



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) =
1,1547 “**

Rizkiardi Wilis Prakoso
2112 100 090

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**

**“ Study Case for the Ratio of Length of Obstacle
Plate Relative to The Diameter of Turbine (L/D) =
1,1547 “**

RIZKIARDI WILIS PRAKOSO
2112 100 090

Advisor
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
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 Datar Pengganggu Relatif
Terhadap Diameter Sudu Turbin (L/D) = 1,1547”

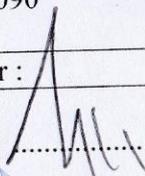
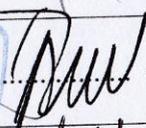
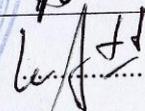
TUGAS AKHIR

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 :

RIZKIARDI WILIS PRAKOSO

NRP. 2112 100 090

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 ($L/D = 1,1547$)”

Nama Mahasiswa : Rizkiardi Wilis Prakoso
NRP : 2112 100 090
Jurusan : Teknik Mesin FTI ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
Abstrak

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin yang banyak digunakan untuk memperoleh energi alternatif non-fosil pada era krisis energi saat ini, walaupun turbin ini memiliki performa yang rendah pada prinsipnya. Turbin Savonius bekerja dikarenakan oleh perbedaan gaya drag yang dihasilkan oleh sudunya, returning dan advancing blade. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan menempatkan pengganggu berupa plat datar di depan returning blade.

Dalam rangka meningkatkan performa turbin angin Savonius yang memiliki diameter D 60 mm dan tinggi h 80 mm, sebuah plat dengan lebar 69 mm dan tinggi 150 mm digunakan sebagai pengganggu yang ditempatkan di depan returning blade dari turbin. Percobaan dilakukan pada subsonic open circuit wind tunnel. Peralatan ini memiliki panjang 457 mm, dengan area uji 304 mm x 304 mm. Kecepatan aliran dari wind tunnel dapat disesuaikan menjadi 8,83 m/s; 11,03 m/s; 13,24 m/s sesuai dengan bilangan Reynolds $Re = 6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; $9,0 \times 10^4$ (berdasarkan panjang setara dengan $L = 2D - b$, dimana b adalah lebar overlap dari dua sudu turbin, dan kecepatan aliran). Kecepatan angin diukur menggunakan pitot-static tube yang dihubungkan dengan inclined manometer. Putaran turbin diukur menggunakan tachometer. Torsi statis diukur menggunakan

torquemeter, dan daya output didapatkan dari pengukuran tegangan dan arus yang dihasilkan generator yang terhubung dengan poros turbin Savonius.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penempatan plat datar pengganggu dan variasi sudut ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) di depan returning blade turbin angin Savonius dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini berdasarkan dari kenaikan putaran dari turbin sebesar 274% dan coefficient of power (CoP) yaitu 1668% pada bilangan Reynolds 6×10^4 pada variasi sudut $\alpha = 40^\circ$ dibandingkan terhadap data yang dihasilkan turbin Savonius tanpa pengganggu. Torsi status (T) mengalami kenaikan hingga 255% pada bilangan Reynolds 9×10^4 pada variasi sudut $\alpha = 0^\circ$.

Kata kunci: performa turbin Savonius, plat datar, variasi sudut

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

“Study Case for the Ratio of Length of Obstacle Plate
Relative to The Diameter of Turbine (L/D) = 1,1547”

Name : Rizkiardi Wilis Prakoso
Student ID : 2112 100 090
Major : Teknik Mesin FTI ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

Abstract

Savonius wind turbine is one of the type of wind turbines that has been widely used to obtain alternative non-fossil energy in the era of the current energy crisis, even though this turbine has a low performance in principle. The Savonius turbine works caused by different of the drag force generated by its blade, returning and advancing blade. The aims of the research is to improve the performance of the Savonius turbine by placing disturbance in the form of plate in front of returning blade.

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 69 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 457 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 $Re = 6 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; 9×10^4 (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 the placement of flat plate as disturbance and the various angle ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) in front of the returning blade Savonius wind turbine can improve the performance of wind turbine Savonius. It is based on the increase of rotation from turbine as 274% and coefficient of power (CoP) is 1668% on the Reynolds number 6×10^4 on various angle $\alpha = 40^\circ$ relative to its value when the savonius turbine without any disturbance. The static torque (T) is increase up to 255% on the Reynolds number 9×10^4 on various angle $\alpha = 0^\circ$.

Keyword: Savonius turbine performance, flat plate, various angle

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL BAHASA INDONESIA	
HALAMAN JUDUL BAHASA INGGRIS	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Energi Angin	7
2.2. Turbin Angin Tipe Savonius	9
2.3. Gaya Drag	10
2.4. Daya Yang Dihasilkan Turbin	11
2.5. Bilangan Reynolds	14
2.6. Penelitian Terdahulu	15
2.6.1. Pemberian Plat Pengganggu dan Pengarah pada Turbin Savonius	15
2.6.2. Desain Baru Susunan Plat Pengganggu dan Pengarah pada Turbin <i>Savonius</i>	18
2.6.3. Membandingkan Perfoma Turbin Savonius Dua Sudu dan Tiga Sudu dengan Pemberian Plat Pengganggu	22
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Analisis Dimensi	27

3.1.1. Analisis <i>Dimensi Coefficient of Power</i>	28
3.2. Peralatan	30
3.2.1. <i>Wind Tunnel</i> (terowongan Angin)	30
3.2.2. Benda Uji	31
3.2.3. Alat Ukur	33
3.3. Pengukuran Daya yang Dihasilkan Turbin	37
3.4. Prosedur Penelitian	37
3.5. Flowchart Penelitian	39
3.5. <i>Timeline</i> Penelitian	40
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	41
4.1. Contoh Perhitungan	41
4.1.1. Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	41
4.1.2. Perhitungan <i>Coefficient of Power (CoP)</i>	42
4.1.3. Perhitungan <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	43
4.2. Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Penggangu	44
4.2.1. Putaran Turbin <i>Savonius</i> Tanpa Plat Datar Penggangu (n_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds (Re)</i>	44
4.2.2. Torsi Statis Tanpa Plat Datar Penggangu (T_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds (Re)</i>	45
4.2.3. <i>Coefficient of Power</i> Tanpa Plat Datar Penggangu (CoP_o) sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds (Re)</i>	46
4.3. Analisis Performa Turbin <i>Savonius</i> yang Diberikan Plat Datar Penggangu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	48
4.3.1. Putaran Turbin <i>Savonius (n)</i> sebagai fungsi Sudut Buka-an Plat Penggangu (α)	48
4.3.2. Torsi Statis (T) sebagai fungsi Sudut Halang (α)	55
4.3.3. <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai Fungsi Sudut Halang (α)	59
4.3.4. <i>Coefficient of Power (CoP)</i> sebagai fungsi <i>Tip Speed Ratio (λ)</i>	65

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	75
BIODATA PENULIS	81

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Turbin Savonius	9
Gambar 2.2 Bagian-bagian dari Turbin Savonius	10
Gambar 2.3 Penguraian komponen gaya <i>drag</i> terhadap permukaan benda	11
Gambar 2.4 Rangkaian Turbin dengan generator	13
Gambar 2.5 Susunan turbin Savonius dan plat penghalang	15
Gambar 2.6 Grafik pengaruh penambahan plat pengganggu terhadap nilai <i>coefficient of power</i>	16
Gambar 2.7 Grafik pengaruh putaran turbin terhadap sudut plat pengganggu	17
Gambar 2.8 Grafik pengaruh torsi yang dihasilkan terhadap putaran turbin	18
Gambar 2.9 Susunan plat penghalang baru	19
Gambar 2.10 Perbandingan nilai torsi statis maksimum antara turbin tanpa penghalang dengan berpenghalang (curtain1, curtain2, curtain3) variasi sudut turbin 45°, 60°, dan 90°	19
Gambar 2.11 Perubahan torsi berdasarkan sudut penghalang untuk $\beta = 10^\circ$ and $\beta = 15^\circ$ ketika posisi θ 45°, 60°, dan 90°	21
Gambar 2.12. Pengaruh susunan penghalang terhadap daya turbin untuk $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$	22
Gambar 2.13 Skema susunan plat pengganggu pada turbin Savonius dua sudu dan tiga sudu	23
Gambar 2.14 Perbandingan struktur aliran pada saat <i>self starting</i> dengan <i>speed ratio</i> (λ) = 0,7; a = turbin dua sudu ; b = turbin tiga sudu	24
Gambar 2.15 Grafik performa turbin Savonius dengan dua sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu	25
Gambar 2.16 Grafik performa turbin Savonius tiga sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu	26
Gambar 3.1 Skema penelitian	27
Gambar 3.2 Skema <i>Wind Tunnel Sub Sonic</i>	31
Gambar 3.3 Turbin Angin Savonius	32

Gambar 3.4 Plat pengganggu	33
Gambar 3.5 <i>Tachometer</i> OMEGA seri HHT12	34
Gambar 3.6 <i>Torquemeter</i> LUTRON model TQ-8800	34
Gambar 3.7 <i>Pitot Static Tube</i>	35
Gambar 3.8 <i>Inclined</i>	36
Gambar 3.9 Sanwa Multimeter Digital CD-771	36
Gambar 3.10 Rangkaian untuk pengukuran	37
Gambar 3.11 Flowchart penelitian	39
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> tanpa plat datar pengganggu (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	45
Gambar 4.2 Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	46
Gambar 4.3 Grafik <i>Coefficient of Power</i> tanpa plat datar pengganggu (CoP_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)	47
Gambar 4.4 Grafik putaran turbin <i>Savonius</i> (n) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α)	49
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Putaran (n/n_o) sebagai fungsi sudut bukaan plat pengganggu (α)	51
Gambar 4.6 Kontur kecepatan hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	53
Gambar 4.7 Kontur <i>pressure</i> hasil simulasi turbin angin <i>Savonius</i> (a) tanpa plat datar pengganggu (b) plat datar pengganggu sudut bukaan $\alpha = 90^\circ$	54
Gambar 4.8 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α)	55
Gambar 4.9 Grafik perbandingan torsi statis (T/T_o) sebagai fungsi sudut halang (α)	57
Gambar 4.10 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α)	59
Gambar 4.11 Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin <i>Savonius</i> (CoP) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re) untuk sudut $\alpha = 40^\circ$	63

- Gambar 4.12 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_0) sebagai fungsi sudut halang (α) 64
- Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) 66

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tingkatan kecepatan angin 10 meter permukaan tanah	8
Tabel 2.2 Variasi panjang dari plat pengganggu dan pengarah ...	16
Tabel 3.1 Parameter dan dimensi	29
Tabel 3.2 Rencana waktu penelitian	40
Tabel A1 Data acuan untuk turbin tanpa plat datar pengganggu ..	74
Tabel A2 Data untuk bilangan <i>Reynolds</i> $6,0 \times 10^4$	75
Tabel A3 Data untuk bilangan <i>Reynolds</i> $7,5 \times 10^4$	76
Tabel A4 Data untuk bilangan <i>Reynolds</i> $9,0 \times 10^4$	77
Tabel A5 Data untuk bilangan <i>Reynolds</i> antara $4,5 \times 10^4$ hingga 10^5 untuk bukaan sudut $\alpha = 40^\circ$	78

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

A	Luas sapuan pada turbin yang ditabrak oleh angin (m^2)
b	<i>overlap</i> (m)
C_D	Koefisien <i>drag</i>
CoP	<i>Coefficient of Power</i> turbin angin berpengganggu
CoP_0	<i>Coefficient of Power</i> tanpa pengganggu
d	Diameter turbin angin <i>Savonius</i> (mm)
D	Diameter sudu turbin angin (mm)
F_D	Gaya <i>drag</i> (N)
h	Tinggi plat datar pengganggu (mm)
H	Tinggi turbin angin (mm)
I	Kuat arus listrik (Ampere)
L	Lebar plat datar pengganggu (mm)
\dot{m}	Laju aliran massa (kg/s)
n	Putaran turbin angin berpengganggu (rpm)
n_0	Putaran turbin angin tanpa pengganggu (rpm)
P	<i>Power</i> (J/s)
Re	Bilangan <i>Reynolds</i>
S	Tebal plat (mm)
T	Torsi statis turbin angin berpengganggu (Ncm)
T_0	Torsi statis turbin angin tanpa pengganggu (Ncm)
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
U	Kecepatan aliran fluida (m/s)
V	Tegangan listrik (Volt)
ρ	Densitas fluida (kg/m^3)
μ	Viskositas absolut fluida ($N.s/m^2$)
ω	Kecepatan angular dari turbin angin (rad/s)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu krisis energi global sedang menjadi topik pembicaraan utama masyarakat internasional. Sumber-sumber energi dunia telah tereksplorasi besar-besaran seiring dengan peledakan populasi manusia di dunia. Minyak bumi sebagai salah satu sumber daya alam dan sumber energi utama dunia sedang mengalami kondisi krisis. Semakin menipisnya persediaan bahan bakar fosil menjadi kekhawatiran tersendiri bagi umat manusia yang mana manusia saat ini sangat tergantung terhadap bahan bakar fosil. Ketergantungan ini perlu dialihkan ke sumber daya alternatif sebagai bentuk penyelamatan sumber energi dunia. Indonesia sebagai salah satu negara khatulistiwa mempunyai banyak sumber daya potensial yang masih belum maksimal pemanfaatannya. Dari data DITJEN EBTKE tahun 2013 salah satu sumber energi potensial di Indonesia adalah energi angin dengan potensi kecepatan angin rata-rata 3-6 m/s dan kapasitas pemanfaatan terpasang 1.33 MW.

Energi yang dimiliki oleh angin dapat dimanfaatkan dengan mengkonversikannya ke energi yang lain, salah satu yang populer saat ini adalah energi listrik. Konversi energi ini dengan cara mengubah energi kinetik dari angin digunakan untuk memutar baling-baling atau turbin angin. Pemanfaatan putaran baling-baling atau turbin angin dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik dengan menghubungkannya pada generator.

Teknologi yang sedang dikembangkan sekarang adalah turbin angin. Seorang ilmuwan yang bernama S.J. Savonius adalah penemu salah satu desain turbin angin pada tahun 1920an. Turbin angin penemuannya ini dinamakan turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius ini mempunyai desain awal dari plat tabung yang dibelah menjadi dua kemudian disatukan sehingga membentuk huruf 'S' jika dilihat dari sisi atas atau bawah. Turbin angin Savonius merupakan tipe turbin angin sumbu vertikal dengan dua sudu, yang mana salah satu sudu bertindak sebagai *advancing*

blade dan satu sudu lagi bertindak sebagai *returning blade*. Dua sudu yang dimiliki turbin angin Savonius memiliki fungsi sebagai penerima gaya dari angin, yaitu gaya *drag*. Dengan bentuk permukaan yang berbeda dari *advancing blade* dan *returning blade* dapat menimbulkan selisih gaya yang mengenai kedua sudu ini. Gaya *drag* yang mengenai *advancing blade* dan *returning blade* jika dikalikan dengan jari-jari dari turbin angin Savonius akan menghasilkan torsi, torsi ini yang akan menggerakkan turbin. Torsi yang dihasilkan ketika dikalikan dengan kecepatan putar dari turbin akan menghasilkan daya turbin. Maka dari itu semakin besar selisih gaya yang mengenai sudu, maka semakin besar daya yang dihasilkan oleh turbin. Untuk menghasilkan selisih gaya yang besar maka perlu dilakukan pengurangan gaya *drag* yang mengenai salah satu sudu yaitu pada *returning blade*. Salah satu cara untuk mengurangi gaya *drag* pada *returning blade* dengan cara menempatkan pengganggu di depannya.

Penelitian-penelitian telah dilakukan oleh beberapa peneliti mengenai peningkatan performa dan penempatan pengganggu pada turbin angin Savonius. Penelitian yang dilakukan **Altan & Atilgan (2008)** menganalisis secara numerik dan eksperimental tentang pengaruh susunan *curtain plate* yang menempatkan dua buah plat di depan turbin dengan variasi sudut satu plat menghalangi *returning blade* (α) dan satu yang lain di posisi tepi luar *advancing blade* (β). Hasil terbaik dari eksperimen ini adalah dengan susunan panjang plat pengganggu $\ell_1 = 45\text{cm}$ dan $\ell_2 = 52\text{ cm}$ dengan sudut plat penghalang $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dengan susunan tersebut dapat meningkatkan *Power Coefficient* maksimum hingga 38.5%.

Penelitian selanjutnya yang dilakukan **Altan & Atilgan (2010)** hampir sama dengan yang dilakukan pada tahun 2008. Perbedaan dalam penelitian kali ini terdapat pada analisis posisi *returning blade* dan *advancing blade* (θ) pada saat turbin berputar dan desain susunan penghalang baru. Hasil maksimalnya turbin dapat menghasilkan daya hingga 8 W dengan susunan $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ dan $\theta = 60^\circ$.

Mohamed et al (2010) melakukan penelitian untuk meningkatkan daya yang dikeluarkan turbin angin Savonius dengan desain turbin menggunakan dua sudu dan tiga sudu dengan simulasi pada *software* ANSYS-FLUENT. Eksperimen dilakukan dengan menempatkan plat penghalang dengan variasi sudut tertentu (β) di depan *returning blade* dan *speed ratio* (λ). Kecepatan angin = 10 m/s. Hasil yang didapat dari simulasi, konfigurasi optimal dari besar sudut (β) = 100.83° dapat meningkatkan *Coefficient of Power* (C_p) hingga 27.3% pada *speed ratio* 0.7. Untuk konfigurasi optimal dari jumlah sudu tiga yaitu besar sudut (β) = 80.52° dapat meningkatkan *Coefficient of Power* (C_p) hingga 27.5% pada *speed ratio* 0.7.

Dari beberapa penelitian yang ditunjukkan, perlu dilakukan penelitian yang lebih dalam lagi untuk menaikkan performa turbin angin tipe Savonius. Pada penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen untuk menaikkan performa dari turbin angin tipe Savonius dengan cara mengurangi gaya *drag* pada sisi *returning blade* dengan menganalisis pengaruh sudut bukaan dari plat datar pengganggu.

1.2 Perumusan Masalah

Turbin angin Savonius terdiri atas dua bagian yaitu bagian *advancing blade* dan bagian *returning blade*. Kedua *blade* tersebut memiliki perbedaan pada kelengkungan permukaan dari sudu turbin. *Advancing blade* memiliki kelengkungan berbentuk cekung terhadap arah aliran yang seakan-akan menampung angin. 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*. Ketika hal tersebut diterapkan pada turbin angin tipe *Savonius* yang diberikan pengganggu di depan bagian *returning blade* maka nilai C_D akan

turun sehingga gaya *drag* yang diterima *returning blade* akan berkurang serta torsi negatif akan berkurang pula.

Pada penelitian kali ini akan digunakan turbin angin tipe Savonius yang diberi pengganggu berupa plat pengganggu berbentuk persegi panjang dengan perbandingan lebar dengan diameter sudu turbin (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 bukaan yang berbeda-beda. Hipotesis awal dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Turbin angin yang disusun secara vertikal dan plat pengganggu berbentuk persegi panjang diletakkan di depan *returning blade* sebagai pengganggu aliran angin dapat mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* sehingga meningkatkan torsi yang dihasilkan dari turbin Savonius. Peningkatan torsi ini juga akan memperbesar daya dari turbin Savonius.
2. Variasi sudut dari plat pengganggu akan mengarahkan aliran udara pada *advancing blade* sehingga akan meningkatkan gaya drag pada *advancing blade*, akibatnya meningkatkan torsi yang dihasilkan turbin.

Untuk membuktikan hipotesis di atas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin tipe Savonius dengan perbandingan lebar dengan diameter turbin (L/D) = 1.1547. Sudut penempatan plat pengganggu divariasikan dari 0° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° , 55° , 60° , 65° , 70° , 75° , 80° , 85° , 90° dengan bilangan *Reynolds* = 3.0×10^4 ; 5.3×10^4 ; dan 7.0×10^4 .

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh beberapa batasan masalah agar pembahasan tidak menjauh dari tujuan penelitian.

1. Fluida yang mengalir adalah udara dalam kondisi aliran *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada sisi *upstream*, dengan bilangan *Reynolds* = 6.0×10^4 ; 7.5×10^4 ; dan 9.0×10^4 .

2. Analisis dilakukan pada turbin angin tipe Savonius dengan panjang (D) = 60 mm dan pengganggu sisi *returning blade* berupa plat datar dengan bentuk persegi panjang dengan ukuran tinggi (H) = 150 mm dan lebar (L) = 69 mm yang memiliki rasio $L/D = 1.1547$.
3. Variasi sudut halang plat datar pengganggu yang digunakan pada rentang $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ dengan kenaikan 5° .
4. Analisis aliran dari satu arah.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menaikkan performa dari turbin angin tipe Savonius dengan mengurangi gaya *drag* pada sisi *returning blade* dan menganalisis pengaruh sudut halang plat datar pengganggu dengan rasio lebar pengganggu dengan diameter sudu turbin (L/D) = 1.1547 terhadap performa turbin angin tipe Savonius, akan diambil hasil pengukuran pada penelitian ini:

1. Nilai putaran dari turbin Savonius dengan *Reynolds Number* 6.0×10^4 ; 7.5×10^4 ; dan 9.0×10^4
2. Nilai torsi statis dari turbin Savonius dengan *Reynolds Number* 6.0×10^4 ; 7.5×10^4 ; dan 9.0×10^4
3. Nilai arus dan tegangan listrik yang dihasilkan oleh generator listrik untuk mendapatkan nilai daya yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang akan didapat dari penelitian penempatan plat pengganggu di depan *returning blade* turbin Savonius ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Dapat menjelaskan pengaruh penempatan plat pengganggu di depan *returning blade* terhadap nilai torsi dan putaran turbin Savonius.
2. Dapat menjelaskan pengaruh sudut bukaan plat pengganggu di depan *returning blade* dan bidang tegak

lurus aliran fluida terhadap nilai torsi dan putaran turbin Savonius.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Angin

Angin adalah udara yang bergerak karena adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi ini. Angin akan bergerak dari suatu daerah yang memiliki tekanan tinggi ke daerah yang memiliki tekanan yang lebih rendah. Angin yang bertiup di permukaan bumi ini terjadi akibat adanya perbedaan penerimaan radiasi surya, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara. Adanya perbedaan suhu tersebut menyebabkan perbedaan tekanan, akhirnya menimbulkan gerakan udara. Perubahan panas antara siang dan malam merupakan gaya gerak utama sistem angin harian, karena beda panas yang kuat antara udara di atas darat dan laut atau antara udara di atas tanah tinggi (pegunungan) dan tanah rendah (lembah).

Proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui dua tahapan konversi energi, pertama aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling atau turbin angin) yang menyebabkan rotor berputar selaras dengan angin yang bertiup, kemudian putaran dari rotor dihubungkan dengan generator, dari generator inilah dihasilkan arus listrik. Jadi proses tahapan konversi energi bermula dari energi kinetik angin menjadi energi gerak rotor kemudian menjadi energi listrik. Besarnya energi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya adalah sebagai berikut :

- 1) Rotor (kincir), rotor turbin sangat bervariasi jenisnya, dimensi dan konfigurasi rotor akan berbanding lurus dengan daya listrik yang dihasilkan.
- 2) Kecepatan angin, kecepatan angin akan mempengaruhi kecepatan putaran rotor yang akan menggerakkan generator.
- 3) Jenis generator, generator terbagi dalam beberapa karakteristik yang berbeda, generator yang cocok untuk Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) adalah generator yang dapat menghasilkan arus listrik pada putaran rendah.

Listrik yang dihasilkan dari Sistem Konversi Energi Angin akan bekerja optimal pada siang hari dimana angin berhembus cukup kencang dibandingkan dengan pada malam hari, sedangkan penggunaan listrik biasanya akan meningkat pada malam hari. Untuk mengantisipasinya sistem ini sebaiknya tidak langsung digunakan untuk keperluan produk-produk elektronik, namun terlebih dahulu disimpan dalam satu media seperti baterai atau aki sehingga listrik yang keluar besarnya stabil dan bisa digunakan kapan saja. Syarat dan kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan kincir angin dan jari-jari 1 meter dapat dilihat seperti pada Tabel 2.1 berikut:

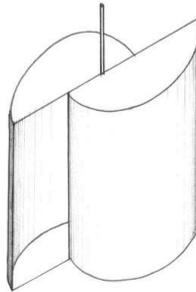
Tabel 2.1 Tingkatan Kecepatan Angin 10 Meter di Atas Permukaan Tanah

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 – 0,02	-----
2	0,3 – 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10,7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plumpang berombak kecil
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 – 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 36,9	Tornado

Klasifikasi angin pada kelompok 3 adalah batas minimum dan angin pada kelompok 8 adalah batas maksimum energi angin yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

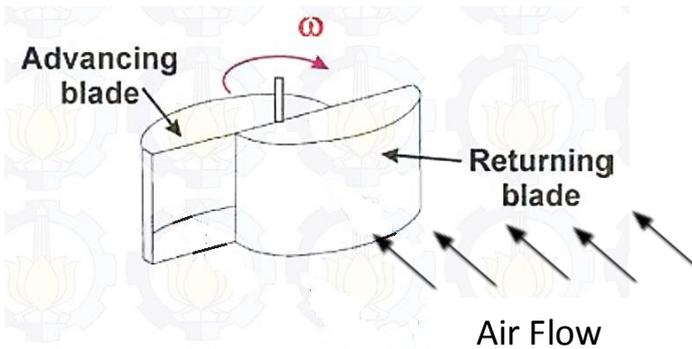
2.2 Turbin Angin Tipe Savonius

Sesuai dengan proses pemanfaatan energi angin dilakukan melalui dua tahapan konversi energi, rotor merupakan salah satu komponen penting dalam sistem konversi energi angin. Salah satu jenis rotor yang digunakan pada penelitian ini adalah turbin angin tipe Savonius, yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Turbin Savonius

Seorang ilmuwan yang bernama S.J. Savonius adalah penemu salah satu desain turbin angin pada tahun 1920an. Turbin angin penemuannya ini dinamakan turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius ini mempunyai desain awal dari plat tabung yang dibelah menjadi dua kemudian disatukan sehingga membentuk huruf 'S' jika dilihat dari sisi atas atau bawah.



Gambar 2.2 Bagian-bagian dari Turbin Savonius

Turbin angin Savonius merupakan tipe turbin angin sumbu vertikal dengan dua sudu, yang mana salah satu sudu bertindak sebagai *advancing blade* dan satu sudu lagi bertindak sebagai *returning blade*. Dua sudu yang dimiliki turbin angin Savonius yang ditunjukkan Gambar 2.2 memiliki fungsi sebagai penerima gaya dari angin, yaitu gaya *drag*. Dengan bentuk permukaan yang berbeda dari *advancing blade* dan *returning blade* dapat menimbulkan selisih gaya yang mengenai kedua sudu ini, yang mana gaya yang mengenai *advancing blade* lebih besar daripada *returning blade*. Hal tersebut yang menyebabkan turbin dapat berputar.

2.3 Gaya Drag

Drag adalah sebuah komponen gaya pada suatu benda yang bertindak sejajar dengan arah gerak relative. Gaya drag merupakan gaya akibat reaksi dari permukaan benda (d) akibat aliran *viscous* fluida inkompresibel dengan kecepatan (V) yang menghasilkan tekanan dan gaya geser dengan arah sejajar horizontal aliran. Gaya drag, F_D , jika ditulis dalam bentuk persamaan simbolik adalah sebagai berikut :

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot A \quad (2.1)$$

Yang mana C_D adalah koefisien drag dan biasa dirumuskan dalam bentuk berikut :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho \cdot U_\infty^2 \cdot A} \quad (2.2)$$

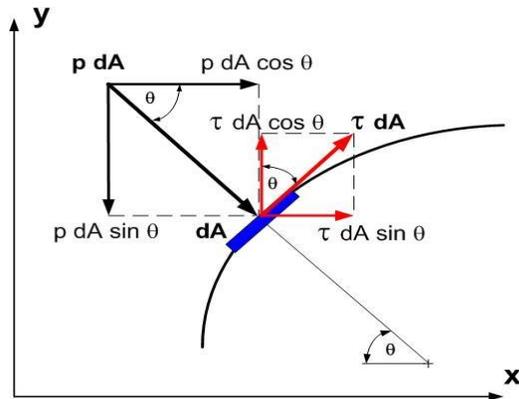
dimana :

F_D : gaya Drag
 $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2$: tekanan dinamis aliran bebas
 A : luas permukaan benda

Gaya drag total merupakan penggabungan antara *friction drag* (F_{Df}) dan *pressure drag* (F_{Dp}). *Friction drag* adalah gaya drag yang diakibatkan oleh tegangan geser antara fluida dan permukaan benda, sedangkan *pressure drag* adalah gaya drag yang diakibatkan oleh tekanan fluida dengan tegak lurus terhadap permukaan benda. Penguraian komponen gaya drag ditunjukkan Gambar 2.3.

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

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



Gambar 2.3 Penguraian komponen gaya drag terhadap permukaan benda

2.4 Daya yang Dihasilkan Turbin

Turbin merupakan salah satu komponen penting dalam sistem konversi energi angin. Turbin mengubah energi kinetik dari

angin menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Daya yang dihasilkan turbin dapat diestimasi dengan menghitung daya yang dihasilkan dari aliran angin yang mengenai turbin dan diukur keluaran daya dari turbin dengan dihubungkan sistem pengukuran tertentu. Untuk menghitung daya dari aliran angin yang mana udara memiliki massa (m) dan kecepatan (v) maka digunakan persamaan energi kinetik sebagai berikut :

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

Massa udara di sini bergerak per satuan waktu (*mass flow rate*) dengan densitas ρ ditunjukkan dengan persamaan berikut ini :

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

Sehingga daya yang dihasilkan dari aliran angin (P_w) adalah sebagai berikut :

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

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.7)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U_1^3 \quad (2.8)$$

dimana :

- P_w : daya angin (*watt*)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- A : luas penampang turbin (m^2)
- U_1 : kecepatan udara (m/s)

Luas penampang A adalah luas area aliran angin yang mengenai turbin, maka dari itu dapat diperoleh dari persamaan berikut :

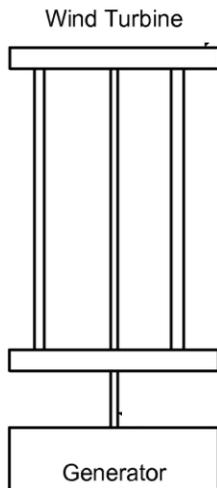
$$A = d \cdot H \quad (2.9)$$

dimana :

- A : luas penampang aliran
- d : diameter turbin
- H : tinggi turbin

Daya yang dihasilkan turbin dapat diketahui juga dengan cara diukur keluaran daya dari turbin dengan dihubungkan sistem pengukuran tertentu. Pengukuran daya yang digunakan cara poros

turbin dihubungkan dengan generator ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian Turbin dengan generator

Daya yang dihasilkan turbin dapat diketahui dengan mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan generator, untuk perhitungan daya dari pengukuran adalah:

$$P_r = V \cdot I \quad (2.10)$$

dimana:

P_r : daya riil (*watt*)

V : tegangan yang dihasilkan dari generator (*volt*)

I : kuat arus yang dihasilkan dari generator (*A*)

Dari hasil perhitungan daya yang dihasilkan aliran angin dan daya yang dihasilkan generator dapat mengetahui *Coefficient of Power* (C_p). *Coefficient of Power* adalah rasio antara daya yang dihasilkan generator dengan daya yang dihasilkan aliran angin.

$$P_r = C_p \frac{1}{2} \rho A U_1^3 \quad (2.11)$$

$$C_p = \frac{P_r}{\frac{1}{2} \rho A U_1^3} \quad (2.12)$$

$$C_p = \frac{P_r}{P_w} \quad (2.13)$$

2.5 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menentukan suatu aliran sebagai aliran *laminar* atau *turbulent* pada aliran *incompressible*. Bilangan Reynolds atau yang biasa disebut *Re* juga mempengaruhi *boundary layer* dari aliran yang melalui suatu benda, dimana lapis batas memisahkan antara daerah yang terpengaruh gaya *viscous* dan gaya inersia. Pengaruh bilangan Reynolds pada lapis batas ditunjukkan oleh persamaan yang menunjukkan rasio dari gaya *viscous* dengan gaya inersia.

$$Re = \frac{\text{GayaInersia}}{\text{GayaViscous}} \quad (2.14)$$

dimana,

$$\text{GayaInersia} = p \times A = \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2 \quad (2.15)$$

$$\text{GayaViscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2 \quad (2.16)$$

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2} \quad (2.17)$$

Dimana L adalah panjang karakteristik yang dalam hal ini $L = 2D - b$, sehingga :

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot (2D - b)}{\mu} \quad (2.18)$$

dimana,

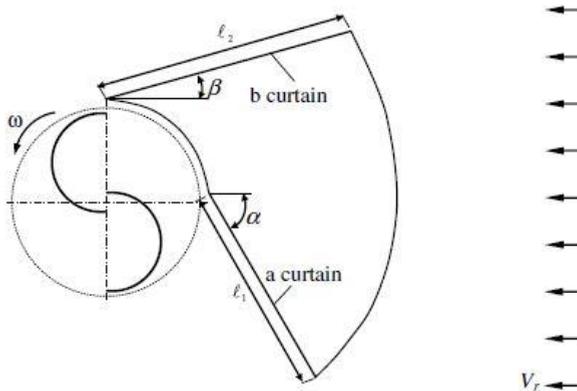
- ρ : densitas fluida
- b : *overlap* poros
- U_{∞} : kecepatan *free stream* fluida
- D : diameter sudu turbin
- μ : viskositas dinamis fluida

2.6 Penelitian Terdahulu

Dalam suatu penelitian, studi referensi pada penelitian-penelitian sebelumnya yang berhubungan dibutuhkan untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti antara lain mengenai peningkatan performa dan penempatan pengganggu pada turbin angin Savonius.

2.6.1 Pemberian Plat Pengganggu dan Pengarah pada Turbin Savonius

Penelitian yang dilakukan **Altan & Atilgan (2008)** menganalisis secara numerik dan eksperimental tentang pengaruh susunan *curtain plate* yang menempatkan dua buah plat di depan turbin dengan variasi sudut satu plat menghalangi *returning blade* (α) dan satu yang lain di posisi tepi luar *advancing blade* (β). Dengan diameter turbin $D = 32$ cm dan tinggi turbin $H = 32$ cm. Plat dengan tebal 4 mm diletakkan di depan turbin dengan sudut α dan β terhadap arah datangnya aliran udara dan disusun seperti pada Gambar 2.5.



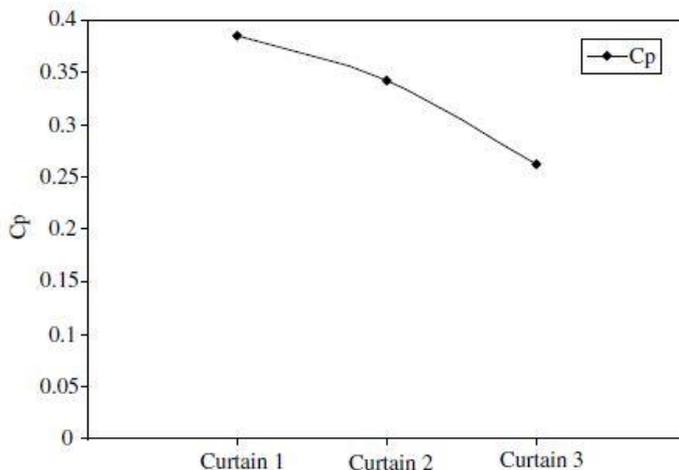
Gambar 2.5 Susunan turbin Savonius dan plat pengganggu (**Altan & Atilgan, 2008**)

Eksperimen dilakukan pada kecepatan angin 7 m/s dan bilangan Reynolds 1.5×10^5 . Variasi susunan panjang plat pengganggu dengan sudut plat pengganggu ditunjukkan pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Variasi panjang dari plat pengganggu dan pengaruh
(Altan & Atilgan, 2008)

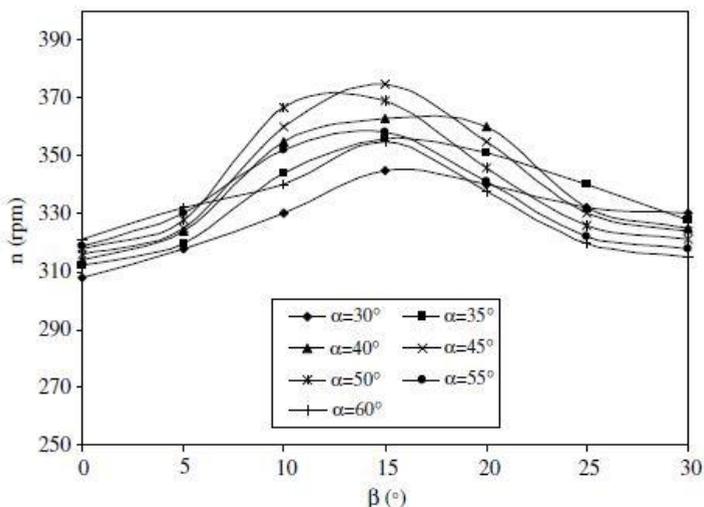
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Dari penelitian tersebut didapatkan nilai coefisien of power pada variasi 1 sebesar 0,38533, pada variasi 2 sebesar 0,34154 dan pada variasi 3 sebesar 0,26273. Atau dapat dilihat pada Gambar 2.6 dibawah ini :



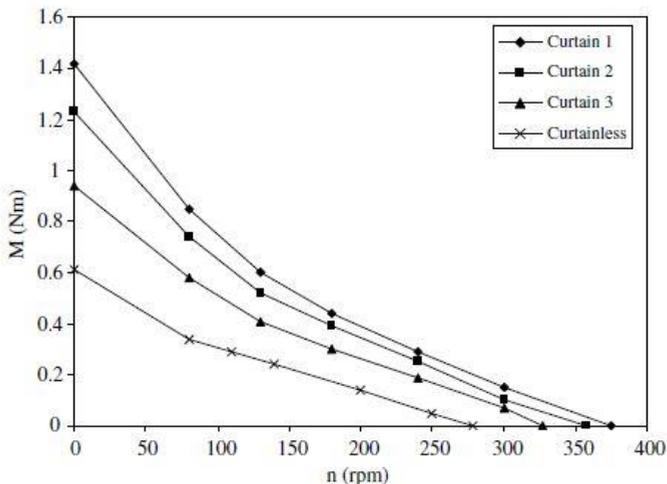
Gambar 2.6 Grafik pengaruh penambahan plat pengganggu terhadap nilai *coefficient of power* (Altan & Atilgan, 2008)

Selain itu penambahan plat pengganggu dan pengaruh juga berpengaruh terhadap putaran turbin rotor Savonius. Hasil pengukuran putaran rotor turbin dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Grafik pengaruh putaran turbin terhadap sudut plat pengganggu 1 (Altan & Atilgan, 2008)

Penambahan plat pengganggu juga berpengaruh terhadap nilai torsi yang dihasilkan oleh rotor turbin Savonius. Pengaruh nilai torsi yang dihasilkan terhadap putaran dan penambahan plat pengganggu dapat dilihat pada Gambar 2.8.

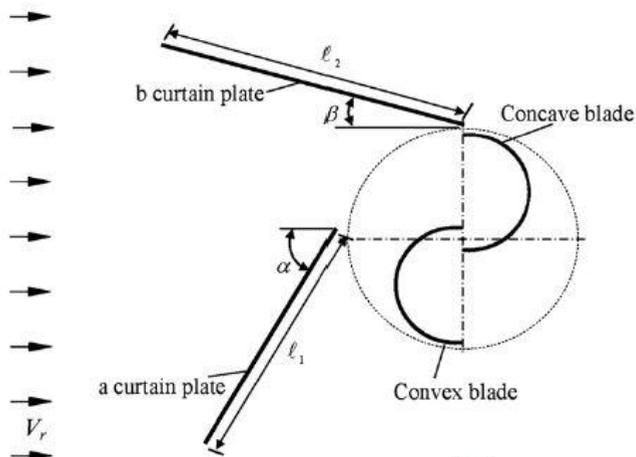


Gambar 2.8 Grafik pengaruh torsi yang dihasilkan terhadap putaran turbin (Altan & Atilgan, 2008)

Dari grafik-grafik diatas didapatkan hasil penelitian yang telah dilakukan yaitu bahwa Coefficient of Power dari turbin Savonius meningkat sebesar 38,5% apabila diberi pengganggu dengan panjang l_1 sebesar 45cm dan l_2 sebesar 52 cm dengan sudut pengganggu $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$.

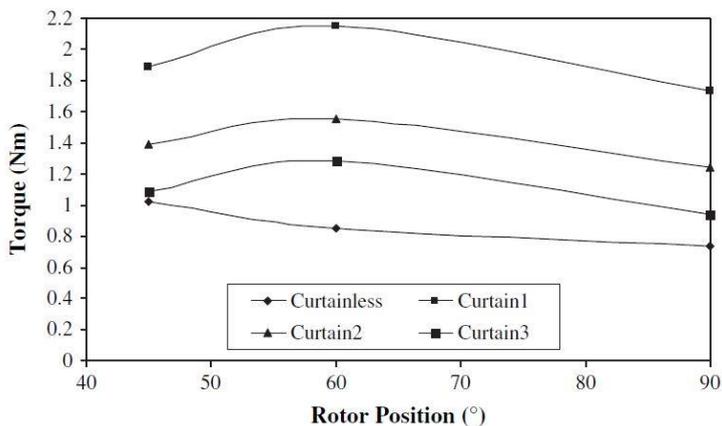
2.6.2 Desain Baru Susunan Pengganggu dan Pengarah pada Turbin Savonius

Penelitian selanjutnya yang dilakukan Altan & Atilgan (2010) hampir sama dengan yang dilakukan pada tahun 2008. Perbedaan dalam penelitian kali ini terdapat pada analisis posisi *advancing blade* dan *returning blade* (θ) pada saat turbin berputar dan desain susunan pengganggu baru. Susunan plat pengganggu dan turbin ditunjukkan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Susunan plat pengganggu baru (Altan & Atilgan, 2010)

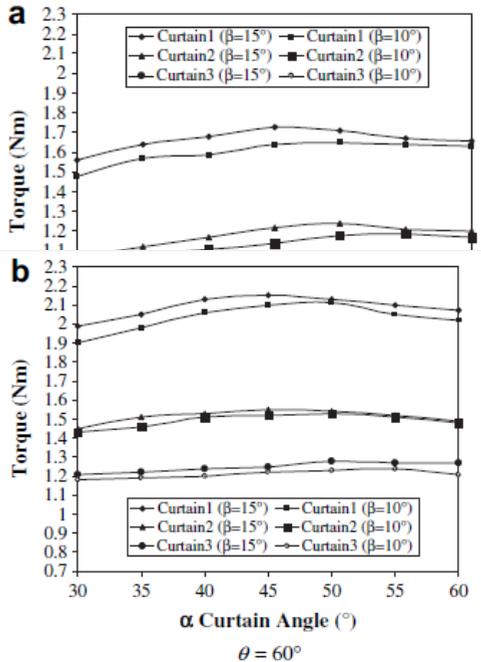
Eksperimen dilakukan pada kecepatan angin 7 m/s dan bilangan Reynolds 1.5×10^5 . Variasi sudut θ adalah 45° , 60° , dan 90° .

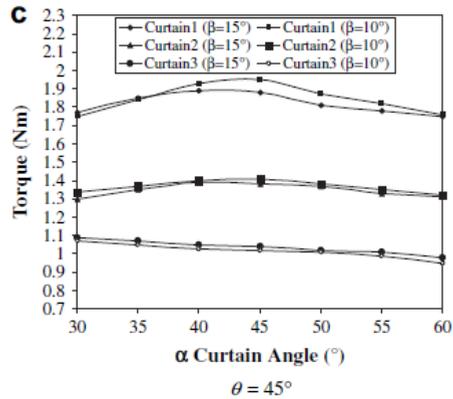


Gambar 2.10 Perbandingan nilai torsi statis maksimum antara turbin tanpa pengganggu dengan berpengganggu (curtain1,

curtain2, curtain3) variasi sudut turbin 45° , 60° , dan 90° (Altan & Atilgan, 2010)

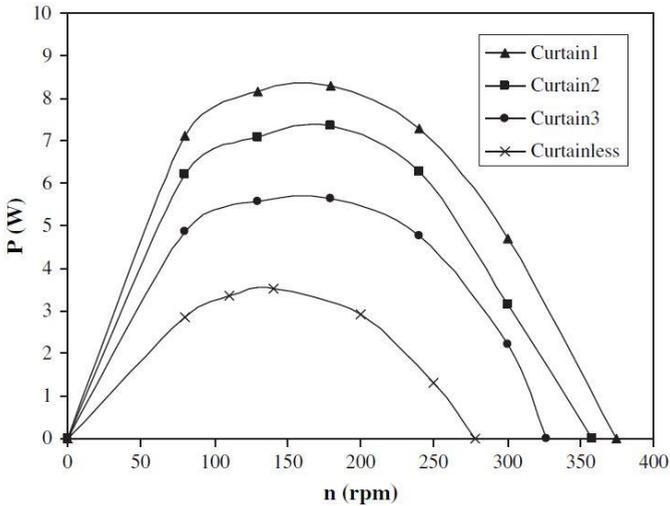
Ketika turbin tanpa pengganggu dan posisi sudut θ adalah 45° , 60° , dan 90° , torsi statis dapat diketahui terlihat pada Gambar 2.10. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa posisi sudut $\theta = 45^\circ$ menunjukkan torsi statis paling tinggi. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan *software* Fluent 6.0 untuk mengetahui torsi yang dihasilkan dari masing-masing variasi. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.11.





Gambar 2.11 Perubahan torsi berdasarkan sudut pengganggu untuk $\beta = 10^\circ$ and $\beta = 15^\circ$ ketika posisi $\theta = 45^\circ, 60^\circ$, dan 90° (Altan & Atilgan, 2010)

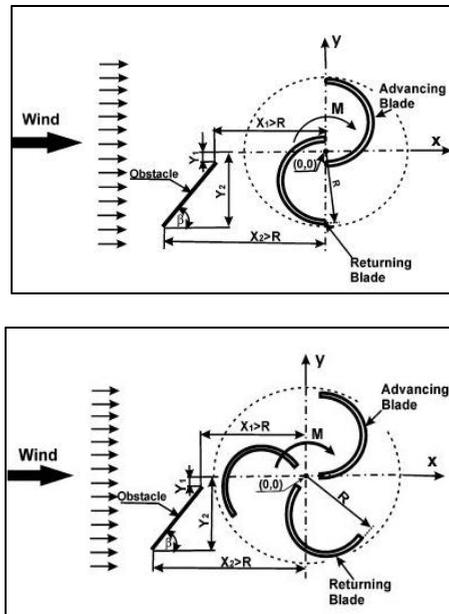
Hasil maksimal dari posisi sudut θ turbin dapat menghasilkan daya hingga 8 W dengan susunan $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ dan $\theta = 60^\circ$. Dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12 di bawah ini.



Gambar 2.12 Pengaruh susunan pengganggu terhadap daya turbin untuk $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Altan & Atilgan, 2010)

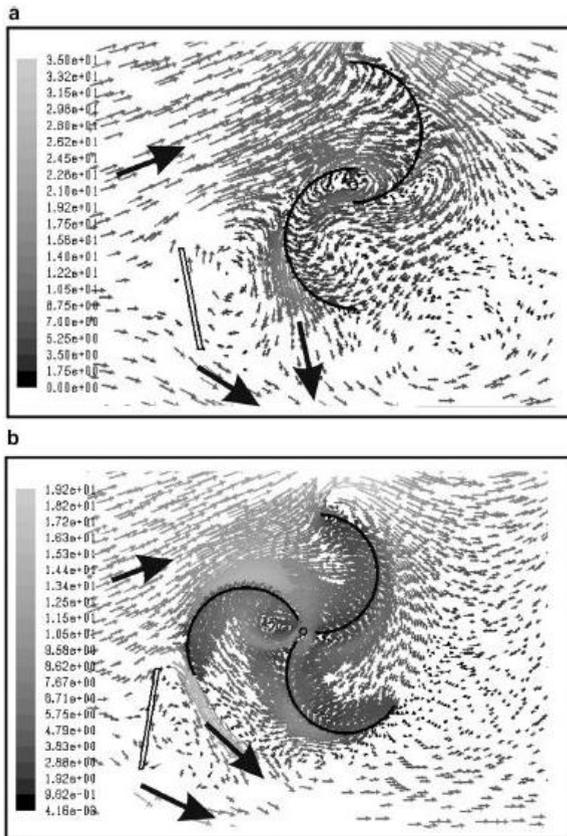
2.6.3 Membandingkan Performa Turbin Savonius Dua Sudu dan Tiga Sudu dengan Pemberian Plat Pengganggu

Mohamed et al (2010) melakukan penelitian untuk meningkatkan daya yang dikeluarkan turbin angin Savonius dengan desain turbin menggunakan dua sudu dan tiga sudu dengan simulasi pada *software* ANSYS-FLUENT. Eksperimen dilakukan dengan menempatkan plat pengganggu dengan variasi sudut tertentu (β) di depan *returning blade* dan *speed ratio* (λ). Kecepatan angin 10 m/s. Posisi plat pengganggu dan turbin savonius diletakkan seperti pada Gambar 2.13 dibawah ini.



Gambar 2.13 Skema susunan plat pengganggu pada turbin Savonius dua sudu dan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

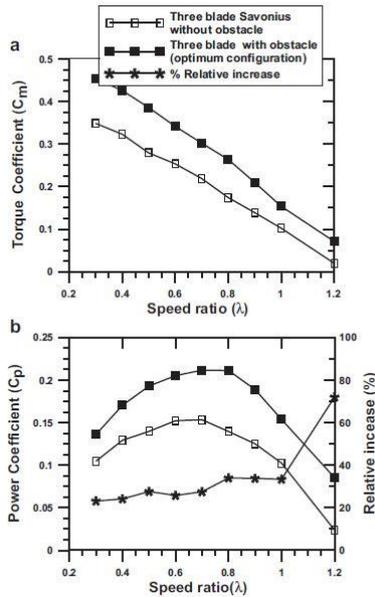
Hasil dari simulasi didapatkan bahwa jumlah sudu berpengaruh terhadap kemampuan *self starting* yang dimiliki oleh turbin Savonius. Aliran fluida pada turbin Savonius berdasarkan simulasi pada saat melakukan self starting dapat dilihat pada Gambar 2.14.



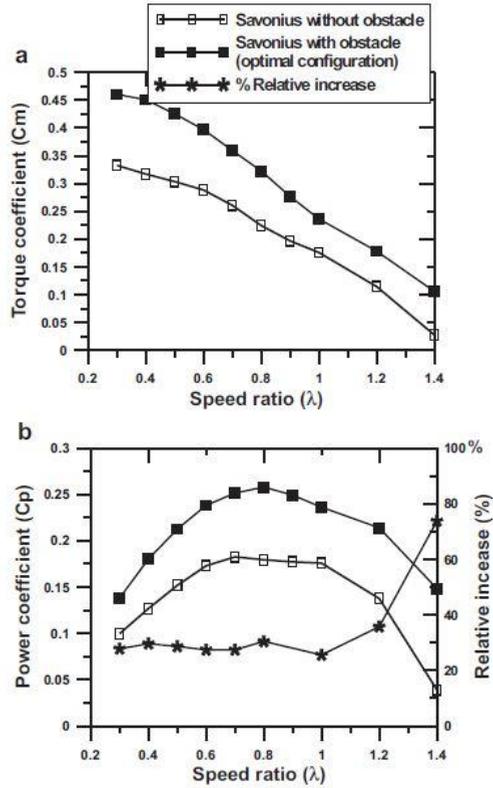
Gambar 2.14 Perbandingan struktur aliran pada saat *self starting* dengan *speed ratio* (λ) = 0,7; a = turbin dua sudu ; b = turbin tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

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

nilai koefisien torsi dan daya dapat dilihat pada Gambar 2.15 untuk dua sudu dan Gambar 2.16 untuk tiga sudu.



Gambar 2.15 Grafik performa turbin Savonius dengan dua sudu sebelum dan setelah diberi plat pengganggu (Mohamed et al, 2010)



Gambar 2.16 Grafik performa turbin Savonius tiga sudu sebelum dan setelah diberi plat penganggu (Mohamed et al, 2010)

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

4.1.1 Perhitungan Bilangan *Reynolds*

❖ Massa Jenis Udara (ρ)

Hukum Boyle - Gay Lussac mengenai pemuaian gas digunakan untuk perhitungan massa jenis udara, yaitu:

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

diketahui $V = \frac{m}{\rho}$ sehingga persamaan 4.1 menjadi :

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

dimana:

m_1 = massa udara pada keadaan standar

m_2 = massa udara pada saat pengukuran

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

P_2 = tekanan absolut udara pada saat pengukuran

T_1 = temperatur udara standar = 288,2 K

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

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

ρ_2 = massa jenis udara pada saat pengukuran

Karena kondisi lingkungan saat pengukuran dan keadaan standar dilakukan pada ketinggian yang sama, maka :

$$P_1 = P_2$$

Dan karena massa udara pada saat pengukuran dan keadaan standar itu juga sama, maka:

$$m_1 = m_2$$

Dari batasan tersebut, maka persamaannya menjadi:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \times \rho_1}{T_2} \quad (4.3)$$
$$\rho_2 = \frac{288,2K \times 1,225 \frac{kg}{m^3}}{299K} = 1,18075 \frac{kg}{m^3}$$

❖ Viskositas Absolut Udara (μ)

Persamaan Sutherland digunakan untuk perhitungan viskositas absolut udara, yaitu :

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

dimana:

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

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

sehingga:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m.s.K}^{0,5}} \times (299)^{0,5}}{1 + \frac{110,4 \text{ K}}{299 \text{ K}}} \\ &= 1,8413 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \end{aligned}$$

❖ Kecepatan Aliran Udara Masuk

Berikut merupakan persamaan untuk mendapatkan kecepatan aliran udara masuk :

$$U = \frac{Re \times \mu}{\rho_2 \times L} \quad (4.5)$$

$$U = \frac{60000 \times 1,8413 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}}{1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,106 \text{ m}}$$

$$U = 8,83 \text{ m/s}$$

4.1.2 Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP)

Dari persamaan (2.13) didapatkan persamaan untuk perhitungan *Coefficient of Power* (CoP) sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_r}{P_w} \quad (4.6)$$

Dimana P_r didapatkan dari daya riil mekanis rotor turbin yang dihitung dari tegangan dan arus keluaran dari generator listrik yang diputar oleh poros turbin. Adapun nilai P_r tersebut dapat dihitung sebagai persamaan berikut:

$$P_r = V \cdot I \quad (4.7)$$

dimana :

P_r : daya riil (watt)

V : tegangan yang dihasilkan dari generator (volt)

I : kuat arus yang dihasilkan dari generator (A)

Sedangkan P_w didapatkan dari energi aliran angin yang masuk sesuai dengan persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A U_1^3 \quad (4.8)$$

dimana :

P_w : daya angin (watt)

ρ : massa jenis udara (kg/m^3)

A : luas penampang turbin (m^2)

U_1 : kecepatan udara (m/s)

Besar luasan A pada penelitian kali ini ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A &= (2D-b) \times H \quad (4.9) \\ &= (2(0,06) - 0,014) \times 0,08 \\ &= 8,48 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan di atas maka nilai dari *Coefficient of Power* (CoP) pada pengukuran bilangan *Reynolds* 6×10^4 ; $L/D = 1,1547$ dan besar $\alpha = 40^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$C_p = \frac{V \times I}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{1,58 \text{ Volt} \times 0,04367 \text{ A}}{\frac{1}{2} \left(1,18075 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times (0,00848 \text{ m}^2) \times (8,833 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3})} \\ &= 0,02002 \\ &= 2,002 \% \end{aligned}$$

4.1.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio* (TSR)

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

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{U} \quad (4.11)$$

dimana :

λ : *Tip Speed Ratio* (TSR)

ω : kecepatan putar turbin (rad/s)

R : Jari-jari turbin (m)

U : kecepatan aliran fluida (m/s)

Dari hasil perhitungan di atas maka nilai dari *Tip Speed Ratio* (TSR) pada pengukuran bilangan *Reynolds* 6×10^4 ; $L/D = 1,1547$ dan besar $\alpha = 40^\circ$ dapat dihitung sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\frac{2\pi}{60} \cdot 1518.8 \times 0,053 \text{ m}}{8,83 \text{ m/s}}$$

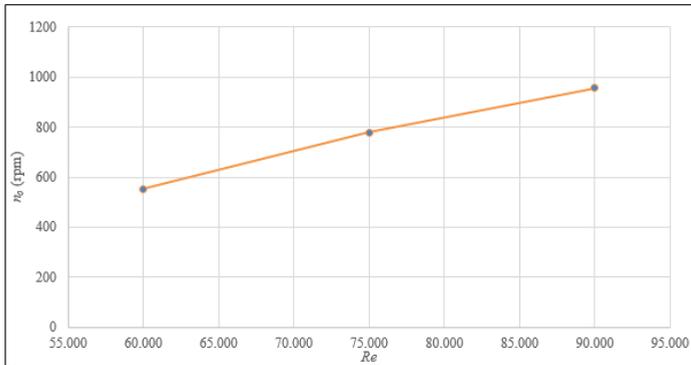
$$\lambda = 0.77$$

4.2 Analisis Performa Turbin *Savonius* Tanpa Plat Datar Pengganggu

Untuk mengetahui performa turbin *Savonius* sebelum dilakukan eksperimen yang bertujuan meningkatkan performa turbin angin *Savonius*, pada penelitian kali ini terlebih dahulu dilakukan pengambilan data awal tanpa menempatkan plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin *Savonius*. Agar dapat mengetahui performa turbin angin *Savonius* dilakukan analisis terhadap indikator-indikator performa turbin angin *Savonius* di bawah ini.

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

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



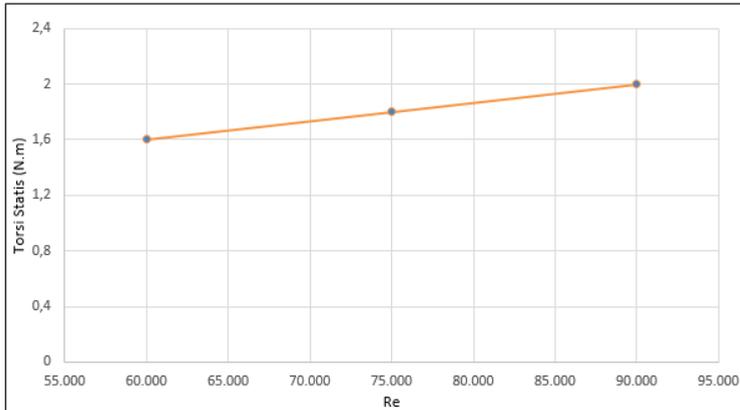
Gambar 4.1 Grafik putaran turbin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu (n_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Gambar 4.1 menunjukkan grafik putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada setiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* akan cenderung naik seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Didapatkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut putaran maksimal yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 554 rpm , 778 rpm , dan 955 rpm . Peningkatan putaran yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Hal tersebut akan menyebabkan nilai dari *mass flow rate* yang mengenai turbin semakin besar sehingga putaran dari turbin akan meningkat.

4.2.2 Torsi Statis Tanpa Plat Datar Pengganggu (T_o) sebagai Fungsi Bilangan *Reynolds* (Re)

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

temperatur sebesar $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran torsi statis pada turbin angin *Savonius* tersebut dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini.

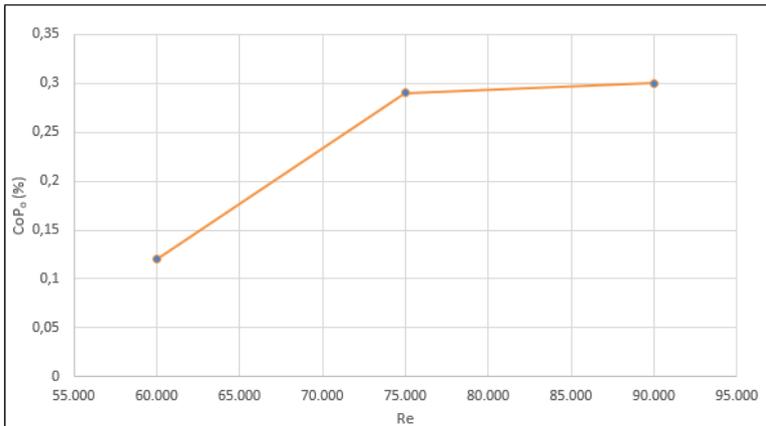


Gambar 4.2 Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_o) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re)

Gambar 4.2 menunjukkan grafik torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius* akan cenderung naik seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Didapatkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut torsi statis (T_o) maksimal sebesar $1,6\text{ N.cm}$, $1,8\text{ N.cm}$, dan 2 N.cm . Peningkatan torsi statis yang dihasilkan turbin *Savonius* disebabkan oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Hal tersebut menyebabkan gaya *drag* yang mengenai turbin angin *Savonius* akan semakin besar sehingga torsi yang dihasilkan akan meningkat.

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

Dari pengambilan data awal yang telah dilakukan, didapat data berupa *Coefficient of Power* tanpa plat pengganggu (CoP_o) pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pengukuran terhadap performa turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu dilakukan pada temperatur sebesar 26°C . Pengukuran daya *output* (P_r) dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan dan arus yang diukur pada keluaran generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* (P_r) nantinya dibandingkan dengan daya teoritis (P_w) untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (CoP). Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 dibawah ini.



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

Gambar 4.3 menunjukkan *Coefficient of Power* tanpa plat datar pengganggu (CoP_o) dari turbin *Savonius* pada tiap bilangan *Reynolds*. *Trendline* dari grafik terlihat bahwa *Coefficient of Power* yang dihasilkan turbin angin *Savonius* akan cenderung naik seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds*. Didapatkan bahwa pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut

didapatkan didapatkan *Coefficient of Power* (CoP_o) maksimal sebesar 0,12%, 0,29%, dan 0,3%. 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 didapatkan bahwa turbin angin *Savonius* memiliki kemampuan yang dapat ditingkatkan untuk mengkonversi energi *input* dari aliran udara.

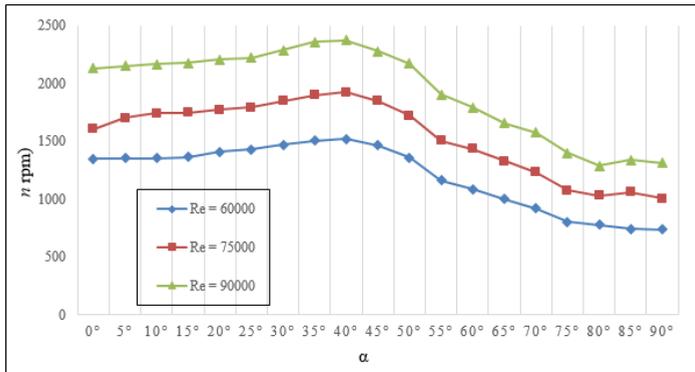
4.3 Analisis Performa Turbin *Savonius* yang Diberikan Plat Datar Pengganggu dengan Variasi Sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

Untuk meningkatkan performa turbin *Savonius* pada penelitian kali ini dilakukan eksperimen dengan penempatan sebuah plat datar pengganggu berbentuk persegi panjang dengan dimensi $L/D = 1,1547$ yang diletakkan di depan *returning blade* turbin *Savonius* dengan variasi perubahan sudut bukaan plat pengganggu (α). Sudut bukaan 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* $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Agar dapat mengetahui peningkatan performa turbin angin *Savonius* dilakukan analisis terhadap indikator-indikator performa turbin angin *Savonius* di bawah ini.

4.3.1 Putaran Turbin *Savonius* (n) sebagai fungsi Sudut Bukaan Plat Pengganggu (α)

Salah satu data yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah putaran turbin angin *Savonius* (n) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Putaran turbin *Savonius* (n) diukur dengan menggunakan *non-contact optical tachometer* yang ditembakkan pada salah satu bagian dari turbin yang telah diberikan *scotlight*. Data hasil pengukuran pada turbin

angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 dibawah ini.



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

Dari Gambar 4.4 dapat dilihat grafik yang menunjukkan putaran yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu. Putaran yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap grafik menunjukkan adanya *trendline* putaran turbin *Savonius* yang memiliki kemiripan satu sama lain.

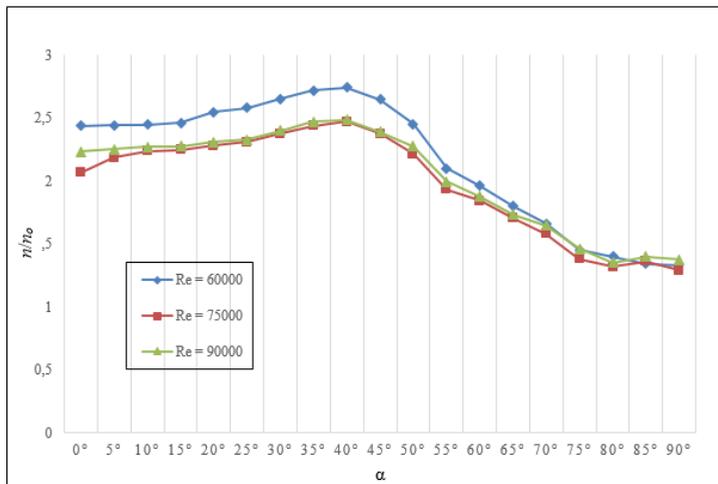
Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . Putaran yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 1348,5 rpm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar 1518,8 rpm, kemudian putaran dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 736,81 rpm pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* 75

$\times 10^4$, putaran yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1606,8 *rpm* pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar 1922,4 *rpm*, selanjutnya putaran dari turbin akan turun hingga 1001,9 *rpm* pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , putaran yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2132,4 *rpm* pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan putaran turbin sebesar 2373,1 *rpm* dan selanjutnya putaran dari turbin akan turun hingga 1314,4 *rpm* pada sudut bukaan 90° .

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° terjadi kenaikan putaran yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi sudut bukaan plat datar pengganggu yang berada di depan *returning blade* menghalangi aliran udara sehingga menurunkan gaya *drag* pada sisi *returning blade*, di sisi lain arah bukaan plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke sisi *advancing blade* menjadi lebih banyak sehingga selisih torsi dari kedua sudu mengalami peningkatan dan terjadi kenaikan putaran dari turbin angin *Savonius* setiap kenaikan sudut bukaan plat pengganggu hingga sudut bukaan 40° . Sedangkan pada rentang sudut bukaan plat datar pengganggu antara 40° hingga 90° terjadi penurunan putaran dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan oleh sudut bukaan plat datar pengganggu yang semakin besar menyebabkan aliran yang menuju ke sisi *returning blade* semakin banyak dan aliran yang menuju *advancing blade* akan lebih sedikit. Pada $\alpha > 30^\circ$ terjadi peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi sudut bukaan 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 turbin angin *Savonius* tanpa 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 (n_1/n) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 di bawah ini.



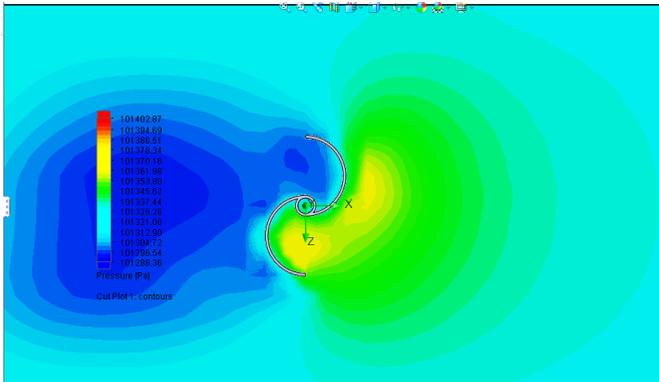
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Putaran (n/n_o) sebagai fungsi sudut bukaan plat pengganggu (α)

Pada Gambar 4.5 terlihat bahwa perbandingan putaran turbin tipe *Savonius* (n/n_o) tiap grafik akan mengalami *trend* naik pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan turun pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 40° hingga 90° . Perbandingan putaran (n/n_o) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 2,43 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n_1/n) turbin sebesar 2,74 kali, kemudian perbandingan putaran (n/n_o) dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 1,33 kali lipat pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan putaran (n/n_o) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,06 kali lipat pada posisi

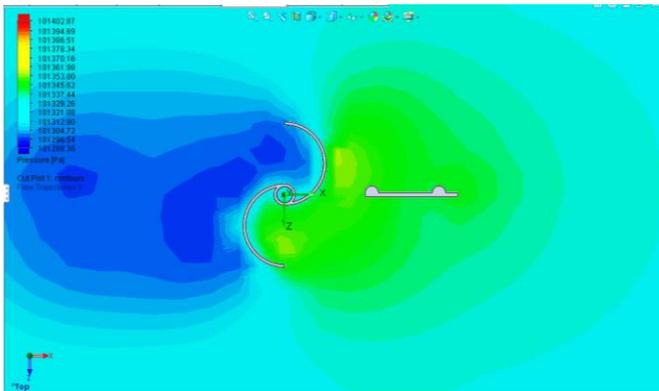
sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n/n_0) turbin sebesar 2,47 kali lipat, selanjutnya perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin akan turun hingga 1,29 kali lipat pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan putaran (n/n_0) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,23 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan putaran (n/n_0) turbin sebesar 2,48 kali lipat dan selanjutnya perbandingan putaran (n/n_0) dari turbin akan turun hingga 1,38 kali lipat pada sudut bukaan 90° .

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

Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 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. Dimana terlihat warna kontur untuk kecepatan yang berbeda di depan turbin antara tanpa pengganggu dan berpengganggu yang menggambarkan kecepatan aliran yang mengenai turbin. Begitu juga dengan kontur tekanan yang ditunjukkan Gambar 4.7 yang memiliki perbedaan warna kontur di depan turbin antara tanpa pengganggu dan berpengganggu. Dari perbedaan itu dapat dianalisis bagaimana gaya *drag* yang bekerja pada turbin, dengan perbedaan yang dihasilkan menyebabkan kenaikan performa dari turbin.



(a)

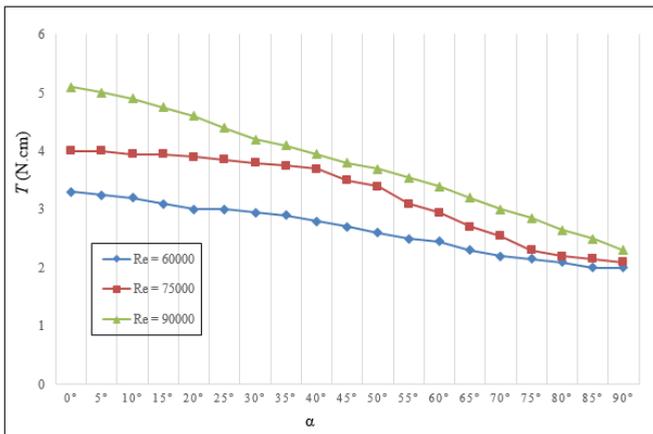


(b)

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

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

Data selanjutnya yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah berupa torsi statis (T) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Torsi statis (T) diukur dengan menahan sudu turbin pada setiap sudut 0° dengan menggunakan *torquemeter* dan hasilnya dapat terbaca. Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 dibawah ini.



Gambar 4.8 Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α)

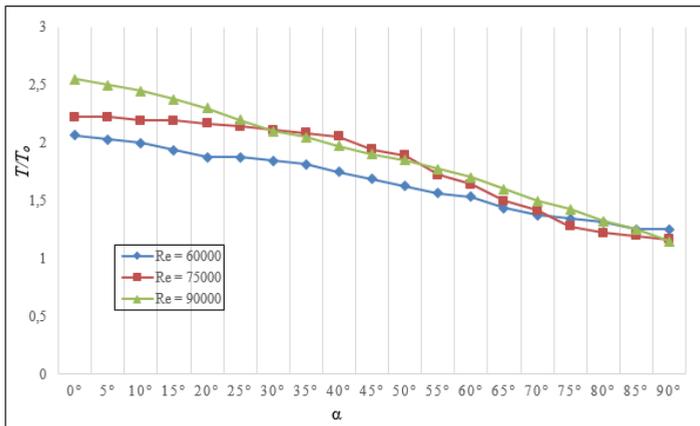
Dari Gambar 4.8 dapat dilihat grafik yang menunjukkan torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu. Torsi statis yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* untuk setiap posisi sudut bukaan tertentu. Grafik di atas menunjukkan adanya *trendline* torsi statis turbin *Savonius* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa torsi statis (T) turbin angin *Savonius* akan cenderung turun pada tiap sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 90° . Torsi statis (T) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* mencapai nilai tertinggi sebesar 3,3 N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 2 N.cm untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, torsi statis (T) tertinggi yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 4 N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 2,1 N.cm. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , torsi statis (T) tertinggi yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 5,1 N.cm pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 2,3 N.cm.

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 90° terjadi penurunan torsi statis yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi sudut bukaan plat pengganggu yang berada di depan *returning blade* mengarahkan aliran udara menuju sudu sehingga titik pusat gaya pada bagian *advancing blade* turbin *Savonius* mengalami perpindahan semakin menuju ke pusat sumbu turbin. Sedangkan di sisi yang lain, bukaan plat datar penghalang juga menyebabkan aliran fluida yang melewati celah antara plat datar pengganggu dengan sisi *returning blade* turbin *Savonius* semakin besar seiring bertambahnya sudut bukaan plat pengganggu menyebabkan aliran yang menuju ke sisi *returning blade* semakin banyak dan aliran yang menuju *advancing blade* akan lebih sedikit, sehingga terdapat peningkatan gaya *drag* yang diterima oleh *returning blade*. Pada kenaikan sudut bukaan, terjadi peningkatan gaya *drag* pada sisi *returning blade* dikarenakan oleh posisi sudut bukaan plat pengganggu yang menyebabkan aliran udara mulai melewati plat datar pengganggu menuju bagian *returning blade*, sehingga aliran fluida dapat menabrak sudu tersebut dan mengakibatkan selisih gaya *drag* antara *advancing*

blade dengan *returning blade* akan semakin kecil torsi statis yang dihasilkan semakin kecil juga.

Dari data turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan torsi statis (T_o) maksimal sebesar $1,6 \text{ N.cm}$, $1,8 \text{ N.cm}$, dan 2 N.cm . Apabila dilakukan sebuah komparasi (T/T_o) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 di bawah ini.



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

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa perbandingan torsi statis turbin tipe *Savonius* (T/T_o) tiap grafik akan mengalami *trend* turun pada sudut bukaan plat datar pengganggu antara 0° hingga 90° . Perbandingan torsi statis (T/T_o) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* mencapai nilai tertinggi sebesar 2,06 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 1,25 kali lipat untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan torsi statis (T/T_o)

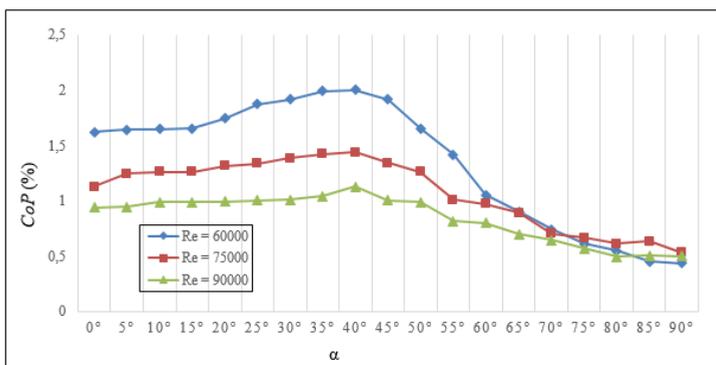
tertinggi yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,22 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 1,17 kali lipat. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan torsi stautis (T/T_o) tertinggi yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 2,55 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan turun hingga mencapai nilai terendah pada sudut bukaan 90° sebesar 1,15 kali lipat.

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

Terjadi sebuah fenomena yang menyimpang pada Gambar 4.9 tentang grafik perbandingan torsi statis pada rentang sudut bukaan $30^\circ < \alpha < 50^\circ$ yang mana grafik perbandingan torsi statis untuk bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$ *overlap* terhadap grafik perbandingan torsi statis untuk $9,0 \times 10^4$. Kemudian pada rentang sudut $75^\circ < \alpha < 90^\circ$ juga terjadi fenomena penyimpangan *trendline* grafik perbandingan torsi statis antar bilangan *Reynolds*. Dari analisis penyebab terjadinya, fenomena tersebut terjadi disebabkan oleh efektivitas performa plat pengganggu di depan *returning blade* sudah kurang berpengaruh pada rentang bukaan sudut yang yang ditunjukkan penyimpangan oleh grafik. Dari grafik dapat ditunjukkan bahwa ketika rentang sudut tersebut kecepatan aliran angin yang melewati belakang plat datar pengganggu akan semakin banyak, sehingga gaya *drag* pada *returning blade* semakin besar dan aliran udara yang mengarah ke *advancing blade* semakin sedikit sehingga gaya *drag* menurun yang selanjutnya akan menurunkan selisih gaya *drag*.

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

Data selanjutnya yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah berupa *Coefficient of Power* dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Pengukuran daya output (P_r) dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan dan arus yang diukur pada keluaran generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya output (P_r) nantinya dibandingkan dengan daya teoritis (P_w) untuk mendapatkan *Coefficient of Power* (*CoP*). Data hasil pengukuran pada turbin angin *Savonius* tersebut diolah dan dihasilkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dibawah ini.



Gambar 4.10 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (*CoP*) sebagai fungsi sudut halang (α)

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat grafik yang menunjukkan *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan plat datar pengganggu. *Coefficient of Power* (*CoP*) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* untuk setiap bukaan sudut plat

tertentu. Grafik di atas menunjukkan adanya *trendline* torsi statis turbin *Savonius* dimana masing-masing grafik bilangan *Reynolds* mengalami penurunan setelah mencapai nilai tertingginya seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa putaran turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 1,62% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 2,00%, kemudian *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 0,43% pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 1,12% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 1,44%, selanjutnya *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin akan turun hingga 0,53% pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 0,94% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan *Coefficient of Power (CoP)* turbin sebesar 1,12% dan selanjutnya *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin akan turun hingga 0,5% pada sudut bukaan 90° .

Pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan turbin angin *Savonius*. Hal ini dikarenakan posisi sudut bukaan plat datar pengganggu yang berada di depan *returning blade* menghalangi aliran udara sehingga menurunkan gaya *drag* pada sisi *returning blade*, di sisi lain arah bukaan plat datar pengganggu yang membentuk sudut menyebabkan aliran udara menuju ke sisi *advancing blade* menjadi lebih banyak sehingga selisih torsi dari

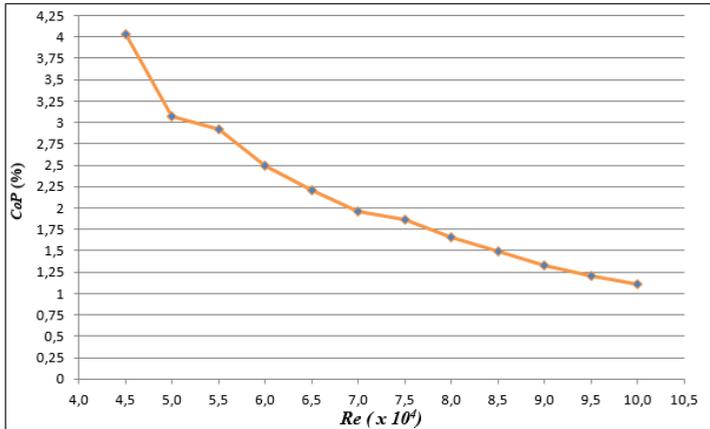
kedua sudu mengalami peningkatan dan terjadi kenaikan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* setiap kenaikan sudut bukaan plat datar pengganggu hingga sudut bukaan 40° . Sedangkan pada rentang sudut bukaan plat datar penghalang antara 40° hingga 90° terjadi penurunan *Coefficient of Power (CoP)* dari turbin angin *Savonius* yang disebabkan oleh sudut bukaan plat pengganggu yang semakin besar sehingga menyebabkan aliran yang menuju ke sisi *returning blade* semakin banyak dan aliran yang menuju *advancing blade* akan lebih sedikit. Pada $\alpha > 30^\circ$ terjadi peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi sudut bukaan 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 grafik masing-masing bilangan *Reynolds* diketahui terdapat fenomena penyimpangan *trendline* nilai *Coefficient of Power* turbin *Savonius (CoP)* memiliki nilai terendah dibandingkan yang lainnya pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 saat posisi sudut bukaan plat datar pengganggu sebesar 90° . Penurunan *trendline* yang cukup terjal terjadi dimulai pada sudut bukaan 60° dimana nilai *Coefficient of Power (CoP)* untuk bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$ hampir sama dengan nilai *Coefficient of Power (CoP)* untuk bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$. Dari analisis penyebab terjadinya, fenomena tersebut terjadi disebabkan peningkatan gaya *drag* dikarenakan oleh posisi sudut bukaan 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 sehingga performa dari turbin angin *Savonius* juga menurun. Pengukuran daya *output* (P_r) dari turbin angin *Savonius* didapatkan dari perkalian antara tegangan dan arus yang diukur pada keluaran generator yang telah dibebani oleh rangkaian lampu. Daya *output* (P_r) nantinya dibandingkan dengan daya teoritis (P_w) untuk mendapatkan *Coefficient of Power (CoP)*. Daya *output* yang

dihasilkan turbin sangat kecil dengan penurunan performa turbin dimulai pada sudut bukaan 60° untuk bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$ jika dibandingkan dengan daya teoritis dari energi angin sehingga *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius*.

Dari data grafik ditunjukkan bahwa nilai *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* sangat kecil jika dibandingkan dengan hasil penelitian-penelitian sebelumnya. Hasil analisis penyebab fenomena ini dihasilkan bahwa pemilihan dari generator sebagai penghasil daya *output* turbin kurang sesuai spesifikasinya. Generator yang digunakan kurang maksimal dalam mengkonversi putaran yang dihasilkan turbin menjadi daya. Hal ini disebabkan spesifikasi generator memiliki keluaran daya (watt) terlalu kecil dan rentang kemampuan mengeluarkan daya (watt) yang juga sempit.

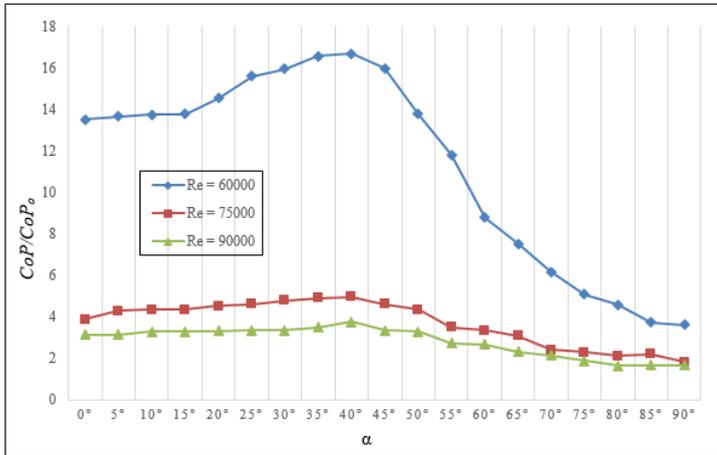
Dapat diketahui dari data *Coefficient of Power (CoP)* yang dihasilkan, nilai tertinggi *Coefficient of Power (CoP)* didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Hal ini dikarenakan nilai bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini (6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4) berada pada rentang bilangan *Reynolds* optimum yang menghasilkan *CoP* maksimum. Hal tersebut juga dibuktikan dari grafik yang dibuat dengan pengambilan data performa turbin untuk sudut bukaan 40° untuk rentang bilangan *Reynolds* $4,5 \times 10^4$ hingga 10^5 yang ditunjukkan Gambar 4.9, bilangan *Reynolds* yang menghasilkan nilai tertinggi *Coefficient of Power* adalah $4,5 \times 10^4$. Pada penelitian kali ini, untuk mengetahui bilangan *Reynolds* yang menghasilkan nilai tertinggi *Coefficient of Power* pada rentang 10^4 hingga 10^5 terbatas oleh kemampuan *wind tunnel* untuk mendapatkan bilangan *Reynolds* di bawah $4,5 \times 10^4$.



Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) sebagai fungsi bilangan *Reynolds* (Re) untuk sudut $\alpha = 40^\circ$

Bilangan *Reynolds* yang digunakan pada penelitian kali ini adalah 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Sedangkan pada Gambar 4.11, terlihat bahwa *trendline Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) akan cenderung turun dari bilangan *Reynolds* $4,5 \times 10^4$ hingga bilangan *Reynolds* 9×10^4 . Nilai tertinggi *Coefficient of Power* pada bilangan *Reynolds* $4,5 \times 10^4$ sebesar 4,03%.

Dari data turbin angin *Savonius* tanpa plat datar pengganggu pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 berturut-turut didapatkan *Coefficient of Power* tanpa plat pengganggu (CoP_o) maksimal sebesar 0,12%, 0,29%, dan 0,3%. Apabila dilakukan sebuah komparasi (CoP/CoP_o) terhadap turbin *Savonius* yang diberikan sebuah plat datar pengganggu maka akan didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 di bawah ini.



Gambar 4.12 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP/CoP_o) sebagai fungsi sudut halang (α)

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat grafik yang menunjukkan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan plat datar pengganggu. Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* dan setiap grafik menunjukkan adanya *trendline* perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin *Savonius*. Masing-masing grafik bilangan *Reynolds* mengalami penurunan setelah mencapai nilai tertingginya seiring dengan bertambahnya sudut bukaan plat datar pengganggu.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin angin *Savonius* akan cenderung naik pada sudut bukaan plat pengganggu antara 0° hingga 40° dan akan cenderung turun pada sudut bukaan plat pengganggu antara 40° hingga 90° . Perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 13,52 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu

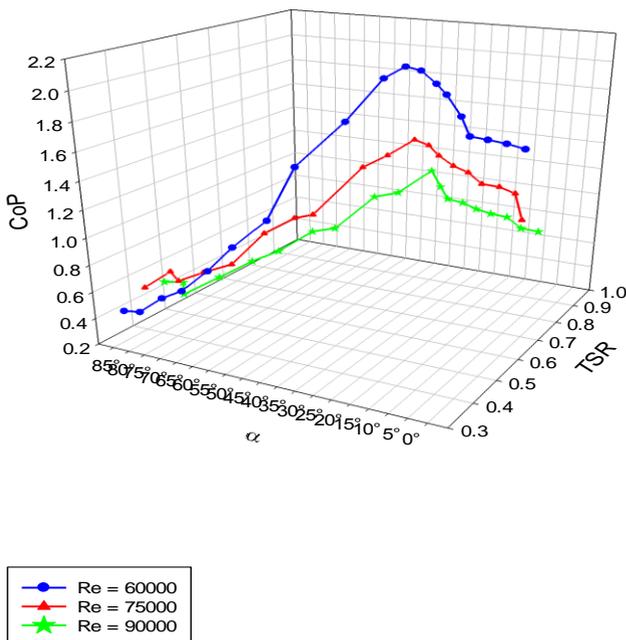
sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin sebesar 16,68 kali lipat, kemudian perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) dari turbin angin *Savonius* akan turun hingga 3,6 kali lipat pada sudut bukaan 90° untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 3,88% pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin sebesar 4,95 kali lipat, selanjutnya perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) dari turbin akan turun hingga 1,82 kali lipat pada sudut bukaan 90° . Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 3,14 kali lipat pada posisi sudut bukaan plat pengganggu sebesar 0° yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaan 40° dengan perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) turbin sebesar 3,75 kali lipat dan selanjutnya perbandingan *Coefficient of Power* (CoP/CoP_o) dari turbin akan turun hingga 1,66 kali lipat pada sudut bukaan 90° .

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

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

Data yang didapat dari eksperimen yang telah dilakukan adalah daya turbin angin *Savonius* (n) dalam setiap sudut bukaan plat datar pengganggu ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) pada bilangan *Reynolds* 6,0

$\times 10^4$; $7,5 \times 10^4$; dan $9,0 \times 10^4$. Daya *output* didapat dari perkalian antara tegangan (V) dengan arus (I) yang diukur dari keluaran generator yang dirangkai dengan rangkaian beban lampu. Perbandingan daya keluaran yang dihasilkan turbin *Savonius* (P_r) dengan daya angin diolah menjadi *Coefficient of Power*. *Tip Speed Ratio* (λ) adalah parameter tak berdimensi yang besarnya didapatkan hasil bagi dari pengukuran kecepatan putar dari turbin *Savonius* saat turbin terhubung dengan rangkaian generator dan beban lampu dengan kecepatan aliran angin yang masuk. Data *Coefficient of Power* kemudian dibuat grafik fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 dibawah ini.



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of Power* turbin *Savonius* (CoP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Gambar 4.13 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin angin *Savonius* pada setiap bilangan *Reynolds* terhadap sudut bukaan penempatan plat datar pengganggu dibandingkan dengan nilai dari *Tip Speed Ratio* (λ). *Coefficient of Power* yang dihasilkan oleh turbin *Savonius* akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* (λ) dan setiap grafik menunjukkan adanya *trendline* yang memiliki kemiripan satu sama lain.

Trendline dari masing-masing grafik terlihat bahwa *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin angin *Savonius* akan cenderung naik. *Coefficient of Power* yang dihasilkan turbin angin *Savonius* sebesar 0,43% pada posisi $\lambda = 0,34$ yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada posisi $\lambda = 0,77$ dengan *CoP* turbin sebesar 2,00% untuk bilangan *Reynolds* 6×10^4 . Pada bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$, *CoP* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 0,53% pada posisi $\lambda = 0,40$ yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada posisi $\lambda = 0,81$ dengan *CoP* turbin sebesar 1,44%. Pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 , *CoP* yang dihasilkan dari turbin *Savonius* sebesar 0,50% pada posisi $\lambda = 0,46$ yang kemudian akan naik hingga mencapai nilai tertinggi pada posisi $\lambda = 0,89$ dengan *CoP* turbin sebesar 1,12%.

Adapun peningkatan *Coefficient of Power* (*CoP*) disebabkan oleh terjadinya kenaikan putaran dan torsi dari turbin *Savonius* yang menyebabkan daya *output* semakin meningkat, sedangkan daya *input* dari aliran angin akan tetap sama. Kenaikan putaran dan torsi dari turbin *Savonius* dipengaruhi oleh penurunan gaya *drag* pada sisi *returning blade* yang disebabkan oleh plat datar pengganggu. Sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu semakin besar, hal itu menyebabkan torsi yang dihasilkan semakin besar. *Tip Speed Ratio* (λ) dipengaruhi besarnya dari hasil bagi pengukuran kecepatan putar dari turbin *Savonius* saat turbin terhubung dengan rangkaian generator dan beban lampu dengan kecepatan aliran angin yang masuk. Pada Gambar 4.13 ini terlihat

bahwa *Coefficient of Power (CoP)* tertinggi didapatkan pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 , hal tersebut sudah sesuai dengan Gambar 4.11 seperti yang sudah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan yaitu penempatan plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,1547$ di depan *returning blade* turbin angin *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 dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penempatan plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Hal ini berdasarkan kenaikan dari data yang diambil yaitu putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin *Savonius* bila dibandingkan dengan data awal tanpa penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade*.
2. Nilai tertinggi putaran yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (n) sebesar 2373,1 rpm pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 274% pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$.
3. Nilai tertinggi torsi statis yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (T) sebesar 5,1 N.cm pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis turbin (T/T_o) didapatkan 255% pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$.
4. Nilai tertinggi *Coefficient of Power* yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (CoP) sebesar 2,00% pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis turbin (CoP/CoP_o) didapatkan 1668% pada bilangan

Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$.

5. Bukaian plat datar pengganggu yang divariasikan ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Hal ini berdasarkan kenaikan dari data yang diambil yaitu putaran (n) dan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin angin *Savonius* mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaian plat datar pengganggu 40° dan 0° untuk torsi statis, kemudian kita bandingkan dengan data awal tanpa penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* menunjukkan nilai di atas 1.
6. Nilai tertinggi putaran yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (n) sebesar 2373,1 rpm dan *Coefficient of Power* yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (*CoP*) sebesar 2,00% pada posisi bukaian sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$. Kemudian nilai tertinggi torsi statis yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (T) sebesar 5,1 N.cm pada posisi bukaian sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang telah dilakukan ini bagi peneliti selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Diperlukan alat ukur daya dan torsi dinamis dari turbin angin *Savonius* yang akan digunakan penelitian ini untuk mendapatkan data-data yang akurat sehingga dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoritis.
2. Sesuaikan spesifikasi generator untuk pengukuran daya yang dihasilkan turbin angina *Savonius*.
3. Dimensi dari turbin angin *Savonius* dalam eksperimen ini melebihi batas yang diizinkan untuk ketentuan dari penggunaan *wind tunnel* yaitu *blockage ratio* sebesar 12%. Hal ini menimbulkan efek *blockage* pada lorong *wind tunnel* yang digunakan terlalu besar, sehingga perlu dilakukan eksperimen ulang dengan memperkecil dimensi

turbin angin *Savonius* atau menggunakan *wind tunnel* dengan dimensi yang lebih besar sehingga tidak melebihi ketentuan *blockage ratio*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Tabel A1 Data acuan untuk turbin tanpa plat datar pengganggu

Re	RPM	Torsi Statis (N.cm)	V (Volt)	I (Ampere)	P (Watt)	n (rpm)	Cop (%)
60000	554	1.6	1.42	0.00497	0.00395	452	0.12
75000	778	1.8	1.56	0.01716	0.0019	648	0.29
90000	955	2	1.54	0.031724	0.03384	806	0.3

Tabel A2 Data untuk bilangan *Reynolds* $6,0 \times 10^4$

α	n (rpm)	Torsi Statis (N.cm)	n (rpm)	λ (TSR)	CoP (%)	n/no	T/T _o	CoP/CoP _o
0°	1348.5	3.3	1048.4	0.6586	1.62218	2.43	2.06	13.51817
5°	1352.4	3.25	1053.1	0.6616	1.63985	2.44	2.03	13.66541
10°	1354	3.2	1054.5	0.6625	1.65018	2.44	2	13.75148
15°	1363.5	3.1	1060.61	0.6663	1.65467	2.46	1.94	13.78896
20°	1409.9	3	1125.6	0.7071	1.74485	2.54	1.88	14.5404
25°	1427.7	3	1144.91	0.7193	1.8732	2.58	1.88	15.61001
30°	1468.5	2.95	1195.57	0.7511	1.91486	2.65	1.84	15.9572
35°	1505.5	2.9	1209.24	0.7597	1.98934	2.72	1.81	16.57784
40°	1518.8	2.8	1221.6	0.7675	2.00199	2.74	1.75	16.68326
45°	1465.2	2.7	1192.4	0.7491	1.91785	2.64	1.69	15.98211
50°	1357.7	2.6	1059.8	0.6658	1.65366	2.45	1.63	13.7805
55°	1161.2	2.5	867	0.5447	1.41613	2.1	1.56	11.80108
60°	1086.5	2.45	798.2	0.5015	1.05289	1.96	1.53	8.774044
65°	997.55	2.3	701	0.4404	0.90318	1.8	1.44	7.526481
70°	919.2	2.2	652.4	0.4099	0.74041	1.66	1.38	6.170118
75°	803.91	2.15	598.7	0.3761	0.60928	1.45	1.34	5.077292
80°	774.51	2.1	577.1	0.3626	0.54777	1.4	1.31	4.564727
85°	743.33	2	541.6	0.3403	0.44738	1.34	1.25	3.728183
90°	736.81	2	538.56	0.3383	0.43192	1.33	1.25	3.599316

Tabel A3 Data untuk bilangan *Reynolds* $7,5 \times 10^4$

α	n (rpm)	Torsi Statis (N.cm)	n (rpm)	λ (TSR)	Cop (%)	n/n _o	T/T _o	CoP/CoP _o
0°	1606.8	4	1324.13	0.6659	1.12562	2.07	2.22	3.881451
5°	1699	4	1428.69	0.7185	1.24219	2.18	2.22	4.283398
10°	1741.4	3.95	1450.7	0.7296	1.26106	2.24	2.19	4.348481
15°	1749	3.95	1455.2	0.7319	1.2623	2.25	2.19	4.352741
20°	1773.7	3.9	1490.7	0.7497	1.31217	2.28	2.17	4.524741
25°	1793.9	3.85	1513.3	0.7611	1.33334	2.31	2.14	4.597728
30°	1849	3.8	1535.52	0.7723	1.38276	2.38	2.11	4.768136
35°	1896.6	3.75	1593.45	0.8014	1.41966	2.44	2.08	4.895378
40°	1922.4	3.7	1615.23	0.8123	1.43709	2.47	2.06	4.955482
45°	1846.4	3.5	1526.91	0.7679	1.33959	2.37	1.94	4.619286
50°	1722.8	3.4	1459	0.7338	1.26247	2.21	1.89	4.353357
55°	1504.2	3.1	1201.84	0.6044	1.00904	1.93	1.72	3.479452
60°	1433.4	2.95	1185.39	0.5962	0.97174	1.84	1.64	3.350825
65°	1325.4	2.7	1083.34	0.5448	0.88993	1.7	1.5	3.068728
70°	1229.5	2.55	965	0.4853	0.6997	1.58	1.42	2.41276
75°	1074.1	2.3	884	0.4446	0.66405	1.38	1.28	2.289831
80°	1027	2.2	824.55	0.4147	0.61244	1.32	1.22	2.111877
85°	1058.1	2.15	869	0.437	0.63282	1.36	1.19	2.182145
90°	1001.9	2.1	800.47	0.4026	0.5282	1.29	1.17	1.821363

Tabel A4 Data untuk bilangan *Reynolds* $9,0 \times 10^4$

α	n (rpm)	Torsi Statis (N.cm)	n (rpm)	λ (TSR)	Cop (%)	n/n _o	T/T _o	CoP/CoP _o
0°	2132.4	5.1	1807.4	0.7573	0.94076	2.23	2.55	3.135876
5°	2148.8	5	1814.6	0.7603	0.94275	2.25	2.5	3.142502
10°	2168.3	4.9	1856.34	0.7778	0.98786	2.27	2.45	3.292853
15°	2173.6	4.75	1870.61	0.7838	0.98796	2.28	2.38	3.293197
20°	2205.5	4.6	1902.53	0.7971	0.99077	2.31	2.3	3.302578
25°	2220.6	4.4	1938.93	0.8124	1.00411	2.33	2.2	3.347043
30°	2288.3	4.2	1958.14	0.8204	1.00646	2.4	2.1	3.354875
35°	2359.9	4.1	2060.83	0.8635	1.04266	2.47	2.05	3.475534
40°	2373.1	3.95	2136.75	0.8953	1.12415	2.48	1.98	3.747175
45°	2279.6	3.8	1947.77	0.8161	1.00469	2.39	1.9	3.348965
50°	2173.1	3.7	1869.01	0.7831	0.98486	2.28	1.85	3.28287
55°	1902.1	3.55	1637.27	0.686	0.81575	1.99	1.78	2.719163
60°	1791.7	3.4	1575.67	0.6602	0.7978	1.88	1.7	2.659349
65°	1655.5	3.2	1412.44	0.5918	0.69815	1.73	1.6	2.327178
70°	1572.5	3	1319.78	0.553	0.64231	1.65	1.5	2.141026
75°	1395.9	2.85	1176.24	0.4928	0.56568	1.46	1.43	1.885593
80°	1289	2.65	1021.89	0.4282	0.49341	1.35	1.33	1.644705
85°	1335.9	2.5	1128.42	0.4728	0.50296	1.4	1.25	1.676548
90°	1314.4	2.3	1098.97	0.4604	0.49901	1.38	1.15	1.663352

Tabel A5 Data untuk bilangan *Reynolds* antara $4,5 \times 10^4$ hingga 10^5 untuk bukaan sudut $\alpha = 40^\circ$

Re ($\times 10^4$)	V _{in} (m/s)	P _{in} (Watt)	V (Volt)	I (Ampere)	P (Watt)	n (rpm)	Cop (%)	TSR
4.5	6.62	1.45243859	1.89	0.031	0.05859	953	4.033905	0.7986
5.0	7.36	1.99598491	1.89	0.0324	0.061236	994	3.067959	0.7492
5.5	8.09	2.6507537	1.9	0.0408	0.07752	1040	2.924451	0.7131
6.0	8.83	3.44671934	1.91	0.0449	0.085759	1181	2.488134	0.7419
6.5	9.56	4.37418843	1.92	0.0503	0.096576	1315	2.207861	0.763
7.0	10.3	5.4706066	1.92	0.0557	0.106944	1448	1.954884	0.7799
7.5	11.03	6.71816008	1.93	0.0647	0.124871	1601	1.858708	0.8052
8.0	11.77	8.16306396	1.94	0.0697	0.135218	1741	1.656461	0.8206
8.5	12.5	9.77808594	1.95	0.0748	0.14586	1878	1.491703	0.8334
9.0	13.24	11.6195087	1.97	0.0787	0.155039	2010	1.334299	0.8422
9.5	13.98	13.6787158	1.98	0.0829	0.164142	2191	1.199981	0.8694
10.0	14.71	15.9353582	1.99	0.0892	0.177508	2337	1.113925	0.8813

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian yang telah dilakukan yaitu penempatan plat datar pengganggu dengan $L/D = 1,1547$ di depan *returning blade* turbin angin *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 dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penempatan plat datar pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Hal ini berdasarkan kenaikan dari data yang diambil yaitu putaran (n), torsi statis (T), dan *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin *Savonius* bila dibandingkan dengan data awal tanpa penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade*.
2. Nilai tertinggi putaran yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (n) sebesar 2373,1 *rpm* pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$, sedangkan untuk perbandingan putaran turbin (n/n_o) didapatkan 274% pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$.
3. Nilai tertinggi torsi statis yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (T) sebesar 5,1 N.cm pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis turbin (T/T_o) didapatkan 255% pada bilangan *Reynolds* 9×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$.
4. Nilai tertinggi *Coefficient of Power* yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (CoP) sebesar 2,00% pada bilangan *Reynolds* 6×10^4 pada posisi bukaan sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$, sedangkan untuk perbandingan torsi statis turbin (CoP/CoP_o) didapatkan 1668% pada bilangan

Reynolds 6×10^4 pada posisi sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$.

5. Bukaian plat datar pengganggu yang divariasikan ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) di depan *returning blade* turbin angin *Savonius* dapat meningkatkan performa turbin angin *Savonius*. Hal ini berdasarkan kenaikan dari data yang diambil yaitu putaran (n) dan *Coefficient of Power* (*CoP*) turbin angin *Savonius* mencapai nilai tertinggi pada sudut bukaian plat datar pengganggu 40° dan 0° untuk torsi statis, kemudian kita bandingkan dengan data awal tanpa penempatan plat datar pengganggu di depan *returning blade* menunjukkan nilai di atas 1.
6. Nilai tertinggi putaran yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (n) sebesar 2373,1 rpm dan *Coefficient of Power* yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (*CoP*) sebesar 2,00% pada posisi bukaian sudut plat datar pengganggu $\alpha = 40^\circ$. Kemudian nilai tertinggi torsi statis yang didapatkan dari turbin angin *Savonius* (T) sebesar 5,1 N.cm pada posisi bukaian sudut plat datar pengganggu $\alpha = 0^\circ$.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian yang telah dilakukan ini bagi peneliti selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Diperlukan alat ukur daya dan torsi dinamis dari turbin angin *Savonius* yang akan digunakan penelitian ini untuk mendapatkan data-data yang akurat sehingga dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan secara teoritis.
2. Sesuaikan spesifikasi generator untuk pengukuran daya yang dihasilkan turbin angina *Savonius*.
3. Dimensi dari turbin angin *Savonius* dalam eksperimen ini melebihi batas yang diizinkan untuk ketentuan dari penggunaan *wind tunnel* yaitu *blockage ratio* sebesar 12%. Hal ini menimbulkan efek *blockage* pada lorong *wind tunnel* yang digunakan terlalu besar, sehingga perlu dilakukan eksperimen ulang dengan memperkecil dimensi

turbin angin *Savonius* atau menggunakan *wind tunnel* dengan dimensi yang lebih besar sehingga tidak melebihi ketentuan *blockage ratio*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Burcin Deda Altan & Mehmet Atilgan. 2008. "An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor". **Energy Conversion Management**, vol. 49, pp. 3425-3432.
- Burcin Deda Altan & Mehmet Atilgan. 2010. "The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors". **Renewable Energy**, vol. 35, pp. 821-829.
- Direktorat Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi. 2013. **Statistik EBTKE 2013**.
- Fox, Robert W. dan Mc. Donald, Alan T. 1998. **Introduction to fluid Mechanics, 5th edition**. John Wiley and Son, Inc.
- Habibie M. Najib, dkk. 2011. **Kajian Potensi Energi Angin Di Wilayah Sulawesi dan Maluku**. Jakarta : Puslitbang BMKG.
- M. H. Mohamed, G. Janiga, E. Pap, dan D. Thevenin. 2010. "Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade". **Renewable Energy**, vol. 35, pp. 2618-2626.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Jepara pada 10 April 1994. Merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis berasal dari Purworejo, Jawa Tengah. Pendidikan telah menempuh pendidikan formal di TK Tarbiyatul Atfal Jepara, SD Negeri 2 Wirun, SMP Negeri 3 Purworejo, SMA Negeri 1 Purworejo. Pada tahun 2012, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

(ITS) melalui jalur SNMPTN Tulis (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri) pada pilihan pertama. Penulis terdaftar dengan NRP 2112 100 090.

Selama masa perkuliahan, penulis tercatat mengambil bidang studi Konversi Energi sebagai bahasan Tugas Akhir. Di jurusan Teknik Mesin ITS, penulis aktif dalam kegiatan kemahasiswaan yaitu sebagai pengurus Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Pada periode 2013 – 2014 menjabat sebagai Staff Divisi Roda Dua, periode 2014 – 2015 menjabat sebagai Kabiro Riset dan Pelatihan Divisi Roda Dua, dan pada periode 2015 – 2016 menjabat sebagai Staff Ahli Divisi Roda Dua. Penulis juga tercatat sebagai *General Manager* ITS Team Sapuangin periode 2015 – 2016. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat rizkiardiwilis@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan