Hasil yang didapatkan tertera pada gambar 2.12 (a) dan (b). Pada gambar 2.12 (a) data grafik nilai C_m terhadap variasi *speed ratio* ditunjukkan besar C_m semakin menurun ketika *speed ratio* semakin tinggi. Pengaruh benda penghalang menghasilkan nilai C_m yang lebih besar dibandingkan konfigurasi turbin Savonius tanpa penghalang. Nilai C_m terbukti meningkat sebesar 0,068 dengan menggunakan konfigurasi benda penghalang.

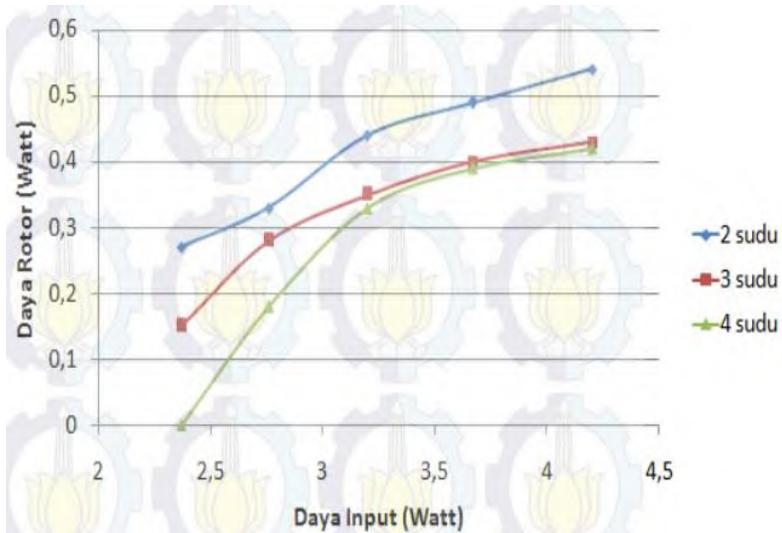
Gambar 2.12 (b) data grafik nilai CoP terhadap perubahan *speed ratio* menunjukkan adanya pengaruh kenaikan besar CoP akibat adanya benda penghalang. Nilai CoP akibat adanya benda penghalang mengalami kenaikan secara keseluruhan sebesar 27,3%. Konfigurasi optimal didapatkan pada sudut ($\beta = 100,83^\circ$) dengan besar $CoP = 0,2503$.



Gambar 2.12 Grafik pengaruh *speed ratio* terhadap (a) *torque coefficient* dan (b) *power coefficient* (Mohamed et al, 2010)

Dalam penelitian oleh Haydarul et al (2013), dilakukan studi performansi secara eksperimental turbin angin tipe *Savonius* dengan variasi jumlah sudu yang berbeda (2, 3, dan 4 buah sudu), sumber energi angin yang digunakan antara 3,8-4,6 m/s dengan resolusi 0,2 m/s, serta dengan atau tanpa *circular shield*.

Dari eksperimen yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut yaitu, turbin konvensional 2 sudu dengan adanya *circular shield* memperlihatkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan turbin angin lebih dari 2 sudu dan *circular shield* mampu menambah dan meningkatkan torsi awal untuk memulai putaran awal turbin dan mampu menambah rpm turbin secara signifikan. Nilai *CoP* meningkat cukup tinggi rata-rata peningkatan *CoP* sebesar 87%

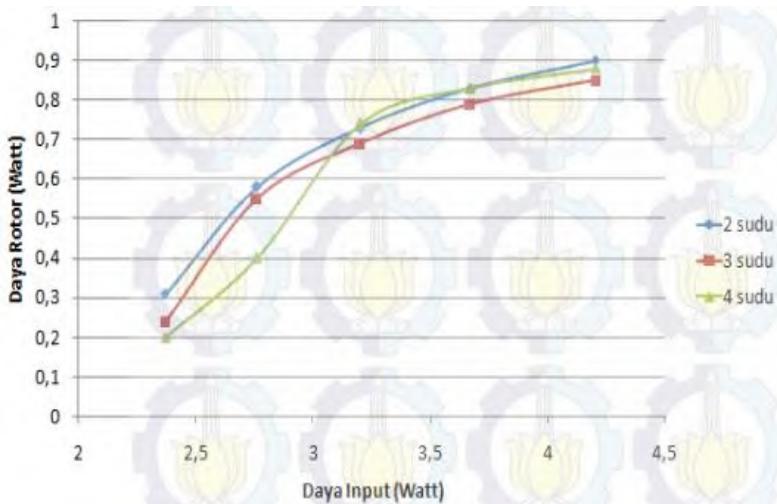


Gambar 2.13 Hubungan Daya Input (Kinetik Angin) dengan Daya Rotor (Mekanik Turbin) tanpa *circular shield* (Haydarul et al, 2013)

Dari gambar 2.13 diatas, dapat diamati bahwa turbin angin Savonius konvensional (2 sudu) mampu mengekstraksi daya input yang dikenakan padanya menjadi daya mekanik rotor (output) lebih baik dibandingkan dengan yang lain. Hasil daya ini menunjukkan nilai koefisien daya (CoP) akan menurun yaitu pada daya lebih dari 3,2 watt grafik cenderung semakin horisontal. Untuk lebih jelasnya, berikut pada gambar 2.14 memperlihatkan bagaimana bentuk hubungan TSR dan CoP .

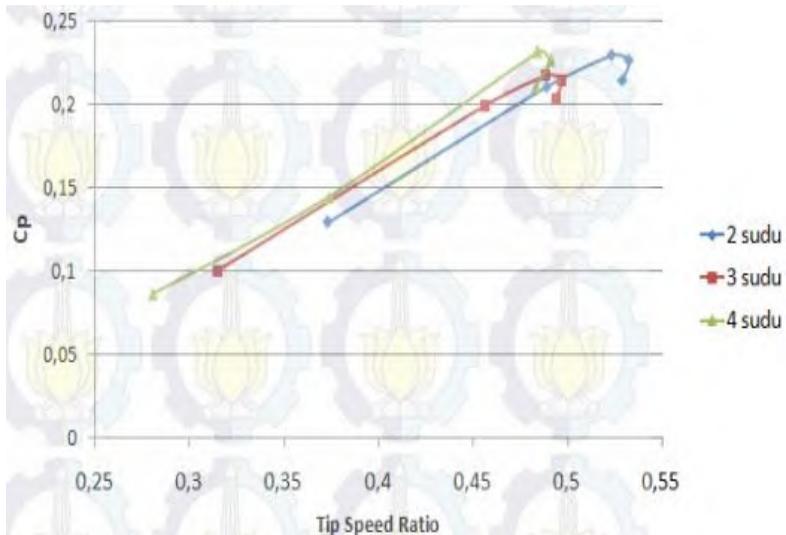


Gambar 2.14 Hubungan tip speed ratio dengan CoP tanpa *circular shield* (Haydarul et al, 2013)



Gambar 2.15 Hubungan Daya Input (Kinetik Angin) dengan Daya Rotor (Mekanik Turbin) dengan *circular shield* (Haydarul et al, 2013)

Dari gambar 2.15 diatas, sama seperti hasil tanpa *circular shield*, dapat diamati bahwa turbin angin Savonius konvensional (2 sudu) mampu mengekstraksi daya input yang dikenakan padanya menjadi daya mekanik rotor (output) lebih baik dibandingkan dengan yang lain.



Gambar 2.16 Hubungan tip speed ratio dengan *CoP* dengan *circular shield* (Haydarul et al, 2013)

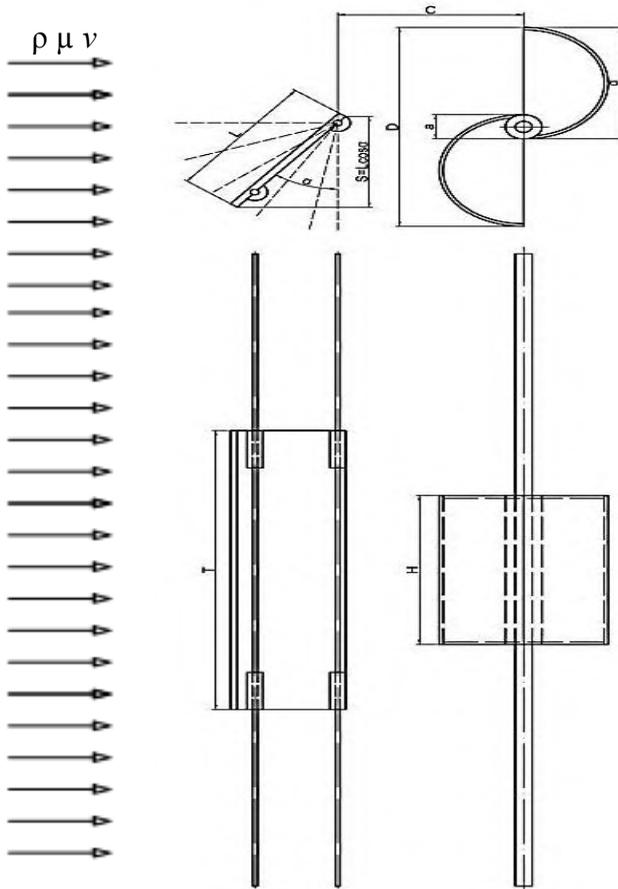
Dari gambar 2.16 nilai *CoP* pada 3 data terakhir menurun. Hal itu saat nilai daya rotor mulai cenderung melandai pada gambar 2.15 (3 data terakhir). Pada kondisi tersebut, penambahan kecepatan angin tidak sebanding dengan penambahan kecepatan putar rotor yang terjadi. Sehingga berhubungan langsung dengan *CoP*, penambahan energi *input* hanya menambah sedikit energi *output*. Dengan penggunaan *circular shield*, secara rata-rata *CoP* dari turbin Savonius konvensional tetap terbaik.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Parameter yang diukur

Pada penelitian ini, dapat terlihat skema alat penelitian dan parameter yang akan dilakukan pengukuran seperti pada gambar 3.1 berikut



Gambar 3.1 Skema Penelitian

1. ρ : Massa jenis fluida udara (kg/m^3)
2. μ : Viskositas udara (N.s/m^2)
3. v : Kecepatan udara (m/s)
4. α : Sudut penempatan plat datar pengganggu
5. D : Panjang karakteristik (m)
6. d : Diameter sudu turbin (m)
7. C : Jarak antara poros turbin dengan poros penghalang (m)
8. a : lebar *overlap* antara kedua buah sudu turbin (m)
9. L : Lebar plat datar pengganggu (m)
10. S : Proyeksi lebar plat datar terhadap sudut pada penghalang (m)
11. H : Tinggi turbin Savonius (m)
12. T : Tinggi plat datar penghalang (m)

3.2 Analisa Dimensi

Pada penelitian ini diperlukan perhitungan analisa dimensi untuk mengetahui parameter pengujian yang berpengaruh pada karakteristik aliran fluida yang disebabkan oleh pemberian benda pengganggu berupa plat datar.

3.2.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Langkah-langkah analisa dimensi yaitu sebagai berikut :

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

$$P = f(\rho, \mu, V, D, L, S, H, T)$$

Jumlah parameter (n) = 9 parameter

Parameter-parameter tersebut adalah :

P = Power, J/s

ρ = densitas udara, kg/m^3

μ = viskositas absolut udara, N.s/m^2

V = kecepatan aliran udara, m/s

D = diameter turbin angin, m

L = lebar plat datar pengganggu, m

S = proyeksi lebar plat datar terhadap sudut pada penghalang ($S = L \cdot \cos\alpha$), m

H = tinggi turbin Savonius, m

T = tinggi plat datar penghalang, m

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	V	D	L	$S=L\cos\alpha$	H	T
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L

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

Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan. Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = $n-m = 9 - 3 = 6$ grup tanpa dimensi.

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

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

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

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

diperoleh :

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

sehingga :

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

atau

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

ii. Dengan cara yang sama diperoleh :

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

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

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

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

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

6. Evaluasi grup tanpa dimensi yang dihasilkan dengan menggunakan dimensi primer yang lain.

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2} = \frac{F L}{t} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t^3}{L^3} \frac{1}{L^2} = 1$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D} = \frac{F t}{L^2} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t}{L} \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_3 = \frac{S}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_4 = \frac{L}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_5 = \frac{H}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

$$\pi_6 = \frac{T}{D} = L \frac{1}{L} = 1$$

Dari analisa dimensi diatas diperoleh grup tak berdimensi sebagai berikut :

π_1 = *Coefficient of Power*

π_2 = bilangan *Reynolds*

π_3 = rasio perubahan sudut penempatan plat pengganggu dengan diameter turbin angin

π_4 = rasio proyeksi lebar plat pengganggu dengan diameter turbin angin

π_5 = rasio tinggi turbin angin dengan diameter turbin angin

π_6 = rasio tinggi plat datar pengganggu dengan diameter turbin angin

Hubungan antara grup tak berdimensi sebagai berikut :

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

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_1 \left(\frac{\mu}{\rho V D}, \frac{S}{D}, \frac{L}{D}, \frac{H}{D}, \frac{T}{D} \right)$$

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

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

Atau

$$C_{op} = f_3 (Re, \alpha)$$

3.3 Metode eksperimen

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

3.3.1. Wind Tunnel (Terowongan Angin)

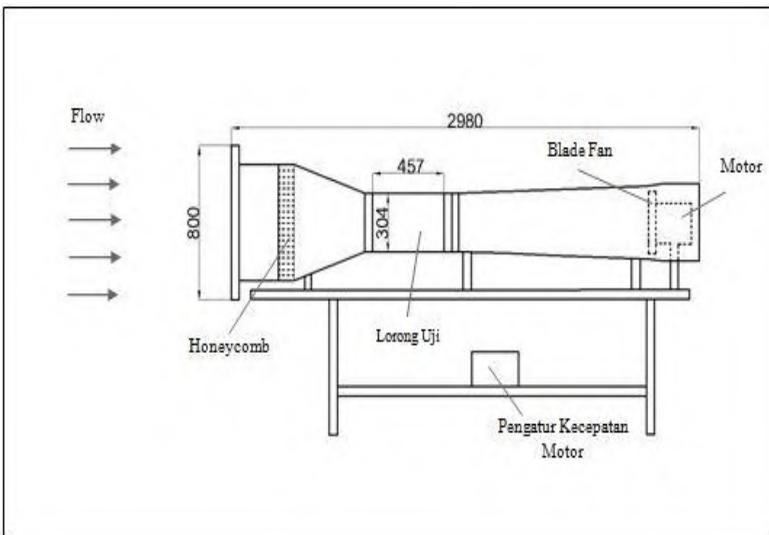
Pada penelitian ini menggunakan wind tunnel untuk menguji benda kerja dalam skala model. Hal ini dikarenakan dalam pengujian dengan ukuran yang sebenarnya membutuhkan biaya yang tidak sedikit. Pengujian dengan skala model dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi-kondisi yang mendekati kenyataan, sehingga hasil yang didapat cukup akurat dan sesuai yang diharapkan.

Spesifikasi Wind Tunnel

Jenis wind tunnel : *subsonic, open circuit wind tunnel*

Bentuk saluran uji : penampang segi 8

- Panjang: 457 mm
- Tinggi : 304 mm
- Lebar : 304 mm
- Kecepatan maksimal : 20 m/s



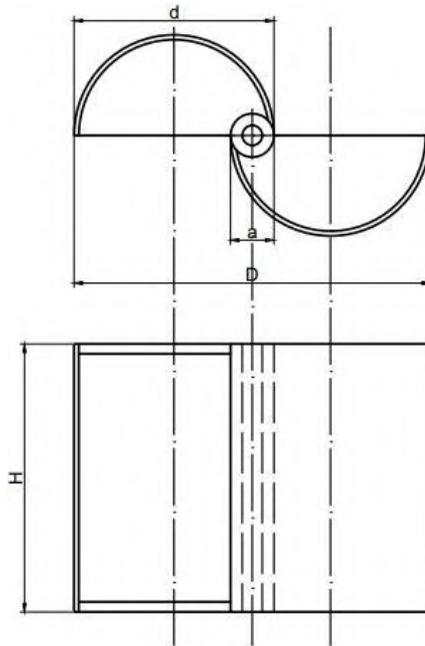
Gambar 3.2 Skema *Wind Tunnel Sub Sonic*

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 :

- Diameter sudu turbin (d) : 60 mm
- Tinggi (H) : 80 mm
- Diameter turbin (D) : 106 mm
- Overlap diameter (a) : 14 mm

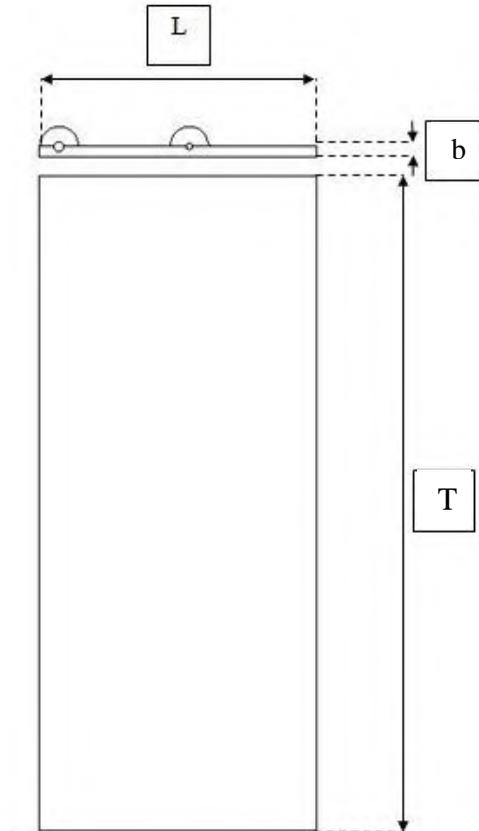


Gambar 3.3 Turbin Angin Savonius

b. Profil plat datar pengganggu sebagai berikut :

- Lebar (L) : 62,118 mm
- Tinggi (T) : 150 mm

- Tebal plat (b) : 3 mm



Gambar 3.4 Plat sebagai Pengganggu

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.

- Tachometer

Tachometer merupakan alat ukur digital yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek.

Tachometer yang digunakan pada penelitian ini yaitu ***Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer OMEGA*** seri HHT12 dengan akurasi pembacaan 0.01% atau ± 1 digit.



Gambar 3.5 Tachometer OMEGA seri HHT12

b. Torque meter

Torque meter merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi dari suatu objek. Torque meter yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.



Gambar 3.6 Torque meter LUTRON model : TQ-8800

c. Thermometer



Gambar 3.7 Thermometer

Thermometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur temperatur udara pada area *test section*, dan juga dipakai dalam penentuan densitas dan viskositas absolut udara.

d. *Pitot Static Tube*

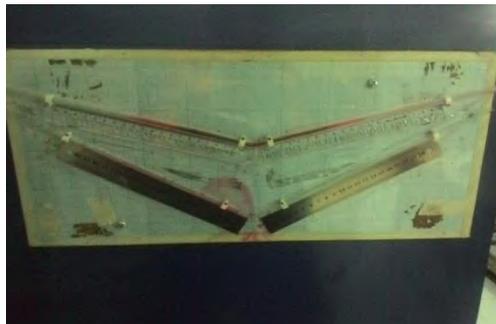
Pitot static tube digunakan untuk mengukur tekanan stagnasi dan tekanan statis aliran yang nantinya akan dikonversi menjadi kecepatan aliran udara pada *wind tunnel*. *Pitot static tube* yang digunakan pada studi eksperimen ini terlihat seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Pitot Static Tube*

e. *Manometer*

Manometer merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur tekanan udara di dalam ruang tertutup. Manometer yang digunakan pada penelitian ini seperti yang terlihat pada gambar 3.9 dengan kemiringan 15° . Fluida kerja yang digunakan yaitu *red oil* dengan *specific gravity* 0,827.



Gambar 3.9 *Manometer*

f. Multi Meter

Multi meter merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur tegangan, hambatan, dan arus listrik.

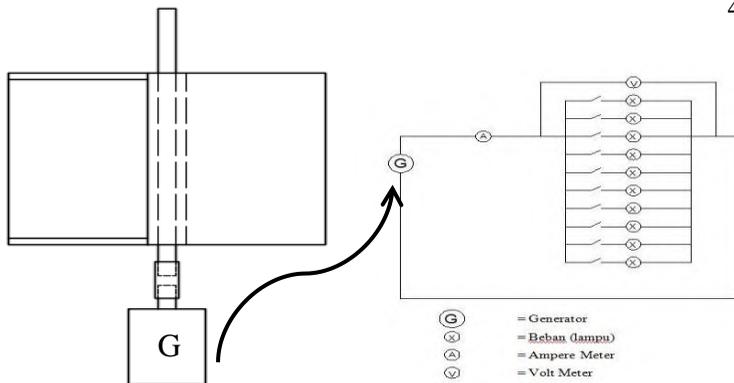
Multi meter yang digunakan pada penelitian ini yaitu **Sanwa Multimeter Digital CD-771** dengan ketelitian 0.1% atau ± 1 digit.



Gambar 3.10 Sanwa Multimeter Digital CD-771

g. Pengukuran daya *output* turbin

Pada studi eksperimen ini untuk mengukur daya *output* dari turbin Savonius digunakan sebuah rangkaian elektronik. Poros turbin Savonius akan dihubungkan dengan poros generator listrik menggunakan *flexible coupling*. *Output* dari generator listrik akan diteruskan untuk menhidupkan beban beberapa lampu yang dipasang secara paralel. Pada rangkaian nantinya akan diukur nilai tegangan (Volt) dan arus listrik (Ampere) yang akan digunakan dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai daya *output* turbin. Skema generator dan rangkaian beban dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3.11 Rangkaian Generator dan Beban Lampu

3.4 Prosedur Penelitian

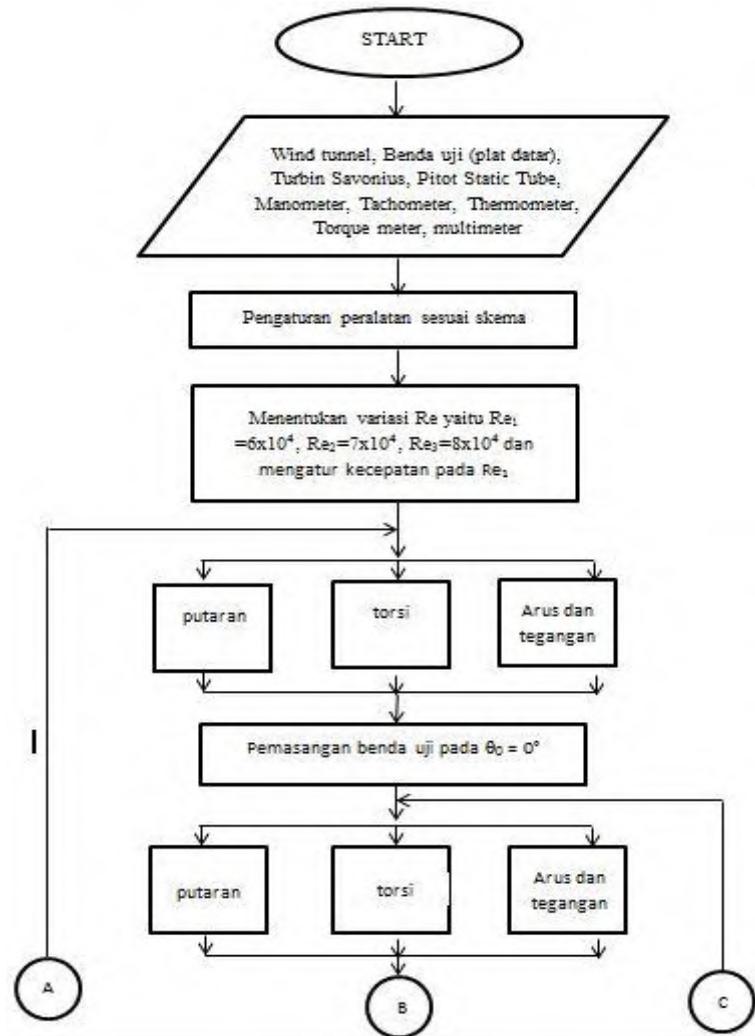
Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pengambilan data pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

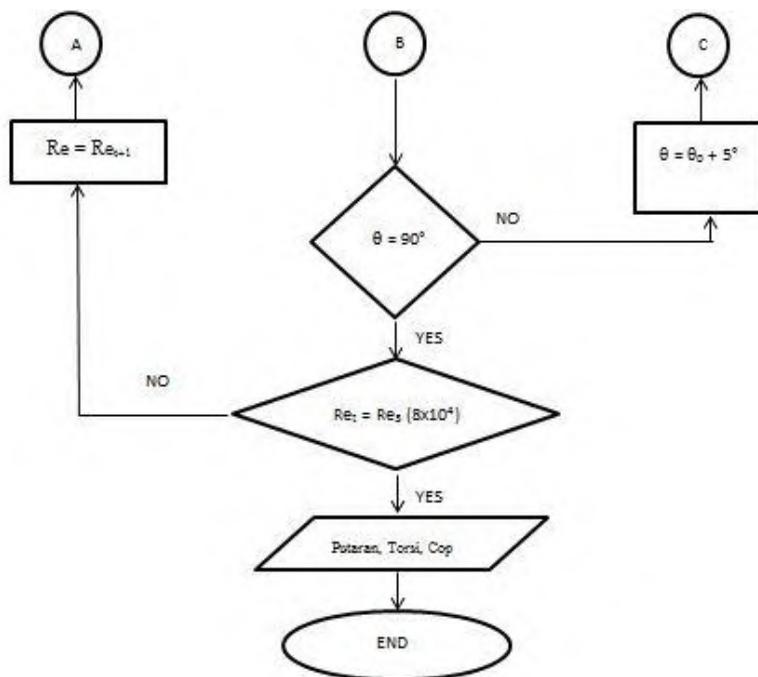
1. Perencanaan peralatan yang akan digunakan.
2. Pemasangan benda uji pada *test section*.
3. Menyalakan *fan* dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan *inverter* sehingga didapatkan nilai kecepatan dalam *test section* sesuai dengan yang diharapkan.
4. Melakukan pengukuran temperatur dan kecepatan angin dengan menggunakan *Thermometer* dan *Pitot Tube* sehingga diperoleh bilangan Reynolds 6×10^4 .
5. Melakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan *Tachometer*.
6. Melakukan pengukuran torsi dengan menggunakan *Torque meter*.
7. Sambungkan poros turbin *Savonius* dengan generator listrik.
8. Melakukan pengukuran tegangan dan hambatan listrik pada generator menggunakan Multi meter.
9. Mematikan *fan*.
10. Mengulangi langkah 3 sampai 9 dengan merubah bilangan Reynolds menjadi $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4

11. Memasang plat pengganggu di depan *returning blade* dengan sudut 0° terhadap arah aliran fluida.
12. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan merubah sudut plat pengganggu sebesar 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , dan 90° .
13. Mematikan *fan*.
14. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi) dan menyajikan dalam bentuk grafik *Coefficient of Power (Cop)* terhadap sudut plat pengganggu.

3.5 Flowchart Penelitian

Urutan langkah pengambilan data dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :





Gambar 3.12 Flowchart pengambilan data

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab 4 ini berisi tentang analisa dan pembahasan terhadap data hasil eksperimen pada turbin *Savonius* dengan atau tanpa menggunakan plat datar pengganggu dalam upaya peningkatan performa dari turbin *Savonius* sendiri.

4.1 Contoh Perhitungan

4.1.1 Perhitungan Bilangan *Reynolds*

✓ massa jenis udara (ρ)

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

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

karena $V = \frac{m}{\rho}$, maka persamaan 4.1 berubah menjadi

$$\frac{P_1 \times m_1}{T_1 \times \rho_1} = \frac{P_2 \times m_2}{T_2 \times \rho_2}$$

dimana :

P_1 = tekanan absolut udara pada saat keadaan standar = 1,01325 N/m²

P_2 = tekanan absolut udara pada saat pengujian

m_1 = massa udara pada keadaan standar

m_2 = massa udara pada saat pengujian

T_1 = temperatur udara standar = 288,2 K

T_2 = temperatur udara ruangan = 26°C = 299 K

ρ_1 = massa jenis udara pada saat keadaan standar = 1,225 kg/m³

ρ_2 = massa jenis udara pada saat pengujian

Bila keadaan standar dan keadaan pengujian berada pada ketinggian yang sama, maka :

$$P_1 = P_2$$

Dan karena massa udara pada keadaan standar dan pada keadaan pengujian itu sama, maka :

$$m_1 = m_2$$

Dari batasan tersebut, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2}$$

$$\rho_2 = \frac{288,2K \times 1,225 \frac{kg}{m^3}}{299K} = 1,18 \frac{kg}{m^3}$$

✓ **viskositas absolut udara (μ)**

Untuk perhitungan viskositas absolut udara digunakan persamaan Sutherland, yaitu :

$$\mu_2 = \frac{b \times (T_2)^{0,5}}{1 + \frac{S}{T_2}} \quad (4.2)$$

dimana:

$$b = 1,458 \times 10^{-6} \text{ Kg/m.s.K}^{0,5}$$

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

sehingga:

$$\mu_2 = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}} \times (299\text{K})^{0,5}}{1 + \frac{110,4\text{K}}{299\text{K}}} = 1,84 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$$

✓ **kecepatan aliran fluida**

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan fluida :

$$U_\infty = \frac{\text{Re} \times \mu}{\rho_2 \times D} = \frac{90000 \times 1,8413 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,106\text{m}} \quad (4.3)$$

$$U_\infty = 13,24 \text{ m/s}$$

4.1.2 Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)*

Sebagai contoh perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* ini, maka diambil data hasil pengukuran pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 . Perhitungan *Coefficient of Power (CoP)* didapatkan dari persamaan 2.14 sebagai berikut

$$C_{op} = \frac{P_G}{P_w}, \text{ dimana} \quad (4.4)$$

P_G didapatkan dari daya mekanis rotor turbin yang dihitung dari tegangan (V) dan arus (I) *output* dari generator listrik yang diputar oleh poros turbin. Adapun nilai P_G tersebut dapat dihitung sebagai berikut

$$P_G = V \times I \quad (4.5)$$

dimana :

V= tegangan yang dihasilkan turbin *Savonius* (Volt)

I = arus listrik yang dihasilkan turbin *Savonius* (Ampere)

Sedangkan daya teoritis (P_W) didapatkan dari energi aliran angin sesuai dengan persamaan 2.6 sebagai berikut :

$$P_W = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (4.6)$$

Dimana :

ρ = massa jenis aliran fluida (kg/m^3)

A = luas penampang turbin (m^2)

v = kecepatan aliran fluida (m/s)

Pada penelitian ini besar luasan A ditentukan sebagai

$$\begin{aligned} A &= (2D-b) \times H \\ &= (2(0,06) - 0,014) \times 0,08 \\ &= 8,48 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Maka nilai dari *Coefficient of Power* (CoP) pada pengukuran bilangan *Reynolds* 9×10^4 dan besar $\alpha = 35^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} CoP &= \frac{V \times I}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \\ CoP &= \frac{1,49 \text{ Volt} \times 0,0818 \text{ A}}{\frac{1}{2} \left(1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times (0,00848 \text{ m}^2) \times (13,24^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3})} \\ &= 0,010489 \\ &= 1,05 \% \end{aligned}$$

4.1.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR)

Sebagai contoh perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR), maka diambil data hasil pengukuran pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 .

Perhitungan *Tip Speed Ratio (TSR)* didapatkan dari persamaan 2.17 sebagai berikut

$$TSR = \frac{\omega R}{v_w} \quad (4.7)$$

dimana,

$$\begin{aligned} TSR &= \text{tip speed ratio} \\ \omega &= \text{kecepatan sudut turbin (rad/s)} \\ R &= \text{jari-jari turbin (m)} \\ v_w &= \text{kecepatan angin (m/s)} \end{aligned}$$

Sehingga nilai *Tip Speed Ratio (TSR)* pada pengukuran bilangan *Reynolds* 9×10^4 dan besar $\alpha = 35^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} TSR &= \frac{\frac{2\pi}{60} \cdot 2068,38 \times 0,053 \text{ m}}{13,24 \text{ m/s}} \\ TSR &= 0,87 \end{aligned}$$

4.1.4 Perhitungan *Error* Eksperimen (ε)

Sebagai contoh perhitungan *Error* Eksperimen (ε), maka diambil data hasil pengukuran torsi statis (T_o) tanpa penghalang pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Perhitungan *Error* Eksperimen (ε) didapatkan dari persamaan sebagai berikut

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_t} \times 100\% \quad (4.8)$$

$$\frac{|T_R - T_t|}{T_t} \times 100\%$$

dimana,

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{error eksperimen} \\ \Delta T &= \text{Selisih antara torsi statis pengukuran dengan} \\ &\quad \text{torsi statis perhitungan (N.cm)} \\ T_R &= \text{torsi statis pengukuran (N.cm)} = 1,6 \text{ N.cm} \end{aligned}$$

$$T_t = \text{torsi statis perhitungan (N.cm)}$$

Nilai T_R didapatkan melalui pengukuran menggunakan *torquemeter*, sedangkan T_t didapatkan melalui perhitungan teoritis selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dengan *returning blade* yang kemudian dikalikan dengan jari-jari turbin. Adapun nilai T_t tersebut dapat dihitung sebagai berikut

$$T_t = (F_{D1} - F_{D2})d \quad (4.9)$$

dimana,

$$F_{D1} = \text{gaya drag pada advancing blade (N)}$$

$$F_{D2} = \text{gaya drag pada returning blade (N)}$$

Sehingga nilai T_t pada pengukuran bilangan *Reynolds* 6×10^4 dapat dihitung sebagai berikut

$$T_t = (C_{D1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d \cdot H - C_{D2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d \cdot H)d$$

$$T_t = (C_{D1} - C_{D2}) \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d^2 \cdot H$$

$$T_t = (2,3 - 1,2) \frac{1}{2} \cdot 1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (8,83 \text{ m/s})^2 \cdot (0,06\text{m})^2 \cdot 0,08$$

$$T_t = 0,0146 \text{ N.m} = 1,46 \text{ N.cm}$$

Sehingga nilai *error* eksperimen (ε) pada pengukuran bilangan *Reynolds* 6×10^4 dapat dihitung sebagai berikut

$$\varepsilon = \frac{|T_R - T_t|}{T_t} \times 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{|1,6 - 1,46|}{1,46} \times 100\%$$

$$\varepsilon = 9,58\%$$

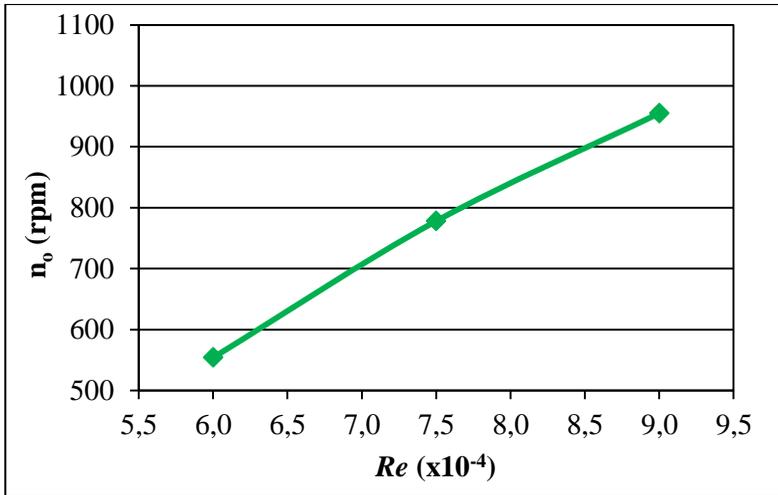
4.2 Analisis Performa Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4

Pada penelitian kali ini akan dilakukan upaya dalam kenaikan performa turbin angin *Savonius* dengan menempatkan pengganggu berupa sebuah plat datar yang berbentuk persegi di depan *returning blade* turbin angin. Plat datar tersebut dipasang dengan sudut kemiringan antara 0° sampai dengan 90° pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

Sebelum diberikan sebuah penghalang, maka terlebih dahulu dilakukan pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa diberikan sebuah penghalang agar nanti hasil datanya dapat dilakukan sebuah analisa komparasi. Adapun parameter-parameter yang diukur meliputi putaran turbin *Savonius* (n_o), torsi statis (T_o), tegangan yang dihasilkan generator (V), dan arus yang dihasilkan generator (I). Data dari eksperimen turbin *Savonius* tanpa menggunakan plat datar pengganggu dapat disajikan dalam beberapa pembahasan sebagai berikut

4.2.1 Putaran Turbin *Savonius* (n_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa putaran turbin *Savonius* (n_o) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa diberikan sebuah penghalang dilakukan pada temperatur sebesar 26°C dengan menggunakan *tachometer* yang ditembakkan pada salah satu sudu dari turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



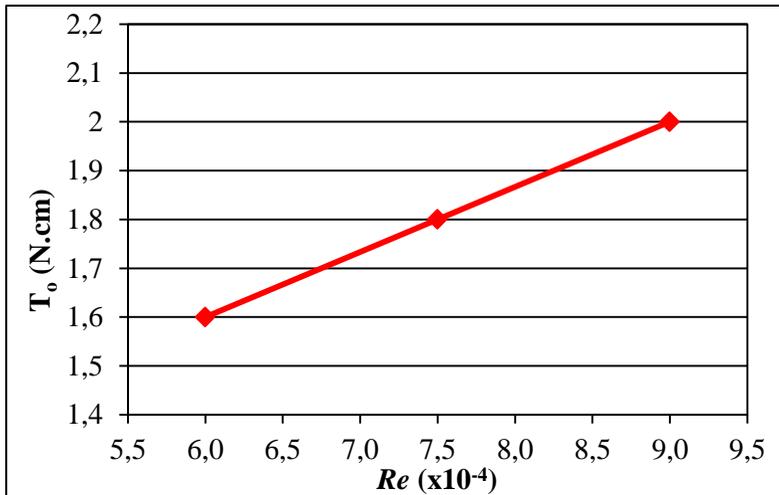
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin *Savonius* (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Berdasarkan pada gambar 4.1 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan putaran turbin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds*. Putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Terlihat bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 554 rpm , 778 rpm , dan 955 rpm . Adapun terjadinya 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 kian meningkat.

4.2.2 Torsi Statis (T) sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (Re)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T_o) turbin *Savonius* pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa diberikan sebuah penghalang dilakukan pada

temperatur sebesar 26 °C dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut

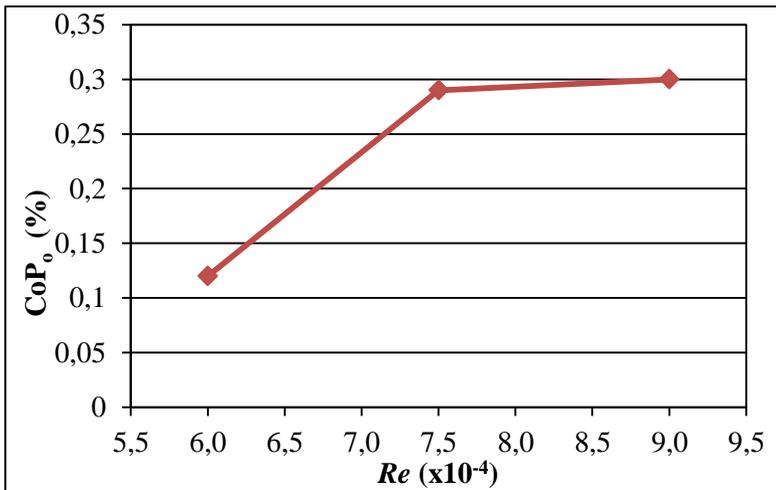


Gambar 4.2 Grafik Torsi statis (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Berdasarkan pada gambar 4.2 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan torsi statis dari turbin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds*. Torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Terlihat bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T_o) maksimal sebesar 1,6 N.cm, 1,8 N.cm, dan 2 N.cm. Terjadinya peningkatan torsi statis yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Hal tersebut menyebabkan nilai dari gaya *drag* yang di dalamnya terikat pada variabel kecepatan udara akan semakin besar sehingga torsi yang dibangkitkan juga kian meningkat.

4.2.3 *Coefficient of Power (CoP)* sebagai Fungsi Bilangan Reynolds (*Re*)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power (CoP_o)* pada bilangan Reynolds 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa diberikan sebuah penghalang dilakukan pada temperatur sebesar 26°C . Pengukuran daya *output* dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan (*V*) dan arus (*I*) yang diukur pada generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.3 Grafik *Coefficient of Power (CoP_o)* sebagai fungsi bilangan Reynolds (*Re*)

Berdasarkan pada gambar 4.3 ditunjukkan *trendline* yang merepresentasikan *Coefficient of Power (CoP_o)* dari turbin *Savonius* pada tiap bilangan Reynolds. *Coefficient of Power*

(CoP_o) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Terlihat bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power* (CoP_o) maksimal sebesar 0,12%, 0,29%, dan 0,3%. Terjadinya peningkatan *Coefficient of Power* (CoP_o) yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. *Coefficient of Power* adalah perbandingan antara daya *output* dari turbin terhadap daya *input* dari angin. Hal tersebut menandakan bahwa kenaikan daya *output* yang dihasilkan turbin *Savonius* masih sebanding dengan peningkatan energi *input* dari aliran udara. Sehingga dapat disimpulkan bahwa turbin *Savonius* masih memiliki kemampuan untuk mengkonversi energi *input* dari aliran udara menjadi daya *output*.

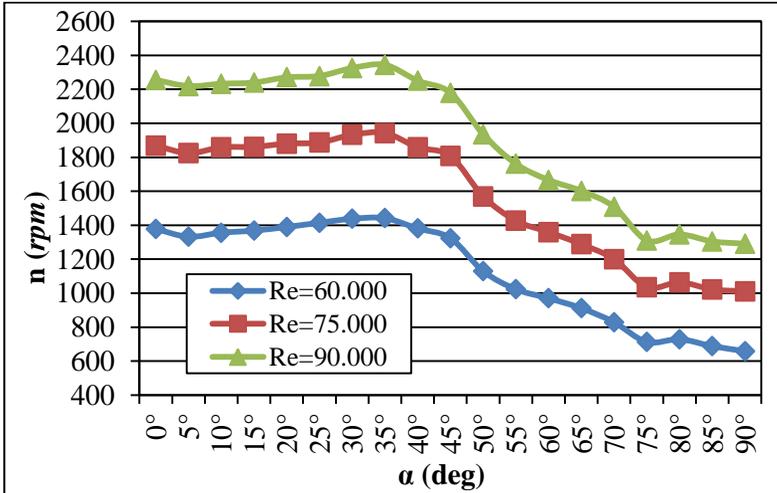
4.3 Analisis Performa Turbin *Savonius* yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4

Adapun studi eksperimental kali ini dilakukan optimalisasi performa dari turbin angin tipe *Savonius* dengan diberikan sebuah plat datar pengganggu berbentuk persegi panjang dengan nilai $L/d = 1,0353$ diletakkan di depan *returning blade* turbin *Savonius* dengan variasi perubahan sudut (α). Sudut penempatan plat datar pengganggu divariasikan dari 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 .

4.3.1 Putaran Turbin *Savonius* (n) sebagai fungsi Sudut Halang (α)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa putaran turbin *Savonius* (n) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran putaran turbin *Savonius* (n) dilakukan dengan menggunakan *tachometer* yang ditembakkan

pada salah satu sudu dari turbin yang telah diberikan *scotlight* berwarna perak. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.4 Grafik putaran turbin *Savonius* (n) sebagai fungsi sudut halang (α)

Berdasarkan pada gambar 4.4 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds* terhadap bukaan sudut penempatan plat datar penghalang. Putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan putaran turbin *Savonius* yang kemudian berangsur mengalami penurunan.

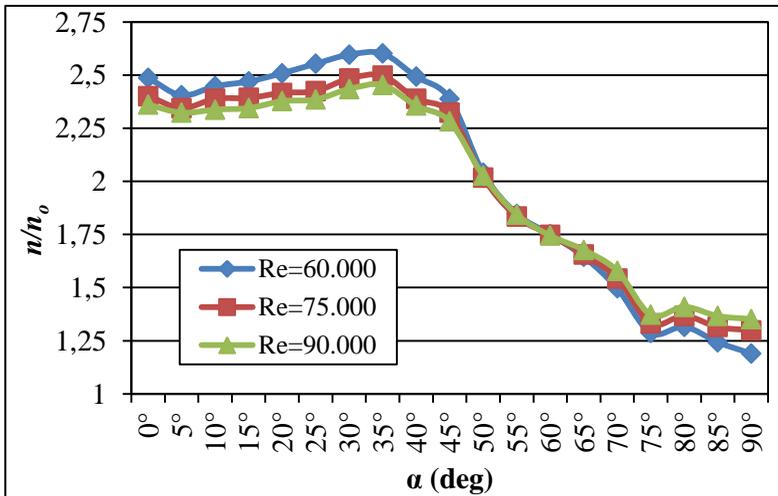
Pada gambar 4.4 terlihat bahwa putaran turbin tipe *Savonius* tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90°. Pada bilangan

Reynolds 6×10^4 , putaran awal dari turbin *Savonius* sebesar 1377,67 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 1441,3 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 659 rpm pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, putaran awal dari turbin *Savonius* sebesar 1868,06 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 1942,67 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 1010,8 rpm pada sudut 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , putaran awal dari turbin *Savonius* sebesar 2254,67 rpm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan putaran turbin sebesar 2343,33 rpm dan selanjutnya putaran dari turbin akan menurun hingga 1291,33 rpm pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 35° terjadi kenaikan putaran dari turbin angin *Savonius*. Hal ini diduga karena posisi sudut penempatan plat datar pengganggu yang menghalangi *returning blade* menyebabkan terjadinya fenomena penurunan gaya *drag* pada *returning blade*, di sisi lain arah plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih banyak sehingga selisih torsi dari kedua sudu meningkat dan terjadi kenaikan putaran dari turbin angin *Savonius*. Sedangkan pada sudut penempatan plat datar penghalang dari posisi 35° hingga 90° terjadi penurunan putaran dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan oleh variasi bukaan sudut plat datar pengganggu yang semakin besar sehingga menyebabkan aliran yang menuju ke bagian *advancing blade* akan lebih sedikit. Selain itu pada $\alpha > 35^\circ$ terjadi peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi bukaan sudut plat pengganggu yang mulai tidak menghalangi bagian *returning blade*, sehingga

aliran fluida dapat menabrak sudu tersebut dan mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil.

Dari data sebelumnya pada turbin *Savonius* yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan putaran maksimal sebesar 554 rpm , 778 rpm , dan 955 rpm . Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut

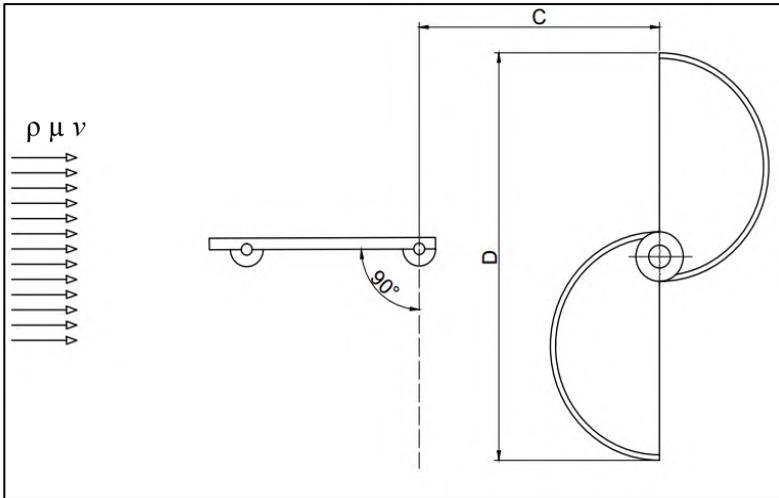


Gambar 4.5 Grafik perbandingan putaran turbin (n/n_o) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada gambar 4.5 terlihat bahwa perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_o) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_o) awal dari turbin *Savonius* sebesar 2,48 kali

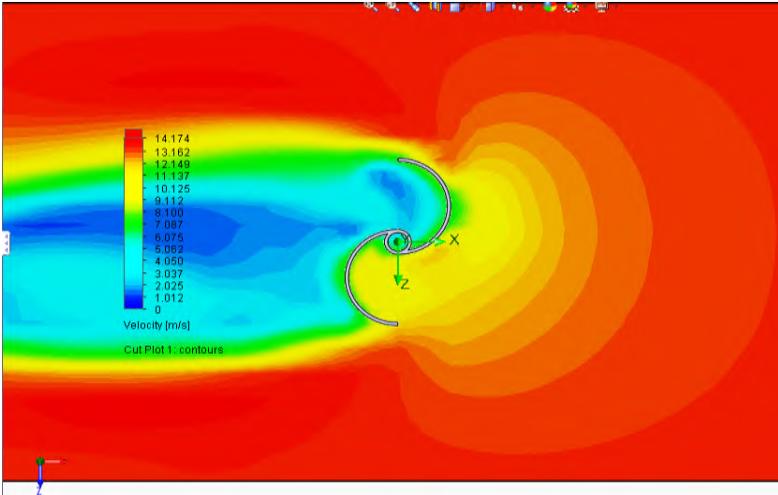
lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,6 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,19 kali lipat pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_o) awal dari turbin *Savonius* sebesar 2,4 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,49 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,29 kali lipat pada sudut 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_o) awal dari turbin *Savonius* sebesar 2,36 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 2,45 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,35 kali lipat pada sudut 90° .

Adapun pada sudut penempatan plat datar pengganggu pada posisi 90° seperti gambar 4.6 didapatkan nilai $n/n_o > 1$, meskipun pada posisi tersebut turbin *Savonius* layaknya tanpa menggunakan penghalang.

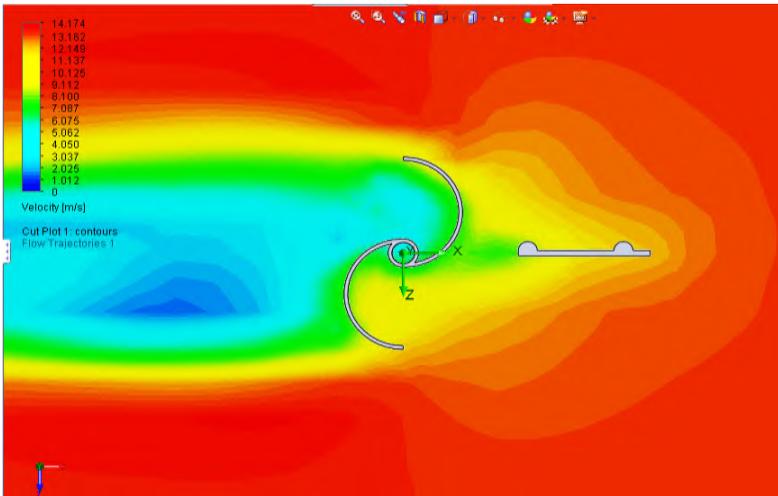


Gambar 4.6 posisi saat sudut penempatan plat datar pengganggu 90°

Hal ini diduga karena adanya pola perilaku aliran yang akan membentuk daerah *wake* setelah terjadinya separasi di bagian *trailing edge* pada plat datar. Daerah *wake* tersebut akan menyebabkan tekanan di depan sudu turbin *Savonius* akan menurun, sehingga gaya *drag* pada sisi *returning blade* juga akan lebih kecil dibandingkan dengan tanpa menggunakan plat penghalang serta selisih torsi yang dihasilkan juga meningkat sehingga putaran turbin juga lebih tinggi. Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan adanya fenomena aliran yang terjadi pada turbin untuk konfigurasi tanpa plat datar pengganggu dan dengan adanya plat datar pengganggu di depan *returning blade* yang mana hal ini membuktikan terjadinya kenaikan performa turbin dengan penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* berdasarkan kondisi tersebut.

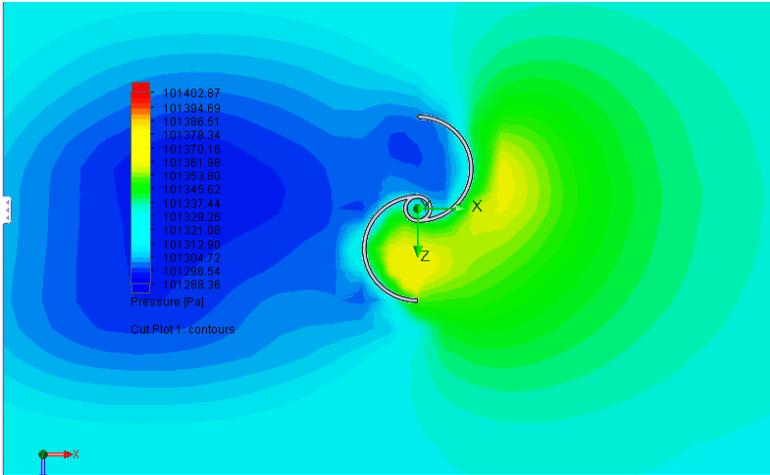


(a)

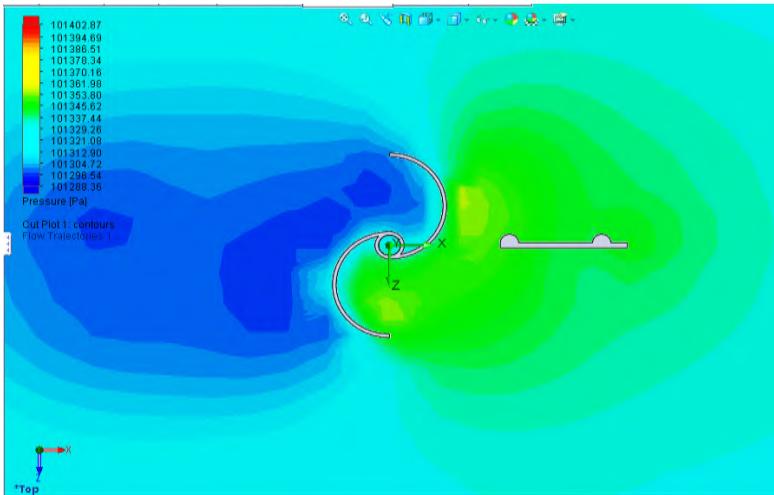


(b)

Gambar 4.7 Kontur kecepatan hasil simulasi turbin angin *Savonius* (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$



(a)



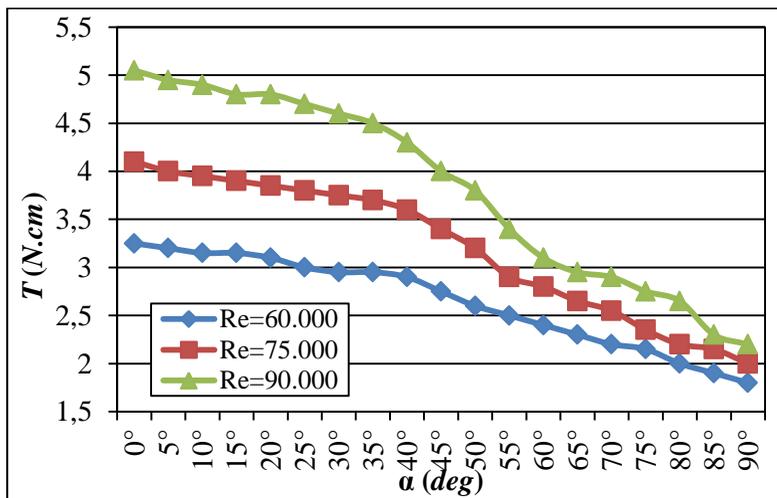
(b)

Gambar 4.8 Kontur *pressure* hasil simulasi turbin angin *Savonius*
 (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut
 bukaan $\alpha = 90^\circ$

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $n/n_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* dapat meingkatkan performa dari turbin *Savonius*.

4.3.2 Torsi Statis (T) sebagai fungsi Sudut Halang (α)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa torsi statis (T) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran torsi statis (T) dari turbin angin *Savonius* dilakukan dengan menahan sudu turbin pada sudut 0° dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.9 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut halang (α)

Berdasarkan pada gambar 4.9 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin

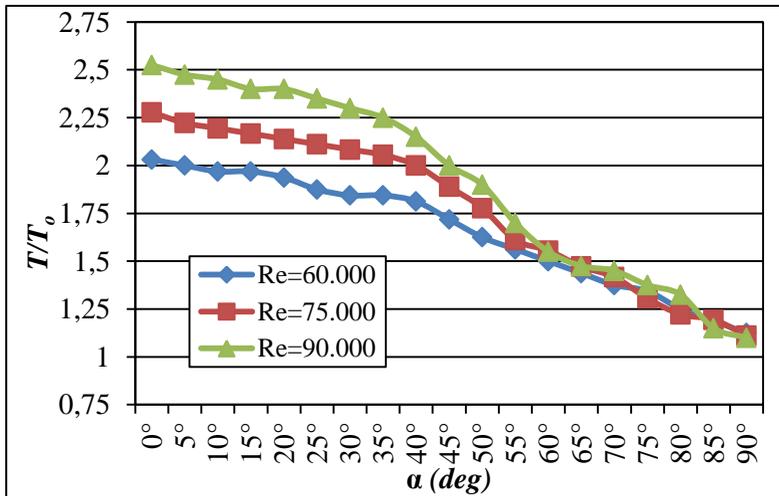
Savonius pada tiap bilangan *Reynolds* terhadap bukaan sudut penempatan plat datar pengganggu. Torsi statis (T) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap *trendline* menunjukkan adanya penurunan torsi statis (T) seiring dengan bertambahnya bukaan sudut penempatan plat datar penghalang.

Pada gambar 4.9 terlihat bahwa torsi statis (T) tiap *trendline* akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , torsi statis (T) memiliki titik maksimum sebesar 3,25 N.cm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan torsi statis (T) turbin sebesar 1,8 N.cm. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, torsi statis (T) memiliki titik maksimum sebesar 4,1 N.cm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan torsi statis (T) turbin sebesar 2 N.cm. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , torsi statis (T) memiliki titik maksimum sebesar 5,05 N.cm pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan torsi statis (T) turbin sebesar 2,2 N.cm.

Adapun pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 90° terjadi fenomena penurunan torsi statis (T) dari turbin angin *Savonius*. Hal ini disebabkan oleh variasi sudut plat datar pengganggu yang semakin besar dan akan menyebabkan titik pusat gaya pada bagian *advancing blade* turbin *Savonius* mengalami perpindahan semakin menuju ke pusat sumbu turbin. Selain itu, variasi sudut plat datar pengganggu yang semakin besar juga menyebabkan adanya aliran fluida atau angin yang perlahan melewati celah antara plat datar pengganggu dengan sisi *returning blade* turbin *Savonius* sehingga terdapat peningkatan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Hal

tersebut berakibat pada selisih gaya *drag* yang dihasilkan dari kedua buah sudu semakin kecil dan selisih torsi akan berangsur-angsur mengalami penurunan.

Dari data sebelumnya pada turbin *Savonius* yang tanpa diberikan plat datar penghalang pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T) maksimal sebesar $1,6 \text{ N.cm}$, $1,9 \text{ N.cm}$, dan 2 N.cm . Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut



Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada gambar 4.10 terlihat bahwa perbandingan torsi statis (T/T_0) tiap *trendline* akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_0) memiliki titik maksimum sebesar 2,03 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang

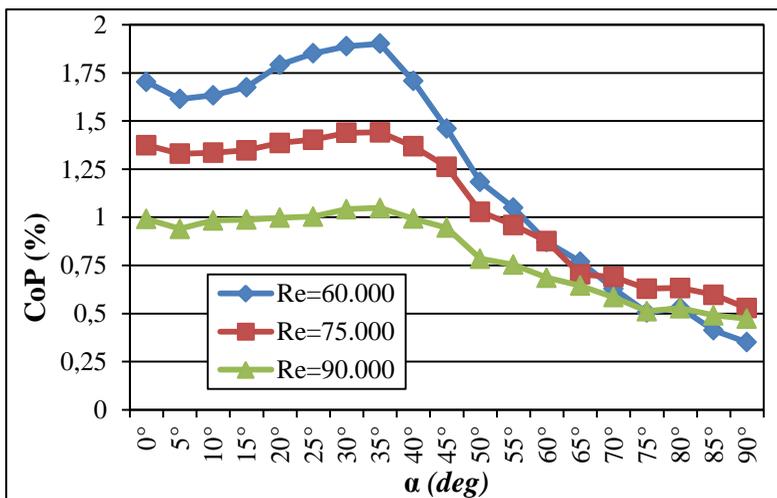
kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,12 kali lipat. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan torsi statis (T/T_o) memiliki titik maksimum sebesar 2,27 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,11 kali lipat. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan torsi statis (T/T_o) memiliki titik maksimum sebesar 2,52 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung turun hingga mencapai titik minimum pada sudut 90° dengan perbandingan sebesar 1,1 kali lipat.

Terdapat fenomena bahwa pada posisi $\alpha \geq 60^\circ$ nilai dari perbandingan torsi statis (T/T_o) dari turbin *Savonius* hampir sama untuk seluruh variasi bilangan *Reynolds*. Posisi plat penghalang yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih banyak dan juga menyebabkan terjadinya penurunan gaya *drag* pada *returning blade*. Hal tersebut yang melandasi pada saat posisi $\alpha \geq 60^\circ$, perbandingan kenaikan gaya *drag* pada *advancing blade* dan penurunan gaya *drag* pada *returning blade* pada seluruh bilangan *Reynolds* memiliki harga yang hampir sama. Sehingga, selisih torsi yang dihasilkanpun mengalami peningkatan yang hampir sama. Selain itu, pada saat posisi $\alpha \geq 60^\circ$ juga menunjukkan bahwa pada $Re=6 \times 10^4$ memiliki performa yang lebih baik dari variasi bilangan *Reynolds* yang lain.

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $T/T_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* dapat meingkatkan performa dari turbin *Savonius*.

4.3.3 Coefficient of Power (CoP) sebagai Fungsi Sudut Halang (α)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran daya *output* dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan (V) dan arus (I) yang diukur pada generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*). Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi sudut halang (α)

Berdasarkan pada gambar 4.11 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds* terhadap

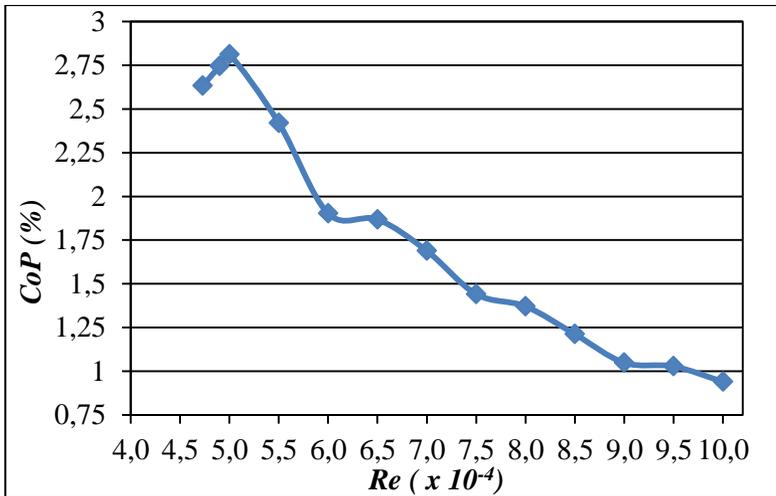
bukaan sudut penempatan plat datar penghalang. Setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) seiring dengan bertambahnya putaran rotor yang kemudian berangsur mengalami penurunan.

Pada gambar 4.11 terlihat bahwa *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin *Savonius* sebesar 1,7% pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 1,9% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 0,35% pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin *Savonius* sebesar 1,37% pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 1,44% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 0,52% pada sudut 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin *Savonius* sebesar 0,99% pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar 1,05% dan selanjutnya *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin akan menurun hingga 0,47% pada sudut 90° .

Pada sudut penempatan plat datar pengganggu dari posisi 0° hingga 35° terjadi kenaikan *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin *Savonius*. Hal ini diduga karena posisi sudut penempatan plat datar pengganggu yang menghalangi *returning blade* menyebabkan terjadinya fenomena penurunan gaya *drag* pada *returning blade*, di sisi lain arah plat datar pengganggu yang

membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke bagian *advancing blade* menjadi lebih banyak sehingga selisih torsi dari kedua sudu meningkat dan terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius*. Sedangkan pada sudut penempatan plat datar penghalang dari posisi 35° hingga 90° terjadi penurunan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* dikarenakan bukaan sudut plat datar pengganggu yang semakin besar menyebabkan aliran yang menuju ke bagian *advancing blade* akan lebih sedikit. Selain itu pada $\alpha > 35^\circ$ terjadi peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi bukaan sudut plat pengganggu yang mulai tidak menghalangi bagian *returning blade*, sehingga aliran fluida dapat menabrak sudu tersebut. Hal itu menyebabkan selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dengan *returning blade* akan semakin kecil sehingga selisih torsi antara kedua buah sudu tersebut akan semakin kecil pula.

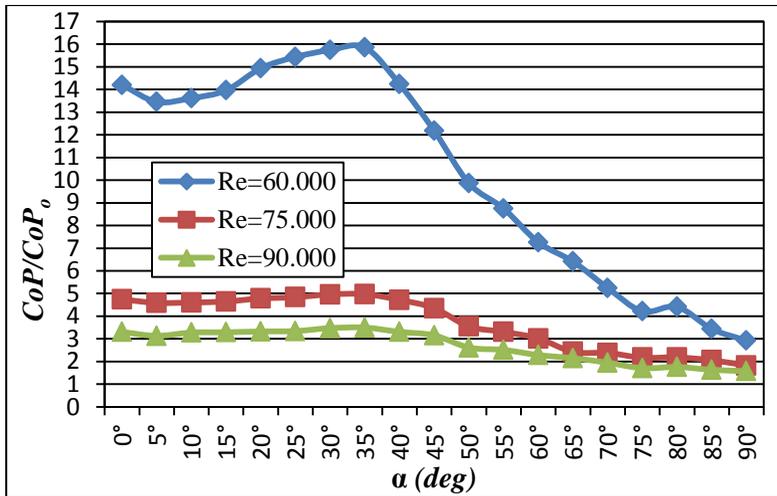
Fenomena lain yang terjadi adalah nilai *Coefficient of Power* turbin *Savonius (CoP)* pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 saat posisi sudut penempatan plat datar pengganggu sebesar 90° memiliki nilai terendah dibandingkan yang lainnya. Hal ini dikarenakan daya *output* turbin yang dihasilkan sangat tidak sebanding dengan daya teoritis dari energi angin. Selain itu, *Coefficient of Power* turbin *Savonius (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* berbanding terbalik dengan bilangan *Reynolds*. Terlihat bahwa *Coefficient of Power (CoP)* tertinggi didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Hal ini dikarenakan nilai bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini (6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4) berada pada posisi bilangan *Reynolds* optimum yang menghasilkan *CoP* maksimum, dimana *Re* optimum diperkirakan pada harga 5×10^4 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12 di bawah ini.



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (*Re*)

Pada penelitian kali ini digunakan variasi bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Sedangkan pada gambar 4.12, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin Savonius (*CoP*) akan cenderung naik dari bilangan *Reynolds* $4,73 \times 10^4$ hingga bilangan *Reynolds* optimum terjadi pada $Re = 5 \times 10^4$ yang menghasilkan *CoP* maksimum sebesar 2,81%. Setelah itu untuk $Re > 5 \times 10^4$ nilai *CoP* cenderung mengalami penurunan. Dalam hal ini nilai bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini (6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4) berada pada daerah *trendline CoP* yang menurun.

Dari data sebelumnya pada turbin Savonius yang tanpa diberikan plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*) maksimal sebesar 0,12%, 0,29%, dan 0,3%. Apabila dilakukan sebuah komparasi terhadap turbin Savonius yang diberikan sebuah plat pengganggu maka akan didapatkan grafik sebagai berikut



Gambar 4.13 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_0) sebagai fungsi sudut halang (α)

Pada gambar 4.13 terlihat bahwa perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_0) tiap *trendline* akan cenderung naik pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 0° hingga 35° dan akan cenderung mengalami penurunan pada bukaan sudut penempatan plat datar penghalang dari 35° hingga 90° . Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_0) awal dari turbin *Savonius* sebesar 14,2 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 15,8 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 2,92 kali lipat pada sudut 90° . Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_0) awal dari turbin *Savonius* sebesar 4,74 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik

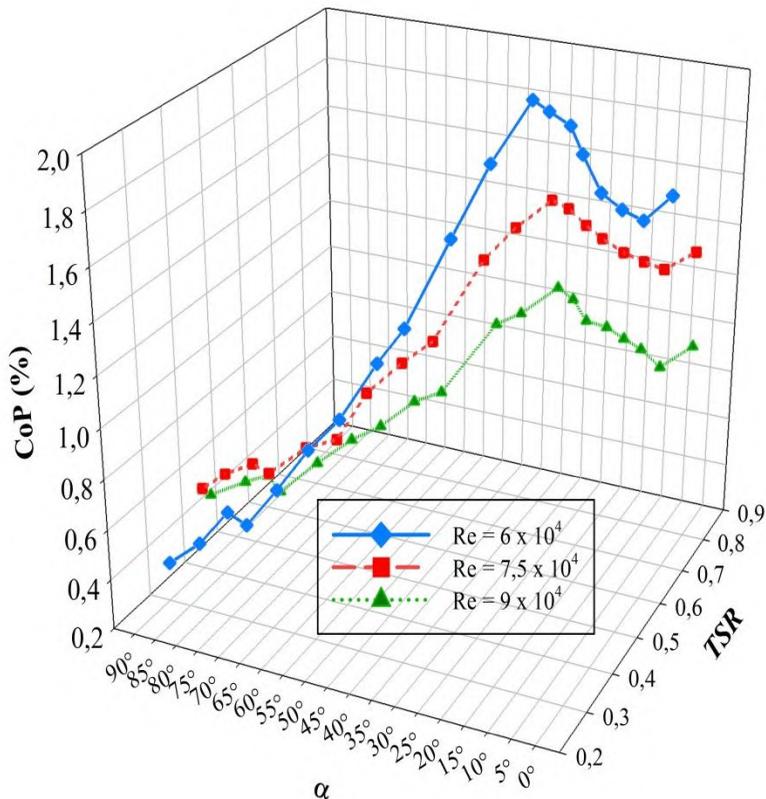
maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 4,97 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,82 kali lipat pada sudut 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_o) awal dari turbin *Savonius* sebesar 3,3 kali lipat pada posisi sudut penempatan plat datar penghalang sebesar 0° yang kemudian akan cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada sudut 35° dengan perbandingan putaran turbin sebesar 3,49 kali lipat dan selanjutnya akan menurun sehingga menghasilkan perbandingan sebesar 1,57 kali lipat pada sudut 90° .

Dapat diketahui bahwa untuk semua variasi bilangan *Reynolds* dan sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) memiliki nilai $CoP/CoP_o > 1$. Hal ini menunjukkan bahwa dengan diberikan plat datar pengganggu di depan *returning blade* turbin *Savonius* dapat meningkatkan performa dari turbin *Savonius*.

4.3.4 *Coefficient of Power* (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (*TSR*)

Dari eksperimen yang telah dilakukan, didapat data berupa daya *output* turbin *Savonius* yang dikonversikan menjadi *Coefficient of Power* (*CoP*) dalam setiap sudut penempatan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 dan dibandingkan dengan besar dari *Tip Speed Ratio* (*TSR*). Pengukuran daya *output* dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan (*V*) dan arus (*I*) yang diukur pada generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* nantinya dibandingkan dengan daya teoritis untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*). Adapun *Tip Speed Ratio* (*TSR*) adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan melalui pengukuran kecepatan putar dari turbin *Savonius* saat turbin terhubung dengan rangkaian generator dan beban lampu yang dibandingkan dengan kecepatan

aliran angin. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* dapat ditunjukkan dalam grafik sebagai berikut



Gambar 4.14 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (*TSR*)

Berdasarkan pada gambar 4.14 ditunjukkan setiap *trendline* merepresentasikan *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* dibandingkan dengan nilai dari *Tip Speed Ratio* (*TSR*). Setiap *trendline* menunjukkan adanya peningkatan

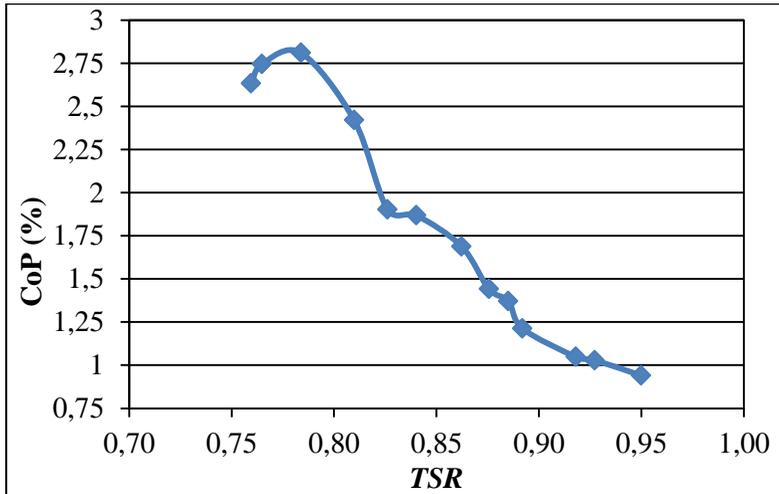
Coefficient of Power turbin *Savonius* (*CoP*) seiring dengan bertambahnya nilai *Tip Speed Ratio* (*TSR*).

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) tiap *trendline* akan cenderung mengalami peningkatan. Pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , *CoP* memiliki titik minimum yaitu 0,35 % pada saat *TSR* sebesar 0,3 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada *TSR* sebesar 0,74 dengan *CoP* turbin sebesar 1,9 %. Kemudian pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *CoP* memiliki titik minimum yaitu 0,52 % pada saat *TSR* sebesar 0,4 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada *TSR* sebesar 0,83 dengan *CoP* turbin sebesar 1,44 %. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *CoP* memiliki titik minimum yaitu 0,47 % pada saat *TSR* sebesar 0,43 yang kemudian akan mengalami peningkatan hingga mencapai titik maksimal pada *TSR* sebesar 0,86 dengan *CoP* turbin sebesar 1,05 %.

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. Pada gambar 4.14 ini terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) tertinggi didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , hal tersebut sudah sesuai dengan gambar 4.12 seperti yang sudah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

Betz Law menjelaskan tentang karakteristik *Coefficient of Power* (*CoP*) dari turbin angin dan menyatakan bahwa *CoP* tidak selalu mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *TSR* yang disebabkan oleh bertambah besarnya bilangan *Reynolds*. Oleh karena itu dilakukan eksperimen kembali terhadap turbin *Savonius* yang berputar pada variasi bilangan *Reynolds* antara 5×10^4 hingga 10×10^4 dengan kenaikan sebesar 5000 serta plat datar

pengganggu diletakkan pada sudut 35° . Hasil yang didapatkan tertera pada gambar di bawah ini



Gambar 4.15 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (*TSR*)

Pada penelitian kali ini digunakan variasi bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Sedangkan pada gambar 4.15, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) akan cenderung naik dari $TSR=0,75$ hingga $0,78$ dan kemudian terjadi penurunan hingga pada $TSR=0,94$. Pada $TSR=0,75$, *Coefficient of Power* (*CoP*) awal dari turbin *Savonius* sebesar $2,63\%$ yang kemudian cenderung naik hingga mencapai titik maksimum pada bilangan *Reynolds* $0,78$ dengan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin sebesar $2,81\%$ dan selanjutnya akan menurun hingga $0,94\%$ pada $TSR=0,94$.

Pada penelitian ini terbukti bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) terbaik didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 dikarenakan *TSR* mencapai nilai sebesar $0,82$ untuk penempatan posisi sudut halang sebesar 35° . Sedangkan pada grafik tersebut

menunjukkan bahwa sesungguhnya konfigurasi dari eksperimen memiliki titik efisiensi kerja maksimum pada *Tip Speed Ratio* (*TSR*) sebesar 0,78.

LAMPIRAN

Tabel A1. Data Standar Turbin Angin Savonius

Re ($\times 10^4$)	RP M	T_o (Ncm)	Pin (watt)	V (Volt)	I (Amper e)	Pout (Watt)	n_o (rpm)	Cop _o (%)
6,0	554	1,6	3,447	1,42	0,003	0,004	452	0,12
7,5	778	1,8	6,718	1,56	0,012	0,019	648	0,29
9,0	955	2	11,620	1,54	0,023	0,035	806	0,30

Tabel A2. Data putaran turbin angin Savonius

α	n			n/n _o		
	$Re = 6 \times 10^4$	$Re = 7,5 \times 10^4$	$Re = 9 \times 10^4$	$Re = 6 \times 10^4$	$Re = 7,5 \times 10^4$	$Re = 9 \times 10^4$
0°	1377,67	1868,06	2254,67	2,487	2,401	2,361
5°	1332,30	1824,33	2218,60	2,405	2,345	2,323
10°	1356,00	1858,30	2232,40	2,448	2,389	2,338
15°	1368,37	1861,33	2239,30	2,470	2,392	2,345
20°	1389,76	1880,00	2270,48	2,509	2,416	2,377
25°	1414,67	1886,53	2277,82	2,554	2,425	2,385
30°	1438,13	1932,30	2325,00	2,596	2,484	2,435
35°	1441,30	1942,67	2343,33	2,602	2,497	2,454
40°	1381,00	1858,33	2250,00	2,493	2,389	2,356
45°	1323,60	1807,33	2179,30	2,389	2,323	2,282
50°	1130,00	1570,00	1935,35	2,040	2,018	2,027
55°	1023,33	1427,00	1761,26	1,847	1,834	1,844

60°	970,00	1359,67	1666,00	1,751	1,748	1,745
65°	911,67	1288,33	1602,00	1,646	1,656	1,677
70°	829,00	1200,33	1508,00	1,496	1,543	1,579
75°	713,00	1035,67	1310,33	1,287	1,331	1,372
80°	729,00	1063,70	1346,00	1,316	1,367	1,409
85°	688,67	1022,67	1304,64	1,243	1,314	1,366
90°	659,00	1010,80	1291,33	1,190	1,299	1,352

Tabel A3. Data torsi statis turbin angin Savonius

α	T			T/T ₀		
	$Re=6 \times 10^4$	$Re=7,5 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=7,5 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$
0°	3,3	4,1	5,1	2,031	2,278	2,525
5°	3,2	4,0	5,0	2,000	2,222	2,475
10°	3,2	4,0	4,9	1,969	2,194	2,450
15°	3,2	3,9	4,8	1,969	2,167	2,400
20°	3,1	3,9	4,8	1,938	2,139	2,400
25°	3,0	3,8	4,7	1,875	2,111	2,350
30°	3,0	3,8	4,6	1,844	2,083	2,300
35°	3,0	3,7	4,5	1,844	2,056	2,250
40°	2,9	3,6	4,3	1,813	2,000	2,150
45°	2,8	3,4	4,0	1,719	1,889	2,000
50°	2,6	3,2	3,8	1,625	1,778	1,900
55°	2,5	2,9	3,4	1,563	1,611	1,700
60°	2,4	2,8	3,1	1,500	1,556	1,550
65°	2,3	2,7	3,0	1,438	1,472	1,475
70°	2,2	2,6	2,9	1,375	1,417	1,450
75°	2,2	2,4	2,8	1,344	1,306	1,375
80°	2,0	2,2	2,7	1,250	1,222	1,325
85°	1,9	2,2	2,3	1,188	1,194	1,150
90°	1,8	2,0	2,2	1,125	1,111	1,100

Tabel A4. Data *Coefficient of Power* turbin angin Savonius

α	CoP			CoP/CoP _o		
	$Re=6 \times 10^4$	$Re=7,5 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$	$Re=6 \times 10^4$	$Re=7,5 \times 10^4$	$Re=9 \times 10^4$
0°	1,704	1,375	0,991	14,202	4,740	3,305
5°	1,615	1,330	0,940	13,454	4,587	3,133
10°	1,634	1,335	0,983	13,618	4,604	3,278
15°	1,676	1,348	0,987	13,963	4,649	3,291
20°	1,792	1,387	0,998	14,936	4,782	3,327
25°	1,852	1,403	1,003	15,432	4,838	3,344
30°	1,889	1,439	1,042	15,739	4,963	3,474
35°	1,902	1,441	1,049	15,853	4,970	3,496
40°	1,708	1,369	0,993	14,235	4,720	3,308
45°	1,462	1,262	0,946	12,179	4,353	3,155
50°	1,184	1,029	0,785	9,867	3,548	2,616
55°	1,050	0,960	0,754	8,750	3,309	2,513
60°	0,871	0,876	0,686	7,261	3,020	2,287
65°	0,769	0,704	0,645	6,412	2,427	2,150
70°	0,630	0,690	0,585	5,247	2,380	1,949
75°	0,506	0,629	0,512	4,213	2,170	1,707
80°	0,530	0,633	0,528	4,413	2,182	1,759
85°	0,413	0,597	0,491	3,440	2,060	1,635
90°	0,351	0,528	0,473	2,922	1,822	1,577

Tabel A5. Data Perhitungan CoP dan *TSR* untuk $Re = 6 \times 10^4$

α	V(Volt)	I (A)	Pout (Watt)	n (<i>rpm</i>)	<i>TSR</i>	Cop (%)
0°	1,51	0,039	0,059	1074,30	0,675	1,704
5°	1,51	0,037	0,056	1042,90	0,655	1,615
10°	1,51	0,037	0,056	1053,52	0,662	1,634
15°	1,52	0,038	0,058	1065,14	0,669	1,676
20°	1,53	0,040	0,062	1086,42	0,683	1,792
25°	1,53	0,042	0,064	1150,00	0,722	1,852
30°	1,54	0,042	0,065	1155,34	0,726	1,889
35°	1,54	0,043	0,066	1188,37	0,747	1,902
40°	1,53	0,038	0,059	1073,45	0,674	1,708
45°	1,53	0,033	0,050	975,00	0,613	1,462
50°	1,52	0,027	0,041	839,67	0,528	1,184
55°	1,53	0,024	0,036	807,61	0,507	1,050
60°	1,52	0,020	0,030	720,13	0,452	0,871
65°	1,53	0,017	0,027	667,10	0,419	0,769
70°	1,51	0,014	0,022	612,00	0,384	0,630
75°	1,50	0,012	0,017	562,81	0,354	0,506
80°	1,49	0,012	0,018	571,31	0,359	0,530
85°	1,49	0,010	0,014	530,84	0,333	0,413
90°	1,48	0,008	0,012	483,91	0,304	0,351

Tabel A6. Data Perhitungan CoP dan *TSR* untuk $Re = 7,5 \times 10^4$

α	V(Volt)	I (A)	Pout (Watt)	n (rpm)	<i>TSR</i>	Cop (%)
0°	1,52	0,061	0,092	1585,39	0,797	1,375
5°	1,52	0,059	0,089	1505,92	0,757	1,330
10°	1,52	0,059	0,090	1524,17	0,767	1,335
15°	1,53	0,059	0,091	1538,26	0,774	1,348
20°	1,53	0,061	0,093	1540,31	0,775	1,387
25°	1,54	0,061	0,094	1584,83	0,797	1,403
30°	1,53	0,063	0,097	1617,67	0,814	1,439
35°	1,55	0,062	0,097	1655,59	0,833	1,441
40°	1,53	0,060	0,092	1539,38	0,774	1,369
45°	1,52	0,056	0,085	1459,47	0,734	1,262
50°	1,48	0,047	0,069	1243,74	0,626	1,029
55°	1,51	0,043	0,064	1175,14	0,591	0,960
60°	1,52	0,039	0,059	1075,38	0,541	0,876
65°	1,52	0,031	0,047	1013,41	0,510	0,704
70°	1,51	0,031	0,046	947,81	0,477	0,690
75°	1,50	0,028	0,042	842,76	0,424	0,629
80°	1,49	0,029	0,043	869,00	0,437	0,633
85°	1,49	0,027	0,040	824,14	0,414	0,597
90°	1,50	0,024	0,035	804,93	0,405	0,528

Tabel A7. Data Perhitungan CoP dan *TSR* untuk $Re = 9 \times 10^4$

α	V(Volt)	I (A)	Pout (Watt)	n (rpm)	<i>TSR</i>	Cop (%)
0°	1,54	0,075	0,115	1919,39	0,804	0,991
5°	1,54	0,071	0,109	1807,94	0,757	0,940
10°	1,54	0,074	0,114	1834,31	0,769	0,983
15°	1,54	0,075	0,115	1882,67	0,789	0,987
20°	1,55	0,075	0,116	1925,71	0,807	0,998
25°	1,56	0,075	0,117	1934,18	0,810	1,003
30°	1,56	0,078	0,121	2010,71	0,842	1,042
35°	1,57	0,078	0,122	2068,38	0,867	1,049
40°	1,57	0,073	0,115	1911,71	0,801	0,993
45°	1,55	0,071	0,110	1875,18	0,786	0,946
50°	1,54	0,059	0,091	1567,82	0,657	0,785
55°	1,55	0,057	0,088	1512,51	0,634	0,754
60°	1,54	0,052	0,080	1402,33	0,588	0,686
65°	1,54	0,049	0,075	1332,33	0,558	0,645
70°	1,53	0,044	0,068	1220,67	0,511	0,585
75°	1,52	0,039	0,059	1091,18	0,457	0,512
80°	1,52	0,040	0,061	1148,39	0,481	0,528
85°	1,50	0,038	0,057	1129,41	0,473	0,491
90°	1,51	0,036	0,055	1021,81	0,428	0,473

Tabel A8. Data Perhitungan CoP dan *TSR* untuk $\alpha=35^\circ$ dengan variasi *Re*

<i>Re</i> ($\times 10^4$)	<i>Vin</i> (m/s)	<i>Pin</i> (Watt)	<i>V</i> (Volt)	<i>I</i> (Ampere)	<i>P</i> (Watt)	<i>n</i> (rpm)	<i>Cop</i> (%)	<i>TSR</i>
4,73	6,96	1,688	1,57	0,028	0,044	953	2,632	0,760
4,90	7,21	1,876	1,57	0,033	0,051	994	2,744	0,765
5,00	7,36	1,996	1,58	0,036	0,056	1040	2,810	0,784
5,50	8,09	2,651	1,58	0,041	0,064	1181	2,420	0,810
6,00	8,83	3,447	1,58	0,041	0,066	1315	1,902	0,826
6,50	9,56	4,374	1,59	0,041	0,082	1448	1,868	0,840
7,00	10,30	5,471	1,59	0,041	0,092	1601	1,689	0,862
7,50	11,03	6,718	1,59	0,041	0,097	1741	1,441	0,876
8,00	11,77	8,163	1,59	0,041	0,112	1878	1,371	0,885
8,50	12,50	9,778	1,60	0,041	0,119	2010	1,213	0,892
9,00	13,24	11,620	1,60	0,041	0,122	2191	1,049	0,918
9,50	13,98	13,679	1,60	0,041	0,141	2337	1,028	0,927
10,00	14,71	15,935	1,61	0,041	0,150	2519	0,941	0,950

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini, penempatan plat datar penghalang dengan $L/d = 1,0353$ di depan *returning blade* turbin *Savonius* pada variasi sudut ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) untuk variasi bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin tipe *Savonius* berpengaruh dalam peningkatan performa turbin angin *Savonius*, hal ini dilandasi dengan adanya kenaikan putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin *Savonius* yang di teliti dibandingkan dengan turbin tanpa diberi penghalang di depan *returning blade*.
2. Putaran maksimum dari turbin angin *Savonius* (n) diperoleh sebesar 2343,33 *rpm* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 2,6 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa penghalang pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$.
3. Torsi statis maksimum dari turbin angin *Savonius* (T) diperoleh sebesar 5,05 *N.cm* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=0^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis (T/T_o) didapatkan 2,52 kali lipat dibandingkan dengan putaran turbin tanpa penghalang pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=0^\circ$.
4. *Coefficient of Power* maksimum dari turbin angin *Savonius* (CoP) diperoleh sebesar 1,9% pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 serta *Tip Speed Ratio* (TSR) sebesar 0,74 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha=35^\circ$, sedangkan untuk perbandingan *Coefficient of Power* turbin (Cop/Cop_o)

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya pada 3 Juni 1994. Merupakan anak kedua dari 3 bersaudara. Penulis berasal dari kota Surabaya, Jawa Timur. Pendidikan telah menempuh pendidikan formal di TK Barunawati Surabaya, SD Hang Tuah 4 Surabaya, SDN 01 Pagi Cipete Selatan Jakarta, SMPN 85 Pondok Labu Jakarta, SMPN 12 Surabaya, SMPN 6 Makassar dan SMAN 16 Surabaya. Pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur SNMPTN Tulis (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada pilihan pertama. Penulis terdaftar dengan NRP 2112 100 057.

Selama masa perkuliahan, penulis tercatat mengambil bidang studi Konversi Energi sebagai bahasan Tugas Akhir. Di jurusan Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam bidang kemahasiswaan yaitu sebagai pengurus Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Pada periode 2013/2014 menjabat sebagai Staff Divisi *Human Resources Development*, periode 2014/2015 menjabat sebagai Staff Ahli Divisi *Human Resources Development*, dan pada periode 2015/2016 menjabat sebagai Badan Pengurus Harian yaitu Wakil Ketua Bidang Otomotif. Penulis juga tercatat sebagai koordinator asisten praktikum Pompa (*Turbo Machinery*) di laboratorium mekanika fluida. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat audiyatraar@gmail.com