TUGAS AKHIR – TM 141585

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

"Studi Kasus untuk untuk d/D = 0,2; Jarak S/D = 1,4; *Reynolds number*= 9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5, dengan y/D= 0;0,25;0,5"

CLARISSA EDWINA KAWI
NRP 02111440000025

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

TUGAS AKHIR – TM 141585

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS

"Studi Kasus d/D = 0,2; Jarak S/D = 1,4 ; *Reynolds number* = $9{,}7 \times 10^4$; $1{,}45 \times 10^5$; $1{,}78 \times 10^5$ dengan y/D = 0,0; 0,25; 0,5"

CLARISSA EDWINA KAWI
NRP 02111440000025

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
2018

TUGAS AKHIR – TM 141585

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER TO THE SAVONIUS WIND TURBINE'S PERFORMANCE

"Study Case for d/D = 0,2; S/D = 1,4; Reynolds number= 9.7 x 104; 1.45 x 105; 1.78 x 105;y/D= 0;0.25;0.5"

CLARISSA EDWINA KAWI
NRP 02111440000025

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
2018

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGGANGGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE SAVONIUS

"Studi Kasus d/D = 0,2; Jarak S/D = 1,4; Re= 9,7 x10^4, 1,45 x10^5, 1,78 x10^5; dengan y/D = 0,0; 0,25; 0,5"

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

CLARISSA EDWINA KAWI

NRP. 02111440000025

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)
   NIP. 196010041986011001
2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., M.T (Penguji I)
   NIP. 197104051997021001
3. Vivien Suphandani, ST., M.E., Ph.D (Penguji II)
   NIP. 198105292003122001
4. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng., Ph.D (Penguji III)
   NIP. 196412281990031002

SURABAYA

JULI 2018

Scanned with CamScanner

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SILINDER PENGGANGU TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

"Studi Kasus untuk d/D = 0,2; Jarak S/D = 1,4; *Reynolds number*= 9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5, dengan y/D= 0;0,25;0,5"

Nama Mahasiswa : Clarissa Edwina Kawi
NRP : 21141000025
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

ABSTRAK

Energi menyumbang peran yang besar dalam menunjang kehidupan manusia.Indonesia memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan (EBT) yang cukup besar dengan variasi yang cukup beragam. Salah satu energi baru yang bisa dimanfaatkan adalah angin. Energi angin memiliki banyak manfaat. Salah satu pemanfaatan angin digunakan untuk menggerakan turbin. Energi angin dapat dikonversikan ke dalam bentuk energi listrik. Salah satu jenis turbin angin yang dapat dimanfaatkan adalah turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius cocok digunakan pada kecepatan rendah seperti di Indonesia yang berkisar antara 3-6 m/s.Daya yang dihasilkan turbin angin Savonius terjadi akibat perbedaan gaya drag antara kedua sudu turbin, advancing blade dan returning blade. Akan tetapi, turbin angin Savonius memiliki effisiensi yang rendah. Sehingga perlu untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder penggangu di depan returning blade.

Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen pada kondisi udara terbuka dengan angin dari sebuah axial fan yang diseragamkan dengan honeycomb. Turbin angin Savonius memiliki dua sudu dan diberi penghalang berupa silinder dengan variasi posisi silinder tegak lurus arah angin masuk (y). Digunakan turbin Savonius berdiameter sudu (D) sebesar 165,2 mm serta rasio antara silinder penghalang terhadap diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,2. Variasi posisi silinder penghalang tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin (y/D) = 0;0,25;0,5 pada Reynolds number =9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5 dan variasi jarak silinder penghalang dengan returning blade terhadap diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,4. Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer untuk mendapatkan Reynolds number sebesar 9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5, putaran turbin diukur menggunakan tachometer, torsi statis turbin diukur menggunakan torque meter, torsi dinamis turbin diukur dengan brake dynamometer dan daya turbin diperoleh dari hasil perkalian antara torsi dinamis turbin dengan kecepatan putaran turbin.

Hasil dari penelitian ini bahwa peletakkan silinder pengganggu pada d/D=0,2 dengan jarak S/D=1,4 efektif meningkatkan performa turbin angin Savonius .Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai putaran(n), torsi statis (Ts), Coefficient of Power(CoP), Coefficient of moment (Cm). Peningkatan nilai Coefficient of Power (CoP) maksimum sebesar 21,1% pada Reynolds number 1,45 x 10^5 pada posisi y/D=0,5.Peningkatan Coefficient of moment (Cm) sebesar 31,27% pada Reynolds number = 1,45 x 10^5pada posisi y/D=0,5.Peningkatan nilai torsi statis tidak signifikan pada Reynolds number = 1,78 x 10^5pada posisi

y/D=0,5 sebesar 0,634% pada posisi sudut 30^o. Peningkatan nilai putaran terbesar diperoleh pada posisi y/D=0,5 Reynolds number =16,8 x 10^4 sebesar 6,1%.

Kata kunci : Turbin angin Savonius, silinder pengganggu, Reynolds number, rasio y/D,Coefficient of Power, Coefficient of moment, torsi statis, putaran turbin.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER TO THE SAVONIUS WIND TURBINE'S PERFORMANCE

"Study Case for d/D = 0,2; S/D = 1,4; Reynolds number= 9.7 x 10^4; 1.45 x 10^5; 1.78 x 10^5;y/D= 0;0.25;0.5"

Name ***: Clarissa Edwina Kawi***
NRP ***: 21141000025***
Department ***: Teknik Mesin FTI-ITS***
Academic Advisor ***: Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA***

ABSTRACT

Energy contributes a large role in supporting human life. Indonesia has a quite large potential of new renewable energy resources varied enough. One of the new energy that can be utilized is wind. Wind energy has many benefits. One of the wind utilization is used to move the turbine. Wind energy can be converted into electrical energy. One type of wind turbine that can be utilized is the Savonius wind turbine. Savonius wind turbine is suitable for use at low speeds such as in Indonesia ranging from 3-6 m/s. The power generated by Savonius wind turbine is due to the difference in drag force between the two turbine blades, advancing blade and returning blade. However, Savonius wind turbines have low efficiency. So it is necessary to improve the performance of wind turbine Savonius by placing the disturbance cylinder in front of the returning blade.

To achieve this goal, this study was conducted by experimental method on open air conditions with wind from a uniformed fan axial with honeycomb. Savonius wind

turbine has two blades and is given a disturbance cylinder with a variation of the cylinder position perpendicular to the incoming wind (y). Savonius turbine used a diameter of blade (D) is 165.2 mm and the ratio of the disturbance cylinder to the diameter of the turbine blade (d/D) is 0,2. Variations of disturbance cylinder position perpendicular to the incoming wind to the diameter of the turbine blade (y/D) = 0; 0.25; 0.5 on Reynolds number = 9.7 x 10^4; 1.45 x 10^5; 1.78 x 10^5 and variation of disturbance cylinder distance from returning blade to the diameter of the turbine blade (S/D) of 1.4. Wind speed is measured using an anemometer to obtain Reynolds number of 9.7 x 10^4; 1.45 x 10^5; 1.78 x 10^5, turbine rotation is measured using a tachometer, turbine static torque measured using a torque meter, turbine dynamic torque measured by a brake dynamometer and turbine power obtained from multiplication of turbine dynamic torque with turbine spin speed.

The result of this study shows that placing the disturbance cylinder at d/D = 0.2 with S/D distance = 1.4 effectively improves the performance of Savonius wind turbine. This is indicated by the increase of rotation value (n), static torque (Ts), Coefficient of Power (CoP), Coefficient of moment (Cm). The increase of Coefficient of Power (CoP) value is 21.1% at Reynolds number = 1.45 x 10^5 at y / D = 0.5. Coefficient of moment (Cm) increase 31,27% at Reynolds number = 1,45 x 10^5 at position y/D = 0.5. The increase of static torque value at Reynolds number = 1.78 x 10^5 at position y/D = 0,5 equal to 0.634% at position angle 30^o. The largest increase of rotation value is obtained at the position of y / D = 0,5 Reynolds number = 1.78 x 10^5 of 6.1%.

Keywords: Savonius wind turbine, disturbance cylinder, Reynolds number, y/D ratio, Coefficient of Power, Coefficient of moment, static torque, rotation

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus karena atas berkatnya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir, dengan judul:

Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius.

"Studi Kasus untuk d/D = 0,2; Jarak S/D = 1,4; *Reynolds number*= 9,0 x 10^4; 13,8 x 10^4; 16,8 x 10^4, dengan y/D= 0;0,25;0,5"

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung untuk menyelesaikan tugas akhir ini, terutama kepada:

1. Keluarga penulis, Papa, Mama, Nita, Ezra, Eyang Surabaya, Eyang Semarang, dan sepupu penulis , Mba Imes atas segala doa dan dukungan selama masa kuliah.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis, yang telah memberi banyak semangat dan motivasi-motivasi yang beliau berikan selama bimbingan, baik persiapan seminar proposal tugas akhir maupun persiapan sidang tugas akhir.
3. Prof. Ir. Sutardi, M. Eng, Ph.D, Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT, dan Ibu Vivien Suphandani, S.T., MT., PhD, selaku dosen penguji seminar proposal dan sidang tugas akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan yang bermanfaat, sehingga tugas akhir ini bisa selesai dengan baik.
4. Seluruh dosen serta karyawan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan banyak bantuan selama penulis

menuntut ilmu di ITS baik secara akademik maupun non akademik.

5. Teman-teman dekat penulis selama di ITS, terutama Dillo, Meika, Eka, Otid, Fido, dll yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah menjadi teman dalam suka dan duka dan pendengar yang baik selama penulis kuliah di Teknik Mesin ITS.
6. Partner Tugas Akhir kelompok 4 ,Meika ,Eka, Riri, Ayup, Vita, Ammar, Elsa, Jasmi, Linun,Yuyung,Andri yang telah berjuang bersama-sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Teman-teman MAUTS 14 , teman-teman MBP, dan teman-teman M57 yang telah berjuang bersama,memberi banyak pelajaran dan canda tawa selama masa perkuliahan ini.
8. Seluruh pihak yang telah banyak membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis sadar bahwa masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini, sehingga penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dalam menyempurnakan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL
LEMBAR PENGESAHAN
ABSTRAK ..... **i**
ABSTRACT ..... **iv**
KATA PENGANTAR ..... **vii**
DAFTAR ISI ..... **ix**
DAFTAR GAMBAR ..... **xiv**
DAFTAR TABEL ..... **xix**
DAFTAR SIMBOL ..... **xxi**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 5
1.3 Batasan Masalah 7
1.4 Tujuan Penelitian 8
1.5 Manfaat Penelitian 8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA **9**
2.1. Turbin Angin 10
2.2. Turbin Angin Savonius 11
2.3. Gaya *Drag* Turbin 12
2.4. Perhitungan Daya Turbin 14
2.5. *Coefficient of Power* 13
2.6. *Reynolds Number* 16
2.7. *Tip Speed Ratio* 16
2.8. Aliran melalui silinder 19
2.9. *End Plates* 20
2.10 Coefficient of Moment……. 22
2.11 Penelitian Terdahulu……... 22
2.11.1 Pengurangan Gaya Drag pada Silinder Sirkular dengan Menggunakan Silinder Penggangu Tipe I ……... 22
2.11.2 Pengaruh Plat Pengganggu terhadap Performa Turbin Angin Savonius 25
2.11.3 Studi Numerik Pengaruh Plat Pengganggu terhadap Performa Turbin Angin Savonius 27

2.11.4 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius 32
2.11.5 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Savonius dengan Berbagai Variasi Parameter Geometri… 36
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 41
3.1 Analisa Dimensi 41
3.1.1. Analisa Dimensi *Coefficient of Power* 42
3.1.2. Analisa Dimensi *Coefficient of Moment*…..... 45
3.2 Peralatan 48
3.2.1. Axial Fan 48
3.2.2. Honeycomb 49
3.2.3. Turbin Angin Savonius 50
3.2.4. Silinder Pengganggu 51
3.2.5. Penyangga Turbin Angin Savonius 52
3.2.6. Alat Ukur 52
3.3 Prosedur Penelitian 60
3.4 Flowchart Penelitian 62
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN 69
4.1 Data Penelitian dan Contoh Perhitungan 69
4.1.1 Perhitungan *Reynolds Number* 69
4.2 Contoh Perhitungan 71
4.2.1 Perhitungan Torsi Dinamis 71
4.2.2 Perhitungan *Coefficient of Power* 72
4.2.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio* 73
4.2.4 Perhitungan *Coefficient of Moment* 73
4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 73
4.3.1 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 74
4.3.2 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu 75
4.3.3 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 76

4.3.4 Analisis *Coefficient of moment* (Cm) terhadap Posisi Sudut Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu 78
4.4 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu 80
4.4.1 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4 81
4.4.2 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 82
4.4.3 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 84
4.5 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu 86
4.5.1 Analisis Torsi StatisTurbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4 86
4.5.2 Analisis Torsi StatisTurbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45x 10^5 88
4.5.3 Analisis Torsi StatisTurbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,78x 10^5 90
4.6 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu 91
4.6.1 Analisis *Coefficient of Moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4 91
4.6.2 Analisis *Coefficient of Moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 93

4.6.3 Analisis *Coefficient of Moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 95
4.7 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu 98
4.7.1 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4 99
4.7.2 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 99
4.7.2 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada Reynolds number =1,78 x 10^5 100
BAB V PENUTUP 103
5.1 Kesimpulan 103
5.2 Saran 104
DAFTAR PUSTAKA 106
LAMPIRAN 109
BIODATA PENULIS 127

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Turbin Angin**(Pengetahuan Dasar Mengenai Turbin Angin,2010)** 11
Gambar 2.2 Skema Turbin Savonius **(www . reuk. co. Uk / Savonius - Wind Turbines . htm)**…… 12
Gambar 2.3 Penguraian komponen gaya hambat dan gaya angkat…….... 13
Gambar 2.4 FBD *Brake Dynamometer*…… 16
Gambar 2.5 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power dengan Tip Speed Ratio pada Beberapa Jenis Turbin **(Shimmeri,2010)**……. 19
Gambar 2.6 Aliran viscous dan inviscid **(Fox Mc Donald, 1994)**…… 19
Gambar 2.7 Pengaruh turbulensi terhadap separasi **(Putu Gede, 2010)**……. 20
Gambar 2.8 Turbin angin Savonius dengan *end plate* **(Akwa et al,2012)**…… 21
Gambar 2.9 Efek *end plate* terhadap performa turbin angin Savonius**(Akwa et al,2012)**……. 21
Gambar 2.10 Geometri Benda Uji (**Tsutsui dan Igarashi,2002)**…… 23
Gambar 2.11 Grafik bilangan Strouhal dan koefisien *drag* (**Tsutsui dan Igarashi,2002)**……. 23
Gambar 2.12 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama (**Tsutsui dan Igarashi,2002)** ……. 24
Gambar 2.13 Skema Penelitian **(Triyogi et al,2018)** …… 25
Gambar 2.14 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) **(Triyogi et al,2018)**…….. 26
Gambar 2.15 Grafik Torsi Statis (T/T_O) **(Triyogi et al,2018)**……. 26
Gambar 2.16 Grafik Putaran (n/n_o) **(Triyogi et al,2018)**……. 27
Gambar 2.17 Skema *Modeling* (**Triyogi et al, 2018**)……. 28
Gambar 2. 18 Aliran sekitar turbin **(Triyogi et al, 2018)** 29
Gambar 2.19 *Pressure contur flow***(Triyogi et al, 2018)** 30

Gambar 2.20 *Pressure contur flow***(Aip et al, 2018)**.....31
Gambar 2.21 Skema Penelitian **(Satria Bayu,2017)**…… 33
Gambar 2.22 Grafik Perbandingan putaran antara turbin angin Savonius berpenggangu dan tanpa silinder penggangu sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5-2,4**(Satria Bayu,2017)**……. 33
Gambar 2.23 Grafik perbandingan torsi statis antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T0) sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5 – 2,4**(Satria Bayu , 2017)** ……33
Gambar 2.24 Grafik perbandingan coefficient of power antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP0) sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5 – 2,4**(Satria Bayu,2017)**……34
Gambar 2.25 Grafik torsi statis turbin angin Savonius berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut (θ) pada jarak S/D = 1,7 **(Satria Bayu,2017)**…… 35
Gambar 2.26 Gambar posisi bukaan sudu Savonius pada berbagai sudut**(Satria Bayu,2017)….**…… 35
Gambar 2.27 Skema turbin angin Savonius**(Mahmoed et al,2010)**……36
Gambar 2.28 Grafik *power* terhadap kecepatan angin saat *aspect ratio* 5 **(Mahmoed et al,2010)** ……36
Gambar 2.29 Grafik *power* terhadap kecepatan angin pada *overlap ratio* yang berbeda **(Mahmoed et al,2010)**……37
Gambar 2.30 Grafik *power* terhadap kecepatan angin pada rotor dengan menggunakan *end plates* dan tanpa *end plates* **(Mahmoed et al , 2010)** ……37
Gambar 2.31 Grafik Spesific power terhadap kecepatan angin pada single dan double stages**(Mahmoed et al,2010)……**38

Gambar 2.32 Grafik *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin pada aspect ratio yang berbeda**(Mahmoed et al,2010)**……39
Gambar 3.1 Skema Penelitian……41
Gambar 3.2 *Axial Fan* CKE SPV-18……48
Gambar 3.3 *Honeycomb* yang Digunakan Dalam Penelitian……49
Gambar 3.4 Skema Instalasi *Axial Fan*, *Honeycomb* dan Silinder Pengganggu Terhadap Turbin Savonius …….....50
Gambar 3.5 Turbin Angin Savonius……51
Gambar 3.6 Silinder Pengganggu……51
Gambar 3.7 Penyangga Turbin Angin Savonius……52
Gambar 3.8 Tachometer Omega Seri Hht12……53
Gambar 3.9 Anemometer Omega Hhf141……54
Gambar 3.10 *Torque Meter* Lutron Model Tq-8800……55
Gambar 3.11 *Brake Dynamometer*……56
Gambar 3.12 Massa Pemberat……57
Gambar 3.13 Neraca Pegas……57
Gambar 3.14 Senar Nylon LAZER…… 58
Gambar 3.15 *Voltage Regulator* TDGC 2J-3……. 59
Gambar 3.16 Multimeter……60
Gambar 4. 1 Grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap *Reynolds number* 74
Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds number*=9,7 x 10^4;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5…….75
Gambar 4.3 Grafik Torsi Statis Tanpa Pengganggu Terhadap Fungsi Sudut Turbin Angin Savonius pada Reynolds number=9,7 x 10^4 ;1,45 x 10^5; 1,78x 10^5……. 77
Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number*=9,7 x 10^4 ;1,45 x 10^5; 1,78x 10^5…….....79

Gambar 4.5 Grafik *Coefficient of Power (CoP)* terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 9,7 x 10^4 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5……81
Gambar 4.6 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 1,45 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5……83
Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 1,78 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5……..85
Gambar 4.8 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* 9,7 x 10^4 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5…….87
Gambar 4.9 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* 1,45 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5…… 89
Gambar 4.10 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* =1,78x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5…….90
Gambar 4. 11 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 9,7 x 10^4……92
Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of moment* (Cm) Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 1,45 x 10^5……..94
Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5……96
Gambar 4.14 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0……98
Gambar 4.15 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0,25……..100

Gambar 4.16 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0,5……101

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Koefisien drag pada beberapa bentuk benda **(Fox and McDonald, 1994)**…… 14
Tabel 3.1 Spesifikasi Axial fan CKE SPV-18……. 48
Tabel 3.2 Spesifikasi *Tachometer* OMEGA Seri HHT12…… 54
Tabel 3.3 Spesifikasi Anemometer Digital Omega HHF141... 53
Tabel 3.4 Spesifikasi Torque Meter LUTRON…… 55
Tabel 3.5 Spesifikasi Neraca Pegas……. 57
Tabel 3.6 Spesifikasi Senar Nylon LAZER.....58
Tabel 3.7 Spesifikasi WD 40 *Multipurpose Lubricant*.....59
Tabel 3.8 Spesifikasi Voltage Regulator TDGC 2J-3…….....59
Tabel 3.9 Spesifikasi Multimeter DT-9205…….....60
Tabel 4.1 Kecepatan aliran udara pada tiga *Reynolds number* 71
Tabel 4.2 Data Pengukuran pada Re= 1,45 x 10^5…… 71

(halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

A	*Cross sectional area* (m^2)
b	Diameter poros (m)
C_D	*Coefficient drag*
C_m	*Coefficient of Moment*
C_{m0}	*Coefficient of Moment* turbin tanpa silinder pengganggu
CoP	*Coefficient of Power*
CoP_0	*Coefficient of Power* turbin tanpa silinder pengganggu
Cp	*Coefficient of pressure*
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
d	Diameter silinder pengganggu (m)
D_0	Diameter *end plates* (m)
E_k	Energi kinetik (Joule)
F_D	Gaya *drag* (N)
g	gaya gravitasi (m/s^2)
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
h	Tinggi silinder pengganggu (m)
L	Panjang karakteristik atau Diameter turbin angin Savonius (m)
m	Massa pemberat (kg)
n	Jumlah putaran poros turbin angin Savonius (rpm)
n_0	Jumlah putaran poros turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (rpm)
P_W	Daya kinetik angin (Watt)
P_T	Daya aktual turbin (Watt)
R	Jari-jari turbin (m)
r	Jari-jari silinder atau poros turbin (m)
Re	Bilangan Reynolds

S	Jarak antara pusat turbin angin Savonius dengan pusat silinder pengganggu (m)
s	Massa yang terbaca pada neraca pegas (kg)
T	Temperatur (°C)
T_D	Torsi dinamis turbin (N.m)
Ts	Torsi statis dari putaran poros (N.cm)
Ts_0	Torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (N.cm)
V	Kecepatan aliran fluida (m/s)
y	Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
ρ	Massa jenis fluida (kg/m^3)
μ	Viskositas dinamis (Ns/m^2)
ω	Kecepatan sudut turbin angin Savonius (rad/s)
λ	*Tip Speed Ratio*
θ	Sudut sudu turbin angin Savonius (°)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi menyumbang peran yang besar dalam menunjang kehidupan manusia. Pada tahun 2015 pangsa terbesar konsumsi energi adalah sektor rumah tangga (35%) diikuti oleh sektor transportasi (31%), industri (29%), komersial (4,0%) dan lainnya (2,0%). Sebagai negara berkembang, Indonesia akan mengarah menjadi negara maju yang diindikasikan dengan dominasi sektor industri dalam menunjang perekonomiannya. Pangsa kebutuhan energi sektor industri meningkat dari 29% pada tahun 2015 menjadi 43% (skenario dasar) 44% (skenario tinggi) pada tahun 2050. Tingginya peningkatan kebutuhan energi perlu diantisipasi dengan menerapkan upaya konservasi energi. Indonesia memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan (EBT) yang cukup besar dengan variasi yang cukup beragam. Salah satu energi baru yang bisa dimanfaatkan adalah angin.(**Outlook Energi Indonesia, 2017**).

Penggunaan energi angin sebesar 970 MW dan sejauh ini baru digunakan sebanyak 1.96 MW. Energi angin memiliki banyak manfaat. Salah satu pemanfaatan angin digunakan untuk menggerakan turbin. Energi angin dapat dikonversikan ke dalam bentuk energi listrik. Di Eropa, angin menyumbang 4% dari suplai listrik global dan akan terus berkembang. Angin menyumbang 40% dari total listrik di Denmark, 23% di Portugal dan Irlandia, 20% di Uruguay, 19% di Spanyol, dan 15% di Jerman.(**Global Wind Energy, 2016**)

Salah satu jenis turbin angin yang dapat dimanfaatkan adalah turbin angin Savonius. Di Indonesia, penggunaan turbin angin Savonius sesuai untuk diterapkan, karena kecepatan rata-rata angin di Indonesia sekitar 3-6 m/s.Turbin angin Savonius adalah jenis turbin angin sumbu vertikal (VAWT), yang digunakan untuk mengubah gaya angin menjadi torsi pada poros berputar.Turbin angin Savonius ditemukan oleh insinyur

Finlandia Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922. Turbin angin Savonius ini memiliki dua jenis sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade*.Kedua sudu ini menghasilkan torsi positif dan torsi negatif dan gaya *drag* yang berbeda. *Advancing blade* menghasilkan koefisien drag, gaya *drag*, dan torsi yang lebih besar daripada *returning blade.*Perbedaan gaya *drag* yang dimiiki akan menghasilkan torsi. Semakin besar selisih gaya *drag* yang dimiliki maka akan menghasilkan torsi yang semakin besar dan akan menghasilkan daya yang lebih besar. Selain itu yang dapat dilakukan yaitu mengurangi gaya *drag* pada sudu *returning blade.*

Turbin Savonius memiliki beberapa kelebihan antara lain memiliki desain yang sederhana dan murah dan dapat bekerja pada kecepatan yang rendah.Namun turbin ini memiliki kekurangan yaitu memiliki performa yang rendah. Sehingga sejak awal ditemukannya tubin Savonius telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan performa turbin.

Penelitan untuk mengoptimalkan performa turbin angin Savonius telah banyak dilakukan. Dilakukan penelitian oleh **Tsusui Igarashi (2002).** Penelitian tentang aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder lain pernah dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi (2002). Penelitian tersebut memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu (d/D), dan harga bilangan Reynolds pada rentang $1{,}5 \times 10^4 \leq Re \leq 6{,}2 \times 10^4$. Gambar 2.10 merupakan gambar dari geometri benda uji. Geometri benda uji tersebut mempunyai diameter silinder utama sebesar 40 mm dengan perubahan diameter silinder penganggu dari 1 mm sampai 10 mm sedangkan jarak antar kedua pusat silinder divariasikan dari rentang 50 mm sampai 120 mm.Dari hasil penelitan tersebut didapatkan bahwa penurunan harga koefisien drag (C_D) dan peningkatan bilangan Strouhal yang disebabkan oleh peningkatan bilangan Reynolds (Re) dan peningkatan d/D serta penurunan harga L/D. Dengan peningkatan bilangan Reynolds di atas 3×10^4, maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, tebal Shear

Layer berkurang, sehingga bilangan Strouhal akan meningkat dan daerah wake menyempit (koefisien drag menurun).

Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi plat pengganggu di depan *returning blade* dilakukan oleh **Aip et al (2018)** . Terdapat beberapa variasi S/D yaitu 1 ; 1,02 ; 1,03 ; 1,06 ; 1,11 ; 1,15 ; 1,41 ; 1,62 ; 1,83 ; 2.Eksperimen dilakukan pada *Reynolds number* 30000 dan 90000. Diperoleh hasil apabila S/D>1,41 pada Re=90000, diperoleh hasil bahwa performa turbin menurun dibandingkan tanpa menggunakan pengganggu.

Penelitian lainnya dilakukan oleh **Aip et al (2018)** dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dengan memasang plat pengganggu di depan turbin angina Savonius. Dilakukan secara numerik dalam aliran seragam pada *Reynolds number* 30.000 dan 90.000. Vektor kecepatan dan distribusi tekanan di sekitar turbin disimulasikan dengan memvariasikan lebar pelat gorden relatif terhadap diameter sudu rotor (S / D) = 1,00, 1,02, 1,03, 1,15,1,41, dan 2,00, menggunakan STAR CCM++ *Software* digunakan untuk memvisualisasikan fenomena aliran terjadi di sekitar turbin, dan di mana dalam simulasi ini, turbin rotor diatur statis. Hasilnya menunjukkan bahwa adanya plat pengganggu meningkatkan performa turbin tergantung jarak S/D dan jumlah Reynolds (Re). Untuk S / D = 2 pada Re = 90.000, kinerja turbin diperkirakan lebih rendah daripada saat turbin tanpa plat pengganggu.

Dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius oleh **Mahmoed et al (2010)**. Penelitian dilakukan dengan variasi parameter geometri rotor Savonious,antara lain jumlah *blade* dari dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b); *single stage* (1) dan *double stage* (2st.); *overlap ratio* (b) dari 0, 0,2, 0,25, 0,3 dan 0,35 dan *aspect ratio* 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dan ada tidaknya *end plates*. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan bahwa dua rotor memberi daya mekanik lebih tinggi dibanding tiga rotor dan empat *blade* .Rotor dua *blade* lebih efisien untuk *aspect ratio*

lainnya dan rotor *double stages*. Selain itu dapat dilihat bahwa rotor tanpa *overlap ratio* memberi *power* lebih tinggi dibanding rotor dengan *overlap ratio*. Untuk mempelajari efek dari *end plates*, rotor dengan dan tanpa *end plates* diuji pada nilai konstan parameter lainnya. Rotor dengan *end plates* memberi *power* yang lebih tinggi daripada rotor tanpa *end* plates.Hal ini karena keberadaan *end plates* meningkatkan jumlah udara yang mengalir menuju *blades* turbin angin Savonius. Jumlah *stages* untuk rotor *single* dan *double stages* berpengaruh pada nilai parameter konstan lainnya. Rotor *double stages* memberi *specific power* yang lebih tinggi dari pada rotor *single stage*. Pada penelitian ini, torsi statis berpengaruh pada *blade* rotor untuk kedua rotor *single stage* dan *double stages* diukur pada sudut rotasi yang sama dan pada kecepatan anginyangberbeda. Terjadi peningkatan *Coefficient of Power* dengan kenaikan *aspect ratio*.

Dilakukan penelitian oleh **Satria Bayu (2017),** dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius, maka performa turbin angin dapat ditingkatkan. Untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan d/D=0,2,pengganggu diletakkan dengan variasi jarak $1{,}5 \leq S/D \leq 2{,}4$. Dilakukan pada *Reynolds number* 3×10^4 ; 6×10^4 ; 9×10^4 .Kecepatan angin diukur menggunakan anemometer.Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin. Selain itu, variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin Savonius. Hal ini menjelaskan bahwa dengan diletakkannya silinder pengganggu di depan *returning blade,* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin.Pada posisi pengganggu dengan S/D = 1,8 di depan *returning blade* memberikan kinerja yang optimal pada turbin Savonius yang diteliti.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka penelitian tentang turbin angin Savonius yang diberi silinder pengganggu didepan *returning blade* penting untuk

dilakukkan. Dalam penelitian ini akan dilakukan studi eksperimen dengan menggunakan variasi jarak posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datang angin terhadap diameter turbin (y/D) dan *Reynolds number* yang dilakukan pada *external flow* untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin Savonius memiliki dua jenis sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade*.Bagian sudu yang cekung disebut *advancing blade* dan bagian sudu yang cembung disebut *returning* blade.Adanya perbedaan nilai *coefficient drag* (C_D) menyebabkan turbin dapat berputar, dimana nilai *coefficient drag* (C_D) pada *advancing blade* lebih besar daripada nilai *coefficient drag* (C_D) pada *returning blade* . Semakin besar selisih gaya *drag* maka torsi akan semakin meningkat dan daya yang dihasilkan turbin angin Savonius akan semakin meningkat. Namun sampai saat ini perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu belum maksimal sehingga perlu dilakukan upaya untuk meningkatkannya. Salah satu upaya yang dilakukan adalah pemasangan silinder pengganggu.

Pemasangan silinder pengganggu di bagian depan dari *returning blade* akan mengurangi gaya *drag* yang terjadi pada *returning blade* sehingga akan memperbesar selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade.*Peningkatan selisih torsi akan meningkatkan daya dari turbin angin Savonius.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius yang memiliki dua sudu dan diberi pengganggu berupa silinder dengan variasi posisi silinder tegak lurus arah angin masuk (y). Digunakan turbin Savonius berdiameter sudu (D) sebesar 155,1 mm serta rasio antara silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin (d/D) sebesar 0,2. Variasi posisi silinder pengganggu tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin (y/D) 0;0,25;0,5 pada *Reynolds number* sebesar $9,7 \times 10^4$; $1,45 \times 10^5$;

1,78x 10^5 dan variasi jarak silinder pengganggu dengan *returning* blade terhadap diameter sudu turbin (S/D) sebesar 1,4.

Hipotesis awal yang diberikan adalah sebagai berikut:

1. Pemasangan silinder pengganggu di depan *returning blade* dapat memperkecil nilai gaya drag pada *returning* blade. Hal ini karena adanya *wake* yang timbul dibelakang silinder pengganggu akan mempercepat perubahan *boundary layer* dari laminar menjadi turbulen pada *returning* blade. Sehingga hal ini akan menyebabkan mundurnya titik separasi sehingga daerah *wake* akan menyempit sehingga gaya drag pada *returning blade* akan menurun,akibatnya selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* akan semakin besar. Dengan semakin besarnya selisih dari gaya drag maka akan meningkatkan torsi dan diikuti dengan peningkatan daya turbin angin Savonius.
2. Variasi rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus arah angin masuk terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0;0,25;0,5 dimaksudkan untuk mendapatkan posisi optimum dimana *wake* yang dihasilkan dari silinder pengganggu digunakan secara efektif untuk menunda titik separasi dari *returning blade* sejauh mungkin ketika turbin berputar sehingga gaya drag *returning blade* semakin kecil dan selisih gaya *drag* kedua sudu semakin meningkat.Disisi lain, pada posisi (y/D) tertentu, diduga silinder pengganggu dapat berpengaruh dalam mengalirkan udara ke sisi *advancing blade* lebih banyak, sehingga gaya drag *advancing blade* akan meningkat seiring dengan pergeseran posisi y menuju *advancing blade* hingga mencapai posisi optimum. Setelah y melewati posisi optimumnya maka akan terjadi peningkatan gaya *drag* pada *returning blade* dan penurunan selisih gaya

drag kedua sudu. Akibatnya, nilai torsi, daya, dan *Coefficient of Power* (CoP) akan meningkat hingga jarak y optimum kemudian menurun seiring dengan pertambahan jarak y melewati titik optimumnya.

3. Pemasangan silinder pengganggu diduga akan menyebabkan tekanan di depan *returning blade* turun,sedangkan tekanan dibelakang *returning* blade diasumsikan sama seperti tidak menggunakan silinder pengganggu sehingga terjadi penurunan *pressure drop* antara daerah depan dan dibelakang *returning blade.*Hal ini menyebabkan penurunan *pressure drag* antara bagian depan dan belakang pada *returning blade* lebih besar.Akibatnya selisih gaya *drag* antara kedua sudu semakin besar sehingga mengasilkan torsi yang besar maka performa turbin angin Savonius meningkat.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini agar hasil penelitian yang didapat sesuai dengan tujuan yang ingin diperoleh, antara lain:

1. Aliran mengalir dalam kondisi *incompressible flow, steady state,*dan uniform pada sisi *upstream.*
2. Aliran yang mengalir merupakan *external flow.*
3. Analisa dilakukan pada turbin Savonius dengan rasio perbandingan diameter silinder pengganggu terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (d/D) sebesar 0,2.
4. Variasi rasio posisi silinder pengganggu tegak lurus arah angin masuk terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0 ;0,25;0,5 .
5. Variasi *Reynolds number* sebesar 9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78x 10^5.

6. Pebandingan jarak silinder pengganggu dengan *returning blade* terhadap diameter sudu turbin angin Savonius (S/D) sebesar 1,4.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan meletakkan silinder pengganggu berukuran d/D= 0,2 pada jarak S/D= 1,4 didepan *returning blade* pada variasi posisi tegak lurus terhadap arah angin (y/D) 0;0,25;0,5 dengan *Reynolds number* $9{,}7 \times 10^4$; $1{,}45 \times 10^5$; $1{,}78 \times 10^5$, dengan dilakukan pengukuran, antara lain:

1. Mengukur kecepatan putaran dari turbin angin Savonius.
2. Mengukur torsi statis dan torsi dinamis turbin angin Savonius saat dialirkan udara.
3. Menghitung *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius.
4. Menghitung *Coefficient of moment* dari turbin angin Savonius.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah

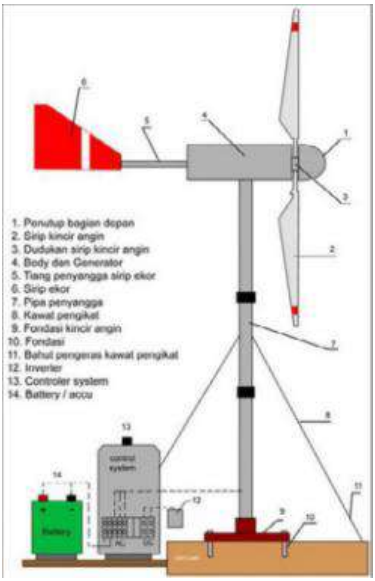
1. Memberikan saran dan masukan terhadap pengembangan energi terbarukan yaitu sumber energi angin.
2. Menjelaskan pengaruh peletakkan silinder pengganggu sebagai pengganggu turbin angin Savonius terhadap nilai torsi, putaran, dan *Coefficient of Power*,dan *Coefficient of moment*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

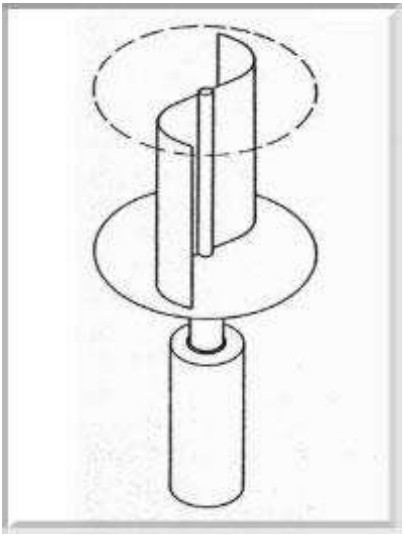
Turbin angin merupakan suatu alat yang mekanisme geraknya memanfaatkan energi angin.Turbin angin berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi gerak berupa putaran rotor dan poros generator untuk menghasilkan energi listrik. Pemakaian turbin angin banyak digunakan untuk menghasilkan listrik. Terdapat dua tipe turbin angin antara lain HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*), yang memiliki ciri yaitu sumbu putar turbin yang sejajar terhadap tanah. Turbin ini paling dikembangkan di berbagai negara,digunakan untuk menghasilkan listrik. Terdapat dua tipe yaitu mesin *upwind* dan mesin *downwind*. Mesin *upwind*, dimana rotor terletak berhadapan dengan angin dan mesin *downwind*,dimana rotor diletakkan di belakang *tower*. Rotor dibuat lebih fleksibel dan lebih ringan daripada mesin *upwind*. Kelemahannya yaitu angin harus melalui *tower* sebelum sampai pada rotor sehingga menambah beban pada turbin.Tipe kedua adalah VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*).VAWT memiliki ciri yaitu sumbu putar turbin vertikal terhadap tanah. Turbin jenis ini jarang dipakai. Rotornya berputar relatif lambat yaitu dibawah 100 rpm, namun memiliki momen gaya yang besar sehingga dapat digunakan sebagai pompa air tetapi tidak cocok untuk menghasilkan listrik. VAWT terdiri dari dua tipe yaitu tipe dorong (Savonius) dimana ujung *blade* tidak bergerak lebih cepat daripada kecepatan angin dan tipe angkat (Darius) dimana ukuran *blade* relatif lebih besar dan tingi sehingga menghasilkan getaran. Turbin jenis ini menghasilkan lebih banyak daya *output* dan memiliki efisiensi yang tinggi dan digunakan untuk aplikasi turbin angin di pedesaan.



Gambar 2.1 Skema Turbin Angin **(Pengetahuan Dasar Mengenai Turbin Angin,2010)**

2.2 Turbin Angin Savonius

Salah satu jenis dari turbin angin adalah turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius ditemukan oleh insinyur Finlandia, Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922. Turbin angin Savonius memiliki dua jenis sudu yaitu *advancing blade* dan *returning blade*.Kedua sudu ini menghasilkan torsi positif dan torsi negatif dan gaya *drag* yang berbeda. *Advancing blade* menghasilkan koefisien drag, gaya *drag*, dan torsi yang lebih besar daripada *returning blade.*Perbedaan gaya *drag* yang dimiiki akan menghasilkan torsi. Semakin besar selisih gaya *drag* yang dimiliki maka akan menghasilkan torsi yang semakin besar dan akan menghasilkan daya yang lebih besar



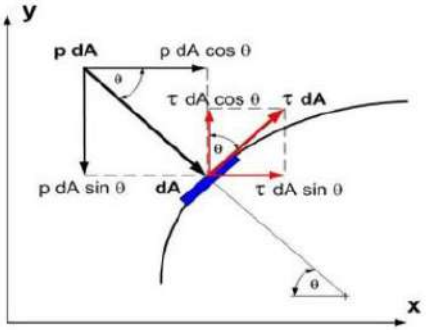
Gambar 2.2 Skema Turbin Savonius
(www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm)

Turbin angin Savonius memiliki desain rotor yang simple, *tip speed ratio* rendah, dan memiliki kemampuan untuk menerima angin dari berbagai arah. Turbin Savonius memiliki effisiensi aerodinamis yan lebih rendah daripada turbin Darrius.Berdasarkan percobaan yang dilakukan Savonius dapat dihasilkan *Coefficient of Power (CoP)* sebesar 0.37. Meskipun memiliki effisiensi aerodinamis yang rendah namun memiliki torsi awal yang besar. Dengan torsi awal yang besar turbin ini dapat digunakan untuk aplikasi alat yang membutuhkan torsi yang besar, contohnya adalah pompa air.

2.3 Gaya *Drag* Turbin

Gaya *drag* (*drag force)* adalah komponen gaya pada bodi yang bekerja sejajar dengan arah gerak relatif. Sedangkan gaya angkat (*lift force)* adalah komponen gaya pada bodi yang tegak lurus dengan arah gerak relatif . Gaya *drag* terdiri dari gaya yang disebabkan oleh tegangan geser (*friction drag)* dan gaya akibat

tekanan yang sejajar dengan aliran yang datang (*pressure drag)*. Gaya *drag* dipengaruhi oleh diameter, viskositas, massa jenis, dan.Resultan gaya *drag* total merupakan penjumlahan dari *friction drag* dan *pressure drag.*



Gambar 2.3 Penguraian komponen gaya *drag* dan gaya angkat

Dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_D=F_{Dp}+F_{Df} \quad (2.1)$$

$$F_D= \int p \cos\theta dA + \int \tau w \sin\theta \, dA \quad (2.2)$$

Gaya *drag* ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_D = f_1(d, V, \mu, \rho) \quad (2.3)$$

sesuai dengan teori **Buckingham-P** menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{FD}{\rho V^2 d^2} = f_2(\frac{\rho V d}{\mu}) \quad (2.4)$$

Gaya *drag* berhubungan dengan koeffisien drag (C_D). Koefisien drag merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan gaya *drag* pada suatu aliran fluida yang melintasi benda. Nilai koefisien drag dinyatakan sebagai berikut:

$$C_D= \frac{FD}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.5)$$

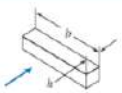
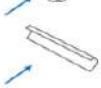
Turbin Savonius berbentuk seperti huruf S yang membentuk *C-section* dan memiliki dua *blade* yaitu *advancing blade* dan *returning blade.* Karena memiliki bentuk yang berbeda keduanya memiliki nilai koefisien drag yang berbeda. *Advancing blade*

memiliki Cd sebesar 2.3 dan *returning blade* memiliki C_D sebesar 1.2. Besar koefisien drag pada beberapa bentuk.

Tabel 2.1 Koefisien drag pada beberapa bentuk benda **(Fox and McDonald, 1994)**

Table 9.3

Drag Coefficient Data for Selected Objects ($Re \geq 10^3$)[a]

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

2.4Perhitungan Daya Turbin

Turbin angin bekerja dengan mengubah energy kinetik dari angin menjadi energi kinetik rotasi di turbin dan kemudian menjadi yang energi listrik dapat disalurkan untuk berbagai macam kebutuhan.Daya dari aliran angin yang memutar turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot V^2 \qquad (2.6)$$

dimana massa udara yang mengalir tiap detik dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \qquad (2.7)$$

Besarnya daya yang dihasilkan oleh angin yang menabrak turbin (P_W) adalah sebagai berikut:

$$P_w = \frac{Ek}{t} \quad (2.8)$$

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V \cdot A) \cdot V^2 \quad (2.9)$$

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

Nilai A merupakan luas penampang A, dalam penelitian ini merupakan luas permukaan turbin angin Savonius yang ditabrak oleh angin yang dirumuskan sebagai berikut:

$$A = (2D - b) \cdot H \quad (2.11)$$

dimana:

Ek : Energi Kinetik (Joule)
$\dot{m}$: massa udara yang mengalir tiap detik (kg/s)
V: kecepatan angin (m/s)
ρ : densitas udara (kg/m^3)
P_w : daya angin (watt)
A: luas permukaan turbin yang ditumbuk oleh angin (m^2)
D : diameter sudu turbin (m)
b : diameter poros (m)
H : tinggi turbin (m)

Tidak semua daya angin dapat dikonversikan menjadi energi mekanik untuk menggerakkan turbin. Oleh karena itu, daya output dari turbin dihitung berdasarkan torsi dinamis yang diukur menggunakan *brake dynamometer* dan putaran turbin menggunakan *tachometer*. Hasil pengukuran yang terbaca kemudian dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_T = T \cdot \omega \quad (2.12)$$

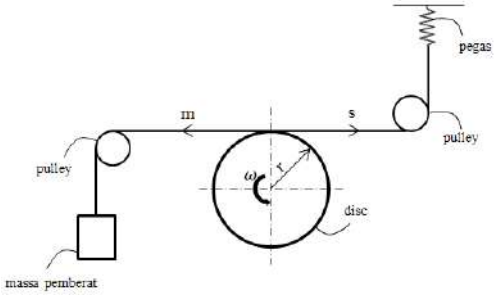
$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.13)$$

$$\mathrm{Td} = (\mathrm{s} - \mathrm{m})\mathrm{gR} \quad (2.14)$$

dimana:

P_T : daya pada turbin (watt)
T : torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin (N-cm)
ω : putaran yang dihasilkan oleh turbin (rad/detik)
n : kecepatan putar poros turbin (rpm)
s : massa neraca pegas (gram)

m : massa pemberat (gram)
g : percepatan gravitasi (m/s^2)
R : jari-jari disc (m)



Gambar 2.4 FBD *Brake Dynamometer*

2.5 *Coefficient of Power*

Coefficient of Power merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan turbin angin dengan daya angin yang mengalir. Berdasarkan persamaan daya diatas dapat diketahui bahwa nilai *Coefficient of Power* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$CoP = \frac{\mathrm{PT}}{\mathrm{Pw}} \tag{2.15}$$

$$CoP = \frac{\mathrm{T.\omega}}{\frac{1}{2}\rho \mathrm{AV^3}} \tag{2.16}$$

$$CoP = \frac{(\mathrm{s-m})\mathrm{gR}}{\frac{1}{2}\rho \mathrm{AV^3}} \tag{2.17}$$

2.6 *Reynolds number*

Reynolds number merupakan bilangan tak berdimensi yang menentukan suatu aliran tersebut laminar, transisi , atau turbulent. Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya *viscous*.

Gaya Inersia = p x A = ρV^2 A (2.18)

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \frac{\mu V}{L} A \quad (2.19)$$

$$\text{Re} = \frac{Gaya\ Inersia}{Gaya\ Viscous} = \frac{\rho.V.L}{\mu} \quad (2.20)$$

Dimana:

ρ = massa jenis fluida (kg /m^3)
V = kecepatan aliran *free stream* fluida (m/s)
μ = viskositas dinamis fluida (N.s/m^2)
L = panjang karakteristik (m)
D = diameter turbin (m)
b = diameter poros (m)

Pada penelitian ini L = 2D-b, sehingga:

$$Re = \frac{\rho.V.(2D-b)}{\mu} \quad (2.21)$$

2.7 *Tip Speed Ratio*

Tip Speed Ratio (sering dikenal sebagai TSR), memiliki lambang λ sangat penting dalam desain generator turbin angin. Jika rotor turbin angin berubah terlalu lambat, sebagian besar angin akan lewat tanpa terganggu melalui celah antara *stage* rotor. Atau jika rotor berputar terlalu cepat, blade akan tampak seperti dinding yang kokoh pada angin. Oleh karena itu, turbin angin dirancang dengan rasio *tip speed ratio* yang optimal untuk mengekstrak sebanyak mungkin tenaga dari angin.Ketika sebuah *stage* rotor melewati udara, ia meninggalkan turbulensi di belakangnya. Jika pisau berikutnya pada rotor pemintal tiba pada titik ini sementara udara masih bergolak, ia tidak dapat mengekstrak tenaga secara efisien dari angin. Namun jika putaran rotor sedikit lebih lambat, udara yang menabrak masing-masing sudu turbin tidak akan lagi bergolak. Oleh karena itu rasio *tip speed ratio* juga dipilih sehingga baling-baling tidak melewati udara dengan aliran yang turbulen.

$$\lambda = \frac{kecepatan\ ujung\ bilah\ turbin}{kecepatan\ angin} \quad (2.22)$$

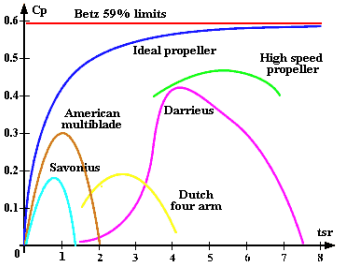
$$\lambda = \frac{\omega D}{V} \qquad (2.23)$$

Dimana: λ = *tip speed ratio*
ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)
R = jari-jari turbin (m)
V = kecepatan aliran udara (m/s)

Rasio *tip speed ratio* diberikan dengan membagi kecepatan ujung *stage* turbin dengan kecepatan angin - misalnya jika angin 20 mph bertiup pada turbin angin dan ujung *stage*nya berputar pada kecepatan 80 mph, maka rasio kecepatan ujungnya adalah 80/20 = 4

Rasio *tip speed ratio* optimum tergantung pada jumlah *stage* pada rotor turbin angin. Semakin sedikit jumlah baling-baling, semakin cepat rotor turbin angin perlu berputar untuk mengekstrak tenaga maksimal dari angin. Rotor dua-*stage* memiliki rasio *tip speed ratio* optimum sekitar 6, rotor tiga-*stage* sekitar 5, dan rotor empat *stage* sekitar 3.

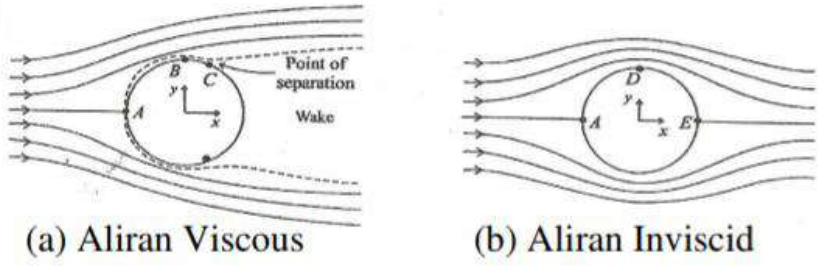
Berdasarkan **gambar 2.4** Setiap jenis turbin angin akan mencapai *coefficient of* power optimum pada nilai TSR tertentu. Seorang fisikawan berkebangsaan Jerman, Albert Betz, menemukan batas maksimum *Coefficient of Power* untuk sebuah turbin angin ideal menggunakan teori momentum aksial. Betz menemukan bahwa turbin angin yang gaya penggerak utamanya adalah gaya angkat memiliki *Coefficient of Power* maksimum sebesar 59,3%. Nilai ini dikenal sebagai batas Betz (Betz *limit*). Semakin besar nilai TSR, maka *Coefficient of Power* akan meningkat hingga titik optimum. Dan seiring dengan meningkatnya nilai TSR maka nilai *Coefficient of Power* semakin menurun.



Gambar 2.5 Grafik Hubungan antara *Coefficient of Power* dengan *Tip Speed Ratio* pada Beberapa Jenis Turbin (**Shimmeri,2010)**

2.8 Aliran melalui silinder

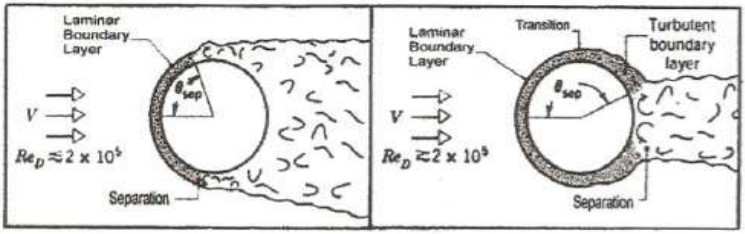
Aliran Melintasi Silinder Aliran inkompresibel melintasi silinder dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.6 Aliran *viscous* dan *inviscid* (**Fox Mc Donald, 1994)**

Gambar 2.6.a menunjukkan aliran viscous pada suatu silinder, streamlines adalah simetris. Titik A adalah titik stagnasi yang selanjutnya terjadi boundary layer. Dari titik A ke titik B terjadi kenaikan kecepatan yang berakibat penurunan tekanan dan selanjutnya dari titik B ke titik C terjadi penurunan kecepatan yang berarti terjadi kenaikan tekanan PC > PB. Di titik C momentum aliran tidak mampu melawan tegangan geser sehingga menyebabkan pecahnya boundary layer. Titik C disebut dengan *point of separation*. Diantara titik-titik atau tempat-tempat

pemisahan boundary layer terjadi suatu kawasan yang disebut dengan *wake*. Makin besar *wake* makin besar terjadi perbedaan gaya didepan dan dibelakang silinder berakibat makin besar gaya seret aliran silinder terhadap silinder. Aliran *inviscid* digambarkan pada **gambar 2.6.b** terlihat bahwa *streamlines* simetris, terjadi slip pada permukaan silinder dan perbedaan besar kecilnya kecepatan aliran ditunjukkan oleh rapat longgarnya streamlines yang ada dan juga tidak terjadi *wake* sehingga tidak terjadi gaya seret pada silinder.

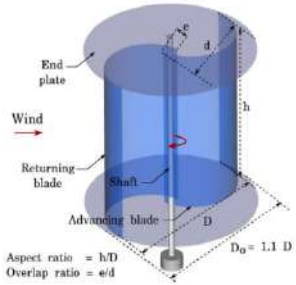


Gambar 2.7 Pengaruh turbulensi terhadap separasi (**Putu Gede, 2010)**

Karena momentum fluida dalam lapisan batas turbulen lebih besar daripada lapisan batas laminar, maka kemampuannya untuk melawan tegangan geser lebih besar sehingga akan lebih mampu untuk menunda yang menyebabkan separasi, itu layak untuk mengharapkan transisi. Jika Red $\leq$ 2 x 10^5 , lapisan batas tetap laminar, dan separasi terjadi pada 80^o , tetapi, jika Red $\geq$ 2 x 10^5 , terjadi transisi lapisan batas, dan separasi ditunda sampai 140^o .

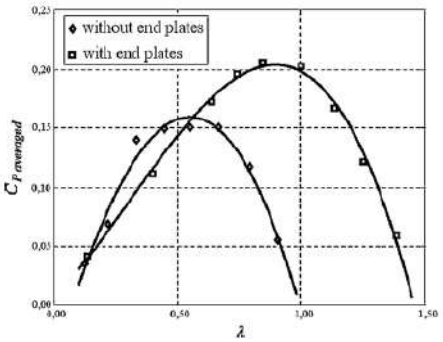
2.9 *End Plates*

End plates adalah aksesoris paling sederhana yang bisa ditambahkan ke turbin Savonius untuk meningkatkan kinerjanya. Penambahan *end plates* pada turbin Savonius dapat meningkatkan koefisien daya rata-rata maksimum, rata-rata *Coefficient of Power*. Turbin juga beroperasi lebih efisien pada rasio *tip speed ratio* yang lebih tinggi



Gambar 2.8 Turbin angin Savonius dengan *end plate* **(Akwa et al,2012)**

End plates pada ujung turbin mencegah pelarian udara dari sisi *advancing blade* ke aliran luar, menjaga tekanan perbedaan antara sisi *advancing* dan *returning blade* di tingkat optimum di atas ketinggian rotor. Untuk diameter *end pates*, ukuran yang disarankan setara dengan 1,1 kali diameter rotor.



Gambar 2.9 Efek *end plate* terhadap performa turbin angin Savonius
(Akwa et al,2012)

2.10 *Coefficient of Moment*

Coefficient of moment adalah rasio antara torsi dinamis dengan torsi yang dihasilkan angin terhadap turbin angin Savonius. Didapatkan hubungan antara *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Moment* dengan *tip speed ratio* sebagai berikut:

$$\frac{CoP}{Cm} = \frac{\omega D}{V} = \lambda \qquad (2.24)$$

Sehingga diperoleh,

$$Cm = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A V^2 D} \qquad (2.25)$$

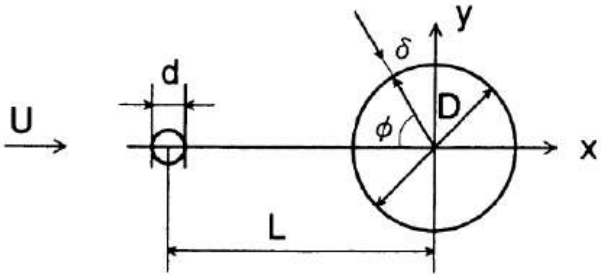
Dimana: T = torsi dinamis (N.m)
ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
D = diameter sudu turbin (m)
H = tinggi turbin (m)
V = kecepatan angin (m/s)
b = diameter poros (m)

2.11 Penelitian Terdahulu

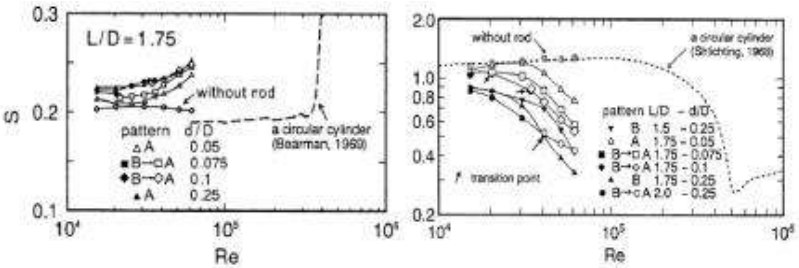
2.11.1 Penelitian Silinder dengan Pengganggu

Penelitian tentang aliran fluida pada sebuah silinder yang diberi pengganggu berupa silinder lain pernah dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi (2002). Penelitian tersebut memvariasikan jarak antara kedua pusat silinder (L/D), diameter silinder pengganggu (d/D), dan harga bilangan Reynolds pada rentang 1,5 x $10^4 \leq$ Re $\leq$ 6,2 x 10^4. **Gambar 2.10** merupakan gambar dari geometri benda uji. Geometri benda uji tersebut mempunyai diameter silinder utama sebesar 40 mm dengan perubahan diameter silinder penganggu dari 1 mm sampai 10 mm sedangkan jarak antar kedua pusat silinder divariasikan dari rentang 50 mm sampai 120 mm.Dari hasil penelitan tersebut didapatkan bahwa penurunan harga koefisien drag (CD) dan peningkatan bilangan

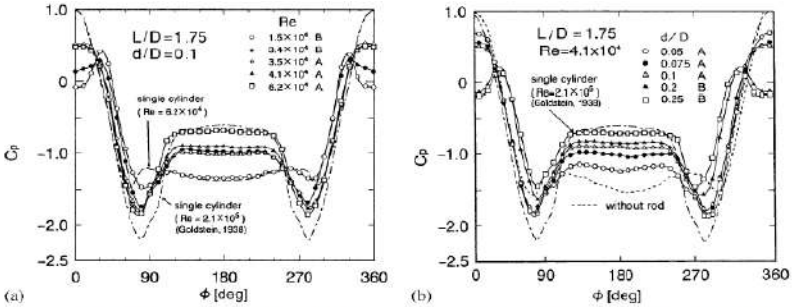
Strouhal yang disebabkan oleh peningkatan bilangan Reynolds (Re) dan peningkatan d/D serta penurunan harga L/D. Dengan peningkatan bilangan Reynolds di atas 3 x 104, maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, tebal Shear Layer berkurang, sehingga bilangan Strouhal akan meningkat dan daerah wake menyempit (koefisien drag menurun). **Gambar 2.11** merupakan grafik hubungan bilangan Strouhal dengan bilangan Reynolds yang dilakukan pada penelitian ini memiliki.



Gambar 2.10 Geometri Benda Uji (**Tsutsui dan Igarashi,2002)**



Gambar 2.11 Grafik bilangan Strouhal dan koefisien *drag*
(Tsutsui dan Igarashi,2002)



(a) Dengan variasi Re **(b) Dengan variasi d/D**

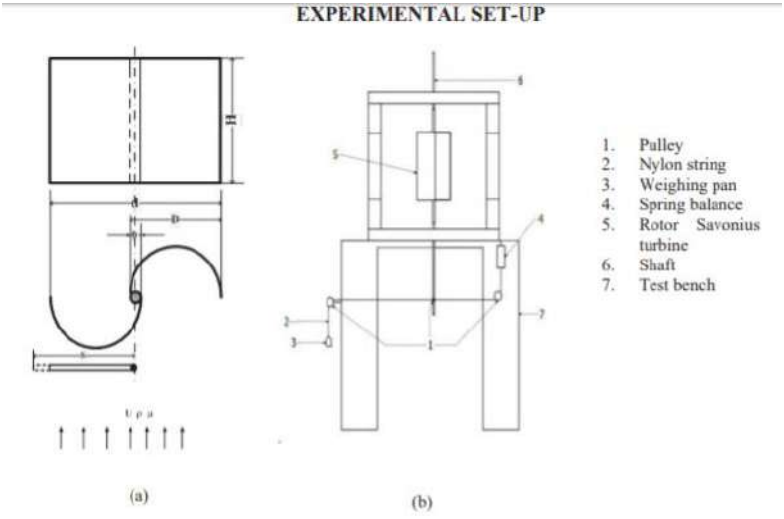
Gambar 2.12 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama
(Tsutsui dan Igarashi,2002)

Untuk mengetahui pengaruh variasi bilangan Reynolds (Re), diameter silinder pengganggu (d/D), dan jarak pusat silinder pengganggu dengan silinder sirkular utama (L/D) terhadap koefisien *drag* (CD) maka didapatkan grafik distribusi Cp seperti **gambar 2.12** diatas. Pada **gambar 2.12 (a)** percobaan dilakukan dengan variasi bilangan Reynolds yang dilakukan pada L/D = 1,75 dan d/D = 0,1 dengan dua pola aliran yaitu pola aliran A dengan adanya *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu dan pola aliran B yaitu tanpa *vortex shedding* dibelakang silinder pengganggu. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu maka Cp pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan. Untuk pola aliran 18 (A) Cp menurun menjadi 0,5 dan pola aliran (B) Cp menjadi negatif pada bagian depan silinder sirkular utama. Dari **gambar 2.12 (a)** dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi bilangan Reynolds yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit. Sedangkan pada **gambar 2.12 (b)** percobaan dilakukan dengan variasi diameter silinder sirkular utama yang dilakukan pada L/D = 1,75 dan Re = 4,1 x 104. Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan memvariasikan diameter

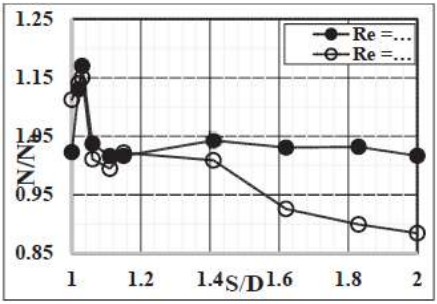
silinder pengganggu yang semakin meningkat maka Cp pada bagian depan silinder sirkular utama mengalami penurunan. Dari grafik **gambar 2.12 (b)** dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan silinder pengganggu dengan variasi diameter yang semakin meningkat maka lebar *wake* dibelakang silinder sirkular utama semakin menyempit.

2.11.2 Pengaruh Plat Pengganggu terhadap Performa Turbin Angin Savonius

Penelitian mengenai aliran fluida yang melalui turbin angin tipe Savonius yang diberi plat pengganggu di depan *returning blade* dilakukan oleh **Triyogiet al (2017)** . Terdapat beberapa variasi S/D yaitu 1 ; 1,02 ; 1,03 ; 1,06 ; 1,11 ; 1,15 ; 1,41 ; 1,62 ; 1,83 ; 2.Eksperimen dilakukan pada *Reynolds number* 30000 dan 90000. Diperoleh hasil apabila S/D>1,41 pada Re=90000, diperoleh hasil bahwa performa turbin menurun dibandingkan tanpa menggunakan pengganggu.

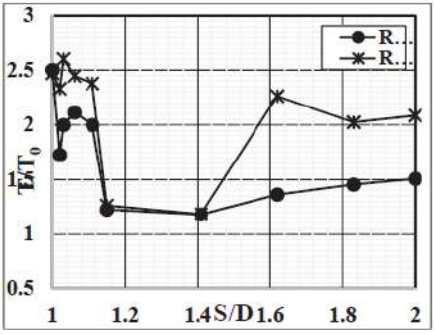


Gambar 2.13 Skema Penelitian **(Triyogiet al,2017)**



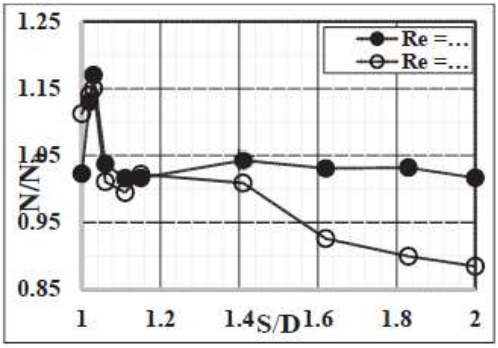
Gambar 2.14 Grafik *Coefficient of Power* (CoP)
(Triyogiet al,2017)

Gambar 2.14 menunjukkan nilai *Coefficient of power* turbin dengan plat pengganggu relative terhadap nilai tanpa plat pengganggu pada Re=30000 dan Re=90000. Pada Re=30000 penempatan plat pengganggu di depan *returning blade* efektif meningkatkan nilai *coefficient of power* ditunjukan dengan nilai $CoP/CoP_0 > 1$. Pada Re=90000, apabila S/D>1,41 nilai CoP/CoP_0 menurun. Pada S/D= 1,83 nilai CoP menurun 60,7% dibandingkan dengan tanpa plat pengganggu.



Gambar 2.15 Grafik Torsi Statis (T/T_O)
(Triyogiet al,2017)

Berdasarkan **gambar 2.15** didapatkan nilai T/T_O pada Re=30000 dan 90000. Didapatkan bahwa peletakkan plat pengganggu di depan *returning blade* efektif meningkatkan torsi pada turbin dengan S/D = 1,02 hingga 1,06 kemudian nilai T/T_O akan menurun.



Gambar 2.16 Grafik Putaran (n/n_o)
(Triyogiet al,2017)

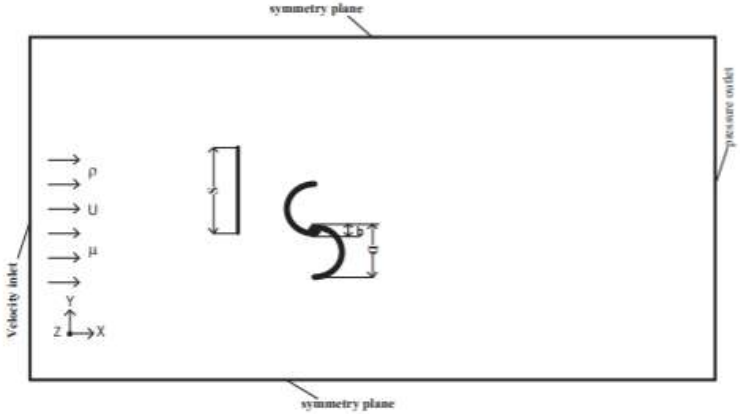
Berdasarkan **gambar 2.16** didapatkan nilai T/T_O pada Re=30000 dan 90000. Didapatkan bahwa peletakkan plat pengganggu di depan *returning blade* efektif meningkatkan putaran pada Re=30000, pada Re=90000 nilai n/no>1, akan tetapi apabila S/D>1,41 nilai putaran akan menurun.

2.11.3 Studi Numerik Pengaruh Plat Penggangu terhadapPerforma Turbin Angin Savonius

Penelitian lainnya dilakukan oleh **Triyogiet al (2017)** dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* dengan memasang plat pengganggu di depan turbin angina Savonius. Dilakukan secara numerik dalam aliran seragam pada *Reynolds number* 30.000 dan 90.000. Vektor kecepatan dan distribusi tekanan di sekitar turbin disimulasikan dengan memvariasikan lebar plat pengganggu relatif terhadap diameter

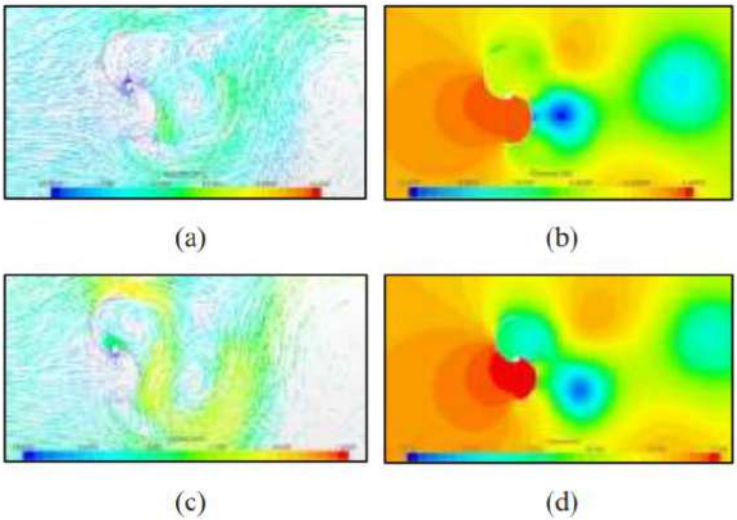
sudu rotor (S / D) = 1,00, 1,02, 1,03, 1,15,1,41, dan 2,00, menggunakan STAR CCM++ *Software* digunakan untuk memvisualisasikan fenomena aliran terjadi di sekitar turbin, dan di mana dalam simulasi ini, turbin rotor diatur statis. Hasilnya menunjukkan bahwa adanya plat pengganggu meningkatkan performa turbin tergantung jarak S/D dan jumlah Reynolds (Re). Untuk S / D = 2 pada Re = 90.000, kinerja turbin diperkirakan lebih rendah daripada saat turbin tanpaplat pengganggu.

Skema *modeling* ini dapat dilihat pada **gambar 2.17**



Gambar 2. 17 Skema *Modeling*
(**Triyogiet al, 2017**)

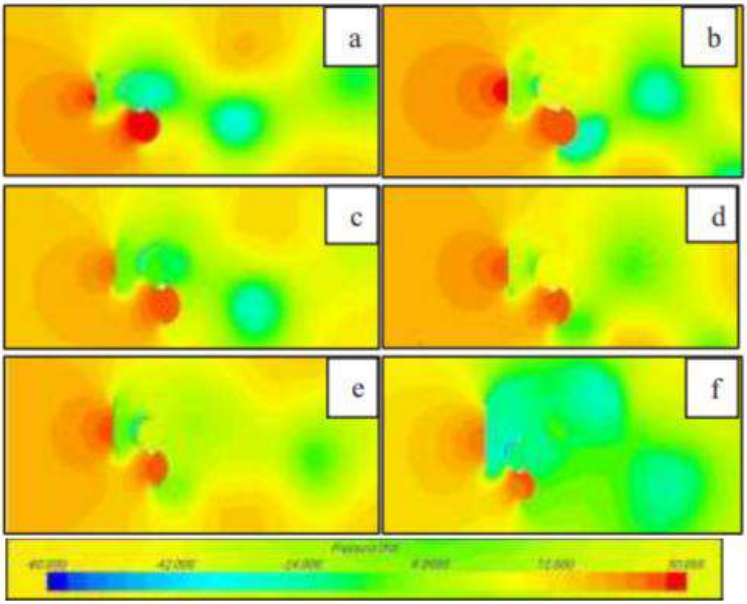
Gambar 2.18 menunjukkan hasil simulasi untuk aliran mengelilingi turbin rotor Savonius tanpa plat, untuk Re = 30.000 (gambar 2.18a dan 2.18a b) dan Re = 90.000 (gambar 2.18a c dan 2.18a d), di mana dalam simulasi ini turbin rotor ditetapkan statis atau tidak bergerak.



Gambar 2.18 Aliran di sekitar turbin rotor Savonius tanpa plat, untuk Re = 30.000: (a) vektor kecepatan, (b) *countur* tekanan, dan untuk Re = 90.000: (c) vektor kecepatan dan (d) penghitung tekanan **(Triyogiet al,2017)**

Gambar 2.18 menunjukkan bahwa secara umum ada perbedaan tekanan antara tekanan di depan *returning blade* dan belakang, tekanan di depan turbin lebih tinggi daripada belakang, dan ini juga merupakan kasus yang sama untuk aliran di *advancing blade* . Itu menyebabkan *pressure drag* di sisi depan*returning blade* lebih tinggi dari belakang sisi. *Pressure drag* pada *advancing blade* lebih tinggi daripada *returning blade.* Dihasilkan torsi statis positif yang menyebabkan turbin rotor berputar berlawanan arah jarum jam. Apabila dibandingkan antara aliran dengan Re = 30.000 dan 90.000, maka turbin rotor dengan Re = 90.000 akan memiliki torsi statis lebih tinggi daripada dengan Re = 30.000. Ditunjukkan oleh tekanan di belakang *returning blade* untuk Re = 30.000 (warna biru, gambar 2.18 d) lebih rendah dari pada Re = 90.000 (warna hijau, gambar 2.18b).

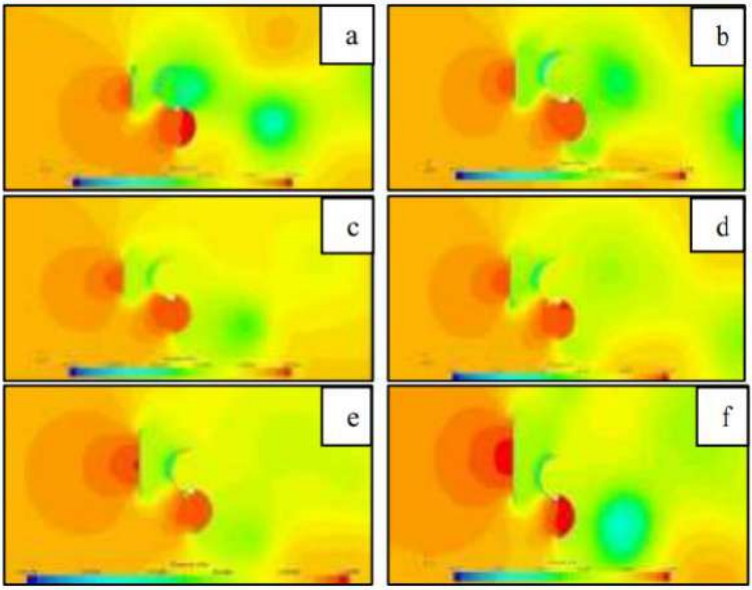
Jadi, torsi negatif pada *returning blade* untuk Re = 30.000 lebih tinggi dari yang untuk Re = 90.000.



Gambar 2.19 *Pressure countur flow* pada turbin angin Savonius dengan plat pengganggu, Re = 30,000: (a) S/D = 1,00, (b) S/D = 1.02, (c) S/D = 1.03, (d) S/D = 1.15, (e). 1.41 and (f) S/D = 2.00
(**Triyogiet al,2017**)

Gambar **2.19** menunjukkan hasil simulasi untuk aliran mengelilingi turbin rotor Savonius dengan plat bervariasi S /D = 1,00; 1,02, 1,03, 1,15, 1,41 dan 2,00, untuk Re = 30.000. Seperti yang terlihat pada gambar yang karena diletakkan plat pengganggu di depan *returning blade*, tekanan di belakang *returning blade* atau di depan *returning blade* akan berkurang, sedangkan tekanan di depan *advancing blade* relatif tidak berubah dibandingkan dengan Turbin rotor Savonius tanpa

pengganggu (lihat gambar 2.19b). Jadi, pemasangan plat penggangu di depan *returning blade* Savonius turbin dapat diharapkan untuk meningkatkan kinerja turbin.



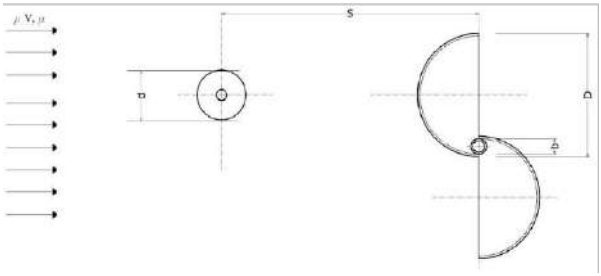
Gambar 2.20 *Pressure countur flow* pada turbin angin Savonius dengan plat pengganggu, Re = 30,000: (a) S/D = 1,00, (b) S/D = 1.02, (c) S/D = 1.03, (d) S/D = 1.15, (e). 1.41 and (f) S/D = 2.00
(**Triyogiet al,2017**)

Untuk SD = 2, pelat tirai dipasang di depan *returning blade* diduga akan menurunkan performa turbin. Hal ini karena daerahnya lebih rendah tekanan di depan *returning blade* lebih besar dari satu untuk S / D <2, itu menyebabkan aliran cenderung lewat di wilayah ini bukannya mendorong *advancing blade* untuk menghasilkan torsi positif. Akibatnya terjadi penurunan performa turbin. Ditunjukkan dengan vektor kecepatan di sekitar turbin

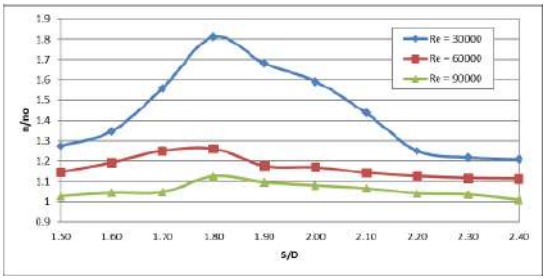
dengan plat apabila dibandingkan dengan vektor kecepatan di sekitar turbin tanpa plat (gambar 2.20c). Jadi, pemasangannya plat pengganggu ukuran S / D = 2 di depan *returning blade* dari Savonius turbin untuk Re = 90.000 .

2.11.4 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu Aliran Di Depan Sisi Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius

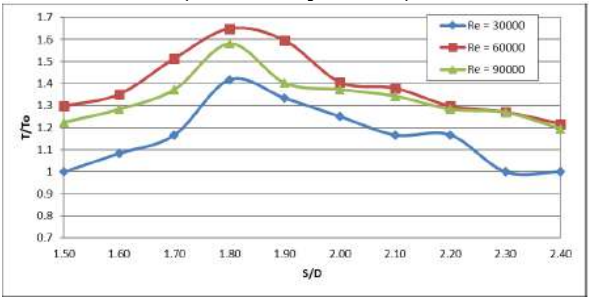
Dilakukan penelitian oleh **Satria Bayu (2017),** dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* turbin angin tipe Savonius, maka performa turbin angin dapat ditingkatkan. Untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan d/D=0,2, Penelitian dilakukan di ruangan terbuka dengan menggunakan blower sebagai media penghasil angin. Penghalang yang digunakan berupa silinder sirkular dengan diamater (d) 20,32 mm atau dengan nilai (d/D) sebesar 0,2 dan diletakkan di depan returning blade. Sedangkan variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah bilangan Reynolds (Re) dan jarak antara pusat penghalang dengan pusat returning blade (S/D).Variasi (Re) berturut – turut adalah $3{,}0x10^4$; $6{,}0x10^4$;$9x10^4$ yang didapatkan berdasarkan perhitungan kecepatan free stream (U) dan panjang karakteristik dari turbin angin (2D-b), sedangkan variasi (S/D) yang digunakan yaitu $1{,}5 \leq S/D \leq 2{,}4$. Pengukuran kecepatan aliran fluida diamati dengan menggunakan anemometer, pengukuran putaran turbin menggunakan tachometer, dan torsi keluaran turbin diukur dengan menggunakan brake dynamometer.Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah penggunaan silinder pengganggu yang diletakkan di depan *returning blade* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin. Selain itu, variasi jarak S/D yang diteliti berpengaruh terhadap performa turbin Savonius.



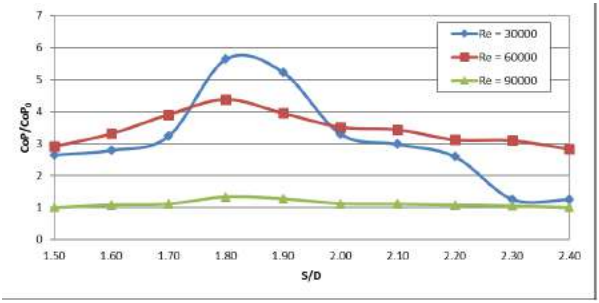
Gambar 2.21 Skema Penelitian (**Satria Bayu,2017**)



Gambar 2.22 Grafik Perbandingan putaran antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5-2,4 (**Satria Bayu,2017**)

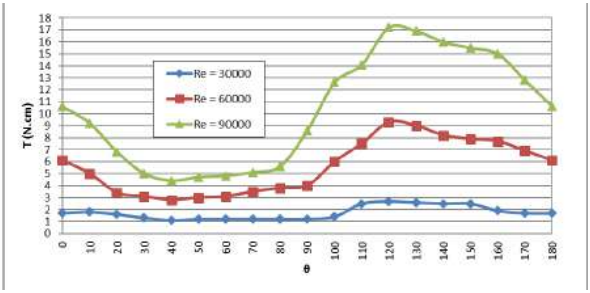


Gambar 2.23 Grafik perbandingan torsi statis antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T0) sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5 – 2,4(**Satria Bayu,2017**)



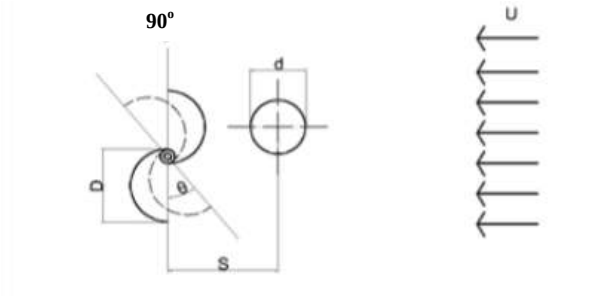
Gambar 2.24 Grafik perbandingan *Coefficient of Power* antara turbin angin Savonius berpengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak pada S/D = 1,5 – 2,4(**Satria Bayu,2017**)

Gambar **2.22,2.23 dan 2.24** diatas memperlihatkan bahwa dari ketiga bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini, menunjukkan bahwa perbandingan putaran, torsi statis dan *Coefficient of Power* memiliki nilai lebih besar dari satu. Hal ini menjelaskan bahwa dengan diletakkannya silinder pengganggu di depan *returning blade,* terbukti efektif meningkatkan performa turbin angin. Grafik diatas menunjukkan bahwa nilai puncak (*peak value)* putaran, torsi statis dan *Coefficient of Power* dari turbin angin Savonius berpengganggu berada pada jarak S/D = 1,8. Ini menunjukkan bahwa pada posisi pengganggu dengan S/D = 1,8 di depan *returning blade* memberikan kinerja yang optimal pada turbin Savonius yang diteliti.



Gambar 2.25 Grafik torsi statis turbin angin Savonius berpengganggu (T) sebagai fungsi sudut (θ) pada jarak S/D = 1,8 **(Satria Bayu,2017)**

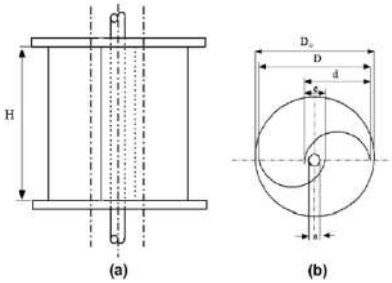
Gambar **2.25** memperlihatkan grafik dalam nilai torsi statis sebagai fungsi sudut pada jarak S/D 1,7 dimana pada jarak S/D tersebut memiliki torsi statis paling besar pada θ= 120^o. Penelitian dilakukan dengan sudut bukaan sudu pada rentang 0° sampai dengan 180° dengan kenaikan setiap 10° seperti pada gambar **2.26**.



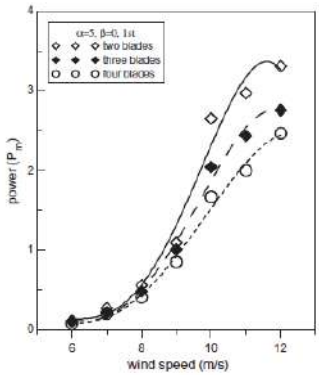
Gambar 2.26 Gambar posisi bukaan sudu Savonius pada berbagai sudut **(Satria Bayu,2017)**

2.11.5 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Savonius dengan Berbagai Variasi Parameter Geometri

Dilakukan penelitian untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius oleh **Mahmoed et al (2010)**. Penelitian dilakukan dengan variasi parameter geometri rotor Savonious,antara lain jumlah *blade* dari dua *blade* (2b), tiga *blade* (3b) dan empat *blade* (4b); *single stage* (1) dan *double stage* (2st.); *overlap ratio* (b) dari 0, 0,2, 0,25, 0,3 dan 0,35 dan *aspect ratio* 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dan ada tidaknya *end plate*.

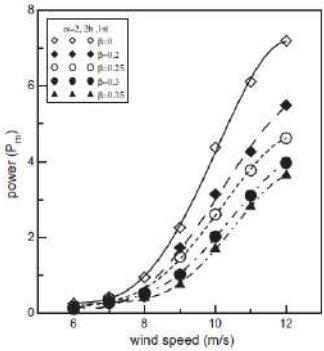


Gambar 2.27 Skema turbin angin Savonius **(Mahmoed et al,2010)**



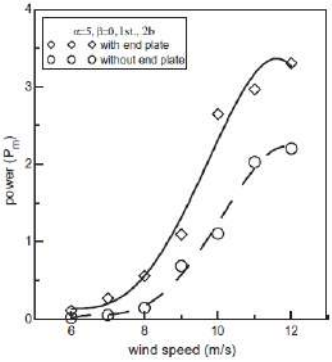
Gambar 2.28 Grafik *power* terhadap kecepatan angin saat *aspect ratio* 5
(Mahmoed et al,2010)

Gambar 2.27 memberi daya mekanik lebih tinggi dibanding tiga rotor dan empat *blade* .Rotor dua *blade* lebih efisien untuk *aspect ratio* lainnya dan rotor *double stages*.



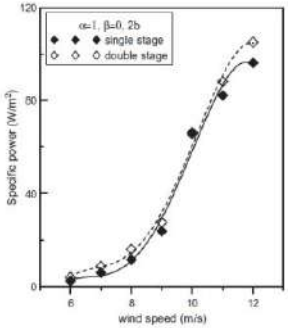
Gambar 2.29 Grafik *power* terhadap kecepatan angin pada *overlap ratio* yang berbeda
(Mahmoed et al,2010)

Berdasarkan **Gambar 2.28**. Dapat dilihat bahwa rotor tanpa *overlap ratio* memberi *power* lebih tinggi dibanding rotor dengan *overlap ratio*.



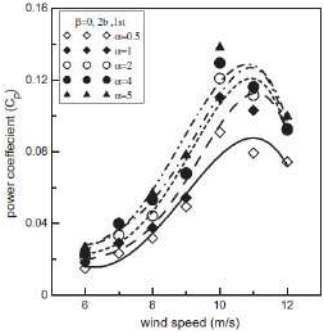
Gambar 2.30 Grafik *power* terhadap kecepatan angin pada rotor dengan menggunakan *end plates* dan tanpa *end plates* **(Mahmoed et al,2010)**

Untuk mempelajari efek dari *end plates*, rotor dengan dan tanpa *end plates* diuji pada nilai konstan parameter lainnya.Variasi *power* dengan kecepatan angin untuk rotor dengan dan tanpa *end plates* diberikan pada **gambar 2.29**. Rotor dengan *end plates* memberi *power* yang lebih tinggi daripada rotor tanpa *end* plates.Hal ini karena keberadaan *end plates* meningkatkan jumlah udara yang mengalir menuju *blades* turbin angin Savonius.



Gambar 2.31 Grafik *Spesific power* terhadap kecepatan angin pada *single* dan *double stages***(Mahmoed et al,2010)**

Jumlah *stages* untuk rotor *single* dan *double stages* berpengaruh pada nilai parameter konstan lainnya. Rotor *double stages* memberi *specific power* yang lebih tinggi dari pada rotor *single stage* seperti ditunjukkan pada **gambar 2.30**. *Spesific power* didefinisikan sebagai daya yang diperoleh dari daerah proyeksi unit rotor. Pada penelitian ini, torsi statis berpengaruh pada *blade* rotor untuk kedua rotor *single stage* dan *double stages* diukur pada sudut rotasi yang sama dan pada kecepatan angin yang berbeda.



Gambar 2.32 Grafik *Coefficient of Power* terhadap kecepatan angin pada *aspect ratio* yang berbeda**(Mahmoed et al,2010)**

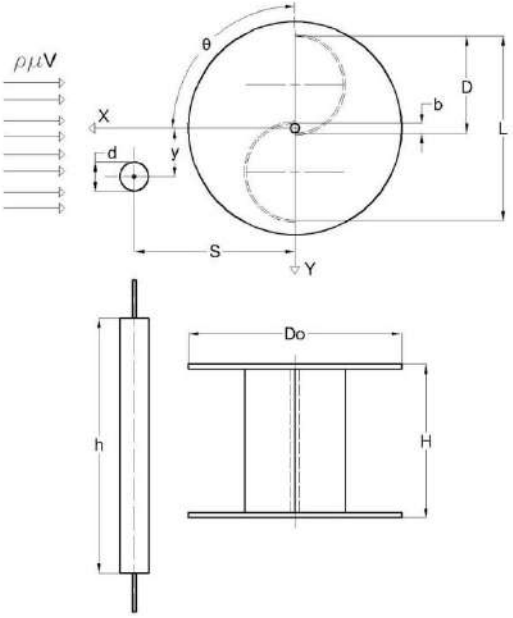
Rotor yang berbeda dengan *aspect ratio* 0,5 sampai 5 dengan dilakukan penelitian pada nilai konstan dari parameter lainnya. Gambar **2.31** menunjukkan variasi *coefficient of performance* terhadap kecepatan angin pada berbagai *aspect ratio* yang berbeda. Terjadi peningkatan *Coefficient of Power* dengan kenaikan *aspect ratio*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAAN

3.1 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui parameter-parameter yang digunakan dalam penelitian ini. Parameter- parameter yang mempengaruhi karakteristik aliran antara lain densitas udara (ρ), viskositas udara (μ), kecepatan udara (v), diameter sudu turbin savonius (D), tinggi turbin savonius (H),diameter poros(b), panjang karakteristik (L), panjang silinder pengganggu (t), jarak antara pusat silinder (S), variasi silinder pengganggu arah tegak lurus arah datang angin (y).



Gambar 3.1 Skema Penelitian

Skema penelitiaan dan parameter yang akan dianalisa pada penelitian ini dapat dilihat pada **gambar 3.1**, adalah sebagai berikut :
ρ:densitas udara (kg/m3)
μ:viskositas udara (N.s/m2)
V:kecepatan udara (m/s)
d:diameter silinder pengganggu (m)
D: diameter turbin (m)
S: jarak antara pusat silinder (m)
y : variasi silinder pengganggu arah tegak lurus arah datang angin(m)
b: diameter poros (m)
L: panjang karakteristik (m)
t: panjang silinder pengganggu (m)
n: putaran sudu turbin angin Savonius (rpm)
H: tinggi turbin Savonius (m)

3.1.1 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Power*

Langkah-langkah analisa dimensi yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

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

   Jumlah parameter(n)= 10 parameter
   Parameter-parameter tersebut adalah:
   P = Power, Nm/s
   ρ = densitas udara, kg/m3
   U = kecepatan aliran udara,m/s
   D = diameter sudu turbin angin,m
   d = diameter silinder pengganggu,m
   H= tinggi turbin,m
   b = diameter poros,m

n = putaran sudu turbin, rpm
t = tinggi silinder pengganggu,m
S= jarak pusat silinder pengganggu terhadap *returning blade*,m

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

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

4. Memilih parameter berulang (m) yang jumlahnya sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan yaitu: ρ, V, D
   Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.
5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.
   Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = 12-3 = 9 grup tanpa dimensi. Grup tanpa dimensi tersebut antara lain:

$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^3 D^2}$ $\pi_5 = \frac{H}{D}$ $\pi_9 = \frac{\omega D}{\mathrm{V}}$

$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$ $\pi_6 = \frac{b}{D}$

$\pi_3 = \frac{d}{D}$ $\pi_7 = \frac{t}{\mathrm{D}}$

$\pi_4 = \frac{y}{D}$ $\pi_8 = \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}}$

Dari analisa diatas, diperoleh grup tidak berdimensi sebagai berikut:

π_1: *Coefficient of Power*

π_2: bilangan *Reynolds*

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_4 : rasio antara variasi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter turbin angin Savonius

π_5 : rasio antara tinggi turbin terhadap diameter turbin angin Savonius

π_6 : rasio antara diameter poros terhadap diameter turbin angin Savonius

π_7 : rasio antara tinggi silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_8 : rasio jarak silinder pengganggu ke pusat *returning blade* terhadap diameter sudu turbin angin Savonius.

π_9 : *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho\, V\, D}, \frac{d}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{t}{D}, \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}} \frac{\omega D}{\mathrm{U}}\right)$$

Dalam penelitian ini, $\frac{\mu}{\rho\, V\, D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}}$ merupakan variabel tetap. Sedangkan $\frac{\omega D}{\mathrm{V}}, \frac{y}{D}, \frac{\mu}{\rho\, V\, D}$ merupakan variabel yang divariasikan untuk diketahui pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* turbin angin Savonius, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

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

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

$$\frac{P}{\rho V^3 D^2} = f_3\left(TSR, \frac{y}{D}, Re\right)$$

$$CoP = f_4\left(TSR, \frac{y}{D}, Re\right)$$

3.1.2 Analisa Dimensi untuk *Coefficient of Moment*

Langkah-langkah analisa dimensi yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang mempengaruhi *power*

   τ= f(ρ,μ,V,D,d,y,H,b,t,S,ω)

   Jumlah parameter(n)= 10 parameter

   Parameter-parameter tersebut adalah:

   τ = Torsi Dinamis, Nm

   ρ = densitas udara, kg/m3

   U = kecepatan aliran udara,m/s

   D = diameter sudu turbin angin,m

   d = diameter silinder pengganggu,m

   H= tinggi turbin,m

   b = diameter poros,m

   n = putaran sudu turbin, rpm

   t = tinggi silinder pengganggu,m

   S= jarak pusat silinder pengganggu terhadap *returning blade*,m

2. Menentukan satu grup dimensi primer yang digunakan dalam menganalisa.

   Dipilih M,L,t.

3. Membuat dimensi primer dari parameter-parameter yang dipilih

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

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

   Jumlah parameter berulang (m) = r = 3.

5. Menentukan grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan.

   Jumlah grup tanpa dimensi yang akan dihasilkan = 12-3 = 9 grup tanpa dimensi. Grup tanpa dimensi tersebut antara lain:

$\pi_1 = \frac{P}{\rho V^2 D^3}$ $\pi_5 = \frac{H}{D}$ $\pi_9 = \frac{\omega D}{\mathrm{V}}$

$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho V D}$ $\pi_6 = \frac{b}{D}$

$\pi_3 = \frac{d}{D}$ $\pi_7 = \frac{t}{\mathrm{D}}$

$\pi_4 = \frac{y}{D}$ $\pi_8 = \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}}$

Dari analisa diatas, diperoleh grup tidak berdimensi sebagai berikut:

π_1: *Coefficient of Moment*

π_2: bilangan *Reynolds*

π_3 : rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_4 : rasio antara variasi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter turbin angin Savonius

π_5 : rasio antara tinggi turbin terhadap diameter turbin angin Savonius

π_6 : rasio antara diameter poros terhadap diameter turbin angin Savonius

π_7 : rasio antara tinggi silinder pengganggu terhadap diameter turbin angin Savonius

π_8 : rasio jarak silinder pengganggu ke pusat *returning blade* terhadap diameter sudu turbin angin Savonius.

π_9 : *Tip Speed Ratio*

Hubungan antara grup variabel yang tak berdimensi adalah:

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

$$\frac{P}{\rho V^2 D^3} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho\, V\, D}, \frac{d}{D}, \frac{y}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{t}{D}, \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}} \frac{\omega D}{\mathrm{V}}\right)$$

Dalam penelitian ini, $\frac{\mu}{\rho\, V\, D}, \frac{b}{D}, \frac{H}{D}, \frac{d}{D}, \frac{\mathrm{S}}{\mathrm{D}}$ merupakan variabel tetap. Sedangkan $\frac{\omega D}{\mathrm{V}}, \frac{y}{D}, \frac{\mu}{\rho\, V\, D}$ merupakan variabel yang divariasikan untuk diketahui pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* turbin angin Savonius, sehingga dapat ditulis sebagai berikut:

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

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

$$\frac{P}{\rho V^2 D^3} = f_3\left(TSR, \frac{y}{D}, Re\right)$$

$$Cm = f_4\left(TSR, \frac{y}{D}, Re\right)$$

3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada eksperimen kali ini antara lain:

3.2.1 Axial Fan

Pada penelitian ini axial fan digunakan sebagai penghasil kecepatan angin yang dapat memutar sudu turbin angin Savonius. Axial Fan yang digunakan adalah **CKE SPV-18** seperti pada gambar 3.2.

Gambar 3.2 *Axial fan* CKE SPV-18

Tabel 3.1 Spesifikasi *Axial fan* CKE SPV-18

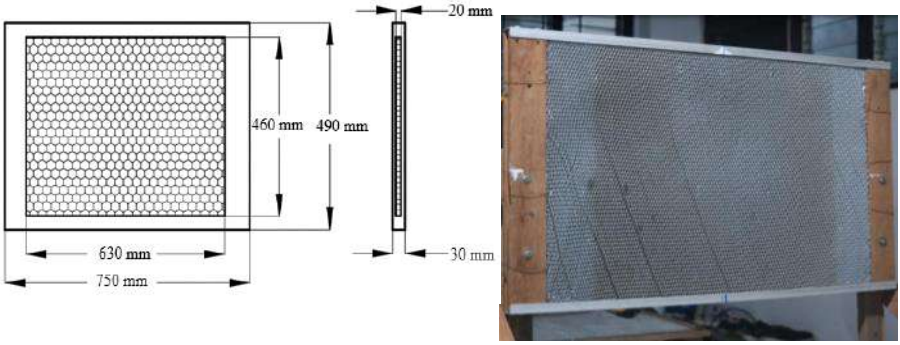
SPECIFICATIONS	
Diameter	18 inch/ 450 mm
Air Flow	4413 CFM
Power	1,7 KW
Voltage	220-240 V

Speed	2850 RPM
Phase	1

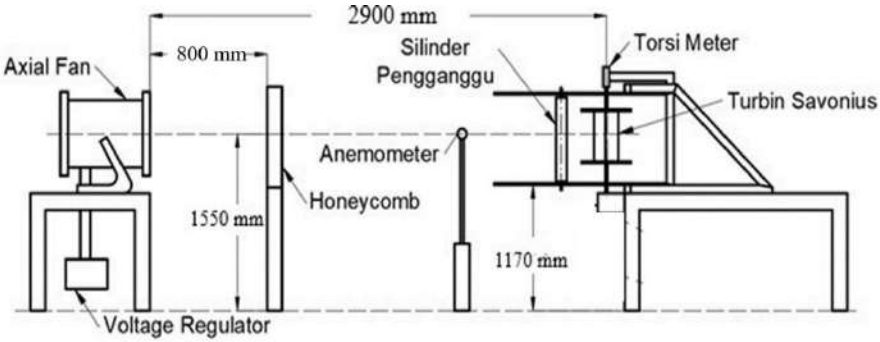
3.2.2 Honeycomb

Pada penelitian ini, *honeycomb* digunakan untuk menyeragamkan aliran angin menuju turbin angin Savonius dan mencegah terjadinya *swirl*. *Honeycomb* diletakkan di antara *Axial Fan* dengan turbin angin Savonius seperti pada **gambar 3.4**. *Honeycomb* yang digunakan berbentuk persegi dengan sket seperti **gambar 3.3** dan mempunyai dimensi sebagai berikut:

Panjang sisi *frame* : 750 mm
Panjang sisi *honeycomb* : 460 mm
Tebal *frame* : 30 mm
Tebal *honeycomb* : 20 mm
Meshing size : 16 lubang/in^2



Gambar 3.3 *Honeycomb* yang Digunakan dalam Penelitian

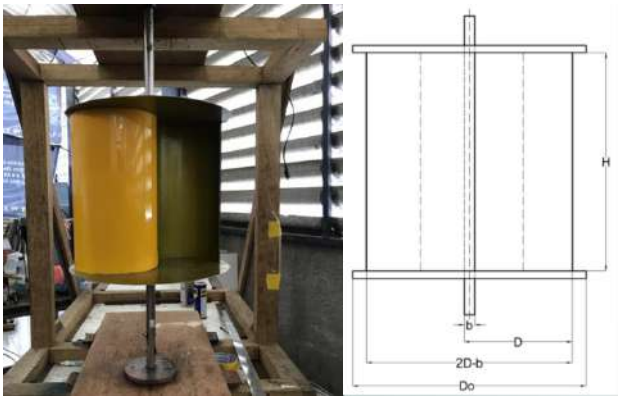


Gambar 3.4 Skema Instalasi *Axial Fan*, *Honeycomb* dan Silinder Pengganggu Terhadap Turbin Savonius

3.2.3 Turbin Angin Savonius

Skema turbin angin Savonius ditunjukkan pada **gambar 3.5**, memiliki dimensi sebagai berikut:

- Diameter sudu turbin (D) : 165,2 mm
- Tinggi (H) : 294,4 mm
- Diameter poros (b) : 19 mm
- Tebal *endplates* : 1 mm
- Diameter turbin (2D-2t-b) : 303,4 mm
- Diameter *end plates*(D_o) : 321 mm
- Massa PVC : 1,56 Kg
- Bahan Turbin : PVC
- Tebal PVC : 2 mm
- Bahan *end plates* :*Aluminium cladding* 2024

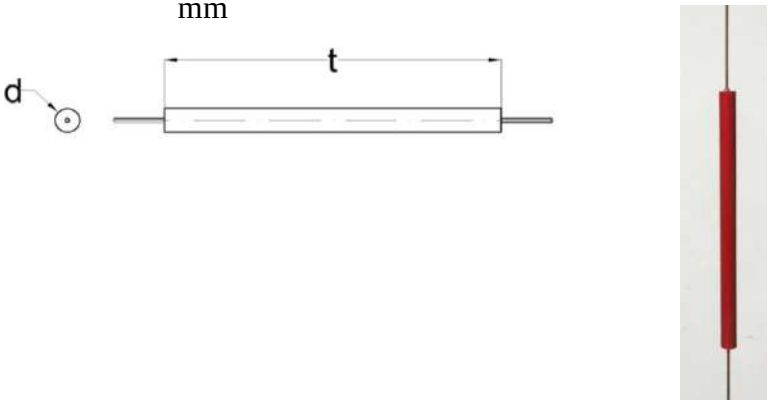


Gambar 3.5 Turbin Angin Savonius

3.2.4 Silinder Pengganggu

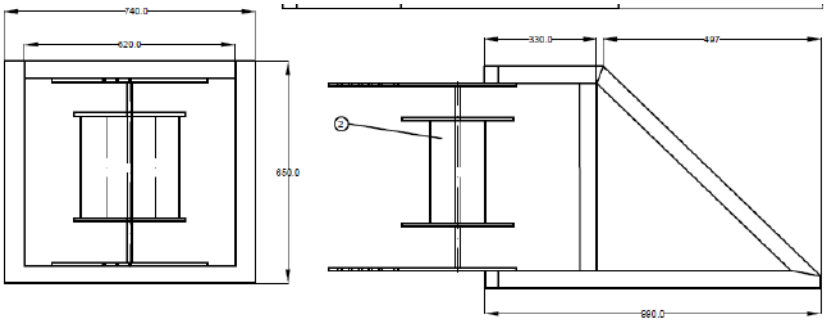
Skema silinder pengganggu dalam penelitian ini terdapat pada **gambar 3.6**

- Tinggi :500 mm
- Diameter silinder pengganggu : 32,2 mm



Gambar 3.6 Silinder Pengganggu

3.2.5 Penyangga Turbin Angin Savonius



Gambar 3.7 Penyangga Turbin Angin Savonius

Digunakan *bearing* tipe IBC Germany sebagai bantalan poros turbin angina Savonius ,

- Diameter luar : 32,25 mm
- Diameter dalam : 12 mm
- Tebal : 10 mm

3.2.6 Alat Ukur

Pada penelitian ini digunakan alat ukur untuk mendapatkan nilai putaran dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai berikut:

a. Tachometer

Tachometer adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek yang berputar. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer* **OMEGA** seri **HHT12** seperti pada **gambar 3.8** dengan akurasi pembacaan 0.01%. Spesifikasi tachometer dapat dilihat pada **tabel 3.2**.

Gambar 3.8 *Tachometer* OMEGA seri HHT1

Tabel 3.2 Spesifikasi Tachometer OMEGA Seri HHT12

SPECIFICATIONS	
Range	5 to 99.999 rpm
Accuracy	0,01 % of reading or ± 1 digit
Resolution	0,001 to 1,0 rpm
Display	5-digit alphanumeric LCD
Memory	Max, min and last
Power	2 "AA" 1,5 V dc batteries
Environmental	5 to 40° C

a. Anemometer

Anemometer adalah alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan aliran angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer model **Omega HHF141** seperti pada gambar 3.9

dengan *high resolution* 0,01 m/s. Spesifikasi dari anemometer ini dapat dilihat pada tabel 3.4

Gambar 3.9 ***Anemometer Omega HHF141***

Tabel 3.3 ***Spesifikasi Anemometer Digital Omega HHF141***

Range	2,75 inch Air Probe	: 40 to 7800 ft/min
		: 0.2 to 40.00 m/sec
	Air Probe AP100	: 300 to 6800 ft/min
		:1.5 to 35.00 m/sec
Accuracy	Air Velocity	**AP275:** ±1.0% of reading ±1 digit
		AP100: ±(0.50% of F.S. +0.75% of reading +1 digit
Resolution	1 ft/min or 0.01 m/sec	
Operating Temperature	Instrument	: 32° to 125°F (0° to 50°C)
	Probes	: -4° to 212°F (-20° to 100°C)
Power Supply	3 AA alkaline batteries	
Battery Life	Approx. 150 hours, without backlight	
Battery Check	Automatic Low Battery display	
Display	0.5" LCD, 4 digits, with LED backlight	

b. Torque meter

Torque meter ini merupakan alat ukur yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torque meter yang digunakan yaitu **Torque meter LUTRON model : TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm.Spesifikasi dapat dilihat pada tabel 3.5

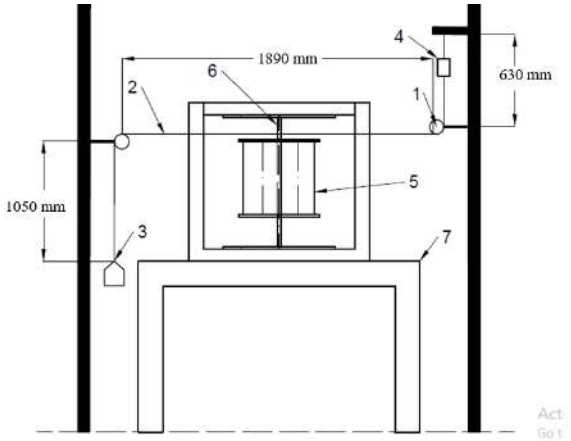
Gambar 3.10 *Torque meter* LUTRON model TQ-8800

Tabel 3.4 Spesifikasi Torque meter LUTRON model TQ-8800

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

c. *Brake Dynamometer*

Brake dynamometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur torsi dinamis dari turbin angin Savonius. Skema *brake dynamometer* yang digunakan pada penelitian ini didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al (2012)** ditunjukkan pada gambar **3.11**



Gambar 3.11 *Brake Dynamometer*

Keterangan **Gambar 3.11**

1. Sistem pulley
2. Senar Nylon LAZER diameter 0,6 mm
3. Massa pemberat (Gambar 3.13)
4. Neraca pegas (Gambar 3.14)
5. Turbin angin Savonius
6. Poros turbin angin Savonius
7. Struktur penyangga turbin angin Savonius

Pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan turbin Savonius dengan *brake dynamometer* dilakukan dengan cara menambahkan massa pemberat yang disambungkan dengan neraca pegas secara bertahap saat turbin sedang berputar hingga turbin berhenti berputar. Setiap menambahkan massa pemberat, putaran dari turbin diukur dengan menggunakan *tachometer*. Nilai torsi dinamis didapatkan dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang

terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan jari-jari *disc* yang dipasang pada poros turbin angin Savonius. Nilai torsi dinamis akan digunakan untuk menghitung daya *output* turbin dengan cara mengalikan torsi dinamis saat diberikan massa pemberat dengan jumlah tertentu dengan putaran turbin yang dihasilkan pada kondisi yang sama.Massa pemberat yang digunakan yaitu 10 dan 20 gram dengan terlebih dahulu ditimbang dengan timbangan dan sebesar 1,2,3,5,50,100,500 gram dari anak timbangan.

Gambar 3. 12 Massa pemberat

Gambar 3. 13 Neraca Pegas Nagata C-5

Tabel 3. 5 Spesifikasi Neraca Pegas Nagata C-5

Spesifications	
Range	0 to 10 kg

Accuracy	50 gram

Gambar 3. 14 Senar Nylon LAZER

Tabel 3.6 Spesifikasi Senar Nylon LAZER

Spesifications	
Diameter	0,6 mm
Kapasitas Beban Maksimal	20 kg

d. Pelumas

Digunakan pelumas pada penelitian ini untuk mengurangi kerugian akibat gesekan pada bagian-bagian turbin angin Savonius. Pelumas yang digunakan adalah **WD 40** . Pelumas digunakan terutama pada bagian bearing yang terletak di poros turbin dimana pemberian pelumas dilakukan setiap pengambilan data dan perubahan variasi *tip* speed

ratio.*Multipurpose Lubricant* dengan spesifikasi **tabel 3.7**.

Tabel 3.7 Spesifikasi WD 40 *Multipurpose Lubricant*

SPECIFICATIONS	
Name	*Multipurpose Lubricant*
Model	6.5 fl oz / 191 ml / 155 gr
Weight	0,5 kg

e. Voltage Regulator

Voltage regulator adalah sirkuit elektronik yang menyediakan tegangan DC stabil tanpa variasi tegangan arus, suhu dan tegangan AC. Tipe yang digunakan adalah **TDGC 2J-3**.

Gambar 3.15 *Voltage Regulator* TDGC 2J-3

Tabel 3.8 Spesifikasi *Voltage Regulator* TDGC 2J-3

SPECIFICATIONS	
Model	**TDGC 2J-3**
Input	110/220 V
Output	0-250 V
Frequency	50-60 Hz

I max	4.8/12 A
Capacity	3 KVA

f. Multimeter

Multimeter adalah alat ukur yang dipakai untuk mengukur tegangan listrik, arus listrik, dan tahanan (resistansi).Multimeter yang digunakan pada percobaan adalah Multimeter **DT-9205A**.

Gambar 3.16 Multimeter DT-9205A

Tabel 3.8 Spesifikasi Multimeter DT-9205A

SPECIFICATIONS	
Measurement Type	ACV
Range	200mV-750 V
Best Accuracy	±(0,8% + 2)
Resolution	0,01 mV
Input Impedance	10 MΩ
Frequency Range	40-400 Hz

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.Perencanaan peralatan yang akan digunakan.

2.Pemasangan benda uji di depan *axial fan*.
3.Menyalakan *axial fan* dan mengatur besar tegangan dengan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin sesuai dengan yang diharapkan.
4.Melakukan pengukuran temperatur menggunakan termometer.
5.Mengukur *uniformity*
6.Mengukur kecepatan angin dengan anemometer sesuai dengan *Reynolds number* yang diinginkan yaitu 9,7 x 10^4
7.Melakukan pengukuran putaran poros turbin angin dengan menggunakan *tachometer*.
8.Mengukur torsi dinamis dengan *brake dynamometer* dengan langkah sebagai berikut:

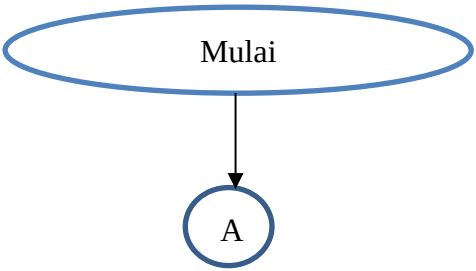
i. Memberikan massa pemberat yang terhubung dengan neraca pegas sesuai dengan variasi massa yang telah ditentukan (untuk 3 *Reynolds number* yang berbeda)
ii. Mengukur massa yang terbaca pada neraca pegas
iii. Mengukur putaran turbin angin Savonius dengan *tachometer*
iv. Mengulangi langkah i-iii sampai turbin berhenti berputar
v. Memilih nilai CoP tertinggi yang dihasilkan dari perkalian antara torsi dinamis dengan putaran turbin dengan kondisi beban yang sama

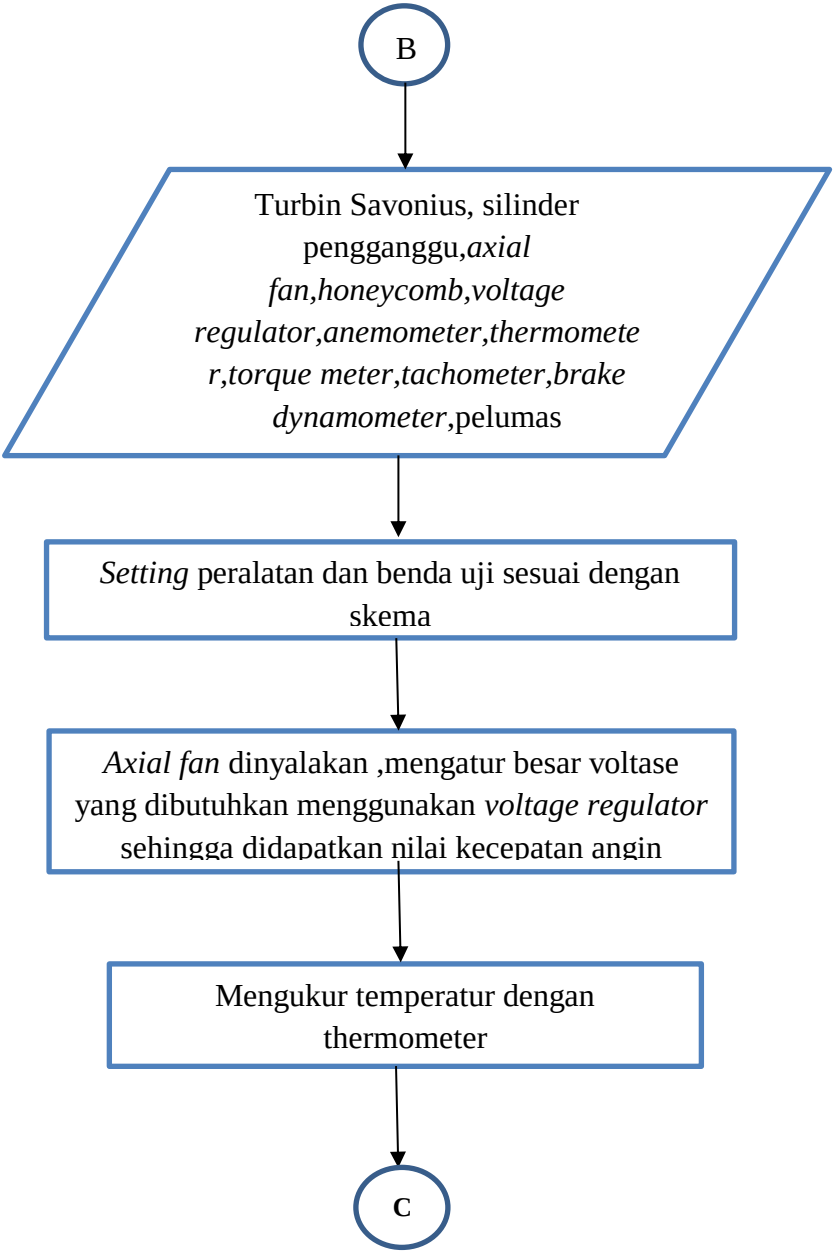
9. Mengulangi langkah 3 sampai 8 dengan merubah kecepatan angin dengan *Reynolds number* 1,45 x 10^5 dan 1,78 x 10^5.
10.Memasang silinder pengganggu di depan *returning blade* dengan jarak antara pusat *returning blade* turbin angin dan silinder sirkular pengganggu (S/D) sebesar 1,4

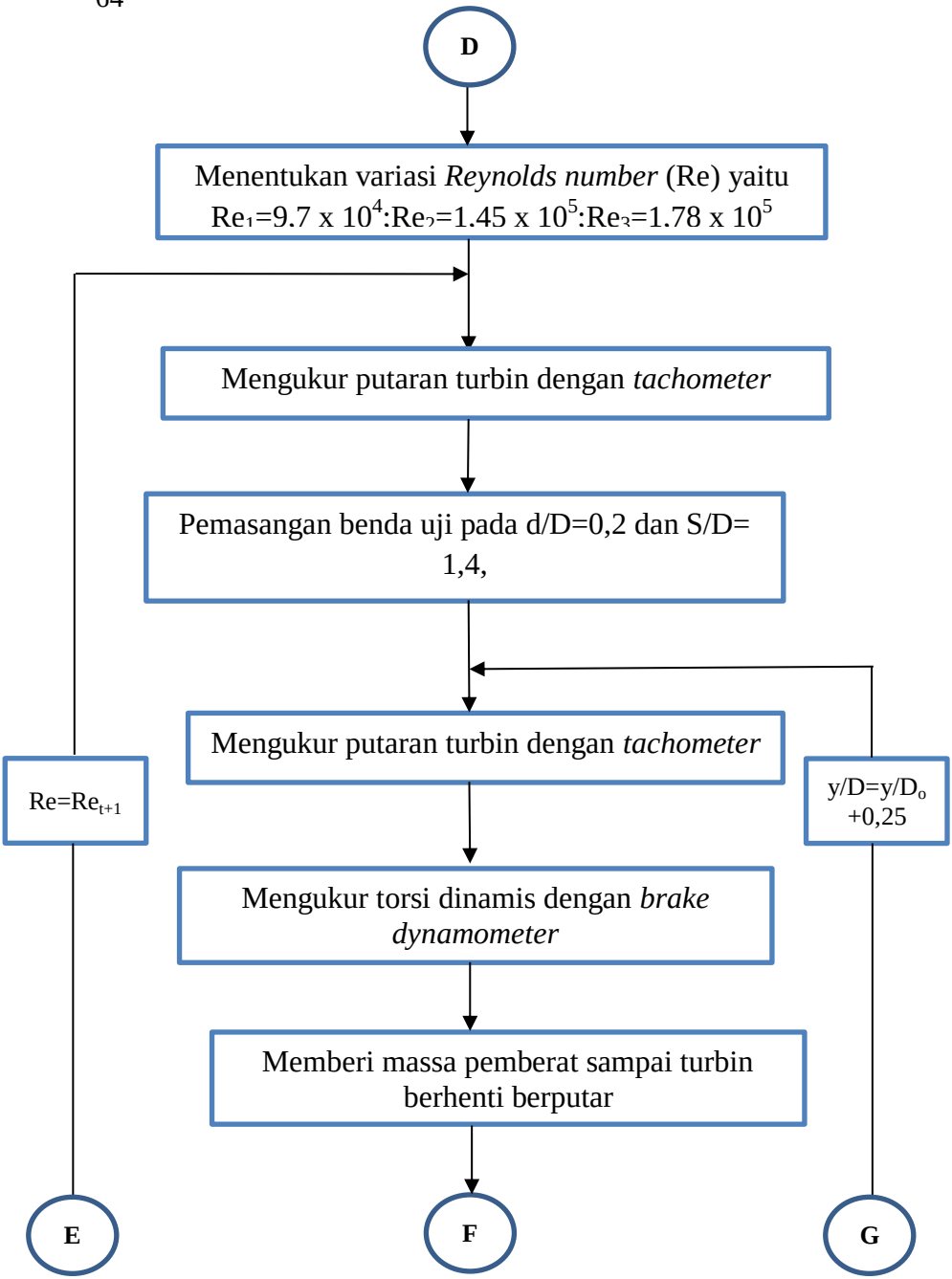
dengan rasio posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin terhadap diameter sudu turbin angin Savonius(y/D) sebesar nol

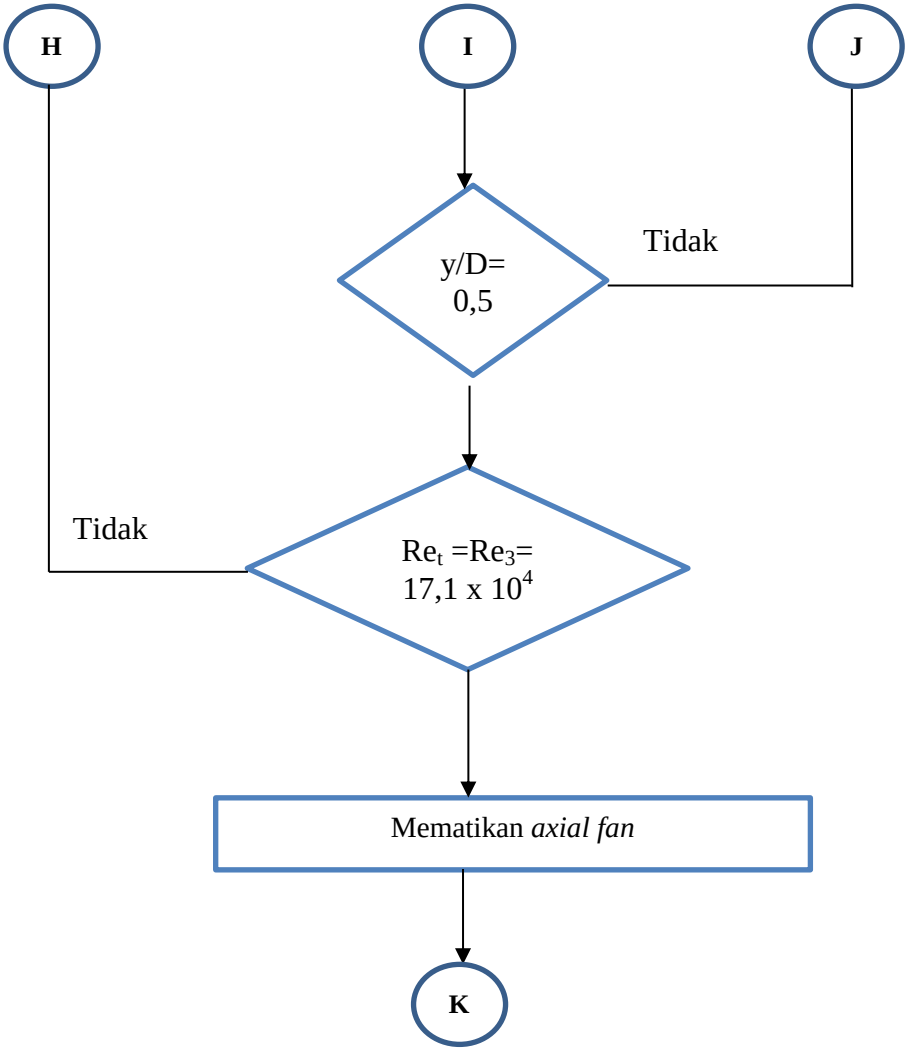
10. Mematikan *axial fan*
11. Mengulangi langkah 3 sampai 10 dengan memvariasikan y/D sebesar 0,25; 0,5
12. Mematikan *axial fan*
13. Menentukan variasi sudut (θ) turbin angin Savonius sebesar 0^0
14. Menyalakan *axial fan*
15. Melakukan pengukuran torsi statis dengan *torquemeter*
16. Mengulangi langkah 11 sampai 14 dengan merubah variasi sudut hingga 180^0 dengan kenaikan posisi sudut sebesar 10^o
17. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran,torsi statis,torsi dinamis) menjadi *Coefficient of Power* dan *Coefficient of moment* dan melakukan *plotting* grafik torsi statis berpenghalang(Ts) sebagai fungsi sudut(θ),grafik kecepatan putar berpenghalang (n) sebagai fungsi *Reynolds number*,grafik *Coefficient of Power* (CoP)terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) ,grafik *Coefficient of moment* (Cm) sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) .

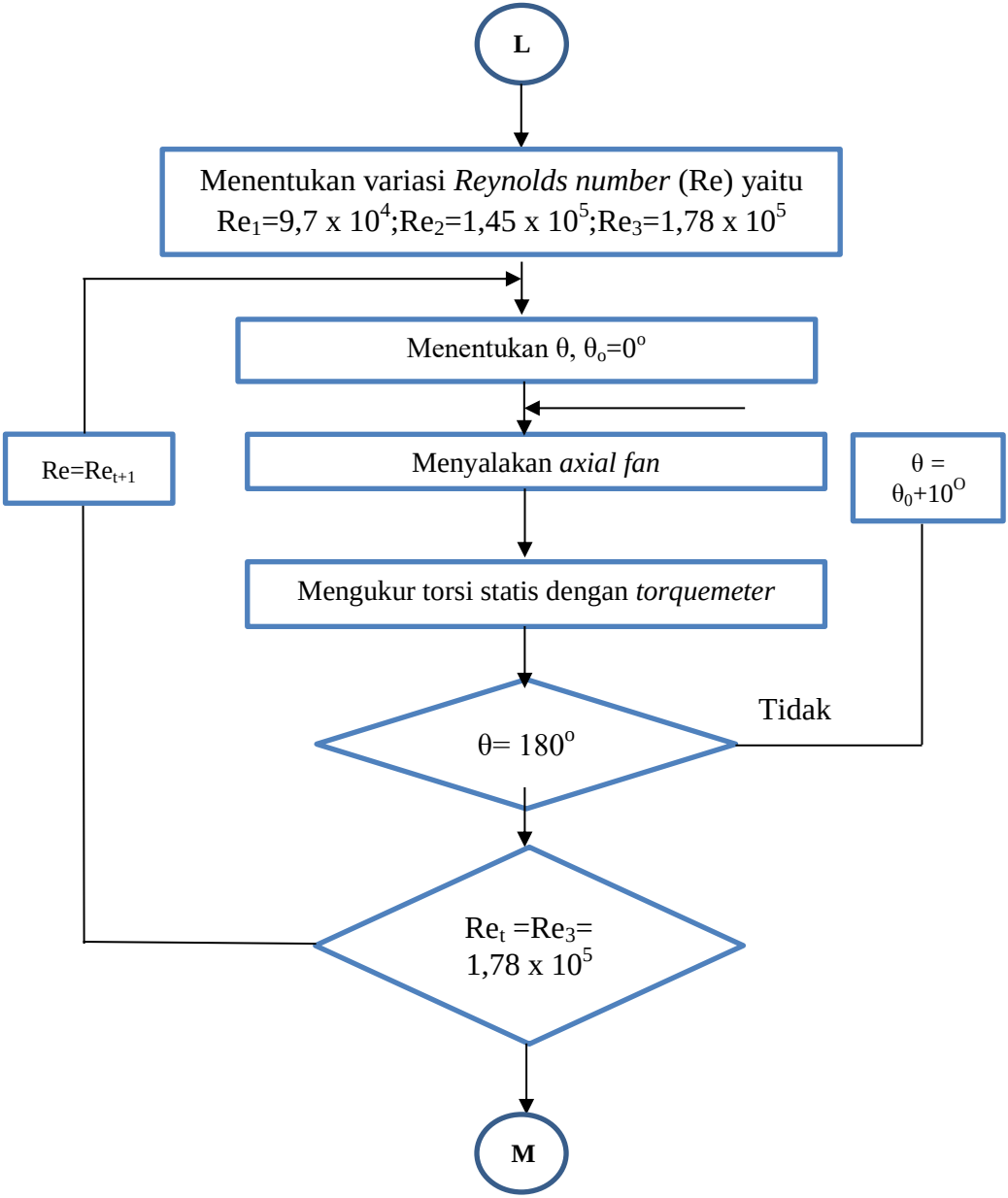
3.5 Flowchart Penelitian

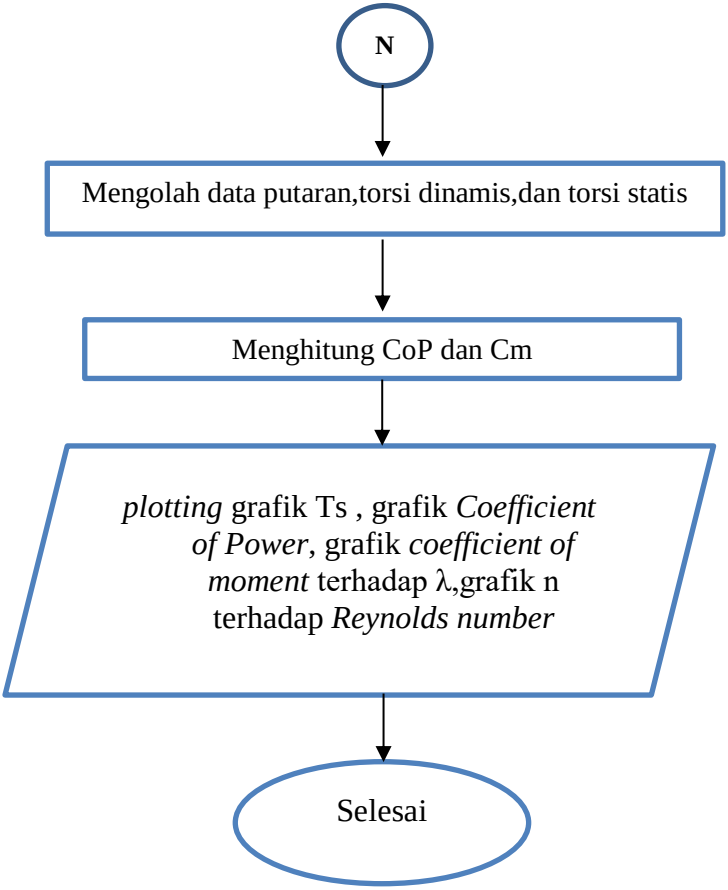



B
Turbin Savonius, silinder pengganggu,*axial fan,honeycomb,voltage regulator,anemometer,thermometer,torque meter,tachometer,brake dynamometer*,pelumas
Setting peralatan dan benda uji sesuai dengan skema
Axial fan dinyalakan ,mengatur besar voltase yang dibutuhkan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin
Mengukur temperatur dengan thermometer
C


D
Menentukan variasi *Reynolds number* (Re) yaitu Re_1=9.7 x 10^4:Re_2=1.45 x 10^5:Re_3=1.78 x 10^5
Mengukur putaran turbin dengan *tachometer*
Pemasangan benda uji pada d/D=0,2 dan S/D= 1,4,
Mengukur putaran turbin dengan *tachometer*
Re=Re_{t+1}
y/D=y/D_o +0,25
Mengukur torsi dinamis dengan *brake dynamometer*
Memberi massa pemberat sampai turbin berhenti berputar
E
F
G


H
I
J
y/D=
0,5
Tidak
Tidak
Re$_t$ =Re$_3$=
17,1 x 10^4
Mematikan *axial fan*
K


L
Menentukan variasi *Reynolds number* (Re) yaitu Re_1=9,7 x 10^4;Re_2=1,45 x 10^5;Re_3=1,78 x 10^5
Menentukan θ, θ_o=0^o
Menyalakan *axial fan*
Mengukur torsi statis dengan *torquemeter*
θ= 180^o
Tidak
θ = θ_0+10^O
Re_t =Re_3= 1,78 x 10^5
Re=Re_{t+1}
M


N
Mengolah data putaran,torsi dinamis,dan torsi statis
Menghitung CoP dan Cm
plotting grafik Ts , grafik *Coefficient of Power*, grafik *coefficient of moment* terhadap λ,grafik n terhadap *Reynolds number*
Selesai

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

4.1.1 Perhitungan *Reynolds Number*

- **Menghitung massa jenis udara (ρ)**

$$\frac{P1V1}{T1} = \frac{P2V2}{T2} \quad (4.1)$$

karena V= $\frac{m}{\rho}$, didapatkan persamaan

$$\frac{P1m1}{\rho 1T1} = \frac{P2m2}{\rho 2T2} \quad (4.2)$$

dimana: *P1* = tekanan absolut udara pada keadaan standar(1,01325 N/m^2)
P2 = tekanan udara pada saat pengujian
m1 = massa udara pada keadaan standar
m2 = massa udara pada saat pengujian
$\rho 1$ = massa jenis udara pada keadaan standar (1,225 kg/m^3)
$\rho 2$ = massa jenis udara pada saat pengujian
T1 = temperatur udara pada keadaan standar (288,2 K)
T2 = temperature udara pada saat pengujian (301,2K)

Pada keadaan standar dan keadaan pengujian berada pada ketinggian yang sama dan massa udara sama maka persamaan menjadi,

$$\rho 2 = \frac{\rho 1T1}{T2} \quad (4.3)$$

$$\rho 2 = \frac{1{,}225\ x\ 288{,}2}{301{,}2}$$

$$\rho 2 = 1{,}1782\,\frac{kg}{m^3}$$

- **Menghitung viskositas udara (μ)**

Digunakan persamaan *Sutherland* untuk menghitung viskositas udara sebagai berikut,

$$\mu 2 = \frac{b\ x\ T2^{0,5}}{1+\frac{S}{T_2}} \qquad (4.4)$$

$$\mu 2 = \frac{1{,}458 \text{ x } 10^{-6}\ x\ (301{,}2)^{0,5}}{1+\frac{110{,}4}{301{,}2}}$$

$$\mu 2 = 1{,}8516\ x\ 10^{-5}\ \frac{kg}{m.s}$$

- **Kecepatan aliran udara (V)**

Digunakan persamaan *Reynolds number* untuk mendapatkan kecepatan aliran udara seperti pada persamaan (2.20) adalah sebagai berikut,

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu}$$

dimana : L = 0,3034 m, sehingga apabila nilai *Reynolds number* yang diinginkan Re=1,45 x 10^5 didapatkan nilai kecepatan,

$$V = \frac{1{,}45\ x\ 10^5 x\ 1{,}8516\ x\ 10^{-5}\ \frac{kg}{m.s}}{1{,}1782\ \frac{kg}{m^3}\ x\ 0{,}3034 \text{ m}} = 7{,}5\ m/s$$

Sehingga didapatkan nilai kecepatan aliran udara pada berbagai *Reynolds number* yang diinginkan sebagai berikut,

Tabel 4.1 Kecepatan aliran udara pada tiga *Reynolds number*

Reynolds number (Re)	Kecepatan aliran udara (V)
$9{,}7 \times 10^4$	5,01 m/s
$1{,}45 \times 10^5$	7,5 m/s
$1{,}78 \times 10^5$	9,2 m/s

4.2 Contoh Perhitungan

Contoh perhitungan dimaksudkan untuk menunjukkan bagaimana pengolahan data dalam penelitian ini sehingga diperoleh data seperti yang ditunjukkan pada lampiran. Data yan digunakan untuk contoh perhitungan ini adalah pada kecepatan aliran udara sebesar V = 7,5 m/s dengan penempatan silinder penghalang pada y/D sebesar 0,5 pada jarak S/D=1,4.

Tabel 4.2 Data pengukuran pada Re= $1{,}45 \times 10^5$

Kondisi Pengujian	Kecepatan putar turbin (n)	Massa neraca pegas (s)	Massa pemberat (m)
V = 7,5 m/s Re = $1{,}45 \times 10^5$ y/D = 0,5 T = 28,6^{o}C ρ = 1,17872	360,18 rpm	1250 gram	260 gram

4.2.1 Perhitungan Torsi Dinamis

Perhitungan torsi dinamis diperoleh dari selisih antara gaya yang dihasilkan dari massa pemberat dengan gaya yang

terbaca pada neraca pegas dikalikan dengan jari-jari *disc* yang dipasang pada poros turbin angin Savonius. Perhitungan torsi dinamis menggunakan persamaan (2.14) berikut :

$$\mathrm{Td} = (\mathrm{s} - \mathrm{m})\mathrm{gr}$$

Dimana: Td = torsi dinamis (Nm)
s = massa neraca pegas (gram)
m = massa pemberat (gram)
g = percepatan gravitasi (m/s^2)
R = jari-jari *disc* (m)

$$\mathrm{Td} = (\,1250 - 260\,)\mathrm{gr} \times 9{,}81\,\frac{m}{s^2} \times 0{,}0095\ \mathrm{m} \times \left|\frac{1\ N}{\frac{1\ kg\ m}{s^2}}\right| \times \left|\frac{1\ kg}{10^3\ gr}\right| \times \left|\frac{1\ m}{10^3\ mm}\right|$$

Td = 0,096226 N.m

4.2.2 Perhitungan *Coefficient of Power* (CoP)

Coefficient of Power (CoP) merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan turbin angin dengan daya angin yang mengalir. Perhitungan *Coefficient of* (CoP) menggunakan persamaan (2.17) sebagai berikut :

$$CoP = \frac{(s-m)gR\omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3}$$

$$CoP = \frac{0{,}096226\ \times 360{,}18\ rpm\ x\ \frac{\frac{2\pi}{60}}{1\ rpm}\ x\ \frac{1\ kgm/s^2}{1\ N}}{\frac{1}{2}\mathrm{x}\ 1{,}1{,}7872\ \frac{kg}{m^3}\ x\ 0{,}0893\ m^2 x\ (7{,}5\ m/s)^3}$$

$$CoP = 0{,}1607$$

$$CoP = 16{,}07\ \%$$

4.2.3 Perhitungan *Tip Speed Ratio (λ)*

Perhitungan *tip speed ratio* menggunakan persamaan (2.23) sebagai berikut:

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

$$\lambda = \frac{nR}{V} \text{x} \frac{\frac{2\pi}{60}}{1\ rpm}$$

$$\lambda = \frac{360{,}18\ rpm\ x\ 0{,}0095\ m \text{ x } \frac{\frac{2\pi}{60}}{1\ rpm}}{7{,}5\ m/s}$$

$$\lambda = 0{,}781$$

4.2.4 Perhitungan *Coefficient of moment* (Cm)

Perhitungan *Coefficient of moment* (Cm) menggunakan persamaan (2.25) sebagai berikut,

$$Cm = \frac{Td}{\frac{1}{2}\rho A V^2 \frac{L}{2}}$$

$$Cm = \frac{0{,}096457\ \text{N m}}{\frac{1}{2} \text{x } 1{,}1{,}7872\ \frac{kg}{m^3} \text{x } 0{,}0861\ m^2 x (7{,}62)^2 \frac{0{,}2918}{2}}$$

$$Cm = 0{,}3043$$

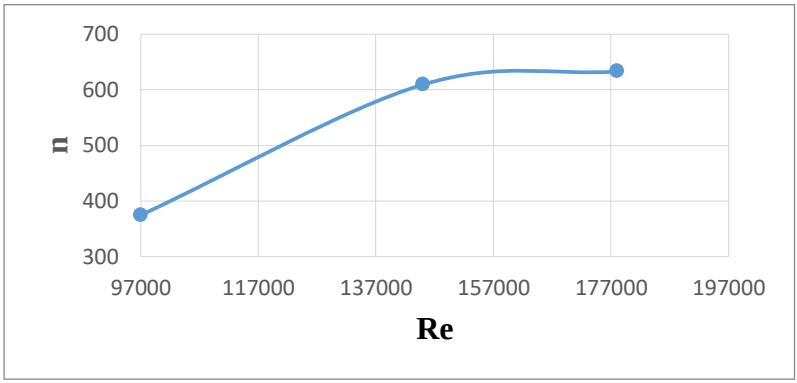
4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Analisis performa turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dilakukan dengan meninjau nilai putaran, *Coefficient*

of Power (CoP),torsi statis,dan *Coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ).

4.3.1 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.1 menunjukan grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (n_0)sebagai fungsi *Reynolds number* (Re) pada *Reynolds number* = 9,7 x 10^4 ;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5.



Gambar 4.1 Grafik putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap *Reynolds number*

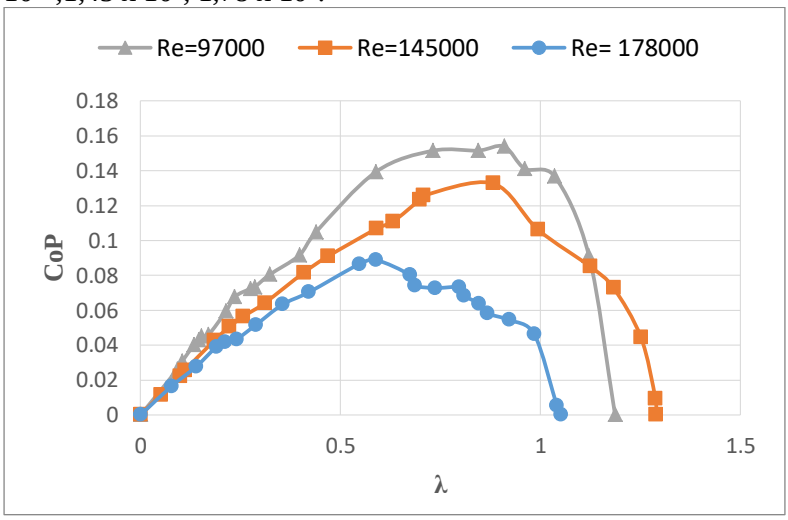
Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat trendline data putaran turbin angin Savonius ditunjukkan pada *Reynolds number* =9,7x 10^4 sebesar 374,56 rpm, pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 sebesar 609,2 rpm, dan pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 sebesar 632,86 rpm.

Dari trendline grafik diatas terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius tertinggi didapatkan pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5. Hal ini dikarenakan semakin *Reynolds number*, kecepatan aliran udara semakin besar sehingga besar putaran turbin angin Savonius akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.20) dimana semakin besar nilai kecepatan aliran

udara maka *Reynolds number* akan semakin meningkat. Meningkatnya kecepatan aliran udara akan meningkatkan selisih gaya *drag* kedua sudu turbin. Semakin meningkatnya selisih gaya *drag* maka akan meningkatkan daya turbin.Kenaikan daya turbin ditandai dengan kenaikan putaran turbin angin Savonius.

4.3.2 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.2 menunjukkan grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (CoP_0) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada tiga *Reynolds number* yaitu 9,7 x 10^4;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5.



Gambar 4.2 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds number*=9,7 x 10^4;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5

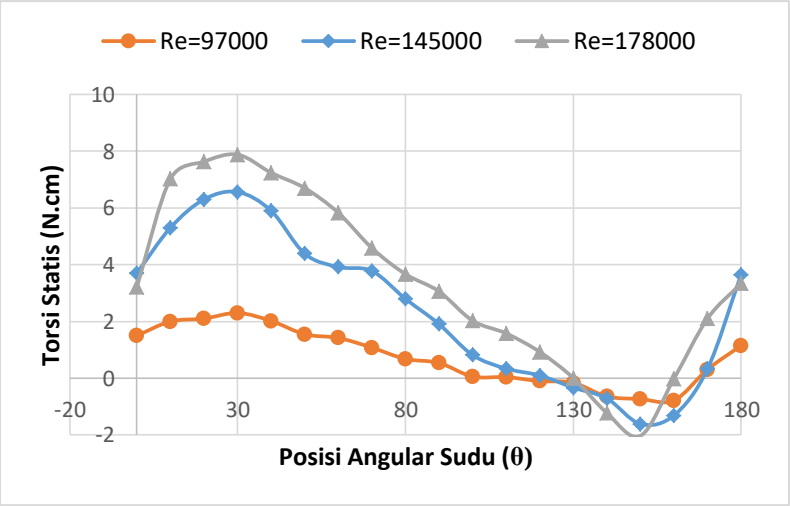
Berdasarkan gambar 4.2 dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of Power* turbin angin Savonius tanpa silinder

pengganggu(CoP_0). Pada *Reynolds number* =9,7x 10^4 didapatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,1538 pada λ= 0,9. Kemudian nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,1327 pada λ=0,88 saat *Reynolds number* = 1,45 x 10^5 dan mengalami penurunan pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 menjadi 0,0853 pada λ=0,61 .

Dapat dilihat bahwa penurunan *Coefficient of Power* (CoP) terjadi karena kemampuan turbin angin Savonius untuk mengubah daya input menjadi daya output turbin,seiring dengan kenaikan *Reynolds number* diiringi dengan kenaikan daya input seperti pada persamaan (2.5) dan (2.10). Akan tetapi, kenaikan daya output turbin akibat peningkatan kecepatan aliran udara tidak lebih besar dari daya input sehingga kenaikan daya input tidak selalu diikuti dengan kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP) sesuai dengan persamaan (2.1,45). Karena semakin besar kecepatan aliran udara maka sudu turbin akan membentuk dinding yang solid sehingga tidak semua fluida yang mengalir dapat secara maksimal mendorong sudu turbin menghasilkan torsi dinamis.Nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum diperoleh pada *Reynolds number* = 9,7 x 10^4 pada λ= 0,9. Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa ketiganya mengalami kenaikan *Coefficient of Power* (CoP) hingga *tip speed ratio* optimumnya dan akan mengalami penurunan nilai *Coefficient of Power* (CoP) setelah melewati titik optimumnya.

4.3.3 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.3 menunjukkan grafik torsi statis tanpa silinder pengganggu (Ts_0) sebagai fungsi sudut (θ) pada tiga *Reynolds number* yaitu 9,7 x 10^4 ;1,45 x 10^5; 1,78x 10^5. Pengambilan data dilakukan dengan sudut angular sudu pada 0^0 hingga 180^0 dengan kenaikan 10^0.



Gambar 4.3 Grafik Torsi Statis Tanpa Pengganggu Terhadap Fungsi Sudut Turbin Angin Savonius pada *Reynolds number*=9,7 x 10^4;1,45 x 10^5; 1,78x 10^5

Berdasarkan gambar 4.3 dapat dilihat trendline data torsi statis turbin angin Savonius. Pada *Reynolds number* = 9,7 x 10^4, nilai torsi statis maksimum sebesar 2,3 N.cm. Lalu pada *Reynolds number* = 1,45 x 10^4 didapatkan nilai torsi maksimum sebesar 6,56 N.cm dan pada *Reynolds number* = 1,78 x 10^5, nilai torsi maksimum sebesar 7,88 N.cm. Sedangkan torsi statis terendah sebesar -0,78 pada *Reynolds number* =9,7 x 10^5 . Torsi statis terendah sebesar
-1,61 pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 dan sebesar -2,03 pada *Reynolds number* =1,78 x 10^4.

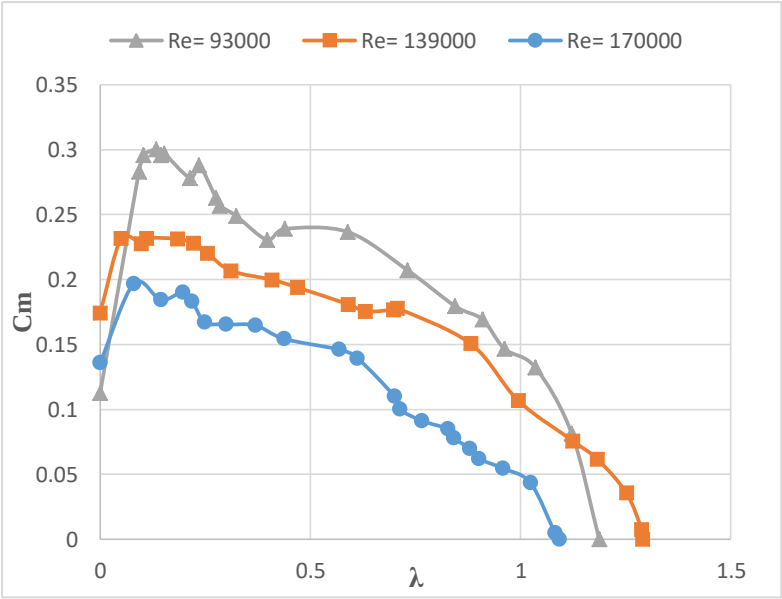
Torsi statis tertinggi diperoleh pada *Reynolds number* tertinggi yaitu 1,78 x 10^4, hal ini terjadi karena semakin tinggi nilai kecepatan angin sehingga semakin besar torsi yang dihasilkan.Torsi statis tertinggi diperoleh pada posisi sudut angular sudu (θ) sebesar 30^0 karena pada posisi tersebut *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih tinggi daripada

returning blade sehingga perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar maka nilai torsi statis maksimum. Sedangkan pada posisi sudut angular sudu (θ) sebesar 150^0 diperoleh torsi statis terendah, hal ini terjadi karena pada posisi tersebut *advancing blade* menerima gaya *drag* yang lebih rendah sehingga mengakibatkan perbedaan torsi pada kedua sudu kecil sehingga torsi statis yang diperlukan untuk menggerakan turbin nilainya rendah bahkan mencapai nilai negatif. Torsi statis dengan nilai negatif ini tidak memiliki kemampuan *self starting* yang baik.

4.3.4 Analisis *Coefficient of moment* (Cm) terhadap Posisi Sudut Turbin Angin Savonius Tanpa Silinder Pengganggu

Gambar 4.4 menunjukkan grafik *Coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu (Cm_0) terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada tiga *Reynolds number* yaitu $9{,}7 \times 10^4$;$1{,}45 \times 10^4$; $1{,}78 \times 10^4$.

Berdasarkan gambar 4.4, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of moment*(Cm) pada tiga *Reynolds number*. Pada *Reynolds number* = $9{,}7 \times 10^4$ nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,3003 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,134. Pada *Reynolds number* =$1{,}45 \times 10^5$, nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,2318 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,11. Selanjutnya pada *Reynolds number* =$1{,}78 \times 10^5$, nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,1967 pada *tip speed ratio* (λ) sebesar 0,08. Seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* (λ) diiringi dengan menurunnya nilai *Coefficient of moment* (Cm).



Gambar 4.4 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number*=9,7 x 10 ^{4};1,45 x 10^{5}; 1,78x 10^{5}

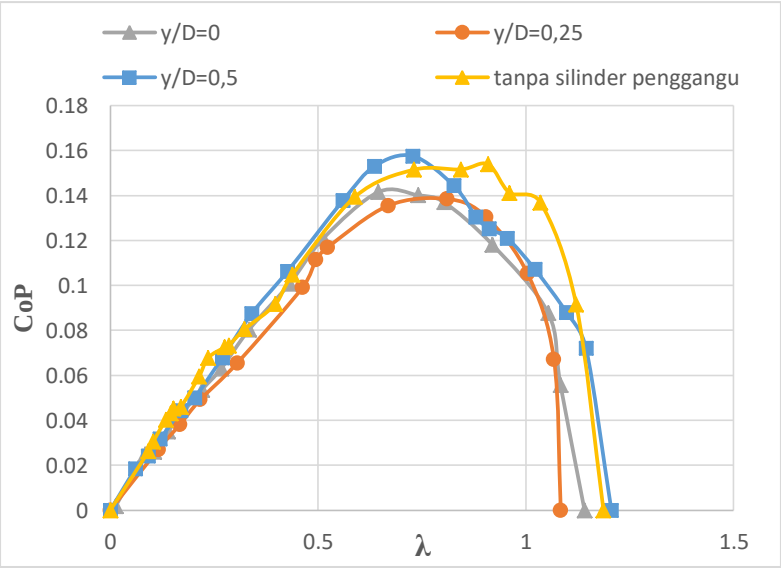
Nilai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum didapatkan pada *Reynolds number* =9,7 x 10^{4} karena semakin rendah *Reynolds number* maka semakin rendah kecepatan aliran udara maka semakin kecil nilai torsi input dan semakin besar torsi output yang dihasilkan maka semakin besar nilai *Coefficient of moment* (Cm). Hal ini sesuai dengan persamaan *Coefficient of moment*(Cm)pada persamaan (2.24).Dan semakin besar kecepatan aliran udara maka sudu turbin akan membentuk dinding yang solid sehingga tidak semua fluida yang mengalir dapat secara maksimal mendorong sudu turbin menghasilkan torsi dinamis.

4.4 Analisis *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

4.4.1 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4

Gambar 4.5 menunjukan grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* sebesar 9,7 x 10^4.

Berdasarkan gambar 4.5, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of Power* (CoP) pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5. Pada posisi y/D=0, nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,142 pada *tip speed ratio* (λ) =0,64. Pada posisi y/D=0,25, nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,1384 pada *tip speed ratio*(λ) = 0,67. Pada posisi y/D=0,5,nilai *Coefficient of Power* (CoP) tertinggi sebesar 0,1576 pada *tip speed ratio*(λ)=0,72. Pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25 , nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum mengalami penurunan dibandingkan dengan nilai *Coefficient of Power* (CoP) tanpa silinder pengganggu sebesar 0,1538. Nilai *Coefficient of Power*(CoP) maksimum mengalami kenaikan sebesar 2,47% pada posisi y/D=0,5 apabila dibandingkan dengan nilai *Coefficient of Power (CoP)* maksimum turbin tanpa silinder pengganggu.



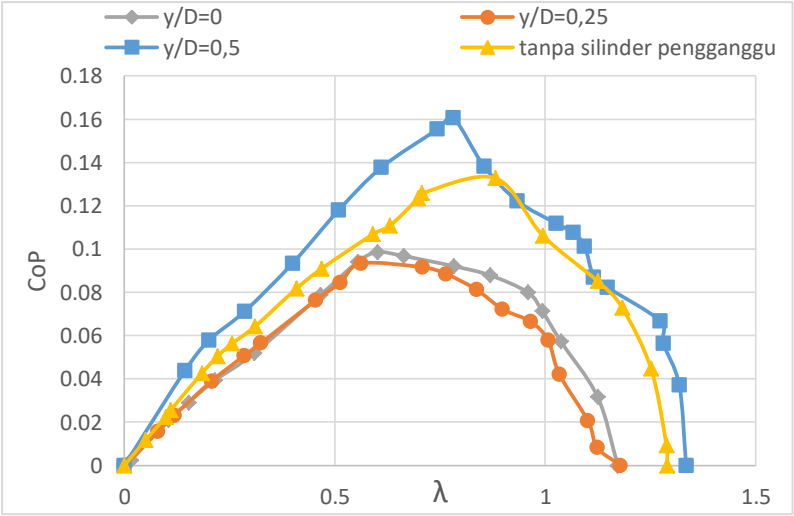
Gambar 4.5 Grafik *Coefficient of Power (CoP)* terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 9,7 x 10^4 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5

Peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP) terjadi pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4, pada posisi y/D=0,5.Akan tetapi kenaikan nilai *Coefficient of Power* (CoP) tidak signifikan. Hal ini dikarenakan peletakan silinder pengganggu di depan *returning blade* diduga dapat menggangu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi sehingga daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar , akan tetapi tidak terlalu signifikan sehingga tidak terlalu efektif meningkatkan nilai CoP .Selain itu mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* meskipun tidak terlalu signifikan sehingga mengurangi gaya *drag* sehingga selisih gaya *drag* pada kedua sudu akan meningkat walaupun tidak terlalu signifikan. Akan

tetapi pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25 mengalami penurunan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Hal ini diduga karena peletakan silinder penghalang pada posisi y/D=0,25 tidak sepenuhnya menghalangi sudu *returning blade* sehingga pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* tidak terlalu tinggi sehingga nilai *Coefficient of Power* (CoP) yang dihasilkan tidak jauh berbeda dari tanpa diberi silinder penghalang. Sedangkan pada posisi y/D=0, posisi silinder pengganggu tepat pada diameter sudu turbin sehingga tidak menghalangi *returning* blade, sehingga selisih gaya *drag* kedua sudu tidak meningkat maka nilai *Coefficient od power* (CoP) menurun. Sehingga pemberian silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5 pada *Reynolds number* = 9,7 x 10^4 tidak efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius karena terjadi peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP) yang tidak signifikan.

4.4.2 Analisis *Coefficient of Power (CoP)* Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5

Gambar 4.6 menunjukan grafik *Coefficient of Power*(CoP)turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* sebesar 1,45 x 10^5.



Gambar 4.6 Grafik Coefficient of Power (CoP) terhadap terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 1,45 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5

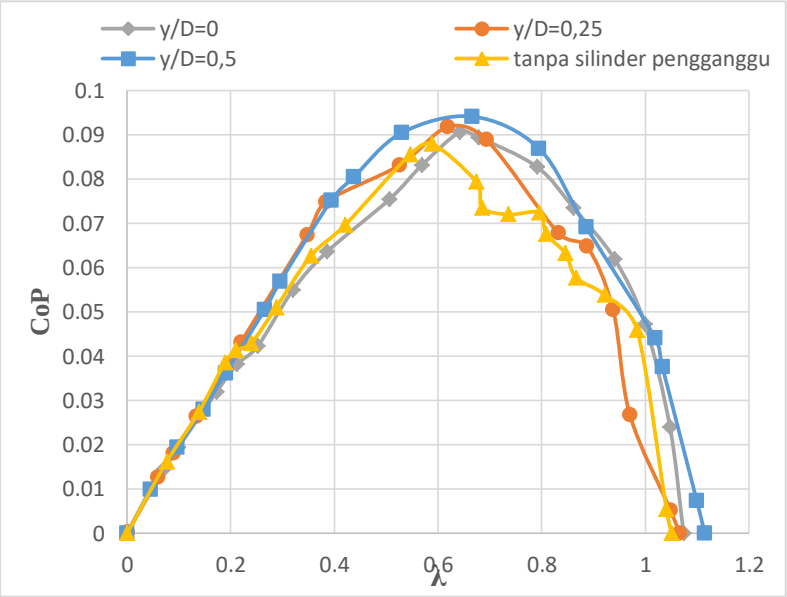
Berdasarkan gambar 4.6, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of Power*(CoP)pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5. Pada posisi y/D=0, nilai *Coefficient of Power* (CoP) tertinggi sebesar 0,0985 pada *tip speed ratio* (λ) = 0,6. Pada posisi y/D=0,25, nilai *Coefficient of Power*(CoP) tertinggi sebesar 0,0933 pada *tip speed ratio*(λ) = 0,56, dan pada posisi y/D=0,5, nilai *Coefficient of Power* (CoP) tertinggi sebesar 0,1607 pada *tip speed ratio*(λ) = 0,78. Pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25,nilai *Coefficient of Power*(CoP) maksimum mengalami penurunan dibandingkan nilai *Coefficient of Power*(CoP) maksimum tanpa silinder pengganggu sebesar yaitu sebesar 0,1327. Namun pada y/D=0,5, nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum mengalami peningkatan sebesar 21,1 % daripada nilai *Coefficient of Power (*CoP) maksimum tanpa silinder pengganggu.

Peletakkan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5 efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius karena dapat menggangu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi sehingga daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar maka akan menghasilkan *Coefficient of Power*(CoP) yang besar. Selain itu y/D=0,5 efektif mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang.Akan tetapi pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25 terjadi penurunan nilai *Coefficient of Power*(CoP) dibandingkan dengan tanpa diberi silinder pengganggu, hal ini diduga karena pada *Reynolds number* 1,45 x 10^5 memiliki kecepatan aliran udara yang tinggi sehingga saat diberi silinder penghalang pada posisi y/D=0 , akan tepat berada pada diameter turbin sehingga akan menghalangi aliran udara ke *advancing blade* sehingga gaya *drag* pada *advancing blade* akan menurun maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu akan menurun sehingga menghasilkan nilai *Coefficient of Power*(CoP) yang lebih rendah dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.Sedangkan pada posisi y/D=0,25,tidak sepenuhnya menghalangi sudu *returning blade* sehingga pengurangan gaya *drag* pada *returning blade* tidak terlalu tinggi sehingga nilai *Coefficient of Power*(CoP) yang dihasilkan lebih rendah daripada tanpa diberi silinder pengganggu.

4.4.3 Analisis *Coefficient of Power* (CoP) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* = 1,78x 10^5

Gambar 4.7 menunjukan grafik *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D=0,2

pada jarak S/D=1,4 pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* = 1,78 x 10^5



Gambar 4.7 Grafik *Coefficient of Power* (CoP) terhadap terhadap fungsi *tip speed ratio*(λ) pada *Reynolds Number* 1,78 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0;0,25;0,5

Berdasarkan gambar 4.7, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of Power*(CoP) pada posisi y/D=0;y/D=0,25;y/D=0,5. Pada posisi y/D=0, nilai *Coefficient of Power*(CoP) maksimum sebesar 0,0878 pada *tip speed ratio* (λ) = 0,66 .Pada posisi y/D=0,25, nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 0,089 pada *tip speed ratio*(λ) =0,64, dan pada posisi y/D=0,5, nilai *Coefficient of Power* (CoP)maksimum sebesar 0,0913 pada *tip speed ratio*(λ) = 0,69. Terjadi peningkatan nilai *Coefficient of*

Power (CoP) sebesar 7 % dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu pada y/D=0,5.

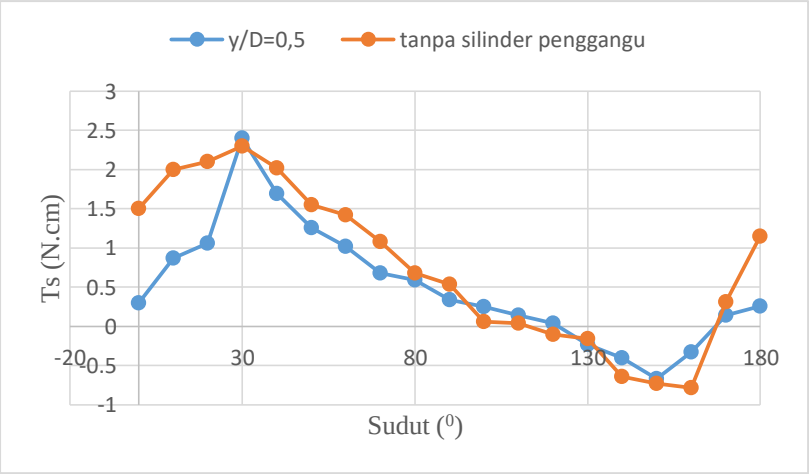
Peletakkan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5 efektif meningkatkan nilai *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius karena dapat menggangu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi sehingga daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar maka akan menghasilkan *Coefficient of Power*(CoP) yang besar. Selain itu efektif mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang.

4.5 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

4.5.1 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4

Gambar 4.8 menunjukan grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D=0, 2 pada posisi y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* sebesar 9,7x 10^4.

Berdasarkan gambar 4.8 dapat dilihat trendline data torsi statis turbin angin Savonius. Pada *Reynolds number* 9,7 x 10^4 pada posisi y/D=0,5, terjadi peningkatan nilai torsi statis pada posisi angular sudu 20^o ke 30^o yaitu dari 1,06 N.cm menjadi 2,4 N.cm . Nilai torsi statis pada y/D=0,5 mengalami kenaikan yang tidak signifikan dari 2,3 N.cm menjadi 2,4 N.cm dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu pada posisi angular sudu (θ)= 30^0.



Gambar 4.8 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* 9,7 x 10^4 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5

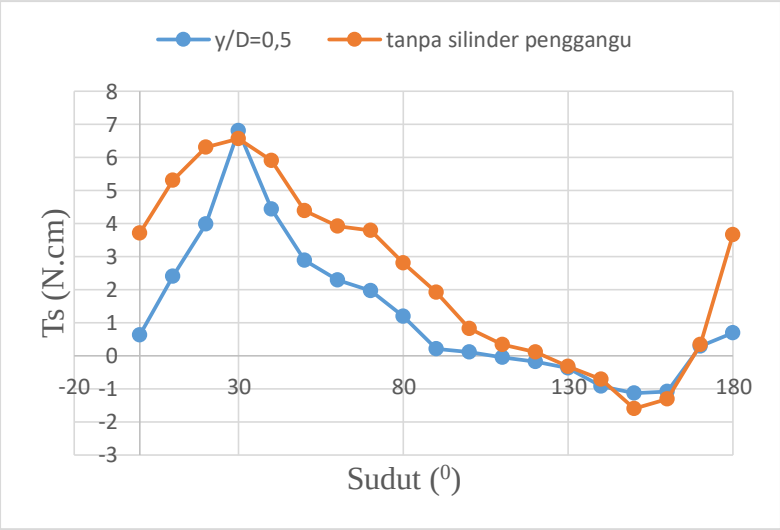
Peletakkan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5 meningkatkan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa pengganggu meskipun tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Terjadi kenaikan yang cukup signifikan torsi statis dengan menggunakan silinder pengganggu pada posisi angular sudu (θ) dari 20^0 menjadi 30^0. Hal ini terjadi karena pada saat posisi angular sudu 30^0, luasan sudu *returning blade* yang terkena aliran udara lebih sedikit dan menjauhi arah aliran sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* kedua sudu meningkat maka menghasilkan kenaikan torsi yang signifikan dari posisi angular sudu 20^0 ke 30^0.Sedangkan nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu mengalami kenaikan yang tidak signifikan jika dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Adanya silinder penggangu kurang efektif mengurangi gaya *drag* pada *returning blade* sehingga kenaikan nilai torsi statis tidak

signifikan, sehinga tidak efektif meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

4.5.2 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5

Gambar 4.9 menunjukan grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D=0, 2 pada posisi y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* =1,45x 10^5 .

Berdasarkan gambar 4.9 dapat dilihat trendline data torsi statis turbin angin Savonius. Pada *Reynolds number* 1,45 x 10^5 pada posisi y/D=0,5 terjadi peningkatan nilai torsi statis yang cukup signifikan pada posisi angular sudu 20^0 menjadi 30^0 , dimana mengalami peningkatan dari 3.98 N.cm menjadi 6.81 N.cm. Nilai torsi statis pada y/D=0,5 mengalami kenaikan yang tidak signifikan dari 6,56 N.cm menjadi 6,81 N.cm dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu pada posisi angular sudu (θ)= 30^0

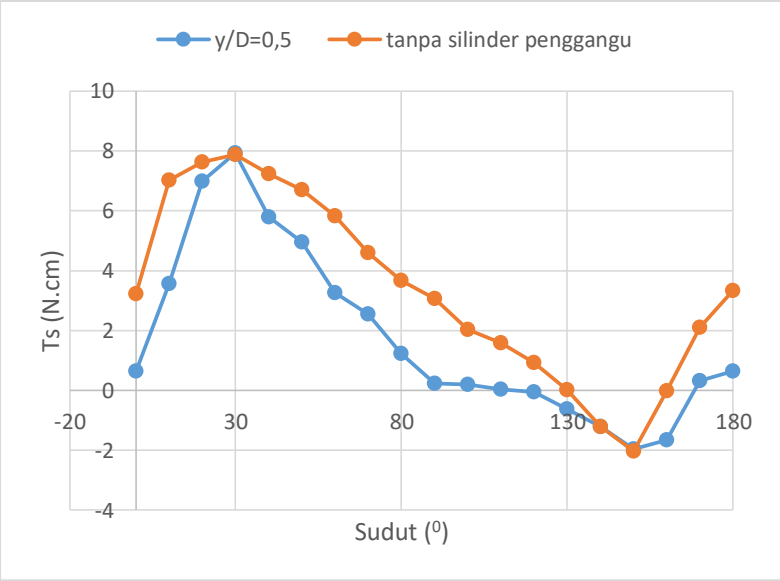


Gambar 4.9 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* 1,45 x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5

Peletakkan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5 meningkatkan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa pengganggu meskipun tidak mengalami kenaikan yang signifikan. Terjadi kenaikan yang cukup signifikan torsi statis dengan menggunakan silinder pengganggu pada posisi angular sudu (θ) dari 20^0 menjadi 30^0. Hal ini terjadi karena pada saat posisi angular sudu 30^0, luasan sudu *returning blade* yang terkena aliran udara lebih sedikit dan menjauhi arah aliran sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* kedua sudu meningkat maka menghasilkan kenaikan torsi yang signifikan dari posisi angular sudu 20^0 ke 30^0.Sedangkan nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu mengalami kenaikan yang tidak signifikan jika dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Adanya silinder penggangu kurang efektif mengurangi gaya *drag* pada

returning blade sehingga kenaikan nilai torsi statis tidak signifikan sehinga tidak efektif meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

4.5.3 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number*= 1,78x 10^5



Gambar 4.10 Grafik Torsi Statis terhadap fungsi sudut (θ) pada *Reynolds Number* =1,78x 10^5 dengan silinder pengganggu d/D=0,2 pada posisi y/D=0,5

Gambar 4.10 menunjukan grafik torsi statis turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu d/D=0, 2 pada posisi y/D=0,5 sebagai fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 .

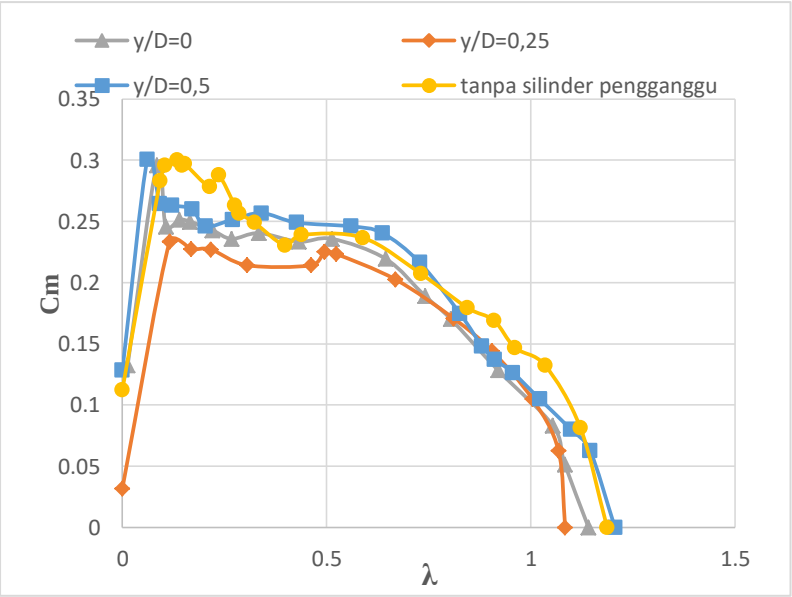
Berdasarkan gambar 4.10 dapat dilihat trendline data torsi statis turbin angin Savonius. Pada *Reynolds number* 1,78 x

10^5 pada posisi y/D=0,5 nilai torsi statis maksimum sebesar 7,93 N.cm pada $\theta = 30^0$. Terjadi kenaikan nilai torsi statis dengan silinder pengganggu pada posisi angular sudu (θ) = 0^0 ke 10^0 yaitu dari 0,65 N.cm menjadi 3,56 N.cm .Hal ini diduga terjadi karena pada saat posisi angular sudu 10^0, luasan sudu *returning blade* yang terkena aliran udara lebih sedikit dan menjauhi arah aliran sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang maka selisih gaya *drag* kedua sudu meningkat maka menghasilkan kenaikan torsi yang signifikan dari posisi angular sudu 10^0 ke 20^0.Sedangkan nilai torsi statis maksimum dengan silinder pengganggu mengalami kenaikan yang tidak signifikan jika dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Adanya silinder penggangu kurang efektif mengurangi gaya *drag* pada *returning blade* sehingga kenaikan nilai torsi statis tidak signifikan sehinga tidak efektif meningkatkan kemampuan *self starting* turbin angin Savonius.

4.6 Analisis *Coefficient of moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu

4.6.1 Analisis *Coefficient of moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* = 9,7 x 10^4

Gambar 4.11 menunjukkan grafik Coefficient of moment (Cm) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 9,7 x 10^4 pada posisi y/D=0;0,25;0,5.



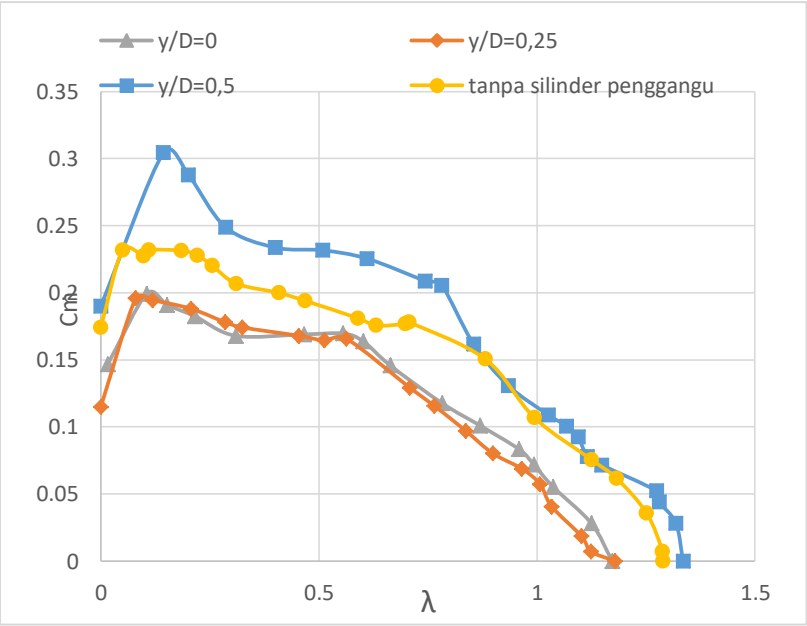
Gambar 4.11 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 9,7 x 10^4

Berdasarkan gambar 4.11, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of moment* (Cm) terhadap fungsi *tip speed* ratio(λ) pada *Reynolds number* 9,7 x 10^4. Pada posisi y/D=0, nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,2957 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,08. Pada posisi y/D=0,25,nilai *Coefficient of moment*(Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment*(Cm) maksimum sebesar 0,2335 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,11. Sedangkan pada posisi y/D=0,5 nilai *Coefficient of moment*(Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,3 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,06 .Nilai *Coefficient of moment*(Cm) tidak mengalami peningkatan karena bernilai sama dengan nilai *Coefficient of moment*(Cm) tanpa silinder pengganggu.

Nilai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum diperoleh saat turbin akan berhenti. Hal ini karena saat mencapai nilai *Coefficient of moment*(Cm) maksimum maka semakin besar massa pemberat yang diberikan pada *brake dynamometer* untuk menghentikan turbin, maka semakin besar pula torsi dinamis turbin. Pada posisi y/D=0,5 tidak efektif meningkatkan nilai *Coefficient of moment*(Cm) ,karena peletakkan silinder pengganggu tidak menggangu *boundary layer* pada *returning blade* ,mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat titik separasi tidak tertunda sehingga daerah *wake* yang dihasilkan sama dengan tanpa menggunakan silinder pengganggu. Pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25, nilai *Coefficient of moment*(Cm) menurun dibandingkan dengan nilai Cm tanpa diberi silinder penghalang. Hal ini karena pada posisi y/D=0 tepat pada diameter sudu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade* ,maka tidak menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat sehingga torsi tidak meningkat maka nilai *Coefficient of moment*(Cm) tidak meningkat. Begitu pula pada posisi y/D=0,25, silinder pengganggu tidak sepenuhnya menghalangi *returning blade* sehingga gaya *drag returning blade* tidak berkurang maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat sehingga torsi tidak meningkat dan nilai *Coefficient of moment* (Cm) tidak meningkat.

4.6.2 Analisis *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savoniusdengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5

Gambar 4.12 menunjukkan grafik *Coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 1,45 x 10^5 pada posisi y/D=0;0,25;0,5.



Gambar 4.12 Grafik *Coefficient of moment* (Cm) Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* 1,45 x 10^5

Berdasarkan gambar 4.12, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of moment* (Cm) terhadap fungsi *tip speed* ratio(λ) pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5. Pada posisi y/D=0, nilai Cm mengalami kenaikan hingga mencapai Cm maksimum sebesar 0,1992 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,089. Pada posisi y/D=0,25 , nilai Cm mengalami kenaikan hingga mencapai Cm maksimum sebesar 0,1958 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,08. Sedangkan pada posisi y/D=0,5 nilai Cm mengalami kenaikan hingga mencapai Cm maksimum sebesar 0,3043 pada *tip speed ratio* (λ)=0,144, mengalami kenaikan 31,27% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* (λ) diiringi dengan menurunnya nilai Cm.

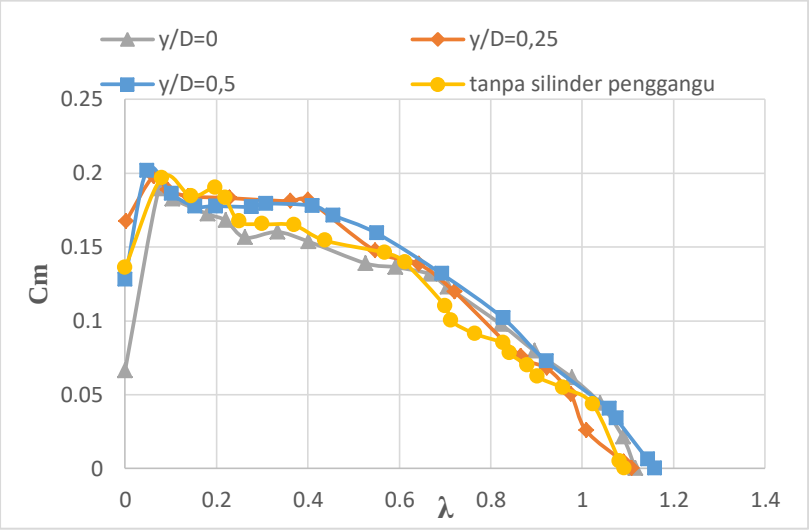
Nilai Cm maksimum diperoleh pada posisi y/D=0,5. Nilai Cm maksimum diperoleh saat turbin akan berhenti. Hal ini karena saat mencapai nilai Cm maksimum maka semakin besar massa pemberat yang diberikan pada *brake dynamometer* untuk menghentikan turbin, maka semakin besar pula torsi dinamis turbin. Pada posisi y/D=0,5 efektif meningkatkan nilai Cm karena peletakkan silinder pengganggu diduga dapat menggangu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi sehingga daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar maka akan menghasilkan nilai Cm yang semakin besar. Selain itu pada y/D=0,5 mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang. Akan tetapi pada posisi y/D=0 dan y/D=0,25, nilai Cm menurun dibandingkan dengan nilai Cm tanpa diberi silinder pengganggu. Hal ini karena pada posisi y/D=0 tepat pada diameter sudu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade* ,maka tidak menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat sehingga torsi tidak meningkat maka nilai Cm tidak meningkat. Begitu pula pada posisi y/D=0,25, silinder pengganggu tidak sepenuhnya menghalangi *returning blade* sehingga gaya *drag returning blade* tidak berkurang maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat sehingga torsi tidak meningkat dan nilai Cm tidak meningkat.

4.6.3 Analisis *Coefficient of moment* (Cm) Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds number* 1,78 x 10^5

Gambar 4.13 menunjukkan grafik *Coefficient of moment* (Cm) turbin angin Savonius dengan silinder pengganggu terhadap

fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 pada posisi y/D=0;0,25;0,5.

Berdasarkan gambar 4.13, dapat dilihat trendline grafik *Coefficient of moment (Cm)* terhadap fungsi *tip speed* ratio(λ) pada *Reynolds number* 1,78 x 10^5. Pada posisi y/D=0, nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,2094 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,0697. Pada posisi y/D=0,25, nilai *Coefficient of moment*(Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,2186 pada *tip speed ratio* (λ)= 0,0583. Sedangkan pada posisi y/D=0,5 nilai *Coefficient of moment* (Cm) mengalami kenaikan hingga mencapai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum sebesar 0,223 pada *tip speed ratio* (λ)=0,0446 dimana mengalami peningkatan sebesar 4,36% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Seiring dengan meningkatnya *tip speed ratio* (λ) diiringi dengan menurunnya nilai *Coefficient of moment* (Cm).



Gambar 4.13 Grafik *Coefficient of moment (Cm)* Turbin Angin Savonius terhadap fungsi *tip speed ratio* (λ) pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5

Nilai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum diperoleh pada posisi y/D=0,5. Nilai *Coefficient of moment* (Cm) maksimum diperoleh saat turbin akan berhenti. Hal ini karena saat mencapai nilai Cm maksimum maka semakin besar massa pemberat yang diberikan pada *brake dynamometer* untuk menghentikan turbin, maka semakin besar pula torsi dinamis turbin. Pada posisi y/D=0,5 efektif meningkatkan nilai *Coefficient of moment* (Cm) karena peletakkan silinder pengganggu diduga dapat menggangu *boundary layer* pada *returning blade* dan mempercepat transisi aliran laminar menjadi turbulen sehingga dapat menunda titik separasi sehingga daerah *wake* akan semakin sempit. Semakin sempit daerah *wake* yang dihasilkan maka semakin besar perbedaan gaya *drag* antara kedua sudu turbin sehingga torsi yang dihasilkan turbin semakin besar maka akan menghasilkan nilai *Coefficient of moment* (Cm) yang semakin besar.Selain itu y/D=0,5 efektif mengurangi *pressure drop* pada *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* berkurang. Akan tetapi pada posisi y/D=0 dan nilai *Coefficient of moment* (Cm) menurun dibandingkan dengan nilai *Coefficient of moment* (Cm) tanpa diberi silinder pengganggu. Hal ini karena pada posisi y/D=0 tepat pada diameter sudu turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade* ,maka tidak menurunkan gaya *drag* pada *returning blade* maka selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak meningkat sehingga torsi tidak meningkat maka nilai *Coefficient of moment* (Cm) tidak meningkat. Pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5, semakin besar *Reynolds number* maka semakin tinggi kecepatan aliran udara, sehingga nilai *Coefficient of moment* (Cm) lebih rendah dibandingkan dengan *Reynolds number* 1,45 x 10^5, karena semakin tinggi kecepatan aliran udara tidak sebanding dengan peningkatan torsi yang terjadi sehingga nilai *Coefficient of moment* (Cm) menurun. Hal ini sesuai dengan persamaan *Coefficient of moment* (Cm) pada persamaan (2.24).Dan semakin besar kecepatan aliran udara maka sudu turbin akan membentuk dinding yang solid sehingga tidak semua

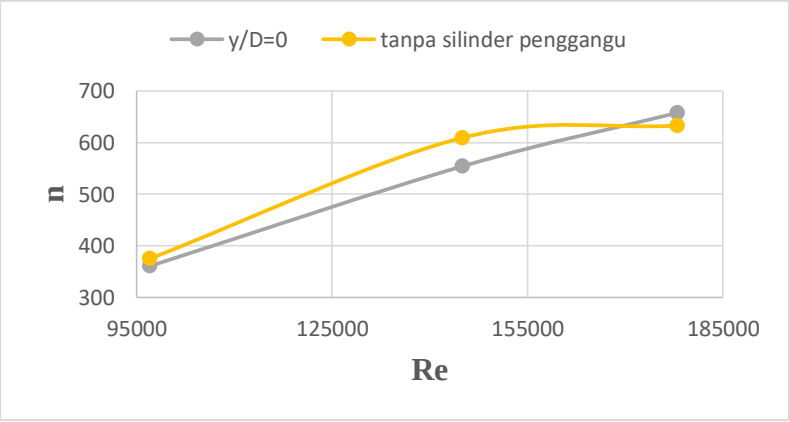
fluida yang mengalir dapat secara maksimal mendorong sudu turbin menghasilkan torsi dinamis.

4.7 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu terhadap *Reynolds Number*

4.7.1 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu terhadap *Reynolds Number* pada y/D=0

Gambar 4.14 menunjukan grafik putaran turbin angin Savonius sebagai fungsi *Reynolds number* pada *Reynolds number* sebesar 9,7 x 10 ^{4} ;1,45 x 10^{5}; 1,78 x 10^{5} dengan silinder pengganggu pada posisi y/D=0.

Berdasarkan grafik, dapat dilihat trendline data putaran turbin angin Savonius pada y/D=0 ditunjukkan pada *Reynolds number* 9,7x 10 ^{4} sebesar 360,19 rpm, pada *Reynolds number* 1,45x 10^{5} sebesar 553,84 rpm, dan pada *Reynolds number* 1,78 x 10^{5} sebesar 657,47 rpm.



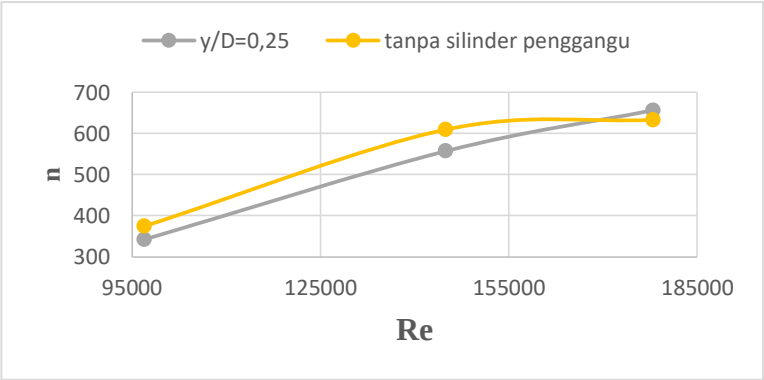
Gambar 4.14 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0

Dari trendline grafik diatas terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius pada *Reynolds number* 1,78,x 10^5 lebih tinggi dari nilai putaran turbin tanpa silinder pengganggu.Nilai putaran mengalami kenaikan sebesar 3,8% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Hal ini dikarenakan pada *Reynolds number* yang tinggi memiliki kecepatan aliran udara yang tinggi, maka putaran turbin juga akan meningkat. Selain itu adanya silinder pengganggu di depan *returning blade* akan mengurangi gaya *drag* sehingga menghasilkan putaran yang lebih tinggi daripada tanpa silinder pengganggu meskipun pada posisi y/D=0 tidak mengalami kenaikan yang signifikan .Pada posisi y/D=0, silinder pengganggu tepat berada pada diameter turbin sehingga tidak menghalangi *returning blade* sehingga gaya *drag* pada *returning blade* tidak berkurang terlalu signifikan sehingga selisih gaya *drag* antara kedua sudu tidak terlalu tinggi sehingga putaran yang dihasilkan tidak menunjukkan hasil yang signifikan dan bahkan menurun pada *Reynolds number* 9 x 10^4 dan 1,45 x 10^5.

4.7.2 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada y/D=0,25 terhadap *Reynolds Number*

Gambar 4.15 menunjukan grafik putaran turbin angin Savonius fungsi *Reynolds number* pada *Reynolds number* sebesar 9,7 x 10^4 ;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5 dengan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,25.

Berdasarkan grafik dibawah, dapat dilihat trendline data putaran turbin angin Savonius pada y/D=0,25 ditunjukkan pada *Reynolds number*= 9,7 x 10^4 sebesar 342,15 rpm, pada *Reynolds number* =1,45x 10^5 sebesar 556,82 rpm, dan pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 sebesar 656,13 rpm.

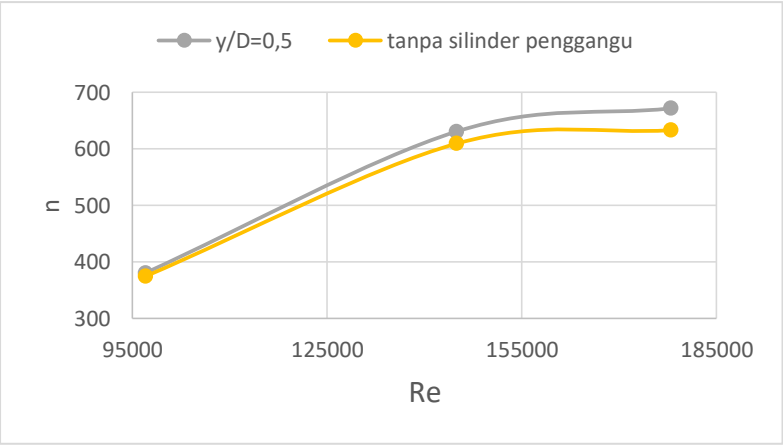


Gambar 4.15 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0,25

Dari trendline grafik diatas terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 mengalami kenaikan sebesar 3,67% daripada tanpa silinder pengganggu. Hal ini dikarenakan semakin besar *Reynolds number* maka akan semakin besar nilai kecepatan aliran udara maka semakin besar nilai putaran turbin.Namun, posisi silinder pengganggu pada y/D=0,25 tidak sepenuhnya menghalangi *returning blade*,sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu turbin tidak mengalami kenaikan yang siginifikan sehingga putaran yang dihasilkan tidak menunjukkan kenaikan yang signifikan dan bahkan menurun pada *Reynolds number* = 9 x 10^4 dan 1,45 x 10^5.

4.7.3 Analisis Putaran Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada y/D=0,5 terhadap *Reynolds Number*

Gambar 4.16 menunjukan grafik putaran turbin angin Savonius sebagai fungsi *Reynolds number* pada *Reynolds number* sebesar 9,7 x 10 ^{4} ;1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5 dengan silinder pengganggu pada posisi y/D=0,5.



Gambar 4.16 Grafik Putaran Turbin Angin Savonius Terhadap *Reynolds number* pada y/D=0,5

Berdasarkan grafik diatas, dapat dilihat trendline data putaran turbin angin Savonius pada y/D=0,5 ditunjukkan pada *Reynolds number* =9,7x 10^4 sebesar 380,59 rpm, pada *Reynolds number* =1,45x 10^5 sebesar 630,6 rpm, dan pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 sebesar 671,47 rpm.

Dari trendline grafik diatas terlihat bahwa putaran turbin angin Savonius pada *Reynolds number* =9 x 10^4 ;1,45 x 10^5;1,78x 10^{5V}lebih tinggi dari nilai putaran turbin tanpa silinder pengganggu. Kenaikan tertinggi diperoleh pada *Reynolds number* 1,78 x 10^5, yaitu sebesar 6,1%. Hal ini dikarenakan posisi silinder pengganggu pada y/D=0,5 efektif mungurangi gaya *drag* pada *returning blade* sehingga mengakibatkan perbedaan gaya *drag* kedua sudu turbin meningkat maka daya turbin turbin.Peningkatan daya turbin ditandai dengan bertambahnya putaran turbin angin Savonius.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada studi eksperimen pengaruh silinder penggangu terhadap performa turbin angin Savonius yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peletakkan silinder penggangu dengan d/D=0,2 pada jarak S/D=1,4 didepan *returning blade* pada *Reynolds number* =9,7 x 10^4; 1,45 x 10^5; 1,78 x 10^5 dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius. Hal ini ditandai dengan peningkatan *Coefficient of Power*, torsi statis, *Coefficient of moment*, dan putaran dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.
2. Nilai *Coefficient of Power* (CoP) terbesar diperoleh pada posisi y/D=0,5 pada *Reynolds number* =1,45 x10^5 yaitu sebesar 0,1607. Diperoleh peningkatan nilai *Coefficient of Power* (CoP) maksimum sebesar 21,1% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.
3. Nilai torsi statis terbesar diperoleh pada posisi y/D=0,5 pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 pada posisi sudut bukaan sudu (θ) = 30^0 yaitu sebesar 7,93 N.cm. Diperoleh peningkatan nilai torsi statis sebesar 0,634% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.Penambahan silinder pengganggu tidak efektif menambah kemampuan *self starting* turbin karena tidak mengalami kenaikan yang signifikan.
4. Nilai *Coefficient of moment* (Cm) terbesar diperoleh pada posisi y/D=0,5 pada *Reynolds number* =1,45 x 10^5 yaitu sebesar 0,3043. Diperoleh peningkatan nilai *Coefficient of moment* (Cm) sebesar 31,27% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.
5. Nilai putaran terbesar diperoleh pada posisi y/D=0,5 pada *Reynolds number* =1,78 x 10^5 yaitu sebesar 671,47

rpm.Diperoleh peningkatan nilai putaran sebesar 6,1% dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan terhadapa penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Memperhatikan keseimbangan turbin angin Savonius agar tidak terjadi getaran saat pengambilan data.
2. Memperhatikan kondisi alat ukur dan kondisi poros turbin angin Savonius selama melakukan pengambilan data.
3. Pengambilan data dilakukan pada kondisi dan waktu yang sama.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

Daftar Pustaka

Akwa, J. V., 2012. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** ***A review on the performance of Savonius wind turbines,*** 16(2012), p. 3057.

Al-Shimmeri,T.2010.***Wind Turbines : First Edition.***Ventus Publishing ApS.

Bayu,Satria. 2017. **"Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Sirkular Sebagai Pengganggu di Depan Sisi Returning Blade terhadap Performa Turbin Angin Savonius". Studi Kasus untuk (d/D) = 0,2, S/D = 1,5 < S/D < 2,4, dan Re= 3,0 x 10^4, 6 x 10^4, 9 x 10^4.** Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Fox, Mc Donalds., 1998. **Introduction to Fluid Mechanics.** 5th ed. New York: John Willey and Son.

Latif, A. A., 2017. **Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Penggangu Di Depan Returning Blade Terhadap Performa Turbin Angin Savonius.**

Mahmoud,N.H., et al. August 2012. **An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance.** Alexandria Engineering Journal

Tista, P. G. G., 2010. **Pengaruh Penempatan Penggangu Berbentuk Silinder Pada Posisi Vertikal Dengan Variasi Jarak Horisontal Di Depan Silinder Utama Terhadap Koefisien Drag.** *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin,* Volume IV, pp. 160-165.

Triyogi., Abdul L., Nabila P.P. dkk. 2017.***The Effect of Width of Single Curtain on The Performance of Savonius Wind***

Turbine.AIP Conference Proceeding, Vol 1983, Issue 1, 2018, pp. 020023-1-020023-5

Triyogi , Abdul L., Nabila P.P. dkk. 2017. ***Numerical study on the effect of width of single curtain on the performance of Savonius wind turbine***.Matec Web of Conference, Vol 154, 01110(2018), pp.1-3

Tsutsui, T and Igarashi, T. 2002. ***Drag Reduction on Circular Cylinder in an Air-Stream***, Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamic, Vol 90, Page Paper 527-541.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

n(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
374.56	39.20	0	0	1.1772	1.18709	0	0	0
353.9	37.04	15	190	1.1772	1.1216	0.01631	0.09138	0.08147
326.7	34.19	16	300	1.1772	1.03539	0.02647	0.13689	0.13221
303.35	31.75	18	333.333	1.1772	0.9614	0.02939	0.14113	0.1468
287.01	30.04	20	383.333	1.1772	0.90962	0.03386	0.15386	0.16915
266.39	27.88	25	410.667	1.1772	0.84427	0.03594	0.15158	0.17954
230.74	24.15	35	480	1.1772	0.73129	0.04147	0.1515	0.20717
185.89	19.45	45	553.333	1.1772	0.58914	0.04737	0.13942	0.23665
138.46	14.49	50	563.333	1.1772	0.43884	0.04784	0.10487	0.23898
125.52	13.13	55	550	1.1772	0.39783	0.04613	0.09168	0.23044
101.94	10.66	65	600	1.1772	0.32307	0.04986	0.08047	0.24906
89.92	9.41	75	626.667	1.1772	0.28498	0.05141	0.07319	0.25682
86.846	9.089	85	650	1.1772	0.27524	0.05266	0.0724	0.26303
74.286	7.77	95	713.333	1.1772	0.23543	0.05763	0.06777	0.28786
67.46	7.06	105	702.667	1.1772	0.2138	0.0557	0.05949	0.27824
47.94	5.018	135	773.333	1.1772	0.15195	0.05949	0.04516	0.29717
45.86	4.83	145	780	1.1772	0.14534	0.05918	0.04297	0.29562
42.26	4.421	155	800	1.1772	0.13395	0.06011	0.04022	0.30027
32.67	3.419	165	800	1.1772	0.10355	0.05918	0.03061	0.29562
29.13	3.049	175	783.333	1.1772	0.09233	0.05669	0.02615	0.2832
0	0	185	426.667	1.1772	0	0.02252	0	0.11251

Tabel A1. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 97000

N (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
609.2	63.763	0	0	1.1772	1.29	0	0	0
608.433	63.683	15	50	1.1772	1.288	0.0033	0.0094	0.007
591.253	61.885	35	206.66	1.1772	1.252	0.016	0.0446	0.036
558.827	58.491	55	351.33	1.1772	1.183	0.0276	0.0728	0.062
531.253	55.605	75	439.33	1.1772	1.125	0.034	0.0851	0.076
469.687	49.161	95	609.33	1.1772	0.994	0.0479	0.1062	0.107
416.36	43.579	115	840	1.1772	0.881	0.0676	0.1328	0.151
333.973	34.956	135	991.33	1.1772	0.707	0.0798	0.1258	0.178
329.827	34.522	155	1006	1.1772	0.698	0.0793	0.1234	0.177
298.18	31.21	175	1020	1.1772	0.631	0.0787	0.1108	0.176
278.753	29.176	195	1066	1.1772	0.59	0.0812	0.1068	0.181
221.567	23.191	215	1148.66	1.1772	0.469	0.087	0.091	0.194
192.907	20.191	235	1197	1.1772	0.408	0.0897	0.0816	0.2
146.653	15.35	255	1250.66	1.1772	0.31	0.0928	0.0642	0.207
120.78	12.642	275	1334.66	1.1772	0.256	0.0988	0.0563	0.22
104.76	10.965	295	1392	1.1772	0.222	0.1022	0.0505	0.228
87.0733	9.1137	315	1428.66	1.1772	0.184	0.1038	0.0426	0.231
52.0733	5.4503	335	1451	1.1772	0.11	0.104	0.0256	0.232
46.34	4.8503	355	1450	1.1772	0.098	0.102	0.0223	0.227
23.6615	2.4766	375	1490	1.1772	0.05	0.1039	0.0116	0.232
0	0	385	1223.33	1.1772	0	0.0781	0	0.174

Tabel A2. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 145000

n(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
632.86	66.23	0	0	1.1772	1.09	0	0	0
626.9	65.61	15	50	1.1772	1.08	0.0032	0.0052	0.0048
592.90	62.05	35	350	1.1772	1.02	0.0293	0.044	0.0435
555.2	58.11	55	450	1.1772	0.95	0.0368	0.0522	0.0545
522.18	54.65	75	525	1.1772	0.90	0.04193	0.05598	0.0621
509.66	53.34	95	600	1.1772	0.87	0.04706	0.06132	0.0697
487.25	50.99	115	680	1.1772	0.84	0.05265	0.06559	0.078
479.37	50.17	135	750	1.1772	0.82	0.05731	0.07024	0.0849
443.43	46.41	155	816	1.1772	0.76	0.06160	0.06983	0.0913
412.90	43.21	175	900	1.1772	0.71	0.06756	0.07132	0.1001
405.76	42.47	195	991.66	1.1772	0.70	0.07424	0.07702	0.11
354.56	37.11	215	1225	1.1772	0.61	0.09412	0.08532	0.1394
329.16	34.45	235	1293.33	1.1772	0.56	0.09863	0.08300	0.1461
253.45	26.52	255	1373.33	1.1772	0.43	0.10422	0.06753	0.1544
213.88	22.38	275	1468.33	1.1772	0.36	0.11121	0.06081	0.1647
173.35	18.14	295	1493.33	1.1772	0.29	0.11167	0.04949	0.1654
144.34	15.10	315	1526.66	1.1772	0.24	0.11292	0.04167	0.1673
126.74	13.26	335	1663.33	1.1772	0.21	0.12379	0.04011	0.1834
113.88	11.92	355	1733.33	1.1772	0.19	0.12845	0.03740	0.1903
83.59	8.749	375	1710	1.1772	0.14	0.12441	0.0265	0.1843
46.35	4.85	395	1820	1.1772	0.08	0.13280	0.01573	0.1967
0	0	415	1400	1.1772	0	0.09179	0	0.136

Tabel A3. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 178000

N (rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
360.19	37.70	0	0	1.17385	1.141	0	0	0
341.95	35.79	15	125	1.17385	1.083	0.0103	0.0556	0.05135
332.54	34.80	20	198.33	1.17385	1.053	0.0166	0.0877	0.08325
290.26	30.38	25	300	1.17385	0.919	0.0256	0.1181	0.12838
253.58	26.54	35	400	1.17385	0.803	0.034	0.1369	0.17040
233.78	24.46	45	450	1.17385	0.740	0.0377	0.1401	0.18908
203.51	21.30	55	525	1.17385	0.644	0.0438	0.1415	0.21942
161.96	16.95	70	575	1.17385	0.513	0.0471	0.1210	0.23576
136.28	14.26	75	575	1.17385	0.431	0.0466	0.1008	0.23343
105.4	11.03	85	600	1.17385	0.334	0.048	0.0803	0.24043
84.4	8.83	95	600	1.17385	0.267	0.0471	0.0630	0.23576
69.63	7.29	105	625	1.17385	0.220	0.0485	0.0536	0.24277
52.40	5.483	115	650	1.17385	0.16	0.0499	0.0414	0.24977
43.94	4.599	125	663.33	1.17385	0.139	0.0502	0.035	0.25133
33.5	3.506	135	661.66	1.17385	0.106	0.0491	0.0261	0.24588
26.57	2.781	145	778.33	1.17385	0.0842	0.059	0.0249	0.29568
4.04	0.422	155	438.33	1.17385	0.0128	0.0264	0.0016	0.1322

Tabel A4. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,0 **pada *Reynolds Number* = 97000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
553.84	57.968	0	0	1.1749	1.1725	0	0	0
531.3	55.60	15	150	1.1749	1.1248	0.01258	0.0316	0.0281
490	51.28	35	300	1.1749	1.0374	0.02469	0.0572	0.0552

469.053	49.09	55	400	1.17455	0.993	0.03215	0.0713	0.0718
453.1	47.42	75	475	1.17455	0.9592	0.03727	0.0798	0.0833
410.84	43.00	115	600	1.1749	0.8698	0.045	0.087	0.1009
369.78	38.70	135	700	1.1749	0.7828	0.05265	0.0920	0.1176
313.633	32.82	175	875	1.1749	0.664	0.06523	0.0967	0.1457
284.367	29.76	215	1000	1.1728	0.602	0.07315	0.0985	0.1637
262.227	27.44	235	1048.33	1.1728	0.5551	0.07579	0.0941	0.1696
220.233	23.05	265	1075	1.17245	0.4662	0.07548	0.0787	0.1689
146.06	15.28	295	1100	1.17245	0.3092	0.07502	0.0519	0.1679
101.84	10.65	325	1200	1.17245	0.2156	0.08154	0.0393	0.1825
71.9733	7.53	385	1300	1.17245	0.1524	0.08527	0.0290	0.1908
49.78	5.21	445	1400	1.17245	0.1054	0.089	0.0209	0.1992
7.52	0.787	475	1178.26	1.17245	0.0159	0.0655	0.0023	0.1467

Tabel A5. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,0 **pada *Reynolds Number* = 145000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
657.4	68.814	0	0	1.1772	1.116	0	0	0
641.3	67.129	15	160	1.1772	1.089	0.01491	0.0232	0.02139
611.93	64.049	35	350	1.1772	1.039	0.03075	0.0458	0.04411
575.8	60.267	55	500	1.1772	0.977	0.04287	0.0601	0.06148
527.64	55.22	95	675	1.1772	0.896	0.05545	0.0712	0.07953
484.41	50.70	135	850	1.1772	0.822	0.06803	0.0802	0.09757
415.36	43.47	215	1120	1.1772	0.705	0.08574	0.0867	0.12297
392.96	41.13	255	1225	1.1772	0.667	0.0918	0.0878	0.13166
348.36	36.46	295	1300	1.1772	0.591	0.09506	0.0806	0.13634

309.74	32.41	375	1400	1.1772	0.526	0.09692	0.0731	0.1390
236.35	24.73	415	1550	1.1772	0.4014	0.10717	0.0617	0.1537
195.98	20.51	455	1638.33	1.1772	0.3328	0.11168	0.0533	0.1601
154.37	16.15	495	1650	1.1772	0.2622	0.10904	0.041	0.1563
129.81	13.58	535	1776.6	1.1772	0.2204	0.11712	0.0370	0.1679
105.94	11.088	575	1850	1.1772	0.1799	0.12022	0.0310	0.1724
60.82	6.365	625	1976.66	1.1772	0.103	0.12737	0.0188	0.1826
43.58	4.56	665	2066.66	1.1772	0.07	0.13203	0.0140	0.1893
0	0	765	1246.66	1.1772	0	0.04629	0	0.0663

Tabel A6. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,0 **pada *Reynolds Number* = 178000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
342.15	35.81	0	0	1.1772	1.0843	0	0	0
336.97	35.27	15	150	1.1772	1.0679	0.0126	0.0671	0.0628
316.94	33.17	25	250	1.1772	1.0044	0.021	0.1052	0.1047
285.36	29.87	35	345	1.1772	0.9043	0.0289	0.1305	0.1443
255.97	26.79	45	411.66	1.1772	0.8112	0.0342	0.1384	0.1707
211.09	22.09	65	500	1.1772	0.669	0.0405	0.1354	0.2025
165.03	17.27	95	575	1.1772	0.5230	0.0447	0.1168	0.2235
156.18	16.35	105	588.33	1.1772	0.4949	0.045	0.1113	0.225
145.96	15.28	115	575	1.1772	0.4625	0.0429	0.0990	0.2141
96.48	10.1	140	600	1.1772	0.3057	0.0429	0.0654	0.2141
68.333	7.152	185	672.66	1.1772	0.2165	0.0454	0.0491	0.227
52.847	5.531	195	683.33	1.1772	0.1674	0.0455	0.0380	0.2273
36.553	3.826	215	716.6	1.1772	0.1158	0.0468	0.0270	0.2335

0	0	225	293.3	1.1772	0	0.0064	0	0.0318

Tabel A7. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,25 **pada *Reynolds Number* = 97000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
556.82	58.28	**0**	0	1.1724	1.178	0	0	0
530.84	55.56	15	50	1.1724	1.123	0.0033	0.0082	0.007
520.35	54.46	35	125	1.1724	1.101	0.0084	0.0206	0.0187
488.36	51.11	55	250	1.1724	1.033	0.0182	0.0420	0.0406
475.69	49.78	75	350	1.1724	1.007	0.0256	0.0577	0.0573
456.02	47.73	95	425	1.1724	0.965	0.0308	0.0664	0.0688
424.45	44.42	115	500	1.1724	0.898	0.0359	0.0721	0.0803
395.42	41.38	135	600	1.1724	0.837	0.0433	0.0811	0.0969
361.12	37.79	195	750	1.1724	0.764	0.0517	0.088	0.1157
334.48	35.01	255	875	1.1724	0.708	0.0578	0.0915	0.1293
265.84	27.82	355	1150	1.1724	0.562	0.0741	0.0933	0.1658
242.27	25.35	375	1163.33	1.1724	0.512	0.0735	0.0843	0.1644
214.67	22.46	395	1200	1.1724	0.454	0.075	0.0763	0.167
153.18	16.03	415	1250	1.1724	0.324	0.0778	0.0564	0.1741
134.60	14.08	435	1288.33	1.1724	0.284	0.0795	0.0507	0.1779
97.72	10.22	475	1376.66	1.1724	0.206	0.084	0.0389	0.1880
56.05	5.86	495	1426.66	1.1724	0.118	0.0868	0.0230	0.1943
37.80	3.95	535	1475	1.1738	0.08	0.0876	0.0156	0.195
0	0	555	1106.66	1.1738	0	0.0514	0	0.1149

Tabel A8. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,25 **pada *Reynolds Number* = 145000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
656.13	68.67	**0**	0	1.1772	1.108	0	0	0
645.53	67.56	15	50	1.1772	1.09	0.0032	0.00504	0.00463
597.11	62.49	55	250	1.1772	1.009	0.0181	0.0260	0.02579
577.25	60.41	95	475	1.1772	0.975	0.0354	0.049	0.05025
546.30	57.18	135	650	1.1772	0.923	0.048	0.06284	0.06811
512.20	53.61	175	750	1.1772	0.865	0.0535	0.0657	0.07604
426.64	44.65	255	1160	1.1772	0.721	0.0843	0.08625	0.11968
380.68	39.84	295	1341.66	1.1772	0.643	0.0975	0.08900	0.13842
323.80	33.89	335	1450	1.1772	0.547	0.1039	0.08065	0.14745
236.3	24.73	375	1750	1.1772	0.399	0.1281	0.07259	0.18184
213.86	22.38	395	1763.33	1.1772	0.361	0.1275	0.06536	0.18095
135.42	14.17	415	1800	1.1772	0.229	0.1290	0.04189	0.18316
82.16	8.6	455	1850	1.1772	0.139	0.1300	0.02560	0.18448
54.86	5.74	495	1923.33	1.1772	0.093	0.1331	0.01750	0.18889
36.66	3.83	535	2030	1.1772	0.062	0.1393	0.01224	0.19771
0.78	0.08	595	1860	1.1772	0.001	0.1178	0.0002	0.16729

Tabel A9. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, v/D= 0.25 **pada *Reynolds Number* = 178000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m^3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
380.59	39.83	**0**	0	1.1772	1.206	0	0	0
361.35	37.82	15	150	1.1772	1.145	0.01258	0.07197	0.06284
346.52	36.26	18	190	1.1772	1.098	0.016029	0.08794	0.08007
322.56	33.76	25	250	1.1772	1.022	0.020968	0.10708	0.10474

301.68	31.57	45	316.66	1.1772	0.956	0.02531	0.1209	0.12647
287.60	30.10	55	350	1.1772	0.911	0.02749	0.1251	0.13733
277.82	29.07	65	383.33	1.1772	0.880	0.02966	0.1304	0.14819
260.94	27.31	75	450	1.1772	0.827	0.03494	0.1443	0.17457
229.6	24.03	85	550	1.1772	0.727	0.04333	0.1575	0.21647
200.8	21.01	95	611.66	1.1772	0.636	0.04815	0.1530	0.24053
176.62	18.48	105	633.33	1.1772	0.559	0.04923	0.1376	0.24596
134.68	14.09	115	650	1.1772	0.426	0.04985	0.1063	0.24906
107.48	11.24	125	676.66	1.1772	0.340	0.05141	0.0874	0.25682
85.08	8.90	135	675	1.1772	0.269	0.05032	0.0677	0.25139
64.03	6.70	155	683.33	1.1772	0.202	0.04923	0.0499	0.24596
53.74	5.62	165	723.33	1.1772	0.170	0.052038	0.0442	0.25992
38.053	3.98	185	750	1.1772	0.120	0.05265	0.0317	0.26303
28.8	3.01	195	763.33	1.1772	0.091	0.05296	0.0241	0.26458
19.36	2.02	215	860	1.175	0.061	0.06011	0.01846	0.30083
0	0	225	500	1.175	0	0.02562	0	0.128263

Tabel A10. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, v/D= 0,5 **pada *Reynolds Number* = 97000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
630.6	66.00	**0**	0	1.1772	1.335	0	0	0
622.96	65.20	15	150	1.1772	1.318	0.0125	0.0369	0.0280
604.99	63.32	25	236.66	1.1772	1.280	0.0197	0.0563	0.0439
601.78	62.98	35	286.66	1.1772	1.27	0.0234	0.0666	0.052
542.21	56.75	55	400	1.1772	1.147	0.0321	0.0822	0.0716
526.94	55.15	75	450	1.1772	1.115	0.03494	0.0869	0.0779

516.82	54.09	95	540	1.1772	1.0941	0.0414	0.1011	0.0924
504.24	52.77	115	600	1.1772	1.067	0.04	0.1075	0.1007
484.52	50.71	135	660	1.1772	1.025	0.0489	0.1118	0.1090
441.17	46.17	175	805	1.1772	0.933	0.0587	0.1222	0.1308
403.80	42.26	215	993.33	1.1772	0.854	0.0725	0.1382	0.1616
369.11	38.63	260	1250	1.1772	0.781	0.0922	0.1607	0.2056
351.4	36.78	275	1280	1.1772	0.744	0.0936	0.155	0.2087
288.60	30.20	315	1400	1.1772	0.61	0.1011	0.1377	0.2253
240.44	25.16	335	1450	1.1772	0.509	0.1039	0.1179	0.2316
188.70	19.75	375	1500	1.1772	0.399	0.1048	0.0933	0.2337
135.01	14.13	395	1593.33	1.1772	0.285	0.1116	0.0711	0.2489
94.9	9.93	415	1800	1.1772	0.201	0.1290	0.0578	0.2877
67.92	7.10	435	1900	1.1772	0.143	0.1365	0.0437	0.3043
0	0	435	1350	1.1772	0	0.0852	0	0.1900

Tabel A11. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,5 **pada *Reynolds Number* = 145000**

N(rpm)	ω (rad/s)	m (gr)	s (gr)	ρ(kg/m3)	λ	Td (Nm)	CoP	Cm
671.46	70.28	**0**	0	1.17245	1.1589	0	0	0
662.3	69.32	15	60	1.17245	1.143	0.004	0.00713	0.006
622.23	65.12	55	300	1.17175	1.0739	0.023	0.03649	0.034
613.6	64.22	95	386.66	1.17175	1.059	0.027	0.04284	0.04
533.72	55.86	175	700	1.1714	0.9211	0.049	0.06709	0.073
478.9	50.12	215	950	1.1714	0.8265	0.068	0.08428	0.102
401.25	41.9	295	1250	1.1772	0.6925	0.089	0.0913	0.132
319.12	33.4	375	1521	1.1693	0.5508	0.107	0.08773	0.159

263.66	27.59	415	1650	1.17035	0.4551	0.115	0.07804	0.171
237.4	24.8	455	1736.67	1.17035	0.4097	0.119	0.07292	0.178
178.12	18.6	495	1786.67	1.17035	0.3074	0.12	0.05514	0.179
160.26	16.7	515	1790	1.16895	0.2766	0.119	0.04903	0.177
114.57	11.9	535	1810	1.16615	0.1977	0.119	0.03514	0.178
88.42	9.25	555	1831.67	1.16825	0.1526	0.119	0.0271	0.178
58.61	6.13	595	1933.33	1.1693	0.1012	0.125	0.01882	0.186
27.46	2.87	675	2126.67	1.1693	0.0474	0.135	0.00956	0.202
0	0	695	1615	1.1679	0	0.086	0	0.128

Tabel A12. Data Hasil Penelitian Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu d/D = 0,2, S/D = 1,4, y/D= 0,5 **pada *Reynolds Number* = 178000**

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1,5
10	3	2	2	3	1	2	2	2	2	1	2
20	2	3	2	2	1	2	2	2	2	3	2,1
30	2,5	1,8	1,8	1,7	2,8	2,8	2,3	3,1	2,2	2,0	2,3
40	1,7	2,3	2,4	1,8	2,3	2,3	2	1,8	1,6	2	2,02
50	1,4	1,6	1,5	1,7	1,3	1,6	1,4	1,7	1,8	1,5	1,55
60	1,4	1,4	1,2	1,4	1,5	2,3	1,1	1,6	1,6	0,7	1,42
70	0,7	1,2	0,9	1,2	0,7	1,1	1,6	0,9	1,1	1,4	1,08
80	0,9	1	0,6	0,7	0,9	0,5	1,1	0,4	0,3	0,4	0,68
90	0,4	0,3	0,6	0,3	0,7	0,6	0,6	0,8	0,6	0,5	0,54
100	0	0,2	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,1	0	0,06
110	0,3	-0,2	-0,1	0,2	0,1	-0,2	0,3	0,1	0,1	-0,2	0,04
120	0	-0,2	-0,1	0,3	-0,2	0	-0,4	-0,2	0,1	-0,3	-0,1
130	0	0,1	-0,6	0	-0,2	-0,1	0	-0,4	-0,2	-0,2	-0,16

140	-0,8	-0,7	-0,6	-0,7	-1,2	-0,6	0,1	-0,5	-0,7	-0,7	-0,64
150	-0,6	-0,7	-0,1	-0,7	-0,6	-0,8	-0,8	-1	-0,9	-1,1	-0,73
160	-1	-0,8	-1,4	-0,6	-1,2	-0,8	-0,9	-0,8	0,1	-0,4	-0,78
170	-0,6	0	0,7	0,1	0,8	0,3	0,1	-0,6	0,7	1,6	0,31
180	0,9	1,1	1,4	1,2	1,3	1,2	1,2	0,7	1,5	1	1,15

Tabel A13. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 97000

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	3	2	2	4	6	3	5	4	5	3	3,7
10	6	4	5	6	4	7	4	5	7	5	5,3
20	6	8	4	7	5	5	8	5	6	9	6,3
30	5,5	5,7	6,2	6,3	5,3	7,2	5,4	7,7	9,7	6,6	6,56
40	6,5	6,1	5,2	6,2	4,9	7	5,3	6,6	5,7	5,5	5,9
50	3,1	4,6	4,1	2,9	3,8	3,4	3,9	5	7,4	5,7	4,39
60	4,8	2,7	1,8	3,6	3,4	5,1	3	4,8	4,9	5,1	3,92
70	4,1	4,3	4,8	1,6	4,6	3	4,6	4,2	2,5	4,1	3,78
80	2,1	2,5	2,6	3,5	3,4	3	3,6	2,9	1,6	2,8	2,8
90	1,5	1,6	2	2,4	1,8	0,9	2,1	3,2	2	1,6	1,91
100	0,8	0,7	-0,4	1,2	-0,7	1,4	1,1	1,6	1,2	1,3	0,82
110	0	0,6	-1,2	0	0	0,4	0,5	0,8	1,2	1,1	0,34
120	0,1	1	1,1	0,4	-0,4	1,3	-1,2	-0,5	-0,6	-0,2	0,1
130	0,8	-0,2	-0,2	0	0,1	-2,2	-0,9	0,6	-0,4	-0,9	-0,33
140	-0,2	0,5	-1,2	-2	-0,4	0	-0,8	-2,1	0,4	-1,3	-0,71
150	-0,6	-1,6	-1,7	-1,8	-0,6	-1,6	-2,4	-0,4	-1,8	-3,6	-1,61
160	-1,4	-2	-2,1	-1,7	-2,5	0,5	-1,7	0	-0,7	-1,5	-1,31
170	0,7	-	-	0,3	-	2,1	-0,1	0,5	2	0,6	0,33

		0,1	0,5		2,2						
180	4	4,1	3,3	3	3,5	3,2	3,2	5,2	3,5	3,5	3,65

Tabel A14. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 1450000

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	3,9	3,5	3,5	4,9	2,6	3,4	2,5	2,6	3,2	2,1	3,22
10	7,6	6,7	7	6,3	7,2	6,5	7,4	7	7,7	6,8	7,02
20	7,2	7,9	8,1	7,6	8,2	7,1	7,4	7,6	7,5	7,7	7,63
30	7,7	7,9	7,2	8,1	8,6	7,5	7,4	8,8	7,6	8	7,88
40	7,2	8	7	6,9	6,5	6,2	8,5	7,7	6,8	7,6	7,24
50	6,8	7,1	7,4	7	7,8	5,9	5,8	5,2	7,5	6,5	6,7
60	5	5,6	4,1	6,3	5,4	5,8	5	8,2	7	5,9	5,83
70	4,4	6,2	3,7	4,1	5,6	5,2	4,2	4,1	3,6	4,8	4,59
80	3	3,2	3,6	3	4,1	3,9	4,4	3,2	4,8	3,5	3,67
90	2,9	2,6	2,6	2,7	3,1	3,3	2,7	4	3,2	3,5	3,06
100	1,5	1,5	2,6	1,5	1,9	1,9	2,2	2,4	1,9	2,9	2,03
110	1,8	1,1	1,9	2,1	2	1,1	1,3	1,5	1,6	1,4	1,58
120	0,9	0,5	0,5	1,6	1,4	0	1,1	1,5	1,4	0,4	0,93
130	0,9	1	1,2	-1,9	-1,1	0,3	0,6	0,3	-0,1	-1,1	0,01
140	-1	0,6	0,2	-3,2	-0,8	-2,2	-2,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,22
150	-3	-2,2	-1,6	-1,3	-2	-1,3	-2,2	-1,9	-2,7	-2,1	-2,03
160	-1,2	0,7	2,3	-1,6	-2,3	2,7	-2,1	2,3	-1	0	-0,02
170	4,6	3,8	-2	3,3	3,8	0,2	4,2	2,9	2,2	-2	2,1
180	4,1	4,5	5,2	5	2,5	-0,8	4,3	4,7	-1,2	5,1	3,34

Tabel A15. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius tanpa Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 1780000

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	0,3	0,2	0,7	0,3	0,3	0,3	0,6	0,3	0,1	-0,1	0,3
10	1,3	0,9	0,7	1,3	0,9	-0,1	1	0,8	1,2	0,7	0,87
20	1,1	0,9	0,8	1	0,9	0,8	0,8	1,3	1,5	1,5	1,06
30	2,2	2,3	2,4	2,7	2,5	2,4	2,4	2,3	2,4	2,4	2,4
40	1,3	1,2	1,7	2,5	2	1,8	1,8	1,2	1,5	1,9	1,69
50	1	1,4	1,4	1,5	1,8	1,5	1,2	0,9	0,9	1	1,26
60	0,8	0,8	0,8	1	1,3	1,2	1,2	1,2	0,8	1,1	1,02
70	0,4	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8	0,9	0,8	0,7	0,68
80	0,4	0,3	0,7	0,4	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,59
90	0,6	0,4	0,7	0,5	0,8	0,4	0	-0,2	0,7	-0,5	0,34
100	0,4	0,2	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0	-0,1	0,1	0,25
110	0,2	0,1	0,3	-0,1	-0,4	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,14
120	0	0,1	0,2	0,2	0,1	0	-0,1	0,1	0	-0,2	0,04
130	-0,3	-0,1	0	-0,2	-0,8	0	0	-0,3	-0,1	-0,5	-0,23
140	-0,4	0,1	-0,2	-0,7	-0,6	-0,1	-0,6	-0,3	-0,7	-0,5	-0,4
150	-0,6	-0,7	-1,1	-0,8	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,5	-0,9	-0,67
160	0	-0,2	-0,6	-0,2	-0,6	-0,7	-0,3	-0,2	-0,5	0	-0,33
170	0,4	-0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	-0,2	0,4	0,2	0,14
180	0,2	0,3	-0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,6	0,3	0,26

Tabel A16. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 970000

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	-0,8	1	7	1,3	1,1	-0,1	-1,2	-1,1	-0,9	-0,1	0,62
10	2,5	-0,4	2,6	2,5	3,6	3,8	3,4	3,3	3,1	-0,4	2,4
20	3,6	3,4	4,5	3,4	4,3	2,7	5,3	4,2	2,2	6,2	3,98
30	6,6	6,3	6,5	6,4	7,6	8,8	6,4	6,5	7,3	5,7	6,81
40	3,4	4	5	5,2	5	3,4	5,8	5	4,2	3,3	4,43
50	2,2	2,6	2,4	3,6	3,1	3,3	2,7	3	2,9	3	2,88

60	2,5	2,5	2,3	2,6	2,3	1,5	3,1	1,5	2,5	2	2,28
70	1,6	1,3	2,1	2,1	2	2,3	1,8	1,7	2,4	2,3	1,96
80	-0,7	2,5	1,4	-0,4	0,4	2	2	1,6	1,6	1,5	1,19
90	0	0	-1,5	1	1,9	-0,3	-0,2	1,5	-0,4	0	0,2
100	-0,3	-0,2	0,6	0,8	-0,3	1	-0,2	0,8	-0,1	-1	0,11
110	0,7	0,6	0,3	-0,8	-0,8	1,3	0,2	-0,9	0,3	-1,5	-0,06
120	0,8	0,2	-0,5	-0,4	-0,1	-0,4	-0,1	-0,3	-0,2	-0,9	-0,19
130	-0,9	0,4	-0,9	-0,5	0,7	0,5	-1	-0,8	-0,8	-0,4	-0,37
140	-0,9	0,2	-2,4	-0,8	-0,4	-1,8	-2	-0,8	-0,5	0,1	-0,93
150	-1,7	-1,4	-0,6	-1,9	-0,8	-1,7	-1,1	-1,5	-0,2	-0,5	-1,14
160	-3,5	-1	-0,6	-1,1	0,5	-0,9	-0,6	-0,6	-1,5	-1,6	-1,09
170	0,6	-0,2	-0,5	-1,5	1,3	1,2	-0,2	1,6	1,1	-0,6	0,28
180	-1,2	-0,7	2,5	-0,5	1,1	1,9	-0,7	2,4	2,3	-0,2	0,69

Tabel A17. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 1450000

Sudut	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
0	2,7	-1,5	-0,2	0	-1,1	2,7	3,1	-2,1	3,1	-0,2	0,65
10	3,2	7,2	-1,8	5,9	3	3,3	-0,2	4,1	6,1	4,8	3,56
20	6,9	6,8	8,9	6,9	5,9	6,2	8,4	7	6,1	6,8	6,99
30	8	8	7,6	8	7,5	8,6	8	7,7	8,2	7,7	7,93
40	5,3	5,6	6,4	6,1	4,9	5	6	5,5	5,7	7,5	5,8
50	3,7	5,9	3,9	5,3	5,8	4,3	5,8	5	5,1	4,8	4,96
60	4,2	3,5	3,5	3,3	3	2,7	2,6	3,3	3,1	3,4	3,26
70	2,5	3,5	3,1	3	2,8	3	1,9	3	-0,2	2,9	2,55
80	1,1	-	2,2	2,5	2,3	-	2,3	-1	2,8	1,8	1,23

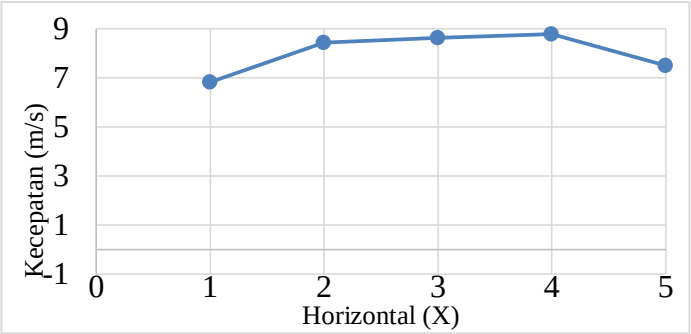
		1,1				0,6					
90	-0,1	-1,1	1,3	1,3	0	0	-1,3	-0,8	1,7	1,3	0,23
100	1,3	0	0,8	-0,2	-0,1	-0,8	-0,3	-1,1	1,6	0,7	0,19
110	1,5	-1,2	-2,3	0,7	0,9	0	-0,3	1	1	-0,9	0,04
120	-1,5	0,8	-1,5	-1	-0,2	-1,5	1,6	1,7	1,4	-0,3	-0,05
130	0,3	-1,7	-1,9	-1,2	0,2	-1,1	-0,4	-0,3	-0,4	0,3	-0,62
140	-0,2	-2,9	0,8	-2,1	-1,1	-1,1	-2,4	-0,7	-2,2	-0,2	-1,21
150	-1,1	-0,5	-2,7	-2,6	-1,5	-1,3	-2,4	-3,4	-2,7	-1,4	-1,96
160	-2,2	-1,5	-2	-1,4	-1,2	-2,9	-1,3	-0,6	-1,3	-2,1	-1,65
170	1	-1	1,8	3,1	-0,2	-0,7	-0,5	-1,1	2,5	-1,6	0,33
180	-0,5	2,9	-0,6	-0,4	-0,7	-0,5	-0,4	2,7	2	2	0,65

Tabel A18. Data Torsi Statis Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu pada *Reynolds Number* = 1780000

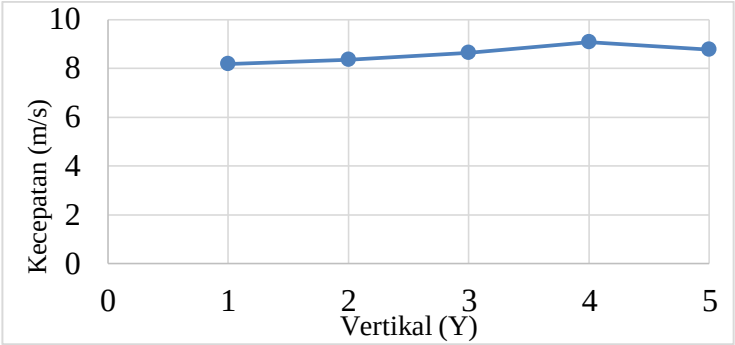
Titik	Kecepatan (m/s)	
	Horizontal (X)	Vertikal (Y)
1.	6,82	8,18
2.	8,43	8,36
3.	8,64	8,64
4.	8,78	9,07
5.	7,49	8,76
Rata-rata	8,032	8,602

		Horizontal				
		1	2	3	4	5
Vertikal	A	A1	A2	A3	A4	A5
	B	B1	B2	B3	B4	B5
	C	C1	C2	C3	C4	C5
	D	D1	D2	D3	D4	D5
	E	E1	E2	E3	E4	E5

Tabel A19. Data *Uniformity*



Gambar A1. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Horizontal (X)



Gambar A2. Grafik Keseragaman Aliran pada posisi Vertikal (Y)

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BIODATA PENULIS

Clarissa Edwina Kawi dilahirkan di Surabaya tanggal 27 Juli 1996, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis memulai pendidikan formalnya pada tahun 2000 di TK IPEKA di Balikpapan. Kemudian melanjutkan pendidikan di 4 SD yang berbeda kota dikarenakan sering pindah kota mengikuti orang tua. Penulis tamat sekolah dasar di SD YPPI I Surabaya(2008), SMP Petra 3 Surabaya (2008-2011) dan SMA Santa Maria Surabaya (2011-2014). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA, penulis melanjutkan pendidikan ke tahap perguruan tinggi. Melalui jalur SNMPTN di S-1 Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Selama empat tahun perkuliahan, selain kegiatan akademis, penulis juga aktif dalam organisasi dan kepanitiaan. Penulis pernah menjadi asisten praktikum mata kuliah Mekanika Fluida dan Mesin Fluida Incompressible. Dalam organisasi kemahasiswaan, di tahun kedua penulis, penulis aktif sebagai staf Mesin ITS Autosport. Pada tahun ketiganya, penulis melanjutkan kegiatan organisasinya menjadi Administrasi Umum di Mesin ITS Autosport.

Sebagai bentuk aplikatif dari ilmu yang didapat semasa perkuliahan, penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktek di GMF AeroAsia selama satu bulan.

Untuk saran dan kritik terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email clarissa.edwina@yahoo.co.id