



**TESIS - TM142501**

**STUDI KARAKTERISTIK KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN  
SILINDER PENGGANGGU TIPE I-53<sup>0</sup> SEBAGAI KONTROL PASIF ALIRAN  
DIDEPAN SISI RETURNING BLADE**

**Nur Fatowil Aulia**

**NRP. 02111650020007**

**DOSEN PEMBIMBING:**

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

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**



**TESIS - TM142501**

**STUDI KARAKTERISTIK KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN  
SILINDER PENGGANGGU TIPE I-53<sup>0</sup> SEBAGAI KONTROL PASIF ALIRAN  
DIDEPAN SISI RETURNING BLADE**

**Nur Fatowil Aulia  
NRP. 02111650020007**

**DOSEN PEMBIMBING:  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2018**



**TESIS - TM142501**

**CHARACTERISTIC STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE  
WITH CYLINDER DISTURBANCE TYPE I-53° AS PASSIVE FLOW CONTROL  
OF THE RETURNING BLADE SIDE**

**Nur Fatowil Aulia  
NRP. 02111650020007**

**AD VISOR :  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

**PROGRAM MAGISTER  
ENERGY CONVERSION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ENGINEERING MECHANICS  
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUT OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2018**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

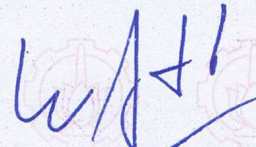
oleh:  
Nur Fatowil Aulia  
NRP. 02111650020007

Tanggal Ujian : 25 Juli 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh :

  
1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)  
NIP. 196001291987011001


  
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D (Penguji)  
NIP. 196412281990031002

  
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT (Penguji)  
NIP. 197104051997021001

  
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT (Penguji)  
NIP. 196202161995121001



Dekan Fakultas Teknologi Industri

  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, ST, MT

NIP. 196905071995121001

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

**STUDI KARAKTERISTIK KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN  
SILINDER PENGGANGGU TIPE I-53° SEBAGAI KONTROL PASIF ALIRAN  
DIDEPAN SISI RETURNING BLADE**

**Nama Mahasiswa : Nur Fatowil Aulia**  
**Nrp : 02111650020007**  
**Jurusan : Teknik Mesin FTI – ITS**  
**Bidang : Rekayasa Konversi Energi**  
**Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA**

***Abstrak***

*Turbin angin Savonius memiliki banyak kelebihan dibanding dengan jenis turbin yang lain karena konstruksinya lebih sederhana dan lebih murah. Namun turbin angin jenis ini memiliki efisiensi paling rendah dibandingkan dengan tipe turbin angin lainnya. Oleh karena itu berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja turbin Savonius. Salah satu upaya yang dilakukan untuk meningkatkan performa kinerja turbin Savonius pada penelitian ini dengan menempatkan pengganggu berupa silinder sirkular tipe-I dengan sudut iris 53° di depan sudu returning blade.*

*Studi kasus ini dilakukan pada bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (berdasarkan panjang karakteristik  $d=2D-e$  dan kecepatan aliran ( $U$ ) berasal dari fan yang digunakan). Diameter Savonius ( $D_s=258.4$ ), Jarak penempatan pengganggu ( $S/D$ ) divariasikan pada rentang  $1.2 \leq S/D \leq 2.2$  . Diameter silinder I-53° relatif terhadap diameter sudu turbin ( $d/D$ ) = 0.5 . Pada eksperimen torsi dinamis diukur dengan menggunakan brake dynamometer. Simulasi numerik pada salah satu  $S/D$  dilakukan dengan menggunakan model K-epsilon realizable, untuk dibandingkan dengan hasil eksperimen.*

*Hasil Eksperimen yang dilakukan menunjukkan bahwa pada Reynolds =  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  , Power Coefficient turbin dengan pengganggu tipe I-53° pada posisi  $S/D=1.4$  memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin konvensional. Dimana pada posisi tersebut dengan pengganggu tipe I-53° dapat meningkatkan nilai  $CP_{max}$  berturut-turut hingga 27,34%; 21,41% dan 22,94% dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu. Hasil simulasi numerik pada turbin dengan pengganggu posisi  $S/D$  menunjukkan peningkatan sebesar 16,4% dengan Nilai  $CP_{Max}$  mencapai 20.4% dengan nilai rata-rata persentase error sebesar 4.28% pada TSR = 0.4 ; 0.6; 0.8; 1.0 jika dibandingkan dengan hasil eksperimen.*

***Kata Kunci : Turbin Savonius, Drag, Pengganggu tipe-I, Bilangan Reynolds, Torsi, Tip Speed Ratio, Power Coefficient, Moment Coefficient***

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

# CHARACTERISTIC STUDY OF SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE WITH CYLINDER DISTURBANCE TYPE I-53° AS PASSIVE FLOW CONTROL OF THE RETURNING BLADE SIDE

**Nama Mahasiswa** : Nur Fatowil Aulia  
**Nrp** : 02111650020007  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI – ITS  
**Bidang** : Rekayasa Konversi Energi  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

## *Abstract*

*Savonius wind turbine has many advantages compared to other types of turbines because the construction is simpler and cheaper. However, this type of wind turbine has the lowest efficiency compared to other types of wind turbines. Therefore various studies have been conducted to improve the performance of the turbine of Savonius. One attempt was made to improve the performance of Savonius turbine in this study by placing circular cylinder type I-53° with in front of the returning blade .*

*This case study was conducted on the Reynolds number =  $9 \times 10^4$ ;  $12.7 \times 10^4$ ;  $16.3 \times 10^4$  (based on the characteristic length  $d = 2D - e$  and flow velocity ( $U$ ) derived from the fan used). The Diameter Savonius ( $D_s = 258.4$ ), distance of placement ( $S / D$ ) is varied in the range  $1.2 \leq S / D \leq 2.2$ . The diameter of the cylinder I-53° relative to the diameter of the turbine blade ( $d / D$ ) = 0.5. In dynamic torque experiments measured using a brake dynamometer. The numerical simulation in one of the  $S / D$  is done by using the realizable K-epsilon model, to be compared with the experimental results.*

*Experimental results show that in Reynolds =  $9 \times 10^4$ ;  $12.7 \times 10^4$ ;  $16.3 \times 10^4$ , Power Coefficient turbine with type I-53° bully at position  $S/D = 1.4$  has bigger value compared with conventional wind turbine. Where in that position with type I-53° bully can increase the value of  $CP_{max}$  successively up to 27,34%; 21.41% and 22.94% compared to turbines without intruders. The result of numerical simulation on turbine with  $S/D$  position hamper showed an increase of 16,4% with  $CP_{Max}$  value reached 20.4% with percentage error average value equal to 4.28% at  $TSR = 0.4$ ; 0.6; 0.8; 1.0 when compared to the experimental results.*

**Kata Kunci** : Turbin Savonius, Drag, Pengganggu tipe-I, Bilangan Reynolds, Torsi, Tip Speed Ratio, Power Coefficient, Moment Coefficient



*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur pelunisi panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan, yang berjudul : **“STUDI KARAKTERISTIK KINERJA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN SILINDER PENGGANGGU TIPE I-53<sup>0</sup> SEBAGAI KONTROL PASIF ALIRAN DIDEPAN SISI RETURNING BLADE ”** . Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan Tugas Akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing dan juga sekretaris jurusan teknik mesin yang telah memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis sehingga penulis bisa menyelesaikan thesis ini.
2. Bapak Ir Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir Prabowo, M.Eng dan Bapak Dr. Eng, Unggul Wasiwitono, ST, M. Eng, selaku ketua dan sekretaris Program Pasca Sarjana Teknik Mesin ITS yang memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan studinya.
4. Tim Dosen penguji penulis Bapak Prof. Ir. Sutardi M.Eng., PhD , Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. , Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. yang telah bersedia meluangkan waktu, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
5. Kedua orang tua ( Bp. Suhardi dan Ibu Erna) dan Adik tercinta (Anisa) beserta keluarga yang telah mendukung baik materi maupun spiritual hingga
6. Rekan satu Tim Savonius Pasca Sarjana kakak Gunawan Sakti dan Kakak Adi Chandra Wijaya yang selalu memberikan dukungan, semangat serta kerja samanya dalam menyelesaikan tesis ini.
7. Rekan satu Tim Savonius dari program Sarjana yang selalu memberikan dukungan, semangat serta kerja samanya dalam menyelesaikan tesis ini.

8. Sahabat terbaik penulis Happi, Dhofir, Rahmat dan Ian yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam menyelesaikan Tesis.
9. Rekan-rekan mahasiswa jurusan teknik mesin.
10. Teman-teman Pasca Sarjana Teknik Mesin 2015-2016, Teman-teman dari Bapak-bapak Mahasiswa S3 semuanya terima kasih atas bantuan dan dukungannya
11. Seluruh Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin ITS.
12. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.
13. Semua pihak yang namanya tidak disebutkan penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tesis ini. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan. .

Surabaya, Agustus 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xv</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xix</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>7</b>
2.1 Turbin Angin .....	7
2.1.1 Turbin Angin Savonius.....	7
2.1.2 Bilangan Rernolds .....	8
2.1.3 Drag Coefficient ( $C_D$ ) .....	9
2.1.4 Perhitungan Torsi dan Moment Coeffisient ( $C_m$ ).....	10
2.1.5 Perhitungan Daya Turbin.....	11
2.1.6 Tip Speed Ratio (TSR ( $\lambda$ )).....	12
2.1.7 Power Coeffisien (CP).....	13
2.2 Literatur Review .....	14
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	<b>31</b>
3.1 Skema Parameter Ukur .....	31
3.2 Analisa Dimensi.....	31
3.3 Metode Eksperimen .....	34
3.3 1 Peralatan Eksperimen .....	35
3.3.2Prosedur Eksperimen .....	41
3.4 Metode Numerik .....	42
3.4.1 Geometri dan Kondisi Batas .....	42

3.4.2 Meshing .....	43
3.4.3 Time Step.....	44
3.4.4 Prosedur Numerik .....	45
3.4 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	45
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>49</b>
4.1 Contoh Perhitungan .....	49
4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds.....	49
4.1.2 Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> .....	50
4.1.3 Perhitungan Bilangan Torsi Dinamis .....	51
4.1.4 Perhitungan <i>Power Coefficient</i> .....	51
4.1.5 Perhitungan Moment Coefficient.....	52
4.2 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa pengganggu dengan Variasi Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ , $12,7 \times 10^4$ dan $16,3 \times 10^4$ .....	53
4.2.1 Analisa Putaran Turbin <i>Savonius</i> terhadap Bilangan <i>Reynolds</i> .....	53
4.2.2 Analisa <i>Power Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> .....	54
4.2.3 Analisa <i>Moment Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> .....	55
4.2.3 Analisa Torsi Statis Terhadap Posisi Sudut Sudu Turbin.....	56
4.3 Analisa Perfoma Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu I-53° .....	57
4.3.1 <i>Power Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi S/D.....	58
4.3.2 Analisa <i>Moment Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi S/D .....	64
4.3.3 Analisa Torsi Statis pada Turbin Angin Savonius dengan Silinder Penggangu dengan Variasi S/D .....	68
4.4 Analisa Perfoma Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkuler .....	73
4.4.1 <i>Power Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi S/D.....	73
4.4.2 Analisa <i>Moment Coefficient</i> terhadap <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi S/D .....	78
4.4.3 Analisa Torsi Statis pada Turbin Angin Savonius dengan Silinder Penggangu dengan Variasi S/D .....	80
4.5 Perbandingan <i>Power Coefficient</i> antara pengganggu (Silinder Sirkular dan Silinder Tipe I-53° ) dengan tanpa pengganggu pada S/D = 1,4 pada Re = 127000 .....	84

4.6 Simulasi Numerik pada Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu .....	86
4.6.1 Validasi .....	86
4.6.2 Perbandingan Hasil Numerik dan Hasil Eksperimen .....	87
4.6.3 Karakteristik Aliran pada Savonius .....	89
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>93</b>
5.1 Kesimpulan .....	93
5.2 Saran .....	93
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>95</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>96</b>
<b>RIWAYAT PENULIS</b>	

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema turbin savonius (Altan et al [7]).....	8
Gambar 2.2 koefisien daya sebagai fungsi dari TSR pada berbagai jenis turbin (Al-Shemmeri, 2010) .....	14
Gambar 2.3 Benda uji tipe D dan I (Aiba dan Watanabe et al [2]) .....	15
Gambar 2.4 Hasil $C_D$ dan $C_p$ pada $Re = 3.1 \times 10^4$ (Aiba dan Watanabe et al [2]) .....	15
Gambar 2.5 Skema Model (Tamotsu and Yoshihiko [2]).....	16
Gambar 2.6 Grafik <i>drag coefficient</i> pada <i>bluff body</i> tipe-D dan tipe-I (Tamotsu and Yoshihiko [2]).....	17
Gambar 2.7 (a) Pola permukaan oil-flow pada $Re = 5.33 \times 10^4$ dan (b) visualisasi dari wake untuk 3 jenis silinder pada $Re = 2.67 \times 10^4$ (Tamotsu and Yoshihiko [2]) .....	17
Gambar 2.8 Klasifikasi dari pola aliran (Tamotsu and Yoshihiko [2]).....	18
Gambar 2.9 Grafik bilangan strauhal dan koefisien drag (Tsutsui dan Igarashi [3]) .....	19
Gambar 2.10 <i>Separation point</i> (Tsutsui dan Igarashi [3]).....	20
Gambar 2.11 skema benda uji eksperimen (Lee dan Park [4]) .....	20
Gambar 2.12 Pengaruh diameter silinder pengganggu terhadap drag pada silinder utama (Lee dan Park [4]).....	21
Gambar 2.13 Pengaruh posisi jarak $L/D$ terhadap drag pada silinder utama (Lee dan Park [4]).....	21
Gambar 2.14 Skema eksperimen dengan penghalang tipe I (Triyogi et al [5]) ..	22
Gambar 2.15 Grafik $C_D/C_{D0}$ terhadap sudut iris pengganggu tipe I (Triyogi et al [5]) .....	22
Gambar 2.16 Distribusi koefisien <i>pressure</i> ( $C_p$ ) pada aliran berpengganggu tipe-I dengan berbagai sudut iris (Triyogi et al [5]) .....	23
Gambar 2.17 Skema penempatan plat pengganggu <i>two blade</i> dan <i>three blade</i> pada sisi returning blade (Mohamed et al [6]) .....	24
Gambar 2.18 Grafik <i>Coefficient Power</i> ( $C_p$ ) dua blade dan tiga blade rotor terhadap <i>speed ratio</i> dengan persentase relatif peningkatan antara savonius tanpa pengganggu dan savonius dengan pengganggu (Mohamed et al [6]) .....	24



Gambar 2.19 Skema tes rig (Mahmoud et al [7]) .....	25
Gambar 2.20 Hasil power mekanik dari variasi dua sudu, tiga sudu dan empat sudu. (Mahmoud et al [7]) .....	25
Gambar 2.21 Hasil power mekanik dari savonius dengan <i>end plates</i> dan tanpa <i>end plates</i> . (Mahmoud et al [7]) .....	26
Gambar 2.22 Turbin angin helikal savonius dengan berbagai bentuk dan ukuran <i>end plates</i> (Jeon et al [8]) .....	27
Gambar 2.23 Grafik koefisien power ( $C_p$ ) maksimum terhadap ratio endplate ( $A_E/A_C$ ) dan Perbandingan TSR terhadap koefisien power ( $C_p$ ) (Jeon et al [8]).....	27
Gambar 2.24 Bentuk blade dengan berbeda <i>Fullness</i> Tian et al [9] .....	28
Gambar 2.25 Domain komputasi dan Kondisi batas Tian et al [9] .....	28
.....	
Gambar 2.26 Koefisien Power ( $C_p$ ) fungsi terhadap Tsr ( $\lambda$ ) dengan berbagai <i>blade fullness</i> Tian et al [9] .....	29
Gambar 3.1 Skema turbin <i>Savonius</i> .....	31
Gambar 3.2 Skema pengujian turbin <i>savonius</i> .....	34
Gambar 3.3 Blower .....	35
Gambar 3.4 a). Tampak atas <i>Savonius</i> b). Tampak samping <i>Savonius</i> .....	36
Gambar 3.5 Alat ukur rotasi <i>tachometer</i> .....	37
Gambar 3.6 Alat ukur kecepatan angin <i>anemometer</i> .....	37
Gambar 3.7 Alat pengukur torsi statis .....	38
Gambar 3.8 Skema Brake Dynamometer .....	39
Gambar 3.9 Timbangan Gantung /Pegas Nagata .....	40
Gambar 3.10 Anak Timbangan .....	40
Gambar 3.11 Benang nylon LAZER .....	31
Gambar 3.12 Geometri dan kondisi batas pemodelan <i>Savonius</i> .....	43
Gambar 3.13 Meshing ' <i>unstructured</i> ' dengan tipe <i>Quadratic Pave</i> .....	44
Gambar 3.14 Diagram alir penelitian Eksperimen .....	46
Gambar 3.15 Diagram alir penelitian simulasi numerik.....	47
Gambar 4.1 Putaran Poros sebagai fungsi dari Bilangan <i>Reynolds</i> .....	53
Gambar 4.2 Evolusi <i>Power Coefficient</i> turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> .....	54

Gambar 4.3 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> .....	55
Gambar 4.4 Evolusi Torsi Statis turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari Posisi Sudut Sudu.....	56
Gambar 4.5 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	68
Gambar 4.6 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	60
Gambar 4.7 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds $16,3 \times 10^4$ .....	62
Gambar 4.8 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	64
Gambar 4.9 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	65
Gambar 4.10 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds $16,3 \times 10^4$ .....	67
Gambar 4.11 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisis sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	68
Gambar 4.12 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisis sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	70
Gambar 4.13 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisis sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds $16,3 \times 10^4$ .....	72
Gambar 4.14 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	74
Gambar 4.15 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	76
Gambar 4.16 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	78
Gambar 4.17 Evolusi <i>Moment Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	79
Gambar 4.18 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ .....	81

Gambar 4.19 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$ .....	83
Gambar 4.20 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> antara tanpa pengganggu dan menggunakan pengganggu pada bilangan <i>Reynolds</i> $12,7 \times 10^4$ pada $S/D = 1,4$ .....	85
Gambar 4.21 Validasi Nilai <i>Power Coefficient</i> tanpa pengganggu dengan peneliti sebelumnya dengan mesh yang berbeda.....	87
Gambar 4.22 Evolusi <i>Power Coefficient</i> sebagai fungsi dari <i>Tip Speed Ratio</i> Eksperimen dan Numerik .....	75
Gambar 4.23 Kontur Tekanan posisi sudu $30^\circ$ dan $150^\circ$ (a). tanpa pengganggu $30^\circ$ (b) dengan pengganggu I- $53^\circ$ pada posisi $S/D = 1.4$ .....	90
Gambar 4.24 Streamline Aliran pada posisi sudu $150^\circ$ (a). Savonius tanpa pengganggu (b) Savonius dengan pengganggu.....	91

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai koefisien drag (CD) untuk berbagai bentuk benda pada $Re \geq 10^3$ (Hoerner, S. F., Fluid-Dynamic Drag, 2nd ed 1965).....	10
Tabel 2.2 Geometri turbin angin helikal savonius.....	26
Tabel 2.3 Detail dari <i>end plates</i> turbin angin helikal savonius pada diameter 50 mm .....	26
Tabel 3.1 <i>Spesifikasi Blower</i> .....	35
Tabel 3.2 Perencanaan Geometri Turbin <i>Savonius</i> .....	36
Tabel 3.3 <i>Spesifikasi Tachometer</i> .....	37
Tabel 3.4 <i>Spesifikasi Anemometer</i> .....	38
Tabel 3.5 <i>Spesifikasi Torsi meter</i> .....	39
Tabel 3.6 <i>Spesifikasi timbangan pegas NAGATA</i> .....	40
Tabel 3.7 <i>Parameter Kondisi Batas</i> .....	43
Tabel 3.8 <i>Parameter Model Numerik</i> .....	43
Tabel 3.9 <i>Perhitungan time step</i> .....	44
Tabel 4.1 Perubahan Nilai $CP_{max}$ terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $9 \times 10^4$ .....	59
Tabel 4.2 Perubahan Nilai $CP_{max}$ terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $12,7 \times 10^4$ .....	61
Tabel 4.3 Perubahan Nilai $CP_{max}$ terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $16,3 \times 10^4$ .....	63
Tabel 4.4 Perubahan Nilai $CP_{max}$ terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $9 \times 10^4$ .....	75
Tabel 4.5 Perubahan Nilai $CP_{max}$ terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $12,7 \times 10^4$ .....	77
Tabel 4.6 Perubahan Nilai $CP_{max}$ pada S/D = 1,4 pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds = $12,7 \times 10^4$ .....	85
Tabel 4.7 Hasil <i>grid independency test</i> .....	86
Tabel 4.8 Persentase Error antara Eksperimen dan Numerik pada S/D = 1,4.....	88

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR SIMBOL

A	Cross sectional area ( $m^2$ )
b	diameter poros (m)
$C_D$	Koefisien <i>drag</i>
$C_m$	<i>Coefficient of Moment</i>
$CoP$	<i>Coefficient of Power</i>
$CoP_0$	<i>Coefficient of Power</i> turbin tanpa silinder pengganggu
$C_p$	Koefisien <i>pressure</i>
D	Diameter sudu Turbin Savonius (m)
d	Diameter silinder sirkular pengganggu (m)
$D_0$	Diameter <i>end plates</i> (m)
$E_k$	Energi kinetik (Joule)
$F_D$	Gaya <i>drag</i> (N)
g	gaya gravitasi ( $m/s^2$ )
H	Tinggi turbin angin Savonius (m)
h	tinggi silinder sirkular pengganggu (m)
n	Putaran turbin (rpm)
$n_0$	Putaran turbin tanpa silinder pengganggu (rpm)
$P_W$	Daya angin (Watt)
$P_T$	Daya aktual turbin (Watt)
P	Tekanan udara saat penelitian dilakukan ( $N/m^2$ )
R	Konstanta spesifik gas ( $J/kg K$ )
R	Jari-jari turbin (m)
r	Jari-jari silinder pada poros turbin (m)
Re	Bilangan Reynolds
S	jarak antara pusat silinder pengganggu dengan pusat <i>returning blade</i> (m)
T	Temperatur udara saat penelitian dilakukan ( $^{\circ}K$ )
T	Torsi statis dari putaran poros (N.cm)
$T_0$	Torsi statis turbin tanpa silinder pengganggu (N.cm)
t	Tebal <i>end plates</i> (m)
$U_{\infty}$	Kecepatan aliran <i>free stream</i> udara (m/s)
y	Posisi silinder pengganggu dalam arah tegak lurus arah datang angin (m)
$\rho$	Massa jenis udara ( $kg/m^3$ )
$\mu$	Viskositas udara ( $Ns/m^2$ )
$\tau$	Torsi Dinamis yang dihasilkan turbin (N-m)
$\omega$	Kecepatan angular turbin (rad/s)
$\lambda$	<i>Tip Speed Ratio</i>

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada era globalisasi saat ini kebutuhan energi terus mengalami peningkatan yang dipengaruhi oleh pertumbuhan ekonomi, penduduk, peningkatan kebutuhan dan harga energi. Ketersediaan sumber daya energi menjadi isu dunia yang dihadapkan dengan krisis energi saat ini. Indonesia merupakan pengguna energi terbesar lebih dari 36% penggunaan energi primer di Asia Tenggara (IEA, 2017). Konsumsi energi final selama tahun 2010-2015 meningkat relatif terbatas sekitar 1.3% pertahun. Energi fosil merupakan salah satu dari sumber daya energi seperti gas, batu bara dan minyak bumi. Cadangan energi fosil untuk minyak bumi Indonesia terus menurun yang akan diperkirakan habis dalam kurun waktu 11 tahun lagi. Cadangan potensial gas bumi mengalami sedikit peningkatan, tetapi cadangan terus menurun yang diperkirakan akan habis 36 tahun lagi. Sumber daya batubara dalam kurun 4 tahun terakhir mengalami sedikit peningkatan, sedangkan cadangannya mengalami penurunan akibat produksi batubara untuk pemenuhan konsumsi domestik dan ekspor. Diperkirakan dengan produksi saat ini, cadangan batubara akan habis dalam 70 tahun lagi jika tidak ditemukan cadangan baru (Outlook Energi Indonesia 2017). Melihat semakin menurunnya cadangan sumber daya energi fosil yang tidak dapat diperbaharui. Maka perlu mencari alternatif yang mana Indonesia memiliki potensi sumber daya energi baru terbarukan yang cukup besar dan beragam, salah satunya yang belum dimanfaatkan secara maksimal energi angin.

Energi angin dapat dimanfaatkan menjadi energi listrik, namun pemanfaatannya di Indonesia masih belum maksimal. Kecepatan angin di Indonesia dikategorikan rendah hingga mencapai 7 m/s. Terdapat beberapa jenis turbin angin salah satunya yaitu turbin angin *Savonius* yang relatif cocok untuk kecepatan angin relatif rendah. Turbin angin *Savonius* atau disebut dengan *S-Rotor* ditemukan 1922 oleh *Sigurd J. Savonius* yang berasal dari Finlandia. Sistem kerja dari turbin *Savonius* ini dengan memanfaatkan perbedaan gaya drag yang dihasilkan oleh



masing-masing sudunya. Sudu pada *Savonius* dibedakan menjadi dua yaitu *advancing* blade yang berbentuk cekung dan *returning* blade yang berbentuk cembung. Perbedaan gaya drag yang dihasilkan oleh sudu *Savonius* akan menghasilkan torsi. Semakin besar perbedaan gaya drag yang dihasilkan maka daya yang didapatkan akan semakin besar. Salah satu upaya yang dilakukan untuk meningkatkan besar perbedaan gaya drag yang berpengaruh terhadap efisiensi turbin *Savonius* dengan memperkecil gaya drag pada sisi *returning* blade. Turbin *Savonius* adalah turbin yang memiliki efisiensi paling rendah diantara turbin tipe lainnya. Oleh karena itu, banyak peneliti melakukan penelitian dalam upaya untuk meningkatkan kinerja turbin *Savonius*.

Terdapat beberapa penelitian terkait dengan drag dan dalam mengoptimalkan turbin *Savonius*. **Aiba dan Watanabe [1]** melakukan studi eksperimen untuk mengetahui karakteristik aliran pada sebuah *bluff body* dari sebuah sirkular silinder yang dipotong tipe D dan I dengan sudut iris yang berbeda, menunjukkan bahwa dengan sudut iris  $53^0$  untuk kedua tipe menunjukkan hasil pada  $Re > 2.5 \times 10^4$  nilai  $C_D$  itu sangatlah kecil hanya sekitar 50 % apabila dibandingkan dengan menggunakan model silinder sirkular. **Tamotsu and Yoshihiko [2]** melakukan studi eksperimen untuk mengetahui karakteristik aerodinamik pada sebuah *bluff body* dipotong tipe D dan I dengan sudut iris  $50-53^0$  pada  $Re < 2.3 \times 10^4$  terjadi pengurangan lebar daerah *wake* dan pembentukan *vortex* menuju *downstream* yang disertai meningkatnya bilangan strouhal diatas 0.28, Sehingga terjadi kenaikan nilai base pressure coefficient dan nilai Koefisien Drag ( $C_D$ ) berkurang hingga 50% dari nilai pada sirkular silinder. **Tsutsui dan Igarashi [3]** menempatkan pengganggu silinder sirkular pada silinder utama dengan diameter silinder pengganggu, reynolds number dan jarak penempatan yang berbeda sangat mempengaruhi nilai Koefisien Drag ( $C_D$ ) . **Lee dan Park [4]** melakukan hal yang sama didapatkan hasil bahwa pada sebuah aliran fluida dengan penempatan bodi pengganggu dapat menurunkan gaya drag yang diletakkan dibelakangnya disebabkan adanya perubahan *boundary layer* pada aliran fluida yang melewatinya. **Triyogi et al [5]** menempatkan pengganggu silinder sirkular yang dipotong tipe I dengan sudut iris yang berbeda pada silinder utama mendapatkan hasil bahwa pada pengganggu tipe-I dengan sudut

iris  $65^{\circ}$  besarnya pengurangan gaya drag yang dihasilkan jika dibandingkan dengan gaya drag silinder tunggal mencapai 52 %. Karena disebabkan oleh daerah wake pada pengganggu sudut iris tersebut sangat besar sehingga mampu menunda titik separasi.

**Mohamed et al [6]** melakukan studi dengan menempatkan satu buah plat pengganggu dengan sudut  $\beta$  yang berbeda pada turbin Savonius pada sisi returning blade dengan variasi 2 blade rotor dan 3 blade rotor. Hasil yang didapatkan nilai  $C_p$  2 blade rotor lebih baik dari pada 3 blade rotor. **Mahmoud et al [7]** melakukan studi eksperimen pada *savonius single stage* dan *double stage* dengan berbagai jumlah sudu *savonius* yang berbeda. Pengukuran torsi dinamis menggunakan sistem brake dynamometer. **Jeon et al [8]** melakukan studi eksperimen pengaruh dari *end plates* dengan berbagai bentuk dan ukuran pada helikal turbin angin mampu meningkatkan koefisien power ( $C_p$ ) sebesar 36%. **Tian et al [9]** melakukan studi numerik CFD 2-D dengan berbagai variasi bentuk blade savonius didapatkan hasil nilai koefisien power ( $C_p$ ) tertinggi didapatkan pada blade fullness  $n = 1$  yang 10,98 % lebih besar dari turbin savonius konvensional .

Berdasarkan uraian di atas penggunaan silinder sirkular tipe – I dengan sudut iris  $53^{\circ}$  sebagai pengganggu di depan turbin angin Savonius pada *returning blade* belum pernah dilakukan. Maka penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penempatan pengganggu silinder sirkular tipe – I dengan sudut iris  $53^{\circ}$  di depan sudureturning divariasikan  $1.2 \leq S/D \leq 2.2$  dan diameter pengganggu relatif terhadap sudu returning direncanakan  $d/D = 0.5$  . Pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 9 m/s).

## 1.2 Perumusan Masalah

Turbin angin *Savonius* mempunyai dua buah sudu yaitu *advancing* blade yang berbentuk cekung dan *returning* blade yang berbentuk cembung. Turbin angin *Savonius* bergerak dengan adanya perbedaan gaya drag antara sudu *advancing* dan *returning* blade

Pada penelitian ini menggunakan turbin angin *Savonius* dengan diameter sisi returning blade ( $D$ ) = 152.4 mm dan diletakkan silinder pengganggu tipe – I

diameter ( $d$ ) = 76 mm dengan sudut iris  $53^0$  pada sisi *returning blade*. Jarak ( $S/D$ ) antara pusat *returning blade* dan silinder pengganggu tipe – I divariasikan kisaran  $1.2 \leq S/D \leq 2.2$ . Ukuran diameter pengganggu relatif terhadap sudu *returning* direncanakan  $d/D = 0.5$ . Pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$ ;  $12,7 \times 10^4$ ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 9 m/s).

Hipotesa yang akan diambil dalam penelitian ini yaitu:

1. Penempatan pengganggu silinder sirkular tipe-I dengan sudut iris  $53^0$  di depan sisi *returning blade* pada turbin angin *Savonius* diduga : (i) *wake* atau *shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu akan *reattache* pada permukaan sudu *returning* dan mengganggu *boundary layer* pada permukaan ini sehingga transisi *boundary layer* dari laminar menuju turbulen akan cepat terjadi. Hal ini akan menyebabkan titik separasi akan lebih mundur kebelakang sehingga lebar *wake* akan lebih sempit. Akibatnya gaya drag dari sudu *returning* akan menurun. (ii) Dengan menempatkan silinder pengganggu didepan sudu *returning* menyebabkan tekanan didaerah antara silinder pengganggu dan sudu *returning* akan menurun sehingga selisih total antara tekanan daerah didepan dan dibelakang sudu *returning* akan menurun pula, akibatnya *pressure drag* pada sudu *returning* juga akan menurun. (iii) silinder tipe-I dengan sudut iris  $53^0$  diduga sangat berpengaruh jika dibandingkan dengan silinder tidak di-iris dikarenakan silinder di-iris mampu memperkecil drag yang terjadi pada sudu *returning* yang disebabkan karena titik separasi akan lebih mundur kebelakang sehingga lebar *wake* akan lebih sempit. Sehingga dari tiga fenomena tersebut [(i), (ii) dan (iii)] menyebabkan selisih gaya drag antara kedua sudu turbin akan semakin besar. Dengan semakin besarnya selisih gaya drag tersebut, torsi yang dihasilkan turbin akan meningkat, sehingga meningkatkan daya turbin angin *savonius*.
2. Ukuran diameter silinder pengganggu relatif terhadap diameter sudu *returning* diduga juga akan mempengaruhi fenomena aliran pada sudu *returning*. Ukuran diameter silinder yang terlalu kecil diduga kurang efektif dalam mempengaruhi transisi *boundary layer* menuju turbulen, sementara ukuran diameter silinder yang terlalu besar menyebabkan *shear layer* yang

terlepas dari silinder yang besar akan jatuh pada daerah boundary layer yang sudah turbulen sehingga tidak memberi pengaruh yang berarti terhadap penundaan terjadinya separasi pada returning. Namun penggunaan silinder pengganggu yang besar akan diduga akan menyebabkan perbedaan tekanan total antara daerah didepan dan dibelakang sudu returning. Hal ini menyebabkan penurunan pressure drag pada sudu returning yang lebih besar.

3. Variasi jarak ( $S/D$ ) dari pusat *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu tipe – I sudut iris  $53^0$  akan berpengaruh terhadap nilai selisih gaya drag pada kedua sudu *Savonius*. Hal ini dikarenakan semakin dekat posisi jarak dari silinder pengganggu tipe-I dengan sudu *returning blade* akan berpengaruh terhadap kurang efektifnya *boundary layer* menerima gangguan. Sedangkan semakin jauh posisi jarak dari silinder pengganggu tipe-I dengan sudu *returning blade* akan menjadi tidak efektif dalam menurunkan drag sudu returning karena akan seperti dua buah bluff body yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi. Pada jarak  $S/D$  yang divariasikan akan terdapat suatu posisi optimum dimana gangguan menjadi efektif. Sehingga akan diketahui jarak ( $S/D$ ) yang paling efektif untuk memperbesar selisih gaya drag.

### 1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian diberikan beberapa batasan masalah yang akan diteliti sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Batasan masalah sebagai berikut :

1. Fluida kerja adalah udara dengan bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 9 m/s).
2. Aliran fluida udara, aliran satu arah, *uniform* pada sisi *inlet upstream*. Aliran fluida bersifat *Incompressible flow*, *viscous* dan *steady flow*.
3. Turbin savonius yang digunakan memiliki dua sudu blade dengan diameter ( $D$ ) = 152.4 mm dan silinder pengganggu tipe – I dengan sudut iris  $53^0$  dengan diameter ( $d$ ) = 76.2 mm, Ukuran diameter pengganggu relatif terhadap sudu returning direncanakan  $d/D = 0.5$  , Ukuran *end plates* = 320 mm,

4. Variasi jarak ( $S/D$ ) antara pusat *returning blade* dan pusat silinder penggaggu tipe – I dengan sudut iris  $53^0$  kisaran  $1.2 \leq S/D \leq 2.2$  atau sampai titik terjauh *boundary layer returning blade* dan silinder penggaggu tidak efektif dalam menerima gangguan.
5. Kemungkinan terjadi adanya perpindahan panas diabaikan.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah meningkatkan performa turbin *Savonius* dengan penempatan penggaggu silinder sirkular tipe – I dengan sudut iris  $53^0$  di depan sisi *returning blade* dan jarak divariasikan  $1.2 \leq S/D \leq 2.2$  dari pusat *returning blade* dengan pusat silinder sirkular penggaggu tipe – I sudut iris  $53^0$ . Pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 9 m/s). Hal ini dilakukan dengan cara :

1. Mengukur torsi dinamis turbin, Mengukur putaran turbin
2. Menghitung Power *Coefficient*
3. Simulasi numerik dengan menggunakan *software CFD*

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat melakukan Penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan referesi dalam upaya peningkatan pengembangan performa turbin angin *Savonius*
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh adanya silinder penggaggu tipe – I dengan sudut iris  $53^0$  terhadap turbin angin *Savonius*.

Memberikan penjelasan tentang pengaruh adanya jarak ( $S/D$ ) antara pusat *returning blade* turbin angin *savonius* dan pusat silinder penggaggu tipe – I sudut iris  $53^0$

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Turbin Angin**

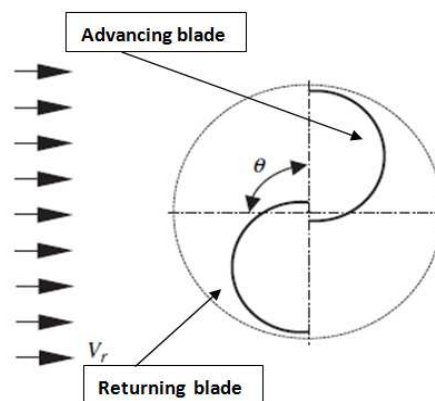
Turbin angin merupakan salah satu jenis sumber daya energi terbarukan yang memanfaatkan energi angin sebagai penggeraknya untuk dijadikan pembangkit energi listrik. Turbin angin memiliki prinsip kerja dengan memanfaatkan gaya *drag* atau gaya *lift* yang ditimbulkan dari aliran angin dan sudu atau blade turbin sehingga menyebabkan poros turbin berputar. Putaran poros turbin dapat digunakan untuk memutar generator listrik sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Jenis turbin angin dibedakan menjadi dua berdasarkan arah sumbu poros yang bekerja yaitu turbin angin sumbu horizontal / *Horizontal Axis wind Turbine* (HAWT) dan turbin angin sumbu vertikal / *Vertical Axis wind Turbine* (VAWT).

*Horizontal Axis wind Turbine* (HAWT) adalah turbin angin yang memiliki poros sejajar dengan arah aliran angin. Prinsip kerja turbin ini lebih memanfaatkan gaya *lift* yang didapatkan dari aliran angin sehingga penggunaan turbin ini cocok untuk daerah yang memiliki kecepatan aliran angin sedang sampai tinggi. Turbin jenis ini memiliki efisiensi yang lebih tinggi tetapi membutuhkan biaya yang lebih mahal dalam instalasinya. *Vertical Axis wind Turbine* (VAWT) adalah turbin angin yang memiliki poros tegak lurus dengan arah alirannya. Prinsip kerja turbin ini lebih memanfaatkan gaya *drag* yang didapatkan dari aliran angin sehingga penggunaan turbin ini cocok untuk daerah yang memiliki kecepatan aliran bervariasi dan bisa digunakan untuk kecepatan aliran rendah. Turbin jenis ini memiliki efisiensi yang lebih rendah dan membutuhkan biaya yang relatif murah dalam instalasinya jika dibandingkan dengan HAWT.

##### **2.1.1 Turbin Angin Savonius**

Turbin angin *Savonius* merupakan salah satu jenis turbin angin sumbu vertikal / *Vertical Axis wind Turbine* (VAWT). Istilah *savonius* diambil dari nama seorang insinyur Finlandia Sigurd J. Savonius yang memperkenalkan pertama kali pada tahun 1922. Turbin jenis ini memiliki sudu berbentuk huruf “S” dan setengah

silinder seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.1 . Turbin ini berputar dengan memanfaatkan selisih gaya *drag* pada sudunya. Pada turbin angin *savonius* sudu turbin diklasifikasikan menjadi dua yaitu sisi cekung (*advancing blade*) dan sisi cembung *returning blade*. Nilai koefisien drag ( $C_D$ ) pada sisi *advancing blade* lebih besar dari pada sisi *returning blade*. Pada penelitian ini untuk memperkecil *drag* pada sisi *returning blade* dilakukan penempatan silinder sirkular tipe – I dengan sudut iris  $53^0$  sebagai pengganggu di depan turbin angin *savonius* sehingga dapat meningkatkan drag ang diterima pada sisi *advancing blade* yang sangat berpengaruh terhadap torsi.



Gambar 2.1 Skema turbin savonius (Altan et al [7])

### 2.1.2 Bilangan Reynolds

Bilangan *reynolds* adalah bilangan tak berdimensi pada aliran *incompressible* untuk mengidentifikasi suatu kondisi aliran, dimana aliran tersebut laminar, transisi dan turbulen. Bilangan *reynolds* merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geser yang ditimbulkan aliran fluida. Bilangan *reynolds* dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} \quad (2.1)$$

Dimana :

$\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  : kecepatan free stream aliran (m/s)

$L$  : panjang karakteristik (m)

$\mu$  : viskositas dinamis fluida (N.s/m<sup>2</sup>)

Pada penelitian ini panjang karakteristik (L) yang digunakan adalah : 2D-b dimana D (diameter turbin (m)), b (diameter overlap (m)). Sehingga persamaan bilangan reynolds menjadi :

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot (2D-b)}{\mu} \quad (2.2)$$

### 2.1.3 Drag Coefficient (C<sub>D</sub>)

Koefisien hambatan (Coefficient Drag) adalah besaran tak berdimensi yang digunakan untuk mengukur drag atau hambatan dari obyek dalam suatu aliran fluida. Gaya drag pada pada suatu aliran fluida yang melintasi benda dipengaruhi oleh kecepatan aliran, viskositas, luasan benda yang menerima gaya dan densitas fluida. Gaya *Drag* merupakan gaya hambat yang disebabkan oleh gangguan aliran udara karena adanya suatu gesekan / tahanan antara suatu permukaan pada suatu bodi. *Drag* merupakan jumlah semua gaya eksternal dalam aliran fluida yang melawan arah gerak objek dan disebabkan oleh aliran udara turbulen di sekitar benda yang melawan gerak maju objek melalui fluida. Berikut persamaan untuk menentukan besar C<sub>D</sub>.

$$C_D = \frac{F_{Drag}}{(\rho V^2 A)/2} \quad (2.3)$$

Dimana:

F<sub>drag</sub> : Gaya Drag ( N )

C<sub>d</sub> : koefisien drag

$\rho$  : masa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

V : kecepatan aliran udara (m/s)

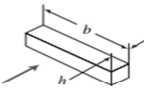




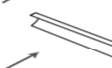

A : luas penampang (m<sup>2</sup>)

Pada penelitian ini turbin *savonius* berbentuk seperti huruf S yang memiliki dua blade yaitu sisi *advancing blade* dan sisi *returning blade* . Besar nilai koefisien



drag ( $C_D$ ) yang dimiliki oleh sisi *advancing blade* lebih besar daripada koefisien drag yang dimiliki sisi *returning blade*. Hal ini sesuai yang dijelaskan oleh (Hoerner,S.F., **Fluid-Dynamic Drag**) pada tabel 2.1. *Advancing blade* turbin yang digunakan serupa dengan benda *C-section (open side facing flow)* dan *returning blade* turbin serupa dengan *C-section (open side facing downstream)*.

Tabel 2.1 Nilai koefisien drag ( $C_D$ ) untuk berbagai bentuk benda pada  $Re \geq 10^3$   
(Hoerner, S. F., Fluid-Dynamic Drag, 2nd ed 1965)

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

#### 2.1.4 Perhitungan Torsi dan *Moment Coefficient* ( $C_m$ )

Torsi merupakan kemampuan puntir yang diberikan suatu benda, sehingga menyebabkan benda tersebut berputar. Pada turbin savonius besar torsi dipengaruhi oleh kecepatan angin dan sudu turbin yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = FD \cdot R \tag{2.4}$$

Sehingga persamaan torsi dapat dirumuskan berdasarkan persamaan 2.2 dan 2.3 menjadi :

$$T = CD \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot R \tag{2.5}$$

$$Cm = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot D \cdot V^2} \tag{2.6}$$

Dimana:

T : Torsi ( N.m )

FD : Gaya drag ( N )

R : Jari-jari sudu turbin savonius (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho$  : masa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

V : kecepatan udara (m/s)

A : luas penampang turbin (m<sup>2</sup>)

Cm : koefisien momen

### 2.1.5 Perhitungan Daya Turbin

Perhitungan daya turbin angin *savonius* dihitung sesuai dengan prinsip kerjanya yaitu perubahan energi angin yang dikonversikan menjadi energi gerak mekanik dan energi mekanik dapat dihitung menjadi daya hasil dari turbin angin *savonius*. Perhitungan daya turbin teoritis dapat dilakukan dengan menghitung besarnya energi kinetik, karena energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin *savonius* dipengaruhi oleh udara dan laju aliran udara. Sehingga besarnya energi kinetik dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Ek = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad (2.7)$$

masa udara yang bergerak dalam satuan waktu dengan kerapatan udara ( $\rho$ ) dapat ditentukan dengan

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (2.8)$$

Berdasarkan persamaan diatas, besarnya daya pada angin ( $P_{\text{angin}}$ ) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$P_{\text{angin}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot V^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.9)$$

Dimana :

Ek : energi kinetik

$\rho$  : masa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

V : kecepatan angin (m/s)

A : luas penampang turbin (m<sup>2</sup>)

Setelah mendapatkan pada angin, pada penelitian ini daya turbin aktual ( $P_{\text{turbin}}$ ) diukur dengan menggunakan *Brake Dynamometer* yang mana alat tersebut menghitung besarnya torsi dinamis yang dihasilkan oleh aliran fluida pada turbin angin *Savonius*. Perhitungan daya aktual turbin ( $P_{\text{turbin}}$ ) turbin savonius dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P_{\text{turbin}} = T \cdot \omega \quad (2.10)$$

Dimana :

$P_{\text{turbin}}$  : daya aktual turbin (watt)

T : Torsi dinamis turbin yang diukur menggunakan *Brake dynamometer* ( N.m )

$\omega$  : kecepatan angular turbin angin ( rad/s )

Torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$T = F \cdot r \quad (2.11)$$

Dimana :

F : gaya yang bekerja pada poros turbin (N)

r : radius *pulley* (m)

Gaya yang bekerja pada poros turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$F = (m-s) \cdot g \quad (2.12)$$

Dimana :

m : masa pemberat (kg)

s : pegas yang terbaca (kg)

g : gravitasi ( $m/s^2$ )

Kecepatan putar turbin angin dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

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

Dimana :

n : rotasi poros permenit (rpm)

### 2.1.6 Tip Speed Ratio ( TSR ( $\lambda$ ))

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan perbandingan antara kecepatan putar blade turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan dengan  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{\omega \cdot D}{2 \cdot V} = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (2.14)$$

Dimana :

$\lambda$  : tip speed ratio

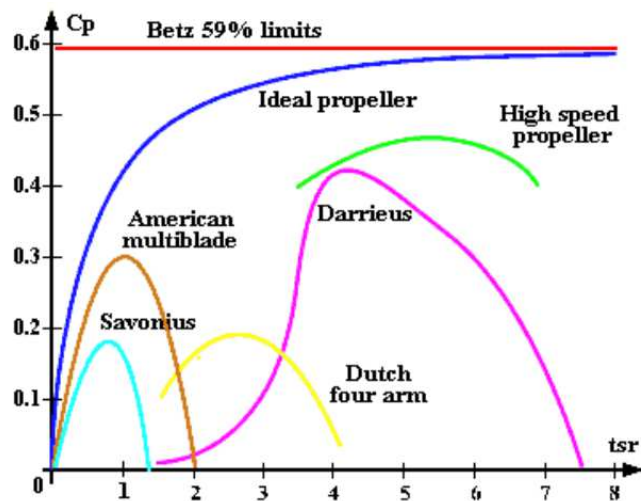
$\omega$  : kecepatan angular turbin angin savonius ( rad/s )

$V$  : kecepatan angin ( m/s )

$D$  : diameter turbin angin ( m )

$R$  : jari-jari turbin angin ( m )

Setiap turbin memiliki karakteristik yang berbeda-beda yang didasarkan pada jenis, tipe dan desain dari turbin angin. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2 koefisien daya sebagai fungsi dari TSR pada berbagai jenis turbin.



Gambar 2.2 koefisien daya sebagai fungsi dari TSR pada berbagai jenis turbin (Al-Shemmeri, 2010)

### 2.1.7 Power Coefficient (CP)

Power Coefficient (CP) merupakan suatu perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin savonius terhadap daya yang dihasilkan oleh aliran udara .

$$CP = \frac{P_{\text{turbin}}}{P_{\text{angin}}} = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3} = \lambda \cdot Cm \quad (2.15)$$

Dimana :

P : daya turbin savonius ( watt )

$\rho$  : masa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

A : luas penampang turbin ( $\text{m}^2$ )

V : kecepatan angin ( m/s )

T : Torsi ( N.m )

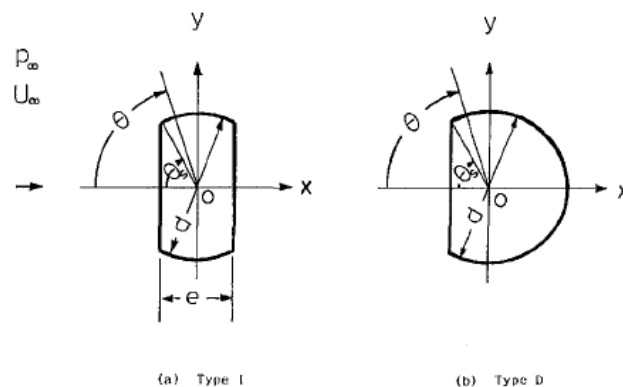
$\lambda$  : tip speed ratio

$\omega$  : kecepatan angular turbin angin savonius ( rad/s )

$Cm$  : koefisien momen

## 2.2 Literatur Review

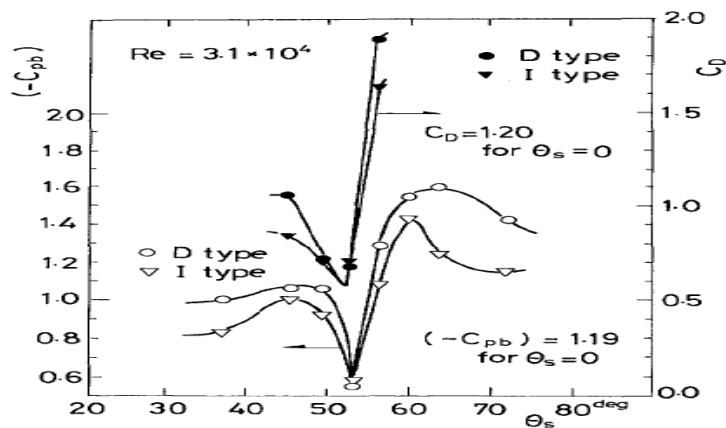
**Aiba dan Watanabe [1]** melakukan studi eksperimen untuk mengetahui karakteristik aliran pada sebuah *bluff body* dari sebuah silinder sirkular yang dipotong tipe D dan I dengan sudut iris yang berbeda ditunjukkan pada gambar 2.3 . Diameter silinder sirkular 20 mm dan 30 mm. Sudut iris pemotongan  $\theta_s = 0, 36.9, 45.6, 49.5, 53, 56.6, 60, 66.4$  dan  $72.5$  derajat untuk semua tipe.



Gambar 2.3 Benda uji tipe D dan I (Aiba dan Watanabe et al [2])

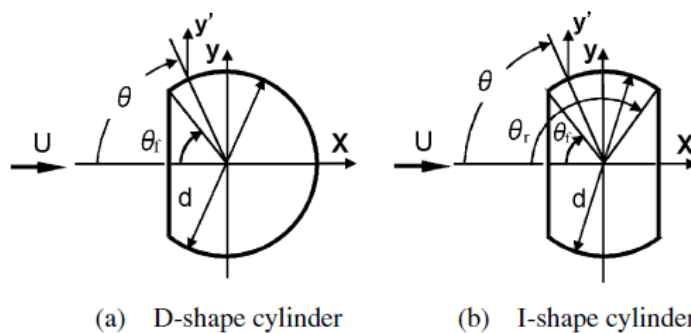
Penelitian dilakukan di dalam *blow-down wind tunnel* dengan tempat *test section* yang memiliki ukuran tinggi sebesar 325 mm dan lebar 225 mm. Pada gambar 2.4 menunjukkan penurunan nilai koefisien drag dan koefisien pressure pada sudut iris  $53^\circ$  untuk tipe D dan I yang lebih kecil. Penelitian ini mendapatkan

kesimpulan bahwa pada model tipe-I dan tipe-D dengan sudut potong  $53^\circ$  pada  $Re > 2.5 \times 10^4$  nilai  $C_D$  itu sangatlah kecil hanya sekitar 50 % apabila dibandingkan dengan menggunakan model silinder sirkular.



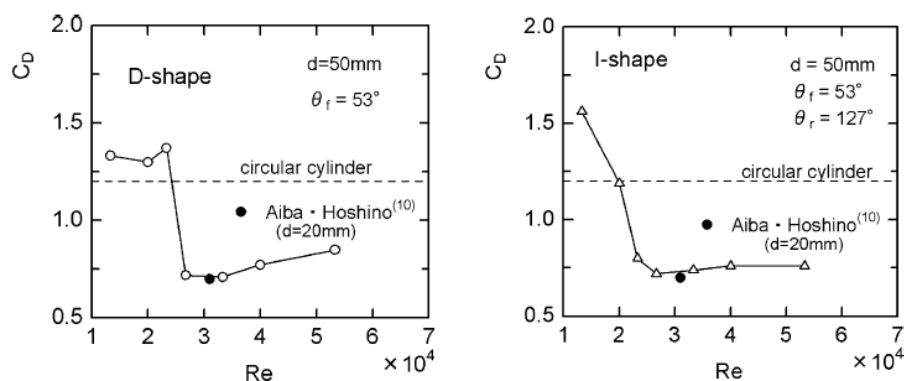
Gambar 2.4 Hasil  $C_D$  dan  $C_p$  pada  $Re = 3.1 \times 10^4$  (Aiba dan Watanabe et al [2])

**Tamotsu and Yoshihiko [2]** melakukan studi eksperimen untuk mengetahui karakteristik aerodinamik untuk mendapatkan sudut potong yang optimal dalam mengurangi gaya drag pada *bluff body* dari sebuah silinder yang dipotong tipe D dan I dengan sudut iris  $50-53^\circ$ . Pada  $Re < 2.3 \times 10^4$  terjadi pengurangan lebar daerah *wake* dan pembentukan *vortex* menuju *downstream*. Hal ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5 (a) Silinder tipe-D dipotong pada bagian depan permukaan dengan sudut potong  $\theta_f$  pada sirkular silinder dan (b) tipe-I yang didapatkan dari pemotongan pada permukaan depan dan belakang dengan sudut  $\theta_f$  dan  $\theta_r$ .



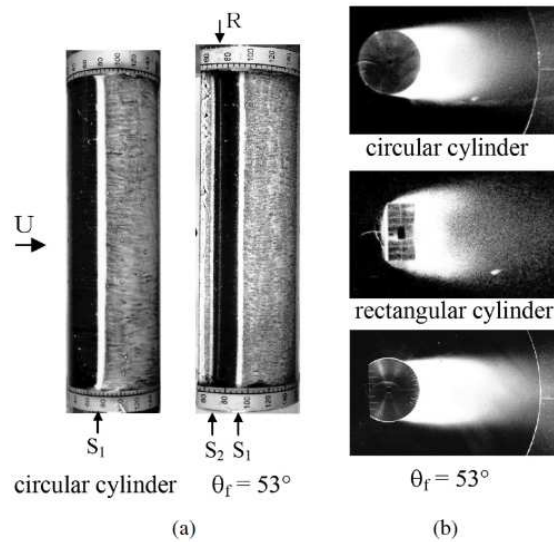
Gambar 2.5 Skema Model (Tamotsu and Yoshihiko [2])

Model silinder tipe-D pada ukuran  $d = 50$  mm dan sudut potong  $\theta_f = 30$  dan  $40^\circ$ , disertai dengan variasi lain yaitu silinder tipe-D dan tipe-I dengan diameter bervariasi pada ukuran 20, 30, 40, 60, 80 mm dan sudut potong sebesar  $\theta_f = 53^\circ$  serta  $\theta_r = 127^\circ$ . Eksperimen dilakukan pada wind tunnel low speed 2-D blowing dengan luas daerah pengukuran sebesar 400 mm x 150 mm dengan panjang 800 mm. Variasi kecepatan ( $U$ ) dari 4 – 24 m/s, dengan kisaran bilangan Reynolds yang ditentukan oleh diameter silinder adalah  $1,1 \times 10^4 \leq Re \leq 8,5 \times 10^4$  dan disertai free stream turbulensi sebesar 0.4 %.



Gambar 2.6 Grafik *drag coefficient* pada *bluff body* tipe-D dan tipe-I (Tamotsu and Yoshihiko [2])

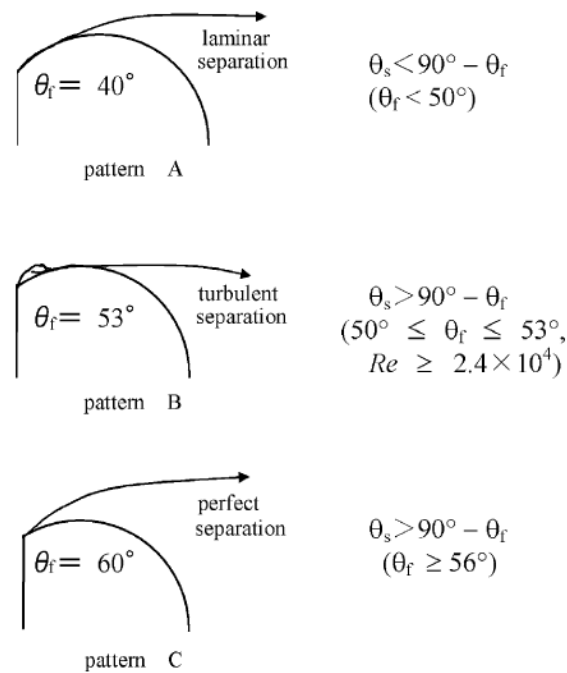
Pada gambar 2.6 Grafik *drag coefficient* pada *bluff body* tipe-D dan tipe-I nilai  $C_D$  tersebut berkurang dari 1.3 menjadi 0.7 pada  $Re = 2.6 \times 10^4$ . Penelitian ini juga melakukan visualisasi aliran untuk meyakinkan adanya transisi turbulen yang terjadi pada silinder tipe-D dengan sudut potong  $\theta_f = 53^\circ$ . Visualisasi menggunakan metode *oil-film* dan *smoke tunnel* yang ditunjukkan oleh gambar 2.15.



Gambar 2.7 (a) Pola permukaan oil-flow pada  $Re = 5.33 \times 10^4$  dan (b) visualisasi dari wake untuk 3 jenis silinder pada  $Re = 2.67 \times 10^4$  (Tamotsu and Yoshihiko [2])

Pada gambar 2.7 (a) menunjukkan pola permukaan dari oil-flow pada bagian busur lingkaran silinder tipe-D dengan  $d = 50$  mm, pada  $Re = 5.33 \times 10^4$ , sedangkan symbol  $R$ ,  $S_1$ , dan  $S_2$  sebagai *reattachment point* dari *shear layer* yang terlepas, *separation point* dari *boundary layer*, serta sebagai *separation point* dari *reserved flow* pada *separation bubble*. Sedangkan pada gambar 2.7 (b) menunjukkan gambar mengenai aliran wake yang didapatkan dengan cara *long exposure* pada 1 detik pada saat  $Re = 2.67 \times 10^4$  dan dilakukan perbandingan *wake* yang terjadi pada circular silinder, rectangular silinder, dan silinder tipe-D. Pada gambar tersebut menunjukkan besar dari wake pada sirkular silinder hampir sama dengan diameter silinder tersebut hal ini terjadi karena adanya separasi laminar pada  $\Theta = 78^\circ$ , sedangkan wake pada rectangular silinder sekitar 1.5x lebih besar dari tinggi silinder tersebut hal ini dikarenakan separasi shear layers yang normal terhadap arah aliran serta terdefleksi oleh aliran utama. Pada silinder tipe-D dengan  $\Theta_f = 53^\circ$ , shear layer terseparasi dari ujung pada permukaan datar di depan dan dilanjutkan dengan reattachment pada sumbu busur dari silinder tersebut di  $\Theta = 72^\circ$ , reattachments diteruskan dan terjadi transisi menjadi turbulent sehingga adanya separasi pada posisi  $\Theta_s = 92^\circ$ .



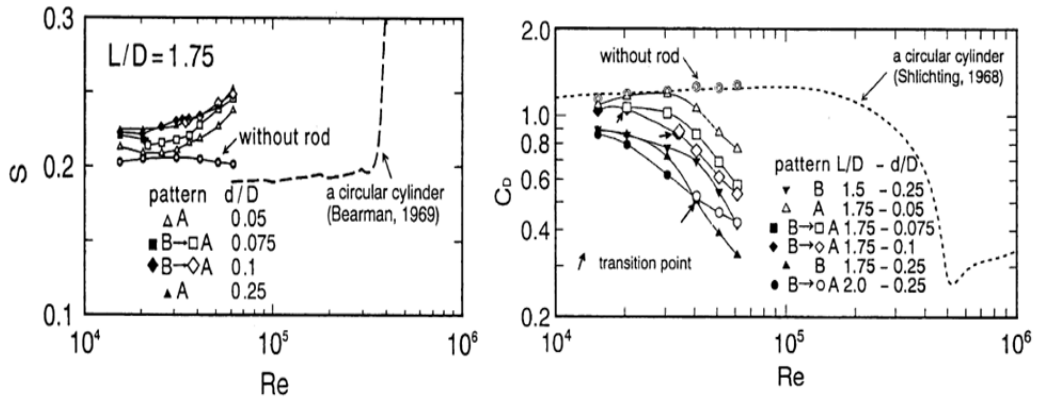


Gambar 2.8 Klasifikasi dari pola aliran (Tamotsu and Yoshihiko [2])

Gambar 2.8 menunjukkan klasifikasi dari pola aliran yang diklasifikasi berdasarkan sudut potong  $\theta_f$ . Pada gambar model aliran tipe A terjadi pada jarak  $30^\circ < \theta_f < 50^\circ$ , *shear layers* akan terseparasi pada bagian ujung depan bagian datar dan akan overlap sepanjang *circular arc* pada silinder. Pada jarak sudut potong  $50^\circ < \theta_f < 53^\circ$  terdapat 2 jenis pola aliran yang muncul yaitu B dan C. Pola aliran B muncul pada saat  $Re > 2.4 \times 10^4$ , dimana *shear layer* yang terlepas dari permukaan potongan akan terjadi *reattachments* pada bagian *circular arc* dan diteruskan dengan terjadinya separasi turbulent. Sedangkan pada saat  $Re < 2.3 \times 10^4$  maka terjadilah *wake* dengan pola C yang disebut sebagai *perfect separation* (tanpa adanya *reattachment*), sehingga pada sudut potong  $\theta_f > 56^\circ$  akan tetap terus terjadi *perfect separation*.

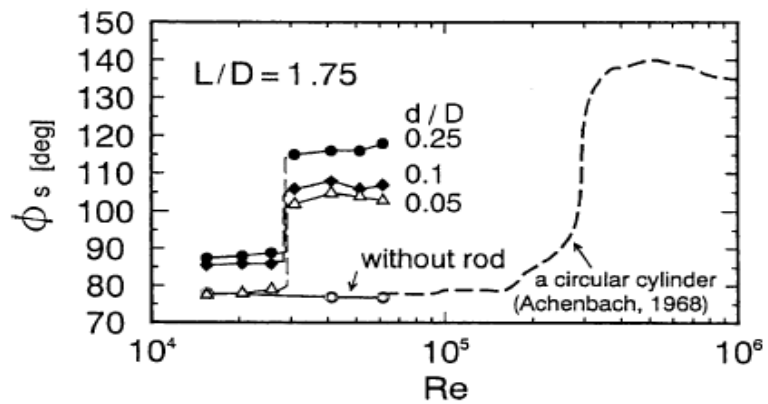
Tsutsui dan Igarashi [3] melakukan studi eksperimen dengan menempatkan pengganggu silinder sirkular dengan variasi diameter ( $d$ ) = 1 sampai 10 mm pada silinder utama ( $D$ ) = 40 mm. Rentang bilangan reynolds yang digunakan  $1.5 \times 10^4 \leq Re \leq 6. \times 10^4$ . Jarak antara kedua silinder divariasikan 50 mm sampai 120 mm. Hasil penelitian didapatkan bahwa penempatan pengganggu silinder terjadi penurunan nilai koefisien drag ( $C_D$ ) yang diikuti dengan kenaikan bilangan *strouhal*

terjadi dipengaruhi oleh peningkatan bilangan *reynolds* ( $Re$ ), peningkatan rasio  $d/D$  dan penurunan nilai  $L/D$  ditunjukkan oleh gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik bilangan strauhal dan koefisien drag (Tsutsui dan Igarashi [3])

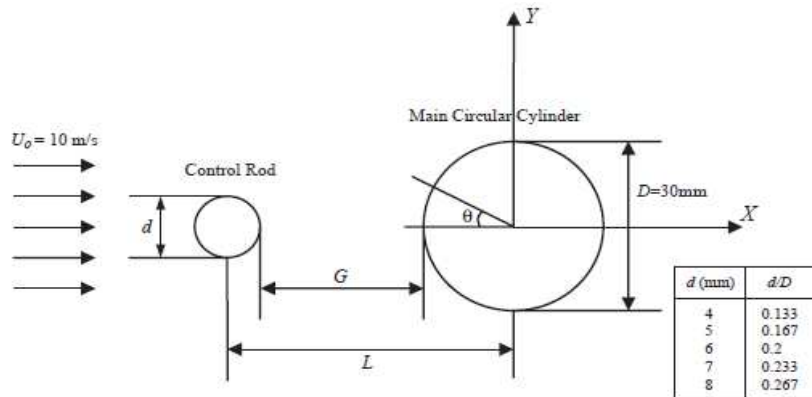
Peningkatan bilangan reynolds menyebabkan titik separasi bergeser yang ditunjukkan oleh gambar 2.10. Sehingga tebal shear layer berkurang dan daerah wake akan menyempit.



Gambar 2.10 Separation point (Tsutsui dan Igarashi [3])

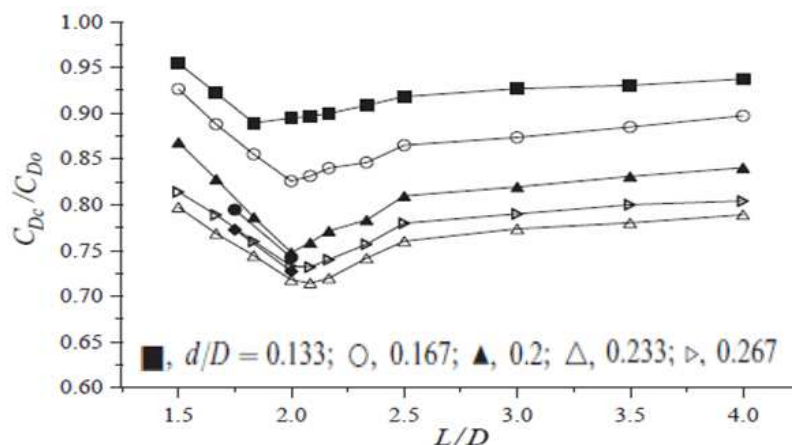
Lee dan Park [4] melakukan hal yang sama dengan studi eksperimen dengan memvariasikan jarak longitudinal diantara bodi pengganggu dan silinder utama ( $L/D = 1.5$  sampai  $4.0$ ); rasio diameter bodi pengganggu dengan silinder utama ( $d/D = 0.133 - 0.267$ ); pada bilangan reynolds ( $Re$ )  $2 \times 10^4$ ; Diameter silinder utama sebesar 30 mm; variasi diameter silinder pengganggu dari 4 sampai 8 mm (4, 5, 6, 7 dan 8mm); jarak antara kedua pusat divariasikan pada jarak 45, 50, 55, 60,

62.5, 65, 70, 90, 105 dan 120 mm skema benda uji eksperimen ditunjukkan gambar 2.11 .

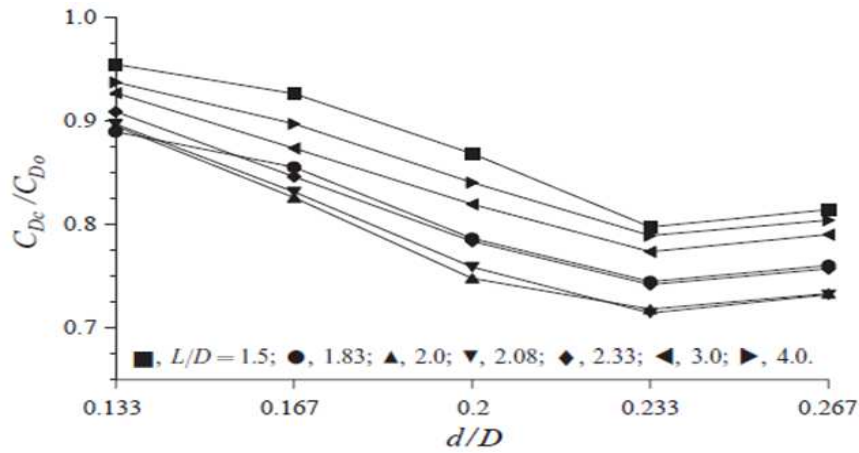


Gambar 2.11 skema benda uji eksperimen (Lee dan Park [4])

Penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa penurunan atau perubahan nilai koefisien drag ( $C_D$ ) dipengaruhi oleh perubahan nilai  $d/D$  dan nilai  $L/D$  yang ditunjukkan oleh gambar 2.12 dan gambar 2.13 . Pada setiap percobaan menunjukkan dengan adanya penambahan silinder pengganggu maka nilai koefisien drag yang diterima silinder utama akan mengalami penurunan. Ketika perubahan rasio diameter  $d/D$  dinaikkan hingga 0.223 terjadi perubahan nilai koefisien drag ( $C_D$ ) yang cukup besar. Penurunan drag maksimal sebesar 29% dengan rasio perbandingan diameter  $d/D = 0.233$  pada jarak  $L/D = 2.083$  bila dibandingkan dengan drag yang diterima silinder utama tanpa adanya bodi pengganggu. Pada perubahan diameter silinder pengganggu yang lebih besar dari  $d/D = 0.233$  terjadi penurunan pengurangan nilai koefisien drag pada silinder utama.

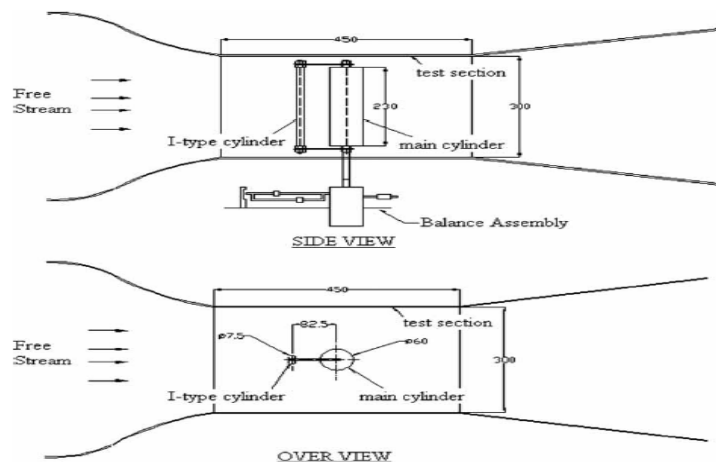


Gambar 2.12 Pengaruh diameter silinder pengganggu terhadap drag pada silinder utama (Lee dan Park [4])



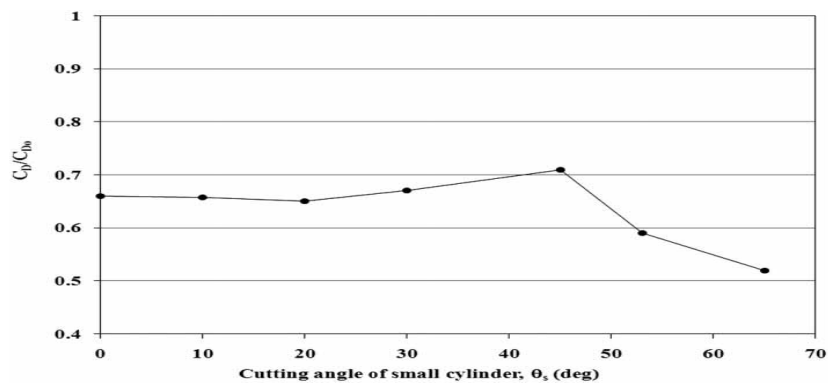
Gambar 2.13 Pengaruh posisi jarak  $L/D$  terhadap drag pada silinder utama (Lee dan Park [4])

Triyogi et al [5] menempatkan pengganggu silinder sirkular yang dipotong tipe I dengan sudut iris yang berbeda pada silinder utama ditunjukkan gambar 2.14 . Diameter silinder utama ( $D$ ) = 60 mm dan diameter silinder pengganggu ( $d$ ) = 7,5 mm atau  $d/D = 0,125$  . Silinder sirkular yang dipotong tipe I dengan sudut iris bervariasi  $\theta = 0^{\circ}, 10^{\circ}, 20^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 53^{\circ}$ , dan  $65^{\circ}$  dengan bilangan Reynolds  $5,3 \times 10^4$ . Jarak antara pusat silinder utama dan pusat silinder pengganggu ditentukan sebesar  $S/D = 1,375$  .



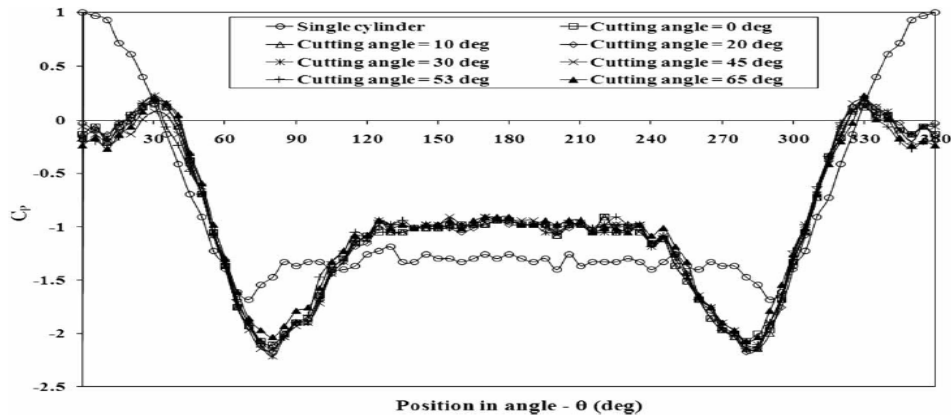
Gambar 2.14 Skema eksperimen dengan penghalang tipe I (Triyogi et al [5])

Perbandingan koefisien drag dengan silinder utama yang menggunakan pengganggu dengan silinder utama tunggal  $C_D/C_{D0}$  pada rentang sudut iris  $0^\circ$  sampai  $65^\circ$  didapatkan nilai terkecil  $C_D/C_{D0}$  mencapai 0.52 pada sudut iris  $65^\circ$  ditunjukkan pada gambar 2.15 . Sehingga membuktikan bahwa dengan penempatan silinder dengan irisan tipe-I dapat memperkecil gaya drag pada silinder utama hingga 48% jika dibandingkan dengan menggunakan silinder utama tunggal tanpa pengganggu.



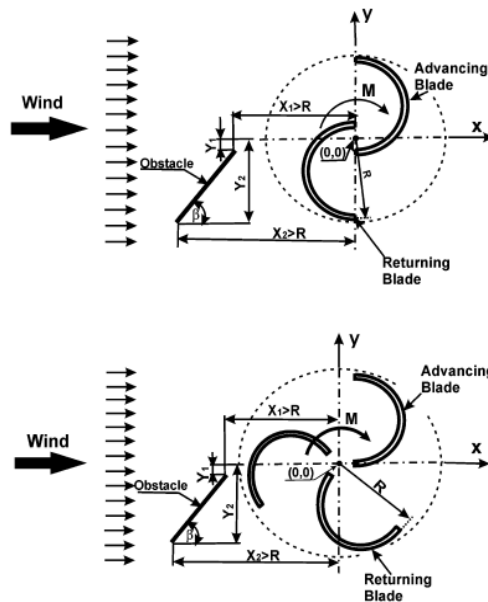
Gambar 2.15 Grafik  $C_D/C_{D0}$  terhadap sudut iris pengganggu tipe I (Triyogi et al [5])

Koefisien *pressure* ( $C_p$ ) pada aliran berpengganggu tipe-I dengan berbagai sudut iris ditunjukkan gambar 2.16 sekitar posisi  $\theta = 30^\circ$  dan  $330^\circ$  menunjukkan adanya *reattachment* dari *shear layer* yang terseparasi dari silinder pengontrol. Pada posisi *reattachment* aliran akan terpisah menjadi dua *shear layer*. Salah satu *shear layer* akan bergerak kebelakang (*backward shear layer*) yang terseparasi pada posisi sekitar  $\theta = 115^\circ$  dan  $245^\circ$  dibagian belakang silinder utama (*backward separation point*). Sehingga posisi separasi menjadi lebih mundur jika dibandingkan dengan silinder tunggal atau tanpa silinder pengontrol. Selanjutnya *shear layer* yang lain mengalir menuju depan (*forward shear layer*) akan terseparasi juga membentuk vortex atau disebut sebagai *quasi-static vortex* oleh **Tsutsui dan Igarashi [3]**.



Gambar 2.16 Distribusi koefisien *pressure* ( $C_p$ ) pada aliran berpengganggu tipe-I dengan berbagai sudut iris (Triyogi et al [5])

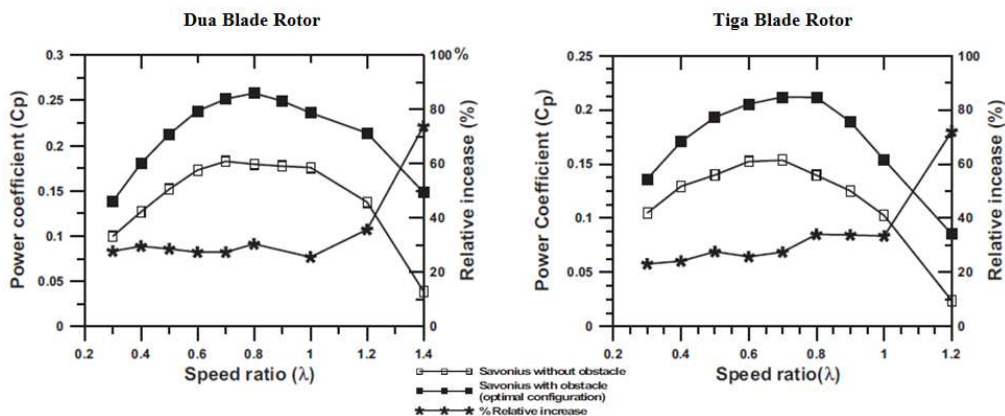
Mohamed et al [6] melakukan studi secara numerik dengan menempatkan satu buah plat pengganggu dengan sudut  $\beta$  yang berbeda pada sisi returning blade dengan variasi 2 blade rotor dan 3 blade rotor skema ditunjukkan pada gambar 2.17 . Kecepatan angin yang digunakan 10 m/s.



Gambar 2.17 Skema penempatan plat pengganggu *two blade* dan *three blade* pada sisi returning blade (Mohamed et al [6])

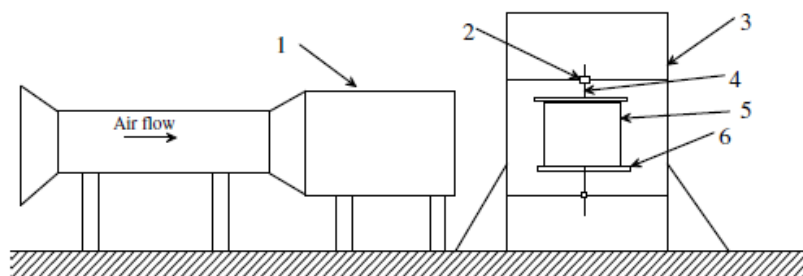
Hasil menunjukkan bahwa nilai Coefficient of Power ( $C_p$ ) maksimal dicapai dengan dua blade rotor. Pada speed ratio 0.7 dengan sudut  $\beta = 100.83^\circ$  dapat meningkatkan

Coefficient of Power ( $C_p$ ) dari turbin savonius hingga 27.3 % pada dua blade rotor. Sedangkan pada tiga blade rotor dapat meningkat hingga 27.5 % jika dibandingkan dengan rotor turbine saonius tanpa pengganggu. Grafik ditunjukkan pada gambar 2.18 .



Gambar 2.18 Grafik *Coefficient Power* ( $C_p$ ) dua blade dan tiga blade rotor terhadap *speed ratio* dengan persentase relatif peningkatan antara savonius tanpa pengganggu dan savonius dengan pengganggu (Mohamed et al [6]).

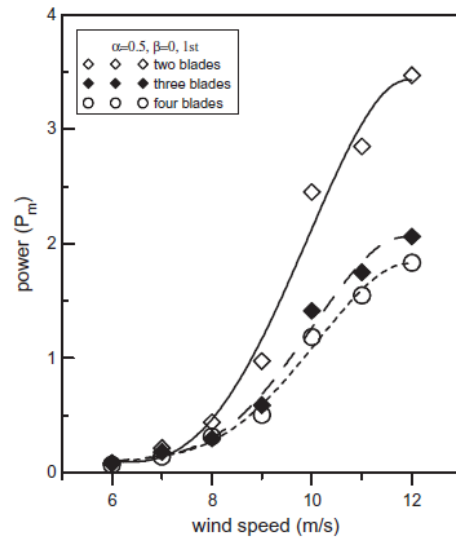
Mahmoud et al [7] melakukan studi eksperimen melakukan studi eksperimen pada *savonius single stage* dan *double stage* dengan berbagai jumlah sudu *savonius* yang berbeda (dua sudu, tiga sudu dan empat sudu), dengan diameter *endplates* 10 % lebih besar dari diameter rotor *savonius*, dengan overlap ratio bervariasi dari 0 – 0.35, . Kecepatan angin yang digunakan bervariasi dari 6 - 12 m/s. Skema tes rig ditunjukkan oleh gambar 2.19 .



Gambar 2.19 Skema tes rig (Mahmoud et al [7])

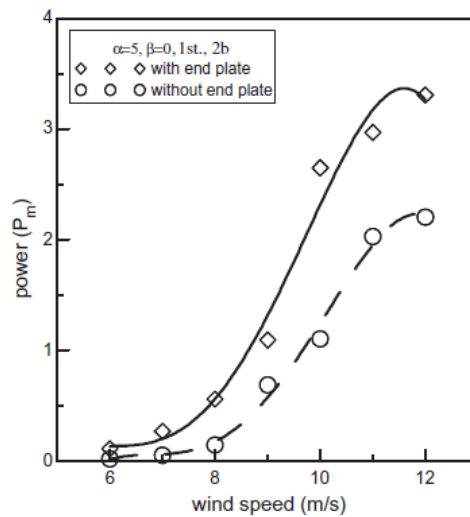
Hasil menunjukkan bahwa nilai *Power Mekanik* ( $P_m$ ) tertinggi dicapai dengan dua blade rotor jika dibandingkan dengan tiga dan empat blade rotor turbine *savonius*

seperti Grafik ditunjukkan pada gambar 2.20 . nilai Power Mekanik ( $P_m$ ) meningkat karena adanya penambahan end plates seperti Grafik ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.20 Hasil power mekanik dari variasi dua sudu, tiga sudu dan empat sudu.

(Mahmoud et al [7])



Gambar 2.21 Hasil power mekanik dari savonius dengan *end plates* dan tanpa *end plates*. (Mahmoud et al [7])

Jeon et al [8] melakukan studi eksperimen pengaruh dari *end plates* dengan berbagai bentuk dan ukuran pada helikal turbin angin yang ditunjukkan pada tabel 2.2



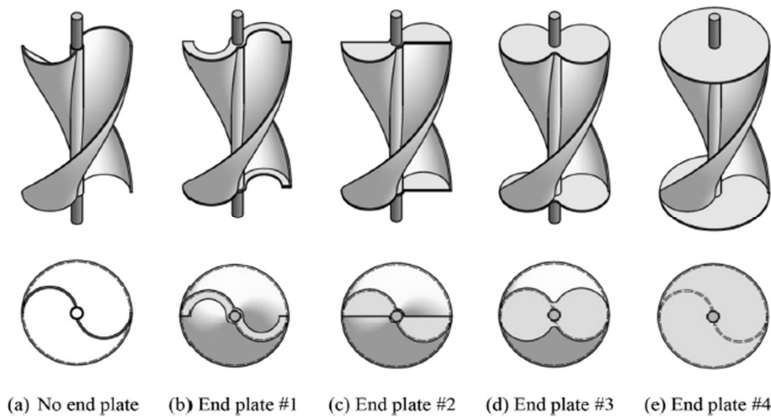
. Detail dari *end plates* turbin angin helikal savonius ditunjukkan pada tabel 2.3. Skema turbin angin helikal savonius dengan berbagai bentuk dan ukuran *end plates* ditunjukkan oleh gambar 2.22 . Pengujian dilakukan pada wind tunnel dengan kecepatan angin pada 6 m/s sampai 12 m/s.

Tabel 2.2 Geometri turbin angin helikal savonius

Designation of Savonius rotors	Diameter of rotor ( <i>D</i> ) [mm]	Height of rotor ( <i>H</i> ) [mm]	Aspect ratio ( <i>H/D</i> )	Diameter of shaft ( <i>d</i> ) [mm]	Thickness of blade ( <i>t</i> ) [mm]
HS #1	150	300	2	10	4
HS #2	200	400	2	15	4
HS #3	250	500	2	25	4
HS #4	350	700	2	25	4

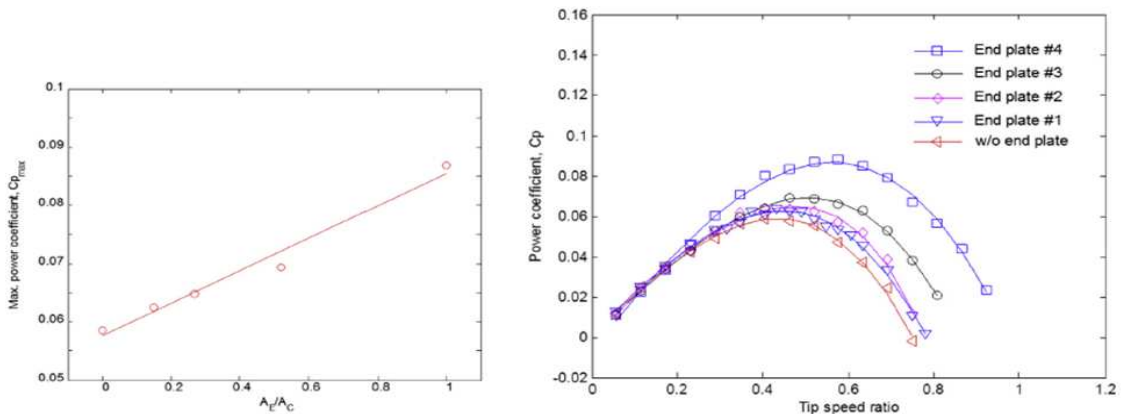
Tabel 2.3 Detail dari *end plates* turbin angin helikal savonius pada diameter 50 mm

	W/o end plates	End plate #1	End plate #2	End plate #3	End plate #4
$A_E$ [mm <sup>2</sup> ]	0	7990	13,510	26,220	50,670
$A_E/A_C$	0	0.15	0.27	0.52	1



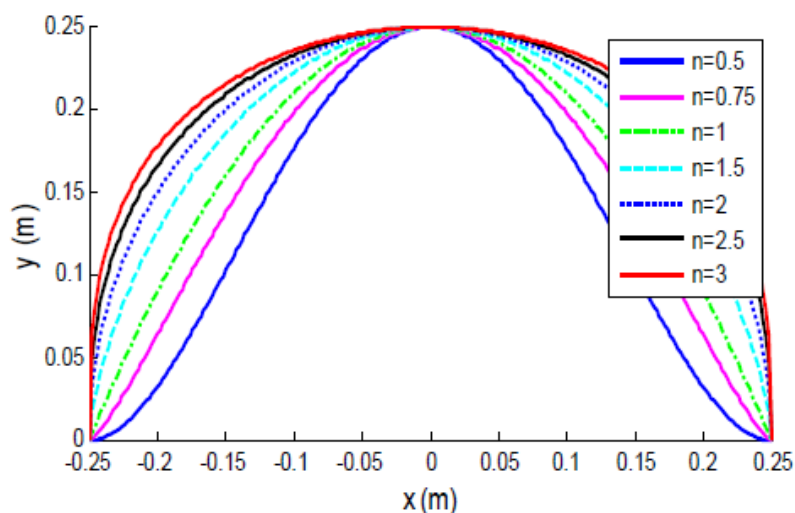
Gambar 2.22 Turbin angin helikal savonius dengan berbagai bentuk dan ukuran *end plates* (Jeon et al [8]).

Nilai koefisien power ( $C_p$ ) maksimal diperoleh pada end plates ratio ( $A_E$  [*end plate area*] /  $A_C$  [*cross section area*]) = 1 dan Nilai koefisien power ( $C_p$ ) meningkat sebesar 36% jika dibandingkan turbin savonius helikal tanpa *endplates* yang ditunjukkan pada gambar 2.24 .

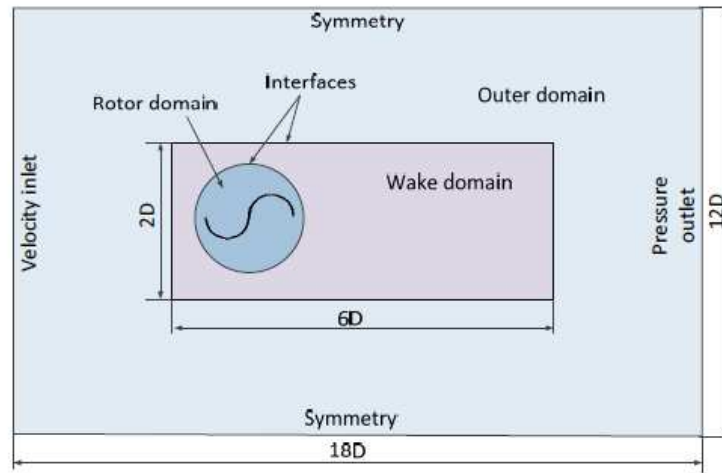


Gambar 2.23 Grafik koefisien power ( $C_p$ ) maksimum terhadap ratio endplate ( $A_E/A_C$ ) dan Perbandingan TSR terhadap koefisien power ( $C_p$ ) (Jeon et al [8]).

Tian et al [9] melakukan studi numerik CFD 2-D pada dua *blade savonius* dengan berbagai bentuk blade yang ditunjukkan pada gambar 2.26. Reynolds number  $4.32 \times 10^5$  (pada kecepatan 7 m/s), model yang digunakan RNG  $k-\epsilon$  turbulence model, dengan intensitas turbulensi 1 %, Hasil  $Y^+$  berada pada kisaran 30 sampai 100, SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) pressure-velocity coupling method digunakan pada semua simulasi, Time step di atur  $1^\circ$  rotasi per time step, scaled residual dibawah  $1 \times 10^{-5}$ , Jumlah iterasi dalam per time step 100 iterasi. Domain dan kondisi batas ditunjukkan oleh gambar 2.25 .

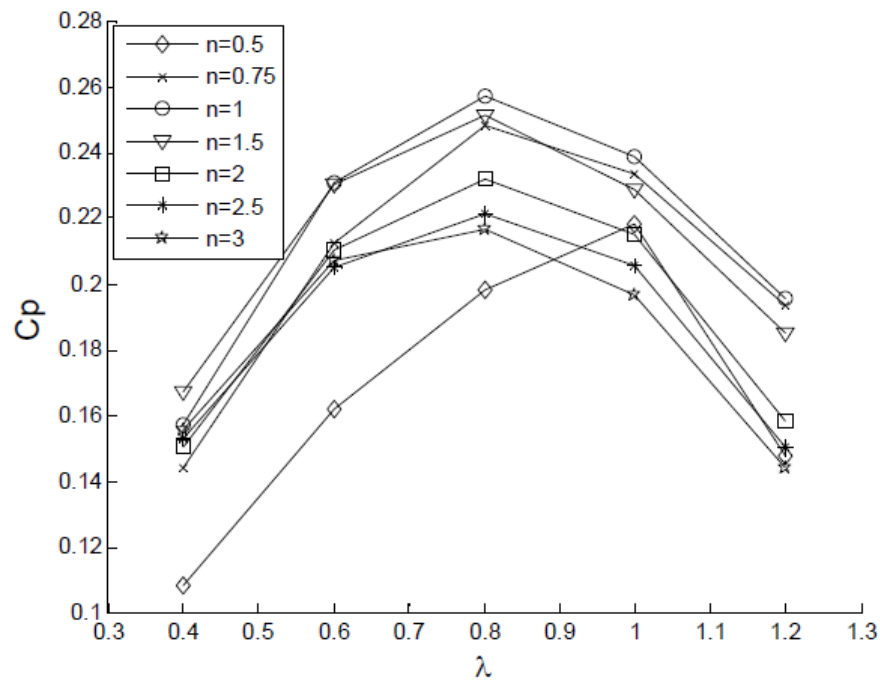


Gambar 2.24 Bentuk blade dengan berbeda Fullness Tian et al [9]



Gambar 2.25 Domain komputasi dan Kondisi batas **Tian et al [9]**

Nilai koefisien power ( $C_p$ ) maksimal diperoleh pada blade *fullness*  $n=1$  sebesar 0.2573 yang mana 10.98 % lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin savonius konvensional seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.26 .



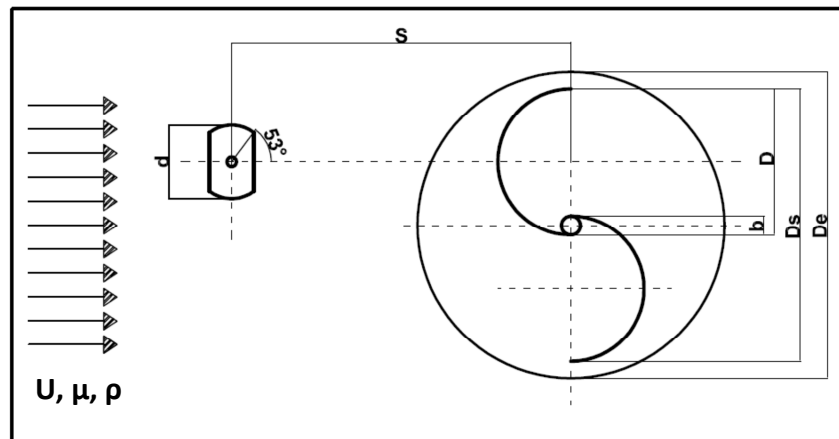
Gambar 2.26 Koefisien Power ( $C_p$ ) fungsi terhadap  $Tsr (\lambda)$  dengan berbagai *blade fullness* **Tian et al [9]**

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Skema dan Parameter Ukur

Penelitian ini menggunakan beberapa parameter yang mempengaruhi hasil penelitian. Skema dan Parameter pengukuran ditunjukkan pada gambar 3.1 .



Gambar 3.1 Skema turbin *Savonius* (tampak atas).

Dimana :

$U$  : kecepatan free stream aliran (m/s)

$\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  : viskositas dinamis fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

$d$  : diameter silinder pengganggu dengan sudut iris  $53^\circ$  (m)

$S$  : jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (m)

$b$  : diameter overlap (m)

$D$  : diameter *returning blade* (m)

$D_s$  : diameter *savonius* (m)

$D_e$  : diameter *endplates* (m)

#### 3.2 Analisa Dimensi

Analisa dimensi diperlukan untuk mengetahui parameter-parameter yang mempengaruhi performa turbin *Savonius* dengan penempatan pengganggu. Tahapan analisa dimensi dilakukan sebagai berikut :

1. Menentukan parameter yang mempengaruhi daya pada turbin *Savonius* :

$$P = f (U, \rho, \mu, d, S, b, D, H_s, h, n)$$

Sehingga didapat jumlah parameter (p)= 11 parameter

- U : kecepatan free stream aliran (m/s)
- $\rho$  : densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )
- $\mu$  : viskositas dinamis fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )
- d : diameter silinder pengganggu dengan sudut iris  $53^\circ$  (m)
- S : jarak antara pusat silinder pengganggu dan pusat *returning blade* (m)
- b : diameter overlap (m)
- D : diameter *returning blade* (m)
- H<sub>s</sub> : Tinggi *Savonius* (m)
- h : Tinggi Pengganggu (m)
- n : putaran sudu turbin ( rpm )
- P : Daya ( N.m/s )

2. Menentukan satu grup dimensi primer didalam menganalisa, maka dapat dipilih M, L, t .

3. Parameter yang dipilih dibuat dalam bentuk dimensi primer.

Parameter	P	$\rho$	$\mu$	U	D	d	S	H <sub>s</sub>	h	b	n
Dimensi	$\frac{M}{Lt^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{Lt}$	$\frac{L}{t}$	L	L	L	L	L	L	$\frac{1}{t}$

4. Jumlah parameter berulang dipilih (q) sama dengan jumlah dimensi primer (r) yang digunakan sebagai berikut :  $\rho, U, D$ .

Jumlah parameter berulang (q) = Jumlah dimensi primer (r) = 3

5. Menentukan group tanpa dimensi yang akan dihasilkan.

Jumlah group tanpa dimensi yang dihasilkan = p-q = 11 – 3 = 8.

$$i. \quad Z_1 = \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{M}{Lt}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML^2}{t^3}\right) = (M^0 L^0 t^0)$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

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

$$T : -b - 3 = 0$$

didapatkan :  $a = -1$ ,  $b = -3$ ,  $c = -2$  . Sehingga :

$$Z_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P \quad \text{atau} \quad Z_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

ii. Dengan cara yang sama dapat diperoleh :

$$Z_2 = \frac{\mu}{\rho U D}$$

$$Z_3 = \frac{d}{D}$$

$$Z_4 = \frac{S}{D}$$

$$Z_5 = \frac{H}{D}$$

$$Z_6 = \frac{h}{D}$$

$$Z_7 = \frac{b}{D}$$

$$Z_8 = \frac{n D}{U}$$

Dari analisa dimensi dapat diperoleh group tanpa dimensi sebagai berikut :

$Z_1 =$  *Coefficient of Power*

$Z_2 =$  bilangan *Reynolds*

$Z_3 =$  rasio diameter silinder pengganggu dengan diameter *returning blade*

$Z_4 =$  rasio jarak antara pusat *returning blade* dan pusat silinder pengganggu dengan diameter *returning blade*

$Z_5 =$  rasio antara tinggi turbin *Savonius* dengan diameter *returning blade*

$Z_6 =$  rasio antara tinggi silinder pengganggu *Savonius* dengan diameter *returning blade*

$Z_7 =$  rasio antara tinggi silinder pengganggu *Savonius* dengan diameter *returning blade*

$Z_8 =$  *Tip Speed Ratio*

Hubungan dari group tidak berdimensi adalah sebagai berikut :

$$Z_1 = f(Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f \left( \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{d}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{n D}{U} \right)$$

Sehingga didapatkan variabel tetap ( $\frac{d}{D}$ ,  $\frac{H}{D}$ ,  $\frac{h}{D}$ ,  $\frac{b}{D}$ ) pada penelitian ini, sedangkan variabel  $\frac{\mu}{\rho U D}$ ,  $\frac{S}{D}$  dan  $\frac{n D}{U}$  merupakan variabel yang divariasikan untuk mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin *Savonius* sehingga hubungan antar variabel menjadi :

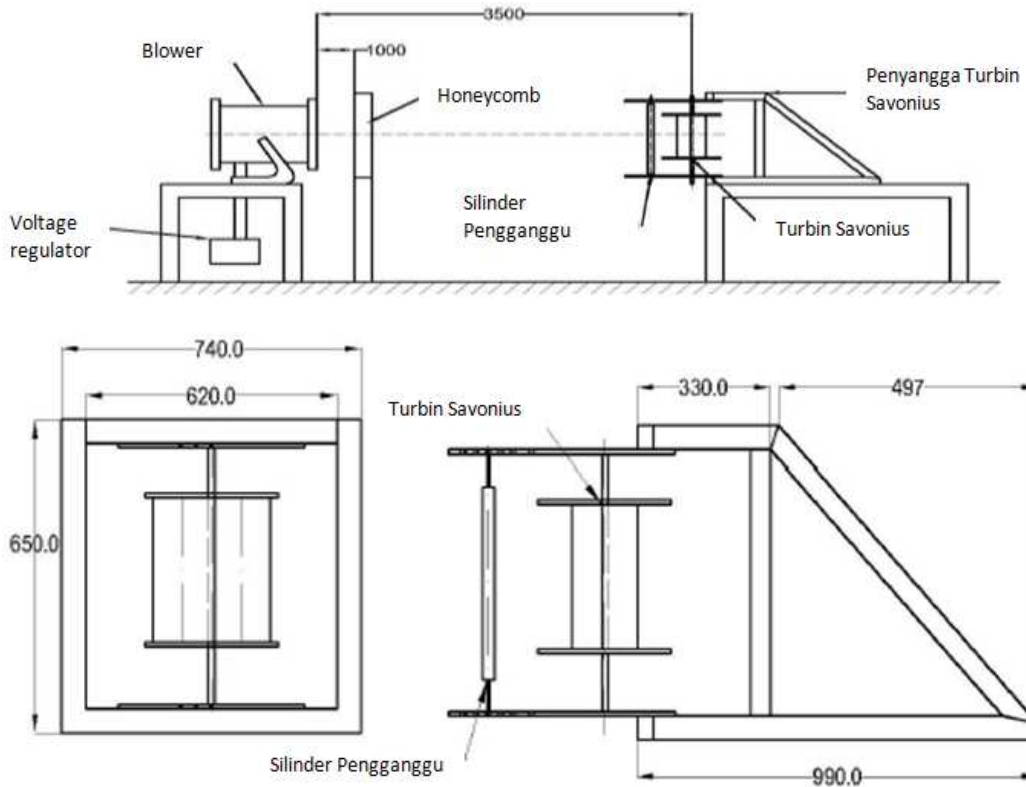
$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2 \left( \frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}, \frac{n D}{U} \right)$$

Pada penelitian ini untuk variabel  $\frac{\mu}{\rho U D}$ ,  $\frac{P}{\rho U^3 D^2}$ ,  $\frac{n D}{U}$  nilai D sebanding dengan L yaitu  $L = 2D - b$ . Sehingga hubungan antar variabel menjadi :

$$\frac{P}{\rho U^3 L^2} = f_3 \left( \frac{\mu}{\rho U L}, \frac{S}{D}, \frac{n L}{U} \right) \text{ atau } C_P = f_4 \left( Re, \frac{S}{D}, Tsr \right)$$

### 3.3 Metode Eksperimen

Pada metode eksperimen ini ditunjukkan skema pengujian dari turbin angin *savonius* ditunjukkan oleh gambar 3.2



Gambar 3.2 Skema pengujian turbin *savonius*.

### 3.3.1 Peralatan eksperimen

#### a. Blower

*Blower* pada penelitian eksperimen ini digunakan sebagai alat yang mengalirkan fluida udara sebagai aliran searah pada turbin *Savonius*. Pada pengujian ini kecepatan angin dari blower diatur oleh *Voltage Regulator*. *Voltage Regulator* adalah alat yang digunakan untuk mengontrol kecepatan angin yang dihasilkan oleh blower. Detail blower ditunjukkan oleh gambar 3.3 . Spesifikasi blower ditunjukkan oleh tabel 3.1 .

Tabel 3.1 *Spesifikasi Blower*

<i>Manufacture Model / type</i>	<i>CKE SPV-19</i>
<i>Air Flow</i>	<i>4.413 CFM</i>
<i>Static Pressure</i>	<i>520 Pa</i>
<i>Rotation</i>	<i>2.850 rpm</i>
<i>Power</i>	<i>1.700 kw</i>
<i>Voltage / Phase</i>	<i>220 - 240 V</i>



Gambar 3.3 Blower

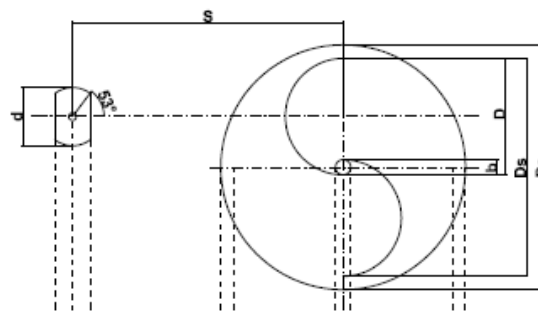
#### b. Benda Uji

Pada penelitian eksperimen ini benda uji turbin angin savonius dan pengganggu tipe-I sudut iris  $53^\circ$  ditunjukkan pada gambar 3.4 . Geometri turbin angin savonius direncanakan ditunjukkan oleh tabel 3.2 . Ukuran Diameter pengganggu relatif terhadap Diameter sudu returning  $(d/D) = 0.5$  .

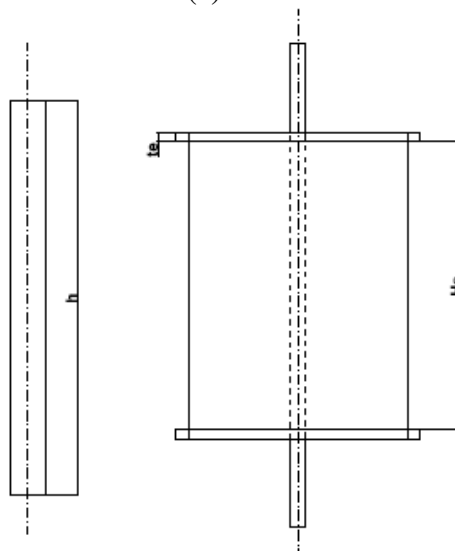


Tabel 3.2 Perencanaan Geometri Turbin *Savonius*

Diameter Advancing / Returning (D)	152.4 mm
Diameter <i>Savonius</i> (Ds)	290 mm
Diameter <i>Endplates</i> (De)	320 mm
Diameter <i>overlap</i> (b)	19 mm
Diameter Pengganggu silinder (d)	76.2 mm
Tinggi <i>Savonius</i> (Hs)	300 mm
Tinggi pengganggu (h)	500 mm
Tebal <i>endplates</i> (te)	3 mm
Jarak penempatan pengganggu (S/D)	$1.5 \leq S/D \leq 4.0$



(a)



(b)

Gambar 3.4 a). Tampak atas *Savonius* b). Tampak samping *Savonius*

### c. Alat Ukur

Pada penelitian secara eksperimen ini diperlukan alat ukur untuk mendukung pengambilan data berupa kecepatan rotasi dari benda uji, pengukur kecepatan angin yang dihasilkan oleh blower, pengukur torsi statis dan pengukur torsi dinamis. Detail alat ukur ditunjukkan dibawah ini :

#### 1. *Tachometer*

*Tachometer* merupakan alat pengujian yang berfungsi untuk mengukur kecepatan rotasi dari sebuah objek. Gambar *tachometer* ditunjukkan oleh gambar 3.5. Spesifikasi *tachometer* ditunjukkan oleh tabel 3.3 .

Tabel 3.3 Spesifikasi *Tachometer*

<i>Manufacture Model / Seri</i>	<i>OMEGA / HHT13</i>
<i>Range</i>	<i>5 – 99,999 rpm</i>
<i>Accuracy</i>	<i>0.01 % of reading or <math>\pm 1</math> digit</i>
<i>Resolution</i>	<i>0.001 to 1.0 rpm</i>
<i>Display</i>	<i>5-digit alphanumeric LCD</i>
<i>Memory</i>	<i>Max, min, and last</i>
<i>Power</i>	<i>2 “AA” 1.5 Vdc batteries</i>
<i>Environmental</i>	<i>5 to 40<sup>0</sup> C</i>



Gambar 3.5 Alat ukur rotasi *tachometer*

#### 2. *Anemometer*

*Anemometer* merupakan alat pengujian yang berfungsi untuk mengukur kecepatan angin. Gambar *anemometer* ditunjukkan oleh gambar 3.6 . Spesifikasi *anemometer* ditunjukkan pada tabel 3.4 .



Gambar 3.6 Alat ukur kecepatan angin *anemometer*.

Tabel 3.4 Spesifikasi *Anemometer*

<i>Manufacture Model / Seri</i>	OMEGA / HHF141A
Air Probe	1 Inch
Power Supply	3 AA alkaline batteries
Battery Life	Approx. 150 h, without backlight
Display	Dual 4-digit LCD
<i>Air Flow</i>	
<i>Range</i>	<i>Resolution</i>
60 to 6800 ft/m	1 ft/min
0.3 to 35 m/s	0.01 m/s

### 3. Pengukur torsi statis

Torque meter ini merupakan alat ukur digital yang berfungsi untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Gambar pengukur torsi statis ditunjukkan oleh gambar 3.7 . Spesifikasi ditunjukkan tabel 3.5 .



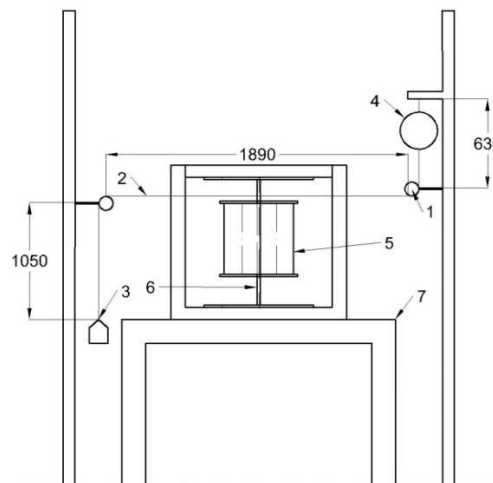
Gambar 3.7 Alat pengukur torsi statis

Tabel 3.5 Spesifikasi *Torsi meter*

<i>Manufacture Model / Seri</i>		<i>LUTRON TQ - 8800</i>		
<i>Display Unit / Resolution</i>				
<i>Unit</i>	<i>Max. Range</i>	<i>High Resolution</i>	<i>Low Resolution</i>	<i>Over Load Protection Range</i>
<i>Kg-cm</i>	<i>15 kg-cm</i>	<i>0.01 kg-cm</i>	<i>0.1 kg-cm</i>	<i>22.5 kgf-cm max</i>
<i>Lb-inch</i>	<i>12.99 Lb-inch</i>	<i>0.01 Lb-inch</i>	<i>0.1 Lb-inch</i>	<i>19.53 Lbf-inch max</i>
<i>N-cm</i>	<i>147.1 N-cm</i>	<i>0.1 N-cm</i>	<i>1 N-cm</i>	<i>220.1 N-cm max</i>

#### 4. Pengukuran torsi dinamis

Pada pengukuran torsi dinamis menggunakan sistem Brake Dynamometer yang berfungsi untuk mengukur torsi dinamis dari suatu benda yang berputar. Sistem pengukuran menggunakan Brake Dynamometer didasarkan penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud et al [8]** ditunjukkan pada gambar 3.8 .



Gambar 3.8 Skema Brake Dynamometer

Keterangan : 1. Pulley, 2. Benang nilon, 3. Massa pemberat, 4. Neraca gantung, 5. Turbin angin Savonius, 6. Poros turbin, 7. Penyangga

Sistem pengukuran terdiri dari pegas, pulley dan massa pemberat yang dihubungkan dengan benang yang menyelubungi poros turbin. Daya yang terukur dari sistem

*Brake Dynamometer* dihitung berdasarkan persamaan 2.12, dimana torsi dinamis juga didapatkan dari turbin angin *savonius* ketika turbin berputar. Massa pemberat yang berbahan dari kuningan ditambahkan secara bertahap dengan berbagai variasi hingga turbin berhenti berputar. Berbagai nilai massa dari pemberat 1 gram, 5 gram, 10 gram, 20 gram, 50 gram, 100 gram, 200 gram, 250 gram, 500 gram dan 1000 gram. Pegas Pada sistem *brake dynamometer* ini menggunakan timbangan pegas NAGATA seperti pada gambar 3.9 dengan spesifikasi pada tabel 3.7.



Gambar 3.9 Timbangan Gantung/ Pegas Nagata

Tabel 3.6 Spesifikasi timbangan pegas NAGATA

<b>SPECIFICATIONS</b>	
<b>Capacity</b>	10 kg
<b>Graduation</b>	50 gram

Sedangkan beban pemberat menggunakan anak timbangan seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Anak timbangan

Untuk menghambat putaran dari poros turbin angin Savonius, digunakan benang *nylon LAZER* seperti pada gambar 3.11 yang menghubungkan antara pegas

dengan beban pemberat. Benang *nylon* LAZER berdiameter 0,6 mm mampu menahan beban hingga 20 kg.



Gambar 3.11 Benang *nylon* LAZER

### 3.3.2 Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Melakukan persiapan peralatan dan benda uji berupa savonius, pengganggu silinder dan pengganggu tipe-I
2. Melakukan pemasangan turbin savonius didepan blower.
3. Melakukan pengambilan data tanpa penghalang.
4. Menyalakan blower dan mengatur besar frekuensi dengan menggunakan voltage regulator sehingga kecepatan angin sesuai dengan bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5m/s; 7 m/s; 9 m/s).
5. Melakukan pengukuran kecepatan angin yang dihasilkan oleh blower dengan menggunakan anemometer sesuai dengan bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 10 m/s).
6. Melakukan pengukuran putaran poros dengan menggunakan tachometer
7. Melakukan pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan oleh savonius dengan *Brake Dynamometer*.
8. Melakukan pengukuran torsi statis dengan menggunakan torsimeter.
9. Melakukan langkah 4 sampai 7 sesuai dengan kecepatan yang diinginkan pada bilangan Reynolds  $9,3 \times 10^4$  ;  $12,7 \times 10^4$  ;  $16,3 \times 10^4$  (5 m/s; 7 m/s; 9 m/s).
10. Mengulangi langkah 4 sampai 9 dengan melakukan pemasangan pengganggu silinder sirkuler didepan returning blade pada jarak yang telah ditentukan.

11. Mengulangi langkah 4 sampai 9 dengan melakukan pemasangan pengganggu silinder sirkuler tipe-I dengan sudut iris  $53^\circ$  didepan returning blade pada jarak yang telah ditentukan.
12. Mematikan blower.
13. Mengolah data yang didapatkan dari hasil eksperimen yang berupa rpm, torsi statis, torsi dinamis untuk menghitung daya, *Moment Coefficient* ( $C_m$ ), *Power Coefficient* ( $C_p$ ), dan *Tip speed ratio* ( $Tsr$ ). Hasil perhitungan tersebut dibuat dalam bentuk grafik yang akan dibandingkan terhadap jarak S/D yang divariasikan, hasil tanpa pengganggu, hasil penempatan pengganggu dengan silinder sirkuler dan hasil penempatan pengganggu tipe-I dengan sudut iris  $53^\circ$ .

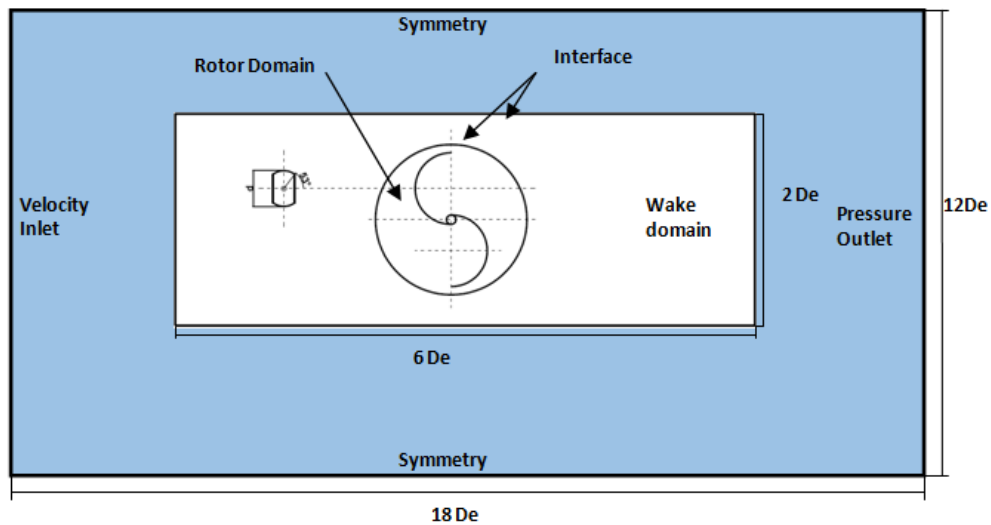
### 3.4 Metode Numerik

Pada metode Numerik ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan *software Ansys Fluent*. Pembuatan model 2-D dapat dilakukan menggunakan *ansys modeler, solid work, gambit fluent*.

#### 3.4.1 Geometri dan Kondisi Batas

Analisa metode numerik ini menggunakan model *savonius* tanpa atau menggunakan pengganggu sesuai dengan ukuran yang sudah ditentukan. Model geometri dan kondisi batas *savonius* yang direncanakan ( $D_e = 320$  mm) ditunjukkan oleh gambar 3.12 . Fluida yang digunakan adalah udara dengan menggunakan ketentuan boundary pada dinding yaitu *no-slip condition*. Parameter kondisi batas diatur sesuai yang ditunjukkan oleh tabel 3.7 . Selanjutnya parameter model numerik ditentukan sesuai yang ditunjukkan oleh tabel 3.8 .

Penentuan perbandingan domain dan kondisi batas disesuaikan dengan peneliti yang dilakukan oleh **Tian et al [9]** yang mana rasio dari *blockage effect* dipertimbangkan kurang dari 10%.



Gambar 3.12 Geometri dan kondisi batas pemodelan *Savonius*

Tabel 3.7 Parameter Kondisi Batas

<i>Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>
	Intensitas turbulensi 1 %
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>
Sisi Atas dan Sisi Bawah	<i>Symmetry</i>
<i>Rotating Domain (Omega)</i>	Rad/s

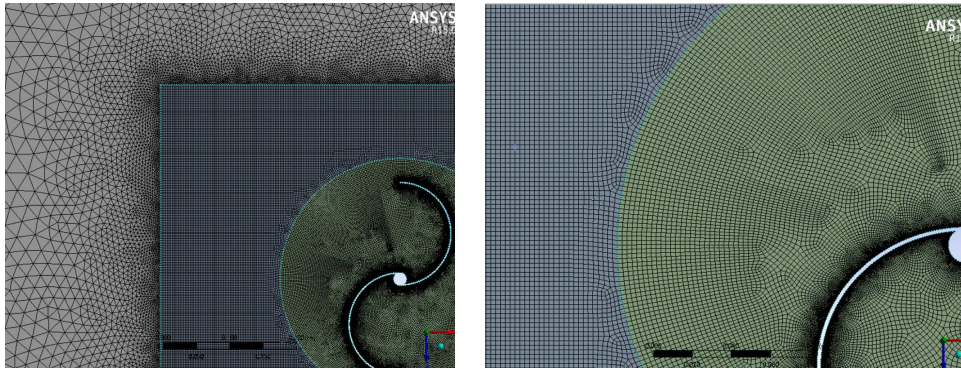
Tabel 3.8 Parameter Model Numerik

<i>Turbulence model</i>	Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model
<i>Solution method</i>	<i>SIMPLE ( Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)</i>
<i>Simulation</i>	<i>Unsteady</i>
<i>Time Step</i>	Time Step diatur 5° rotasi per-time step
<i>Convergence criteria</i>	Dibawah $1 \times 10^5$
<i>Discretization</i>	<i>2nd order</i>

### 3.4.2 Meshing

Pada pemodelan simulasi 2-D turbin savonius menggunakan *mesh* 'unstructured' dengan tipe *Quadratic Pave* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13 .





Gambar 3.13 Meshing ‘unstructured’ dengan tipe *Quadratic Pave*

Pada pemodelan ini akan dilakukan pemilihan mesh untuk validasi yang dilakukan untuk memperoleh hasil yang akurat yang paling mendekati dengan peneliti terdahulu dalam hal ini adalah numerik yang dilakukan oleh **mohamed et al [6]** dan hasil eksperimen **hayashi et al [10]**.

Proses validasi dalam numerik ini dilakukan untuk mendapatkan jumlah elemen nodes yang digunakan. Beberapa sample model dengan jumlah nodes yang berbeda akan didapatkan. Jumlah cell number node yang digunakan pada kisaran 150000 sampai dengan 250000

### 3.4.3 Time Step

Pada simulasi ini time step ditentukan berdasarkan  $5^0$  putaran untuk setiap time step dengan omega yang ditentukan berdasarkan kecepatan free stream pada *velocity inlet* ditunjukkan oleh tabel 3.12 .

Tabel 3.9 Perhitungan time step

TSR	pi	R blade (m)	U (m/s)	Omega (Rad/s)	n (rpm)	dt	t0	M Capture Frame (Derajat one Rotation/Derajat Frame)	Time Duration	Time Step = Time Duration/M
				Omega = (Tsr * U) / R blade	n = (Omega * 60) / (2*pi)	dt = (2*pi) / Omega	M = 360 / Derajat rotasi	Time Duration = dt/t0	Time Step = Time Duration/M	
0.4	3.14	0.1429	7	19.594	187.205	0.321	0	72	0.321	0.00445
0.6	3.14	0.1429	7	29.391	280.807	0.214	0	72	0.214	0.00297
0.8	3.14	0.1429	7	39.188	374.410	0.160	0	72	0.160	0.00223
1	3.14	0.1429	7	48.985	468.012	0.128	0	72	0.128	0.00178
1.2	3.14	0.1429	7	58.782	561.615	0.107	0	72	0.107	0.00148

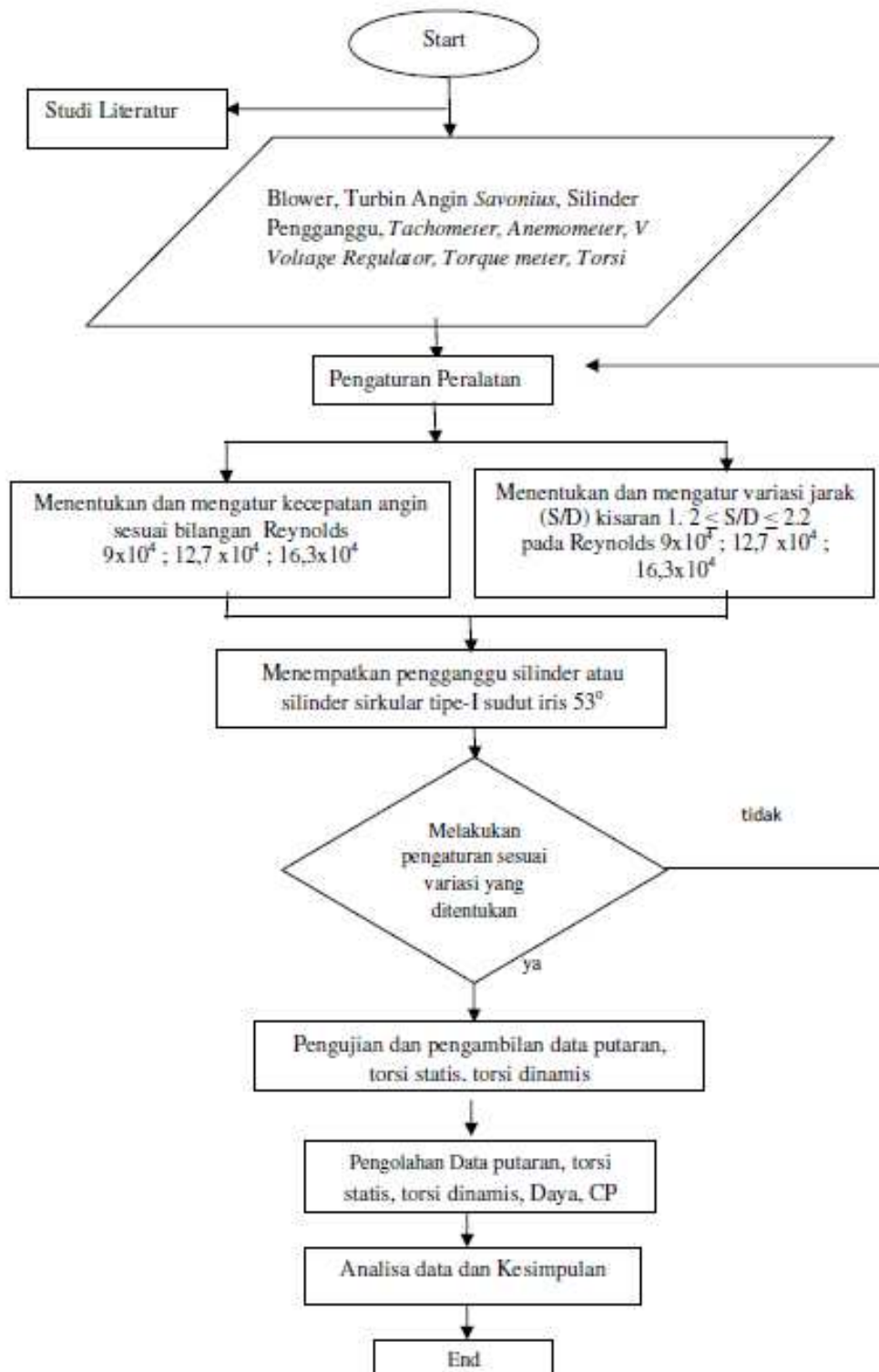
#### 3.4.4 Prosedur Numerik

Prosedur Numerik pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

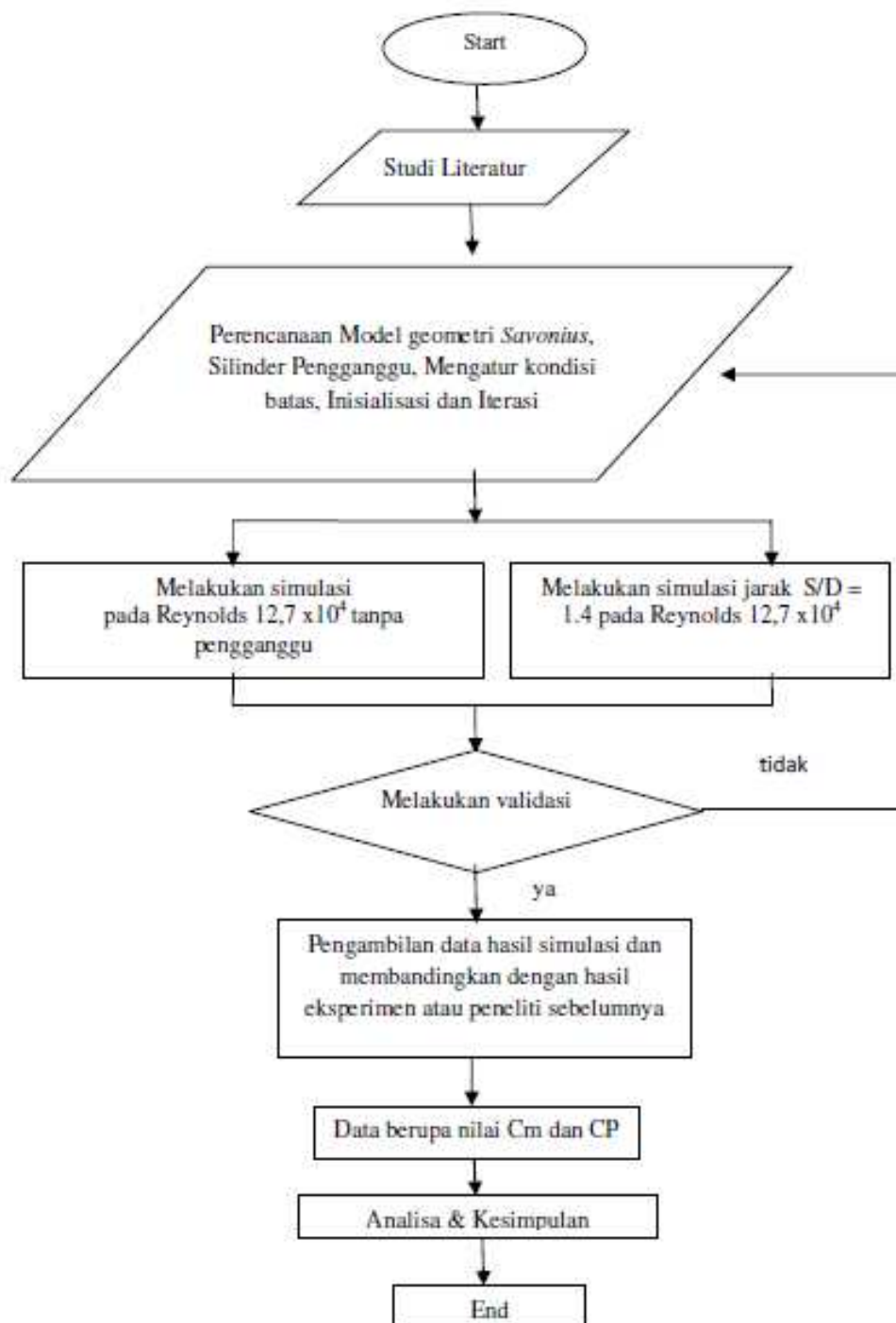
1. Melakukan persiapan PC atau Laptop yang digunakan.
2. Menyiapkan software yang digunakan, dalam hal ini Ansys Fluent 15.
3. Menggambar geometri model bisa menggunakan ansys modeler, solid work , gambit fluent.
4. Melakukan meshing pada model geometri yang sudah dibuat.
5. Melakukan *preprocessing* untuk menentukan kondisi batas dan kondisi pemodelan.
6. Melakukan *processing* proses perhitungan yang berdasarkan geometri, meshing, pendefinisian kondisi batas, dan penentuan inisialisasi yang telah diatur pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  (7 m/s).
7. Melakukan *postprocessing* berupa pengambilan data nilai *moment coefficient*.
8. Melakukan pengolahan data untuk validasi pada hasil simulasi berdasarkan meshing yang dipilih dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen dan peneliti sebelumnya. Sehingga mendapatkan hasil simulasi dengan nilai error terendah.
9. Hasil simulasi yang sudah tervalidasi digunakan sebagai acuan dalam simulasi pada Savonius dengan penempatan pengganggu tipe-I dengan sudut Iris  $53^\circ$ .
10. Hasil simulasi dengan penempatan pengganggu yang berupa data diolah dalam bentuk grafik untuk dibandingkan dengan hasil eksperimen atau peneliti sebelumnya.

#### 3.5 Flowchart Penelitian

Urutan langkah pada proses penelitian eksperimen dan simulasi numerik ini dapat digambarkan dalam diagram alir seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14 dan gambar 3.15



Gambar 3.14 Diagram alir penelitian Eksperimen



Gambar 3.14 Diagram alir penelitian Simulasi Numerik

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## BAB 1V

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan beberapa data yang menunjukkan pengaruh pemberian silinder penghalang didepan *returning blade* turbin *Savonius*. Bilangan Reynolds dan jarak silinder penghalang terhadap turbin angin divariasikan untuk mendapatkan hasil yang paling efektif. Data yang diperoleh dari hasil eksperimen akan dilakukan pengolahan data. Beberapa perhitungan dilakukan untuk mendukung dalam analisa data dan pembahasan. Data yang didapatkan berupa torsi statis dan torsi dinamis. Kemudian data ini diolah untuk mendapatkan nilai *power coefficient (CP)* dan *Moment Coefficient (Cm)*.

#### 4.1 Contoh Perhitungan

##### 4.1.1 Perhitungan Bilangan Reynolds

Perhitungan massa jenis udara ( $\rho$ ) berdasarkan persamaan Boyle-Gay Lussac tentang persamaan gas ideal sebagai berikut :

$$P = \rho RT \dots\dots\dots(4.1)$$

Dimana :

- P : tekanan udara : 101325 Pa
- $\rho$  : massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )
- R : konstanta spesifik gas = 287,058 J/kg.K
- T : temperature saat penelitian = 301,2 K

Sehingga diperoleh nilai massa jenis udara ( $\rho$ ) sebagai berikut.

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{101325 \text{ Pa}}{287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \cdot \text{K} \times 301,2 \text{ K}} = 1,1719 \text{ kg/m}^3$$

Pada perhitungan viskositas absolut udara ( $\mu$ ) berdasarkan persamaan Sutherland :

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S+T} \dots\dots\dots(4.2)$$

dimana,

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

$$S = 110,4 K$$

Sehingga nilai viskositas absolut udara ( $\mu$ ) sebagai berikut :

$$\mu = \frac{bT^{3/2}}{S+T} = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0,5}} \times (301,2 K)^{3/2}}{110,4 K + 301,2 K} = 1,8516 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

Sehingga untuk bilangan Reynolds ( $Re$ ) =  $9 \times 10^4$  pada turbin savonius dengan nilai massa jenis, viskositas udara dan panjang karakteristik 0,2858 meter. maka akan didapatkan nilai kecepatan *freestream* udara dari perhitungan sebagai berikut:

$$V = \frac{Re \times \mu}{\rho \times L} = \frac{90000 \times 1,8516 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}}{1,1719 kg/m^3 \times 0,2858 m} = 4,97 m/s$$

#### 4.1.2 Perhitungan *Tip Speed Ratio*

Persamaan (2.14) yang digunakan untuk perhitungan *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) adalah sebagai berikut :

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

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$R = \frac{L}{2} = \frac{2D-b}{2}$$

dimana :

$\omega$  : putaran turbin angin Savonius (rad/s)

$n$  : putaran turbin angin Savonius (rpm)

$R$  : jari-jari turbin (m)

$V$  : kecepatan angin (m/s)

Berikut salah satu perhitungan pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  tanpa silinder pengganggu :

$$n = 342,07 \text{ rpm}$$

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \times \pi \times 342,07 \text{ rpm}}{60} = 35,8 \text{ rad/s}$$

$$R = \frac{2 \times 0,1524 m - 0,019 m}{2} = 0,1429 m$$

Sehingga didapatkan nilai *tip speed ratio*,

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} = \frac{35,8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 0,1429 \text{ m}}{4,97 \text{ m/s}} = 1,023$$

#### 4.1.3 Perhitungan Torsi Dinamis

Persamaan (2.11) yang digunakan untuk perhitungan torsi dinamis adalah sebagai berikut :

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

dimana :

$T$  : torsi dinamis (Nm)

$s$  : massa yang terbaca pegas (gram)

$m$  : massa beban (gram)

$g$  : gravitasi bumi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$r$  : jari-jari poros yang dihambat (m)

Berikut salah satu perhitungan data pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  tanpa silinder pengganggu dimana

$$m = 15 \text{ gram}$$

$$s = 100 \text{ gram}$$

$$r = 0,0095 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan nilai torsi dinamis,

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

$$T = \left\{ \left( \frac{100-15}{1000} \right) \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right\} \times 0,0095 \text{ m}$$

$$T = 0,00792 \text{ Nm} = 0,792 \text{ N.Cm}$$

#### 4.1.4 Perhitungan Power Coefficient

Persamaan (2.15) yang digunakan untuk perhitungan *Power Coefficient* (CP) adalah sebagai berikut.

$$CP = \frac{T \times \omega}{\frac{1}{2} \rho A V^3}$$

$$A = L \times H$$



dimana :

$T$  : torsi dinamis (Nm)

$\omega$  : putaran turbin angin Savonius (rad/s)

$\rho$  : massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$A$  : luas sapuan turbin oleh angin ( $\text{m}^2$ )

$V$  : kecepatan angin (m/s)

$L$  : diameter turbin (m)

$H$  : tinggi turbin (m)

Berikut salah satu perhitungan data pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  tanpa silinder pengganggu dimana,

$$L = 0,2858 \text{ m}$$

$$H = 0,3 \text{ m}$$

Sehingga didapatkan perhitungan luas sapuan turbin sebagai berikut n

$$A = L \times H = 0,2858 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 0,08574 \text{ m}^2$$

Sehingga didapatkan nilai *Power Coefficient* (CP) sebagai berikut :

$$CP = \frac{0,00792 \text{ Nm} \times 37,04 \text{ rad/s}}{\frac{1}{2} \times 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,08574 \text{ m}^2 \times (4,975 \text{ m/s})^3}$$

$$CP = 0,04496$$

#### 4.1.5 Perhitungan *Moment Coefficient*

Persamaan (2.6) yang digunakan untuk perhitungan *Moment Coefficient* (Cm) adalah sebagai berikut :

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

Sehingga didapatkan nilai *Moment Coefficient* (Cm) sebagai berikut,

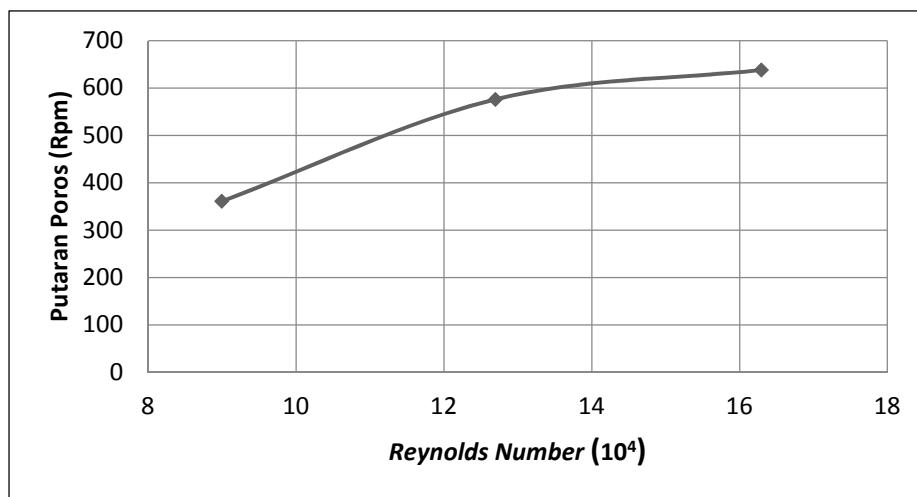
$$Cm = \frac{0,00792 \text{ Nm}}{0,5 \times 1,1772 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,08574 \text{ m}^2 \times (4,975 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} \times 100\% = 4,394 \%$$

## 4.2 Analisa Turbin Angin Savonius Tanpa pengganggu dengan Variasi Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$ , $12,7 \times 10^4$ dan $16,3 \times 10^4$

Pengukuran performa turbin angin tanpa pengganggu dilakukan untuk mengetahui performa awal dari turbin, selanjutnya akan dibandingkan dengan data hasil eksperimen dengan pemberian pengganggu. Hal ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan performa yang dihasilkan dengan adanya penempatan pengganggu tipe I-53<sup>o</sup> dengan variasi *Reynolds Number* dan jarak antara pusat sudu returning blade dengan pusat silinder pengganggu (S/D).

### 4.2.1 Analisa Putaran Turbin Savonius terhadap Bilangan Reynolds

Pengujian Turbin savonius tanpa penghalang diawali dengan pengukuran putaran poros. Data putaran poros didapatkan dengan menggunakan Tachometer. Pengukuran dilakukan pada Bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$ ,  $12,7 \times 10^4$  dan  $16,3 \times 10^4$ . Data yang didapatkan adalah putaran poros dalam bentuk RPM. Dari data putaran poros didapatkan seperti berikut:



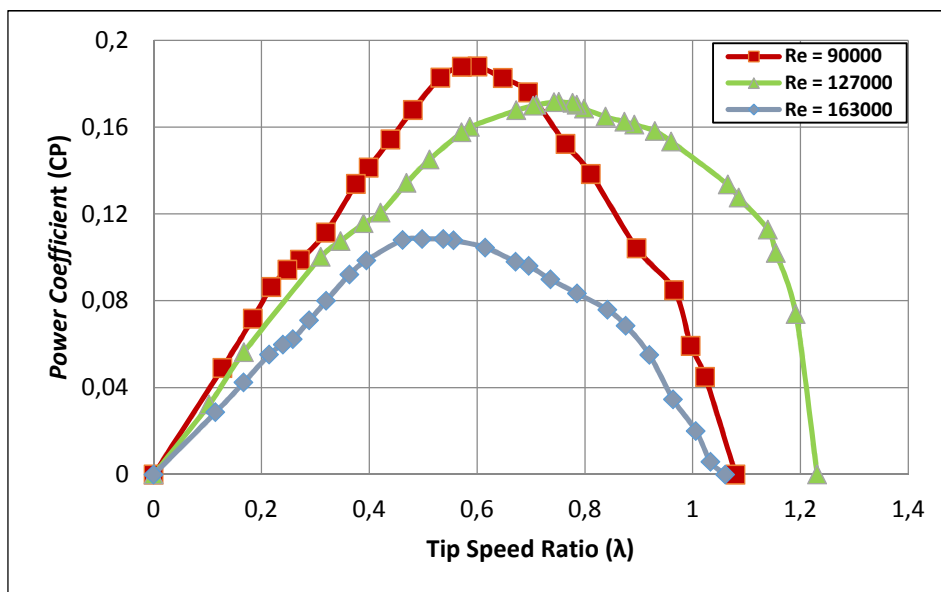
Gambar 4.1 Putaran Poros sebagai fungsi dari Bilangan Reynolds

Dari gambar 4.1 menunjukkan adanya kenaikan putaran seiring dengan naiknya bilangan Reynolds. Hasil ini menunjukkan nilai putaran tertinggi pada Reynolds =  $16,3 \times 10^4$  didapatkan nilai putaran poros 638.27 Rpm. Sedangkan nilai terendah berada pada Reynolds =  $9 \times 10^4$  dengan nilai 361 Rpm. Hal ini dapat

dikatakan bahwa semakin tinggi bilangan *Reynolds*, maka putaran yang dihasilkan akan semakin tinggi. Dimana semakin besar bilangan *Reynolds* maka kecepatan angin yang mengalir juga akan semakin besar. Sehingga selisih gaya drag yang menumbuk turbin juga akan meningkat. Hal ini menyebabkan putaran turbin akan semakin tinggi.

#### 4.2.2 Analisa Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio

Pada hasil eksperimen turbin Savonius tanpa penghalang didapatkan data CP terhadap TSR. Pengukuran Torsi Dinamis pada eksperimen ini menggunakan *Brake Dynamometer*. Dari hasil pengukuran didapatkan Gambar 4.2 . Bilangan *Reynolds* yang dipakai adalah  $9 \times 10^4$ ,  $12,7 \times 10^4$  dan  $16,3 \times 10^4$ .



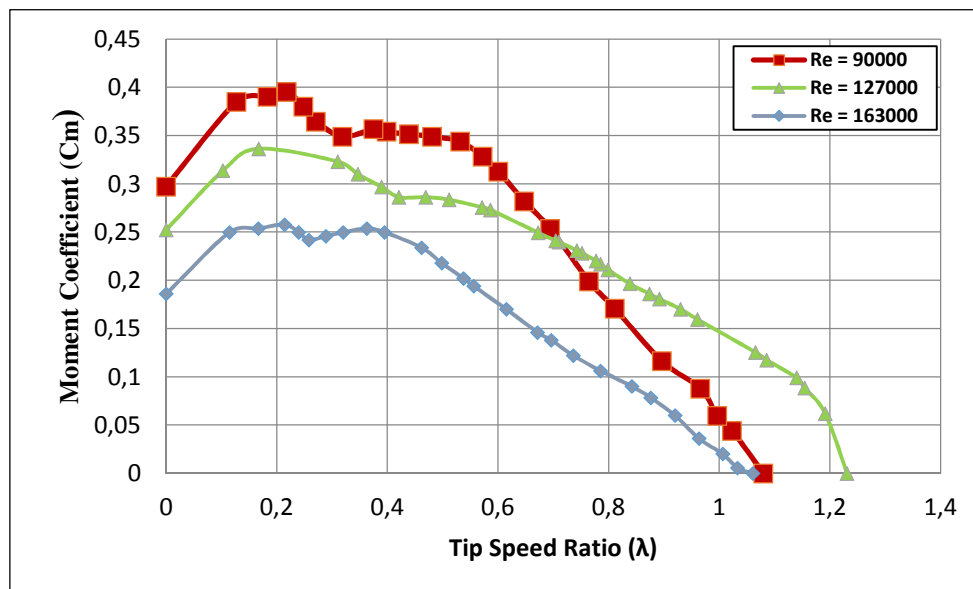
Gambar 4.2 Evolusi *Power Coefficient* turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio*

Gambar 4.2 menunjukkan *trendline* Nilai CP berbentuk *parabolic* dimana nilai CP akan semakin tinggi seiring dengan naiknya Bilangan Reynolds. Tetapi akan turun pada saat melebihi titik optimumnya. Nilai  $CP_{max}$  pada Bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$  didapatkan nilai 18,79% pada *Tip Speed Ratio* 0,6 dan *Tip Speed Ratio* maximum 1,07 . Nilai  $CP_{max}$  pada Bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$  didapatkan nilai 17,15%

pada *Tip Speed Ratio* 0,75 dan *Tip Speed Ratio* maximum 1,23 . Sedangkan Nilai  $CP_{max}$  pada Bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$  dengan nilai 10,85% pada *Tip Speed Ratio* 0,53 dan *Tip Speed Ratio* maximum 1,06 . Berdasarkan gambar 4.2 dapat diketahui Nilai  $CP_{max}$  tertinggi pada bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$ , Sehingga dapat dikatakan turbin angin Savonius ini lebih efektif digunakan pada kecepatan 5 m/s. Sedangkan Nilai  $CP_{max}$  terendah terjadi pada bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$ . Hal ini bisa disebabkan meningkatnya bilangan Reynolds mempengaruhi putaran turbin semakin cepat, sehingga fluida yang mengalir tidak dapat mencapai sudu turbin. Sehingga daya turbin yang dihasilkan lebih rendah.

#### 4.2.3 Analisa *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio*

Pada hasil pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* . *Moment Coefficient* merupakan perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin. Bilangan Reynolds divariasikan pada Reynolds  $9 \times 10^4$ ,  $12,7 \times 10^4$  dan  $16,3 \times 10^4$  ditunjukkan gambar 4.3.

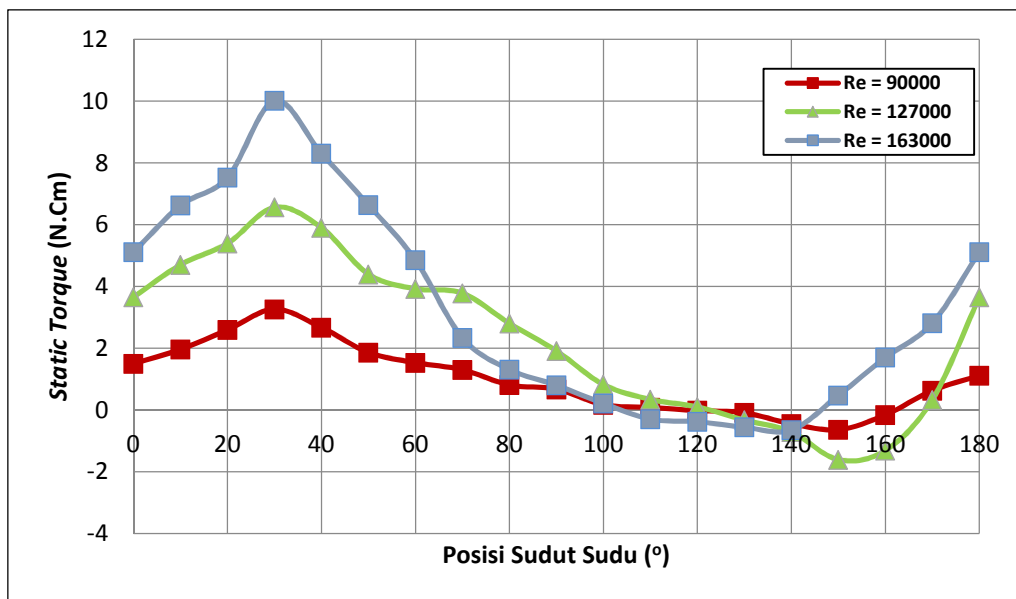


Gambar 4.3 Evolusi *Moment Coefficient* turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio*

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa pada  $TSR = 0$  hingga  $0,6$  semakin tinggi bilangan Reynolds, maka nilai  $C_m$  akan semakin rendah. Nilai  $C_{m_{max}}$  terbesar berada pada bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$  dengan nilai =  $0,395$ . Sedangkan Nilai  $C_{m_{max}}$  terendah berada pada bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$  dengan nilai =  $0,257$ . Nilai  $C_m$  akan meningkat seiring dengan bilangan Reynolds hingga titik optimum. Hasil ini menunjukkan turbin angin efisien pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$ .

#### 4.2.4 Analisa Torsi Statis terhadap Posisi Sudut Sudu Turbin

Pada pengukuran Torsi Statis ( $T_s$ ) menggunakan alat ukur torsi statis Lutron TQ 8800 tanpa penghalang. Pengukuran dilakukan pada saat sudu turbin berada pada sudut  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$  terhadap arah datangnya angin. Bilangan Reynolds divariasikan pada Reynolds  $9 \times 10^4$ ,  $12,7 \times 10^4$  dan  $16,3 \times 10^4$ .



Gambar 4.4 Evolusi Torsi Statis turbin tanpa pengganggu sebagai fungsi dari Posisi Sudu Sudu

Pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai dari torsi statis akan meningkat seiring dengan meningkatnya bilangan Reynolds. Pada sudut  $30^\circ$  mempunyai nilai tertinggi pada semua bilangan Reynolds yang dicoba pada penelitian ini. Sedangkan pada sudut  $140^\circ$  dan  $150^\circ$  mempunyai nilai terendah. Nilai torsi statis minimum

terendah berada pada bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$  dengan nilai = -1,61 N.cm pada sudut  $150^\circ$ . Dan nilai tertinggi pada bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$  dengan nilai 10 N.cm pada sudut  $30^\circ$ . Pada sudut rotor  $0^\circ$  hingga  $60^\circ$  dan  $150^\circ$  hingga  $180^\circ$  pada Bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$  mempunyai nilai tertinggi dikarenakan semakin tinggi bilangan Reynolds, maka kecepatan angin yang mengalir mengenai turbin akan semakin tinggi. Dan hal ini akan menyebabkan gaya drag pada turbin semakin tinggi.

Pada sudut 30 derajat mempunyai nilai tertinggi karena pada posisi sudut tersebut, *advancing blade* diduga menerima gaya *drag* lebih tinggi yang menyebabkan torsi positif semakin bertambah dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih besar sehingga dibutuhkan torsi yang besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada sudut 150 derajat gaya drag pada *advancing blade* lebih rendah dibandingkan pada *returning blade* yang menyebabkan torsi positif berkurang dan perbedaan torsi pada kedua sudu lebih kecil sehingga dibutuhkan torsi yang kecil untuk menggerakkan turbin. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan gaya *drag* pada *returning blade* lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada *advancing blade* sehingga perbedaan gaya *drag* kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan dengan arah turbin dan pada sudut tersebut menunjukkan kemampuan *self starting* yang rendah.

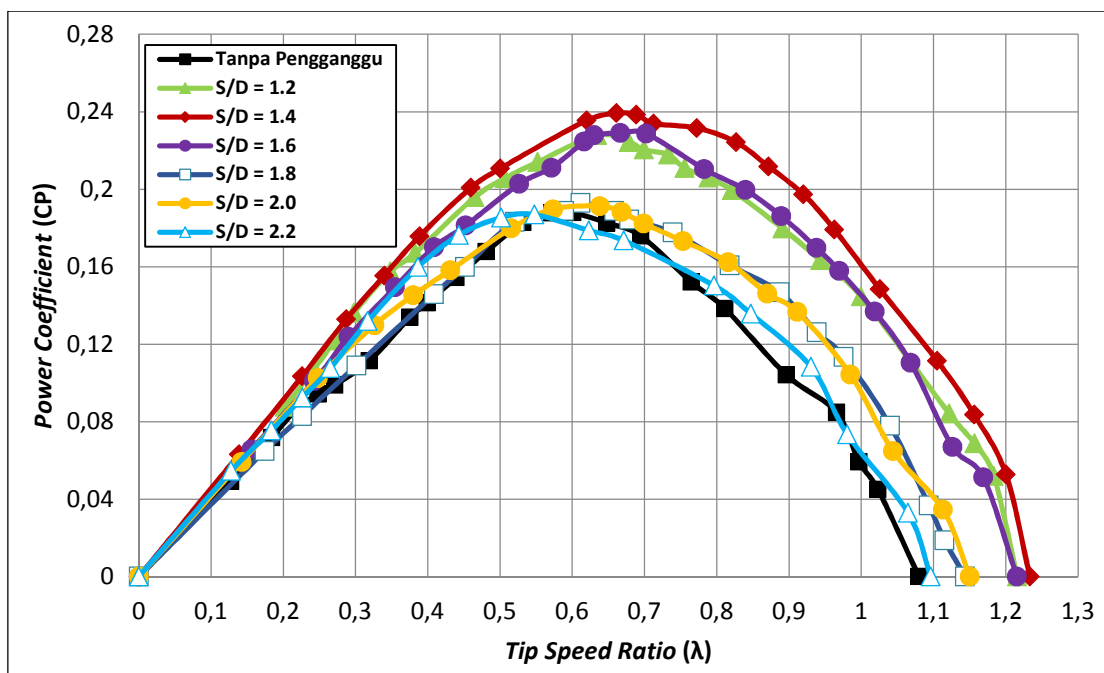
#### **4.3 Analisa Perfoma Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu I-53°**

Pengukuran performa turbin angin dengan pengganggu dilakukan untuk membandingkan dengan data hasil eksperimen tanpa pengganggu. Hal ini bertujuan untuk mengetahui untuk mengetahui seberapa besar peningkatan performa yang dihasilkan dengan ditambahnya pengganggu didepan *returning blade*. Silinder pengganggu tipe I-53° dengan variasi *Reynolds Number* dan jarak antara pusat sudu *returning blade* dengan pusat silinder pengganggu (S/D) = 1,2 – 2,2 .

### 4.3.1 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio dengan variasi S/D .

#### 4.3.1.1 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$

Pada pengukuran ini didapatkan hasil data CP terhadap *Tip Speed Ratio* pada setiap S/D dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $9 \times 10^4$  . *Power Coefficient* merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Data CP terhadap *Tip Speed Ratio* tersebut dibandingkan setiap S/D pada bilangan Reynolds yang sama dalam hal ini  $9 \times 10^4$ :



Gambar 4.5 Evolusi Power Coefficient sebagai fungsi dari Tip Speed Ratio dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

Gambar 4.5 merupakan grafik CP terhadap Tip Speed ratio dengan variasi posisi jarak S/D pada Bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$  . Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 23,93 % pada TSR = 0,66 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi S/D = 2,2 sebesar 18,69 % pada TSR = 0,54. Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa pengganggu, posisi dari pengganggu paling efektif diletakkan pada S/D = 1.4 . Pada posisi S/D = 1,4 didapatkan nilai  $CP_{max}$  yang dihasilkan oleh turbin 23,9 % pada Tip Speed Ratio 0,66 sedangkan tanpa pengganggu  $CP_{max}$  yang dihasilkan hanya 18,79 % pada Tip Speed Ratio 0,6

terjadi peningkatan  $CP_{max}$  sebesar 27,34% jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1 .

Tabel 4.1 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$

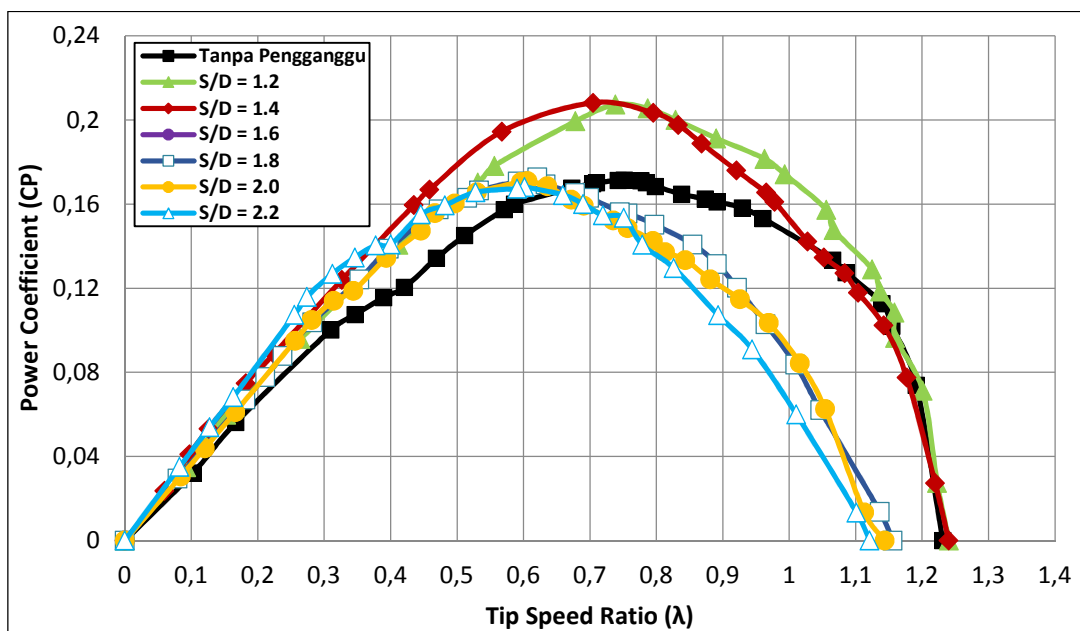
S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	18,79%	-	0,60
1,2	22,79%	21,28%	0,63
1,4	23,93%	27,34%	0,66
1,6	22,90%	21,88%	0,67
1,8	19,29%	2,63%	0,61
2	19,13%	1,82%	0,64
2,2	18,69%	-0,54%	0,55

Pada tabel 4.1 terlihat bahwa pada  $Re = 9 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan silinder pengganggu tipe I-53° di depan *returning blade* pada jarak S/D = 1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; 1,8 dan 2,0 dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$ , dengan kenaikan berturut turut 21,28% , 27,34% , 21,88% , 2,63% , dan 1,82% . Sedangkan pada S/D = 2,2 pemasangan silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi dalam menaikkan performa turbin dimana terjadi penurunan sebesar 0,54% . Sehingga secara umum dapat disimpulkan bahwa pada jarak posisi silinder pengganggu yang sangat dekat S/D = 1,2 tidak lebih efektif bila dibanding S/D = 1,4 yang mencapai posisi optimum. Kemudian  $CP_{max}$  semakin menurun bila bila S/D diperbesar, hal ini karena pada jarak S/D yang semakin besar antara silinder pengganggu I-53° dan sudu *returning blade* seperti 2 buah benda yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi satu sama lain.



#### 4.3.1.2 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$

Pada pengukuran ini didapatkan hasil data CP terhadap Tip Speed Ratio pada setiap S/D dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$ . Power Coefficient merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Data CP terhadap Tip Speed Ratio tersebut dibandingkan setiap S/D pada bilangan Reynolds yang sama dalam hal ini  $12,7 \times 10^4$ :



Gambar 4.6 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari Tip Speed Ratio dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

Gambar 4.6 merupakan grafik CP terhadap *Tip Speed ratio* dengan variasi posisi jarak S/D pada Bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 20,82 % pada TSR = 0,7 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi S/D = 2,2 sebesar 16,81 % pada TSR = 0,60 . Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa pengganggu, posisi dari pengganggu paling efektif diletakkan pada S/D = 1.4 . Pada posisi S/D = 1.4, didapatkan nilai  $CP_{max}$  yang dihasilkan oleh turbin 20,82 % pada *Tip Speed Ratio* 0,7

sedangkan tanpa pengganggu  $CP_{max}$  yang dihasilkan hanya 17,15 % pada Tip Speed Ratio 0,75 terjadi peningkatan  $CP_{max}$  sebesar 21,41% jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2 .

Tabel 4.2 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$

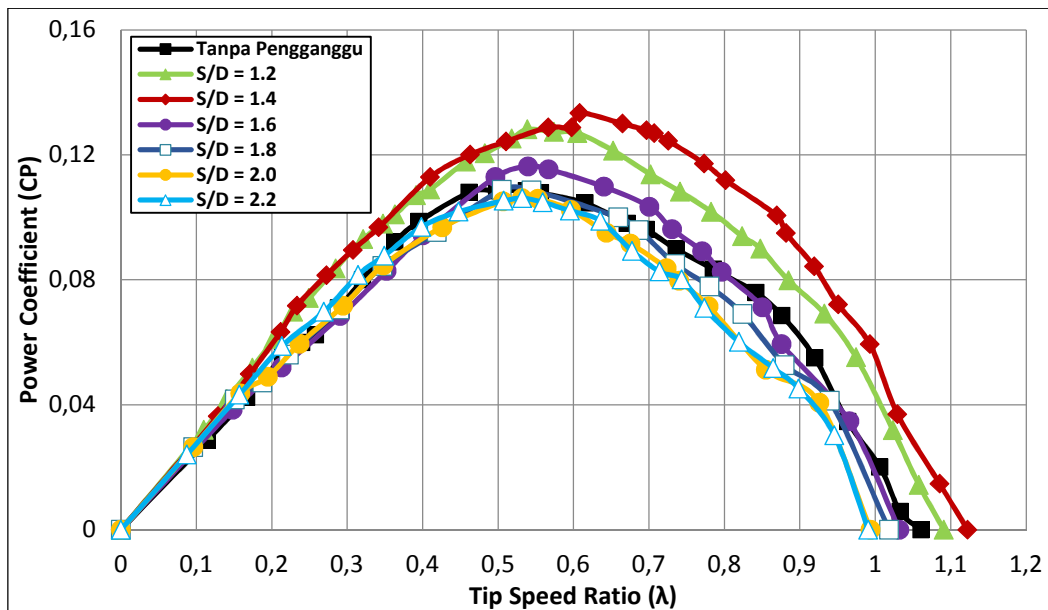
S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	17,15%	-	0,75
1,2	20,74%	20,90%	0,74
1,4	20,82%	21,41%	0,70
1,6	17,76%	3,52%	0,66
1,8	17,28%	0,75%	0,62
2	17,10%	-0,33%	0,61
2,2	16,81%	-1,98%	0,60

Pada tabel 4.2 terlihat bahwa pada  $Re = 12,7 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan silinder pengganggu tipe I-53° di depan *returning blade* pada jarak S/D = 1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; dan 1,8 dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$ , dengan kenaikan berturut turut 20,9% , 21,41% , 3,52% , dan 0,75% . Sedangkan pada S/D = 2,0 dan 2,2 pemasangan silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi dalam menaikkan performa turbin dimana terjadi penurunan sebesar 0,33% dan 1,98%. Sehingga secara umum dapat disimpulkan bahwa pada jarak posisi silinder pengganggu yang sangat dekat S/D = 1,2 tidak lebih efektif bila dibanding S/D = 1,4 yang mencapai posisi optimum. Kemudian  $CP_{max}$  semakin menurun bila S/D diperbesar, hal ini karena pada jarak S/D yang semakin besar antara silinder pengganggu I-53° dan sudu *returning blade* seperti 2 buah benda yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi satu sama lain.

#### 4.3.1.3 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $16,3 \times 10^4$

Pada pengukuran ini didapatkan hasil data CP terhadap Tip Speed Ratio pada setiap S/D dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $16,3 \times 10^4$  . Power

*Coefficient* merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Data CP terhadap *Tip Speed Ratio* tersebut dibandingkan setiap S/D pada bilangan *Reynolds* yang sama dalam hal ini  $16,3 \times 10^4$ :



Gambar 4.7 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari Tip Speed Ratio dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$

Gambar 4.7 merupakan grafik CP terhadap Tip Speed ratio dengan variasi posisi jarak S/D pada Bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 13,34 % pada TSR = 0,61 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi S/D = 2,2 sebesar 10,61 % pada TSR = 0,53 . Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa penghalang, posisi dari pengganggu paling efektif diletakkan pada S/D = 1.4 . Pada posisi S/D = 1.4, didapatkan nilai  $CP_{max}$  yang dihasilkan oleh turbin 13,34 % pada Tip Speed Ratio 0.61 sedangkan tanpa pengganggu  $CP_{max}$  yang dihasilkan hanya 10,85 % pada Tip Speed Ratio 0,54 . terjadi peningkatan  $CP_{max}$  sebesar 22,94% jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.3 .

Tabel 4.3 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds =  $16,3 \times 10^4$

S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	10,85%	-	0,54
1,2	12,81%	18,08%	0,54
1,4	13,34%	22,94%	0,61
1,6	11,63%	7,18%	0,54
1,8	10,88%	0,23%	0,50
2	10,61%	-2,20%	0,53
2,2	10,61%	-2,20%	0,53

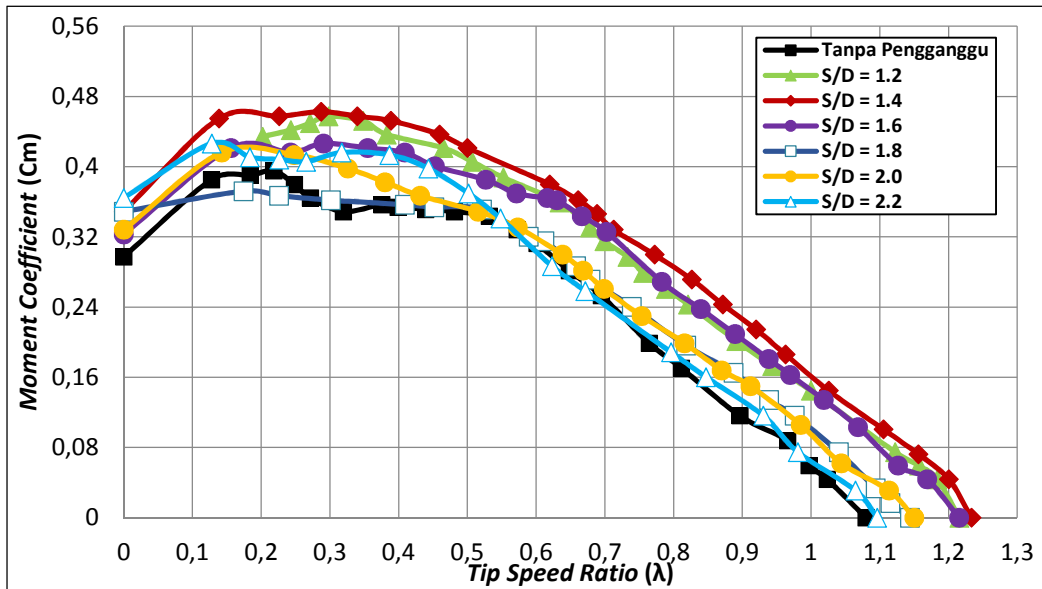
Pada tabel 4.3 terlihat bahwa pada  $Re = 16,3 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan silinder pengganggu tipe I-53° di depan *returning blade* pada jarak S/D = 1,2 ; 1,4 ; 1,6 ; dan 1,8 dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$ , dengan kenaikan berturut turut 18,08% , 22,94% , 7,18% , dan 0,23% . Sedangkan pada S/D = 2,0 dan 2,2 pemasangan silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi dalam menaikkan performa turbin dimana terjadi penurunan sebesar 2,2% dan 2,2%. Sehingga secara umum dapat disimpulkan bahwa pada jarak posisi silinder pengganggu yang sangat dekat S/D = 1,2 tidak lebih efektif bila dibanding S/D = 1,4 yang mencapai posisi optimum. Kemudian  $CP_{max}$  semakin menurun bila bila S/D diperbesar hal ini karena pada jarak S/D yang semakin besar antara silinder pengganggu I-53° dan sudu *returning blade* seperti 2 buah benda yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi satu sama lain.

#### 4.3.2 Analisa Moment Coefficient terhadap Tip Speed Ratio dengan variasi S/D

##### 4.3.2.1 Moment Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$

Pada hasil ini pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* pada setiap posisi S/D pengganggu pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $9 \times 10^4$ . *Moment Coefficient* merupakan

perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin.

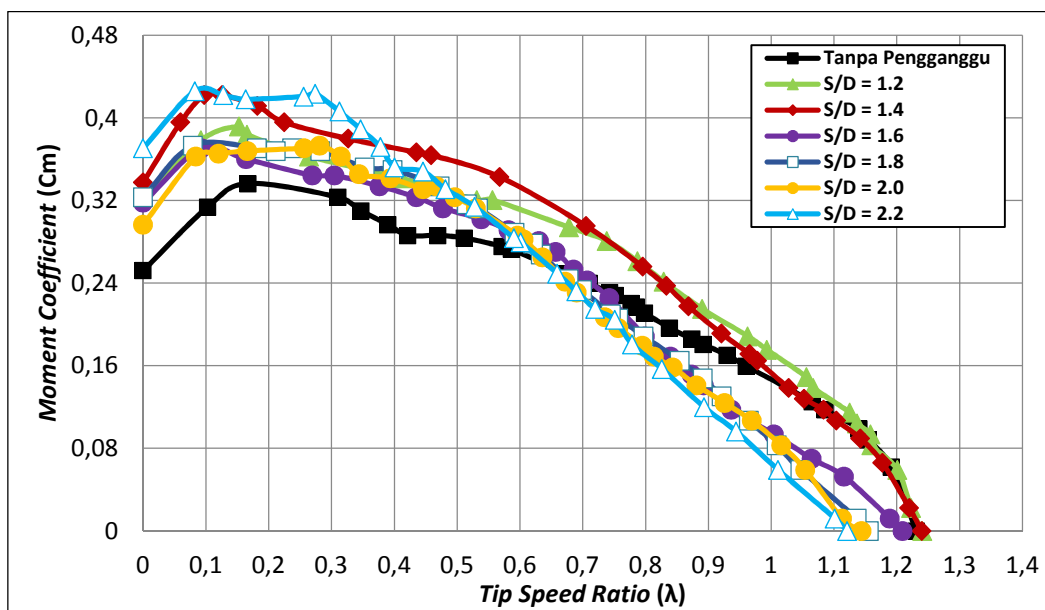


Gambar 4.8 Evolusi Moment Coefficient sebagai fungsi dari Tip Speed Ratio dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

Gambar 4.8 menunjukkan grafik hubungan antara *Moment Coefficient* terhadap Tip Speed Ratio pada turbin angin Savonius berpengganggu pada bilangan *Reynolds*  $9 \times 10^4$  dengan variasi posisi S/D. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Moment Coefficient* menurun dengan meningkatnya Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ). Pada Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )  $> 0,1$  pada posisi S/D = 1,2 ; 1,4 dan 1,6 didapatkan nilai *Moment Coefficient* yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu dan posisi S/D = 1,8 ; 2,0 dan 2,2 . Sehingga dapat diketahui penempatan pengganggu I-53 efektif pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $9 \times 10^4$  ada pada posisi S/D  $\leq 1,6$ . Nilai *Moment Coefficient* pada posisi tersebut lebih tinggi dikarenakan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada sisi returning blade sehingga resultan gaya drag semakin tinggi dan torsi yang dihasilkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penghalang. Pada posisi silinder pengganggu 1,8 ; 2,0 dan 2,2 penambahan silinder pengganggu kurang efektif dikarenakan reduksi gaya drag kurang signifikan.

#### 4.3.2.2 *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$

Pada hasil ini pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* pada setiap posisi S/D pengganggu pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$ . *Moment Coefficient* merupakan perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin.



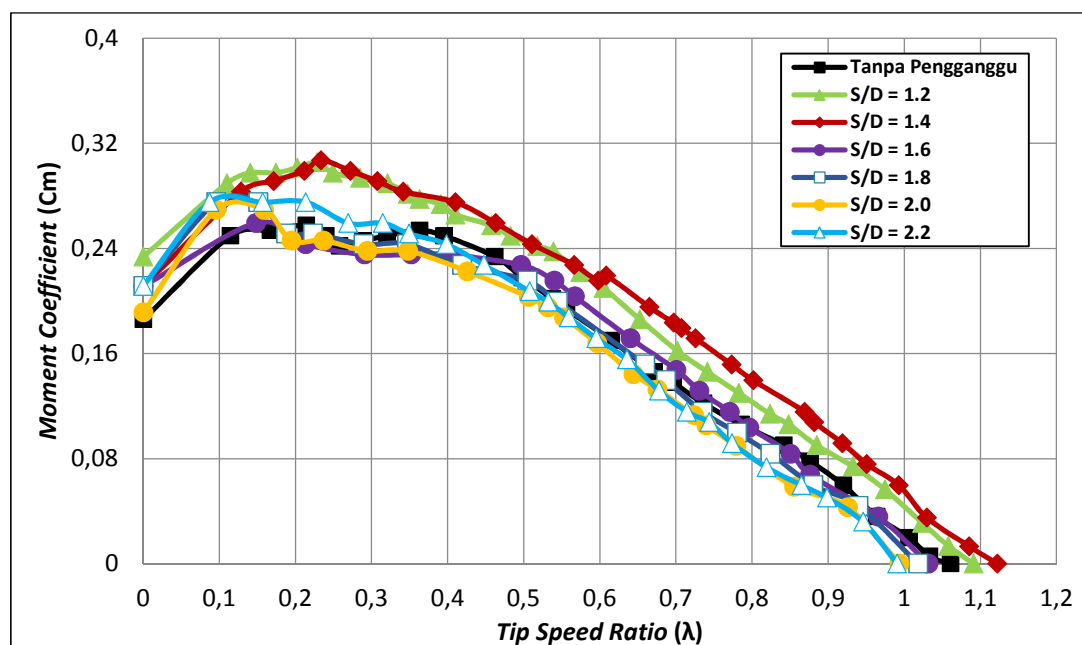
Gambar 4.9 Evolusi *Moment Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

Gambar 4.9 menunjukkan grafik hubungan antara *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin angin Savonius berpengganggu pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  dengan variasi posisi S/D. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Moment Coefficient* menurun dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ). Pada *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ) 0,6 – 1,0 , pada posisi S/D = 1,2 dan 1,4 didapatkan nilai *Moment Coefficient* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu dan posisi S/D = 1,6 - 2,2 . Sehingga dapat diketahui penempatan pengganggu I-53 efektif pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$  ada

pada posisi  $S/D \leq 1,4$ . Nilai *Moment Coefficient* pada posisi tersebut lebih besar dikarenakan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada sisi returning blade sehingga resultan gaya drag semakin tinggi dan torsi yang dihasilkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penghalang. Pada posisi silinder pengganggu  $S/D = 1,6 - 2,2$  penambahan silinder pengganggu pada Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )  $0,7 - 1,0$  kurang efektif dikarenakan reduksi gaya drag kurang signifikan.

#### 4.3.2.3 *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada Bilangan Reynolds $16,3 \times 10^4$

Pada hasil ini pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* pada setiap posisi  $S/D$  pengganggu pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $16,3 \times 10^4$ . *Moment Coefficient* merupakan perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin.



Gambar 4.10 Evolusi *Moment Coefficient* sebagai fungsi dari Tip Speed Ratio dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$

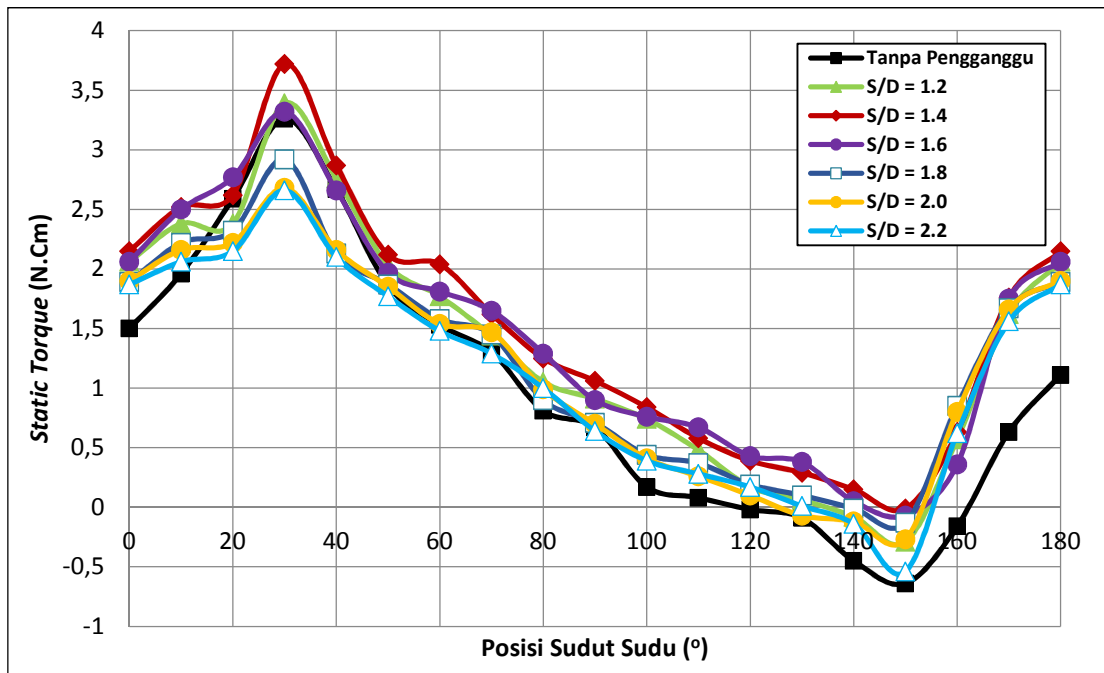
Gambar 4.10 menunjukkan grafik hubungan antara Moment Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada turbin angin Savonius berpengganggu pada bilangan *Reynolds*  $16,3 \times 10^4$  dengan variasi posisi S/D. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai Moment Coefficient menurun dengan meningkatnya Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ). Pada Tip Speed Ratio ( $\lambda$ )  $> 0,2$  , pada posisi S/D = 1,2 dan 1,4 didapatkan nilai *Moment Coefficient* yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu dan posisi S/D = 1,6 - 2,2 . Sehingga dapat diketahui penempatan pengganggu I-53 efektif pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $16,3 \times 10^4$  ada pada posisi S/D  $\leq 1,4$  . Nilai *Moment Coefficient* pada posisi tersebut lebih tinggi dikarenakan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada sisi returning blade sehingga resultan gaya drag semakin tinggi dan torsi yang dihasilkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penghalang. Pada posisi silinder pengganggu S/D = 1,6 - 2,2 penambahan silinder pengganggu kurang efektif dikarenakan reduksi gaya drag kurang signifikan.

### **4.3.3 Analisa Torsi Statis pada Turbin Angin Savonius dengan Silinder Pengganggu tipe I-53° dengan Variasi S/D**

#### **4.3.3.1 Perbandingan Nilai Torsi Statis antara Turbin Tanpa Pengganggu dengan Turbin dengan Pengganggu pada bilangan *Reynolds* = $9 \times 10^4$**

Dalam pemanfaatan energi angin yang paling penting dalam turbin angin adalah kemampuan dalam sistem self-starting. Untuk menentukan masalah ini pengukuran torsi statis ( $T_s$ ) dilakukan sebagai fungsi dari posisi sudut sudu ( $\theta$ ), dengan memvariasikan dengan pengganggu (variasi S/D) atau tanpa pengganggu I-53° jenis silinder di depan sudu returning blade di mana posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dimulai pada sudut  $0^\circ$  (blade ke arah aliran) hingga  $180^\circ$  dengan peningkatan  $10^\circ$ . Pada pengukuran torsi statis pengganggu I-53° dengan bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  pada jarak S / D = 1,4 dapat menghasilkan nilai tertinggi dari torsi statis seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.11.





Gambar 4.11 Evolusi *Torsi Statis* sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

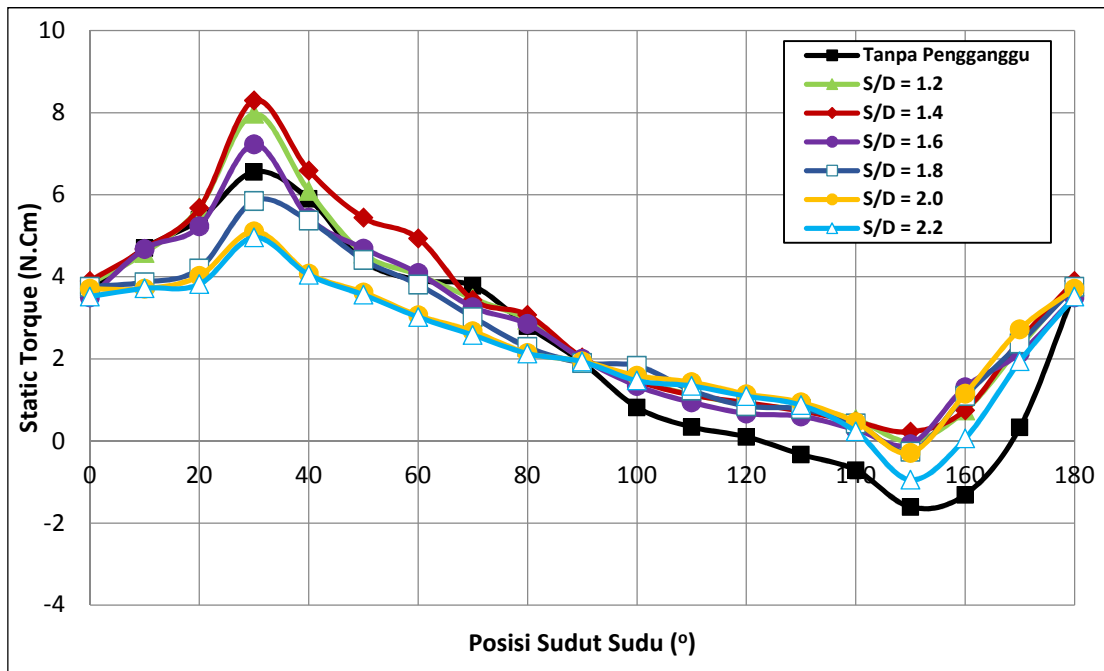
Gambar 4.11 merupakan grafik nilai Torsi Statis terhadap sudut bukaan turbin terhadap arah datangnya angin. Berdasarkan gambar 4.11 dapat diketahui nilai torsi statis paling tinggi sebesar 3,72 N.Cm pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $30^\circ$  adalah turbin *Savonius* berpengganggu dengan jarak  $S/D = 1,4$ . Selanjutnya pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $> 70^\circ$  turbin *Savonius* berpengganggu didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $30^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai gangguan diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi sudut sudu blade tersebut diduga *advancing blade* menerima gaya drag yang lebih tinggi yang menyebabkan peningkatan torsi positif. Kemudian perbedaan dalam torsi kedua sudu lebih besar sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dari  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai pengganggu diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi sudut ini blade *Savonius* posisi *advancing blade* hampir searah dengan aliran udara. Sehingga aliran

udara yang sangat sedikit dapat dikumpulkan oleh *advancing blade*. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari pada *advancing blade*. Sehingga perbedaan gaya drag dari kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan arah turbin. Dengan demikian, nilai negatif dari torsi statis menunjukkan kemampuan *self-starting* yang rendah dari turbin angin *Savonius*, dan itu diperoleh pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu. Tetapi dengan memasang pengganggu  $I-53^\circ$  di depan *returning blade* turbin memberikan kemampuan *self-starting* yang lebih baik ditunjukkan oleh gambar 4.11 pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $> 70^\circ$  nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi statis pada turbin konvensional yang tanpa silinder pengganggu.

#### **4.3.3.2 Perbandingan Nilai Torsi Statis antara Turbin Tanpa Pengganggu dengan Turbin dengan Pengganggu pada bilangan $Reynolds = 12,7 \times 10^4$**

Dalam pemanfaatan energi angin yang paling penting dalam turbin angin adalah kemampuan dalam sistem *self-starting*. Untuk menentukan masalah ini pengukuran torsi statis ( $T_s$ ) dilakukan sebagai fungsi dari posisi sudut sudu ( $\theta$ ), dengan memvariasikan dengan pengganggu (variasi S/D) atau tanpa pengganggu  $I-53^\circ$  jenis silinder di depan sudu *returning blade* di mana posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dimulai pada sudut  $0^\circ$  (*blade* ke arah aliran) hingga  $180^\circ$  dengan peningkatan  $10^\circ$ . Pada pengukuran torsi statis pengganggu  $I-53^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada jarak  $S/D = 1,4$  dapat menghasilkan nilai tertinggi dari torsi statis seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.12.



Gambar 4.12 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

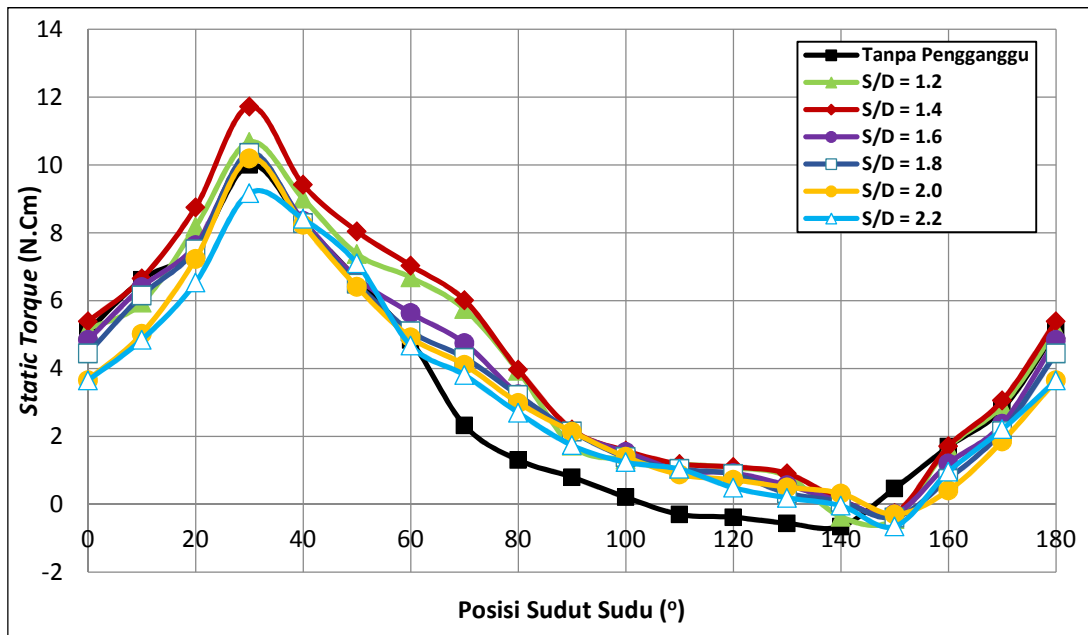
Gambar 4.12 merupakan grafik nilai Torsi Statis terhadap sudut bukaan turbin terhadap arah datangnya angin. Berdasarkan gambar 4.12 dapat diketahui nilai torsi statis paling tinggi sebesar 8,3 N.Cm pada sudut( $\theta$ ) *blade*  $30^\circ$  adalah turbin savonis berpengganggu dengan jarak S/D 1,4. Selanjutnya pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $> 90^\circ$  turbin savonius berpengganggu didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu .

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada sudut blade rotor ( $\theta$ )  $30^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai gangguan diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi sudut rotor blade tersebut diduga *advancing blade* menerima gaya drag yang lebih tinggi yang menyebabkan peningkatan torsi positif. Kemudian perbedaan dalam torsi kedua sudu lebih besar sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada sudut blade rotor ( $\theta$ ) dari  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai pengganggu diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi sudut ini blade rotor posisi *advancing blade* hampir searah dengan aliran udara. Sehingga aliran udara

yang sangat sedikit dapat dikumpulkan oleh *advancing blade*. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari pada *advancing blade*. Sehingga perbedaan gaya drag dari kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan arah turbin. Dengan demikian, nilai negatif dari torsi statis menunjukkan kemampuan *self-starting* yang rendah dari turbin angin *Savonius*, dan itu diperoleh pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu. Tetapi dengan memasang pengganggu I- $53^\circ$  di depan *returning blade* turbin memberikan kemampuan *self-starting* yang lebih baik ditunjukkan oleh gambar 4.12 pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $> 90^\circ$  nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi statis pada turbin konvensional yang tanpa silinder pengganggu.

#### **4.3.3.3 Perbandingan Nilai Torsi Statis antara Turbin Tanpa Pengganggu dengan Turbin dengan Pengganggu pada bilangan Reynolds = $16,3 \times 10^4$**

Dalam pemanfaatan energi angin yang paling penting dalam turbin angin adalah kemampuan dalam sistem *self-starting*. Untuk menentukan masalah ini pengukuran torsi statis ( $T_s$ ) dilakukan sebagai fungsi dari posisi sudut sudu ( $\theta$ ), dengan memvariasikan dengan pengganggu (variasi S/D) atau tanpa pengganggu I- $53^\circ$  jenis silinder di depan sudu *returning blade* di mana posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dimulai pada sudut  $0^\circ$  (*blade* ke arah aliran) hingga  $180^\circ$  dengan peningkatan  $10^\circ$ . Pada pengukuran torsi statis pengganggu I- $53^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$  pada jarak S/D = 1,4 dapat menghasilkan nilai tertinggi dari torsi statis pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $10^\circ$  sampai dengan sudut *blade* ( $\theta$ )  $130^\circ$  jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.13.



Gambar 4.13 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisis sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$

Gambar 4.13 merupakan grafik nilai Torsi Statis terhadap sudut bukaan turbin terhadap arah datangnya angin. Berdasarkan gambar 4.12 dapat diketahui nilai torsi statis paling tinggi sebesar 11,73 N.Cm pada sudut *blade*  $30^\circ$  ( $\theta$ ) adalah turbin savonis berpengganggu dengan jarak S/D 1,4. Selanjutnya pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $> 60^\circ$  sampai dengan sudut *blade* ( $\theta$ )  $140^\circ$  didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds  $16,3 \times 10^4$  pada sudut blade rotor ( $\theta$ )  $30^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai gangguan diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi sudut rotor blade tersebut diduga *advancing blade* menerima gaya drag yang lebih tinggi yang menyebabkan peningkatan torsi positif. Kemudian perbedaan dalam torsi kedua sudu lebih besar sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada sudut blade rotor ( $\theta$ ) dari  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai pengganggu diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi sudut ini blade rotor posisi *advancing blade* hampir searah dengan aliran udara. Sehingga aliran udara yang sangat sedikit dapat dikumpulkan oleh *advancing blade*. Nilai negatif pada torsi

statis menunjukkan bahwa gaya drag pada returning blade lebih besar dari pada advancing blade. Sehingga perbedaan gaya drag dari kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan arah turbin. Dengan demikian, nilai negatif dari torsi statis menunjukkan kemampuan *self-starting* yang rendah dari turbin angin *Savonius*, dan itu diperoleh pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu. Tetapi dengan memasang pengganggu  $I-53^\circ$  di depan *returning blade* turbin memberikan kemampuan *self-starting* yang lebih baik ditunjukkan oleh gambar 4.13 pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $> 60^\circ - 140^\circ$  nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi statis pada turbin konvensional yang tanpa silinder pengganggu.

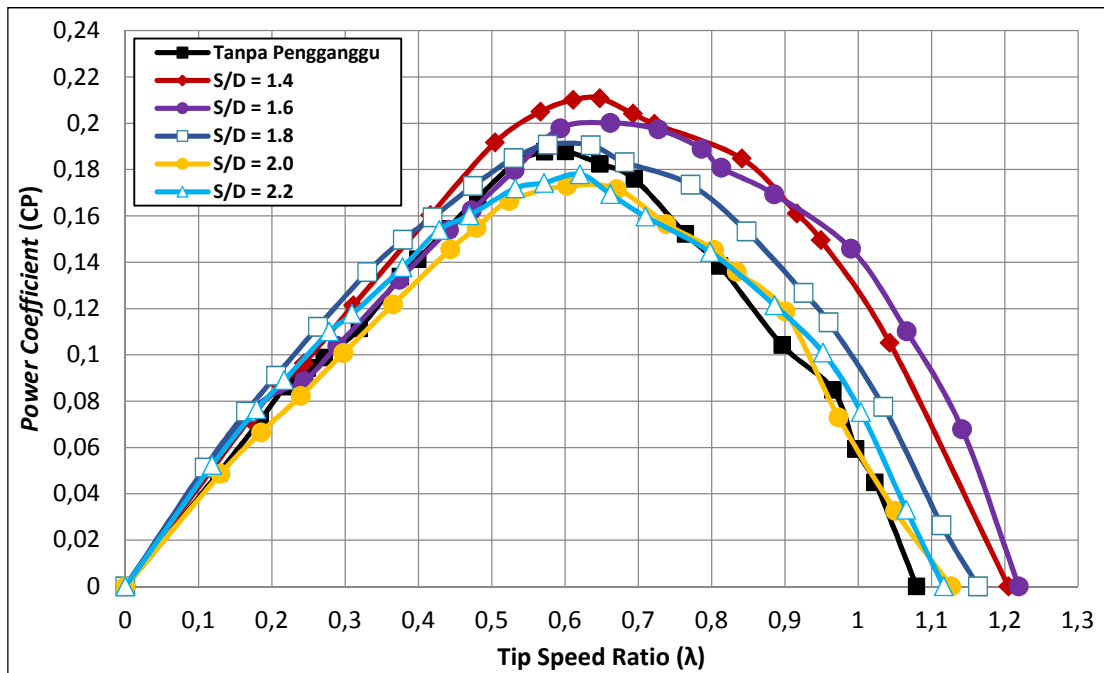
#### **4.4 Analisa Perfoma Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Pengukuran performa turbin angin dengan pengganggu Silinder pengganggu Sirkular dilakukan untuk membandingkan dengan data pengganggu Silinder  $I-53^\circ$ . Hal ini bertujuan untuk mengetahui untuk mengetahui seberapa besar peningkatan performa yang dihasilkan antara pengganggu yang tidak diiris dan diiris  $I-53^\circ$  di depan returning blade. Pengganggu tersebut dengan *Reynolds Number* yang divariasikan dan jarak antara pusat sudu returning blade dengan pusat silinder pengganggu (S/D) = 1,4 – 2,2 .

##### **4.4.1 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio dengan variasi S/D .**

###### **4.4.1.1 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$**

Pada pengukuran ini didapatkan hasil data CP terhadap *Tip Speed Ratio* pada setiap S/D dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $9 \times 10^4$ . *Power Coefficient* merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Data CP terhadap *Tip Speed Ratio* tersebut dibandingkan setiap S/D pada bilangan Reynolds yang sama dalam hal ini  $9 \times 10^4$ :



Gambar 4.14 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* dengan variasi posisi *S/D* pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

Gambar 4.14 merupakan grafik CP terhadap Tip Speed ratio dengan variasi posisi jarak *S/D* pada Bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 21,08 % pada TSR = 0,65 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi *S/D* = 2,1 sebesar 17,3 % pada TSR = 0,60 . Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa pengganggu, posisi dari pengganggu paling efektif diletakkan pada *S/D* = 1.4 . Pada posisi *S/D* = 1,4 didapatkan nilai  $CP_{max}$  yang dihasilkan oleh turbin 21,08 % pada *Tip Speed Ratio* 0,65 sedangkan tanpa pengganggu  $CP_{max}$  yang dihasilkan hanya 18,79 % pada Tip Speed Ratio 0,6 terjadi peningkatan  $CP_{max}$  sebesar 12,18% jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.4 .

Tabel 4.4 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$

S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	18,79%	-	0,60
1,4	21.08%	12.18%	0.65
1,6	20.02%	6.51%	0.66
1,8	19.08%	1.54%	0.58
2	17.30%	-7.96%	0.60
2,2	17.80%	-5.28%	0.62

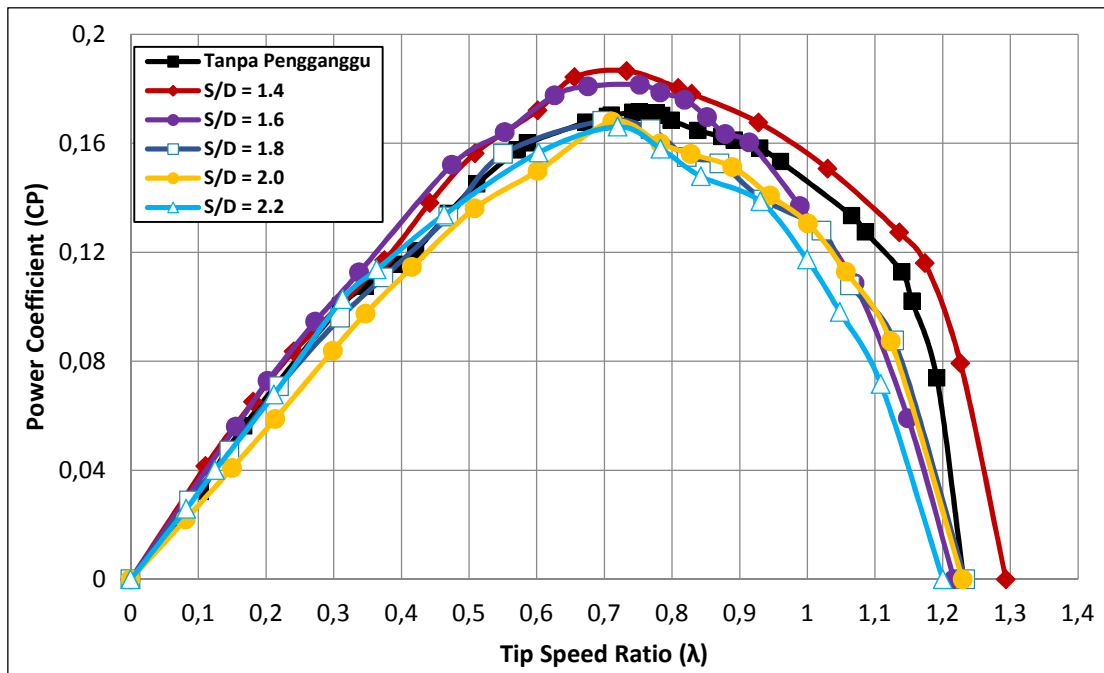
Pada tabel 4.4 terlihat bahwa pada  $Re = 9 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan silinder pengganggu tipe silinder sirkular di depan *returning blade* pada jarak  $S/D = 1,4 ; 1,6$  dan  $1,8$  dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$ , dengan kenaikan berturut turut  $12,18\% ; 6,51\%$  dan  $1,54\%$  . Sedangkan pada  $S/D = 2,0$  dan  $2,2$  pemasangan silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi dalam menaikkan performa turbin dimana terjadi penurunan sebesar  $7,96\%$  dan  $5,28\%$  . Sehingga secara umum dapat disimpulkan bahwa pada jarak posisi silinder pengganggu yang sangat dekat  $S/D = 1,4$  efektif bila dibanding  $S/D \geq 1,6$  . Kemudian  $CP_{max}$  semakin menurun bila bila  $S/D$  diperbesar, hal ini karena pada jarak  $S/D$  yang semakin besar antara silinder pengganggu silinder sirkular dan sudu *returning blade* seperti 2 buah benda yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi satu sama lain.

#### 4.4.1.2 Power Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$

Pada pengukuran ini didapatkan hasil data CP terhadap Tip Speed Ratio pada setiap S/D dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$  . Power Coefficient merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Data CP terhadap Tip Speed Ratio



tersebut dibandingkan setiap S/D pada bilangan Reynolds yang sama dalam hal ini  $12,7 \times 10^4$ :



Gambar 4.15 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* dengan variasi posisi S/D pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

Gambar 4.15 merupakan grafik CP terhadap *Tip Speed ratio* dengan variasi posisi jarak S/D pada Bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$ . Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 18,66 % pada TSR = 0,73 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi S/D = 2,2 sebesar 16,61 % pada TSR = 0,72 . Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa pengganggu, posisi dari pengganggu paling efektif diletakkan pada S/D = 1.4 . Pada posisi S/D = 1.4, didapatkan nilai  $CP_{max}$  yang dihasilkan oleh turbin 18,66 % pada *Tip Speed Ratio* 0,73 sedangkan tanpa pengganggu  $CP_{max}$  yang dihasilkan hanya 17,15 % pada Tip Speed Ratio 0,75 terjadi peningkatan  $CP_{max}$  sebesar 8,78% jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.5 .

Tabel 4.5 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  terhadap posisi jarak S/D pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds =  $12,7 \times 10^4$

S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	17,15%	-	0,75
1,4	18.66%	8.78%	0.73
1,6	18.15%	5.84%	0.75
1,8	16.82%	-1.93%	0.70
2	16.79%	-2.08%	0.71
2,2	16.61%	-3.18%	0.72

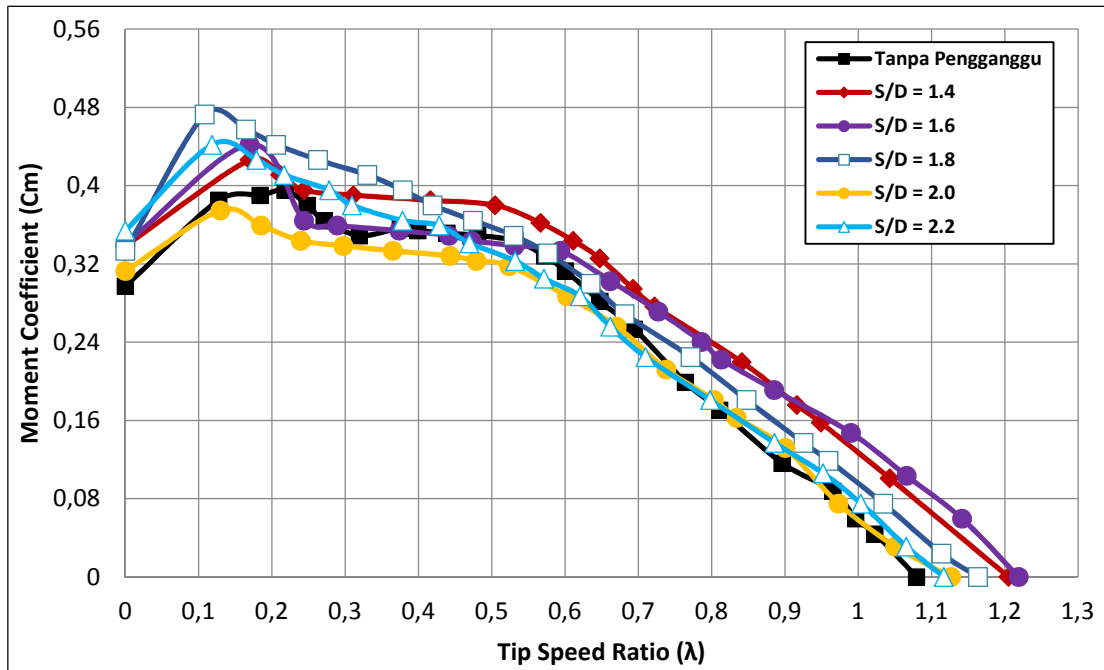
Pada tabel 4.2 terlihat bahwa pada  $Re = 12,7 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan silinder pengganggu tipe I-53° di depan *returning blade* pada jarak S/D = 1,4 dan 1,6 dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$ , dengan kenaikan berturut turut 8,78% , dan 5,84% . Sedangkan pada S/D  $\geq 1,8$  pemasangan silinder pengganggu sudah tidak efektif lagi dalam menaikkan performa turbin dimana terjadi penurunan sebesar 1,93; 2,08% dan 3,18%. Sehingga secara umum dapat disimpulkan bahwa pada jarak posisi silinder pengganggu yang sangat dekat efektif bila dibanding dengan S/D > 1,4 yang mencapai posisi optimum. Kemudian  $CP_{max}$  semakin menurun bila bila S/D diperbesar, hal ini karena pada jarak S/D yang semakin besar antara pengganggu silinder sirkular dan sudu *returning blade* seperti 2 buah benda yang berdiri sendiri-sendiri tanpa saling mempengaruhi satu sama lain.

#### 4.4.2 Analisa Moment Coefficient terhadap Tip Speed Ratio dengan variasi S/D

##### 4.4.2.1 Moment Coefficient terhadap Tip Speed Ratio pada Bilangan Reynolds $9 \times 10^4$

Pada hasil ini pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* pada setiap posisi S/D pengganggu pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $9 \times 10^4$ . *Moment Coefficient* merupakan

perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin.



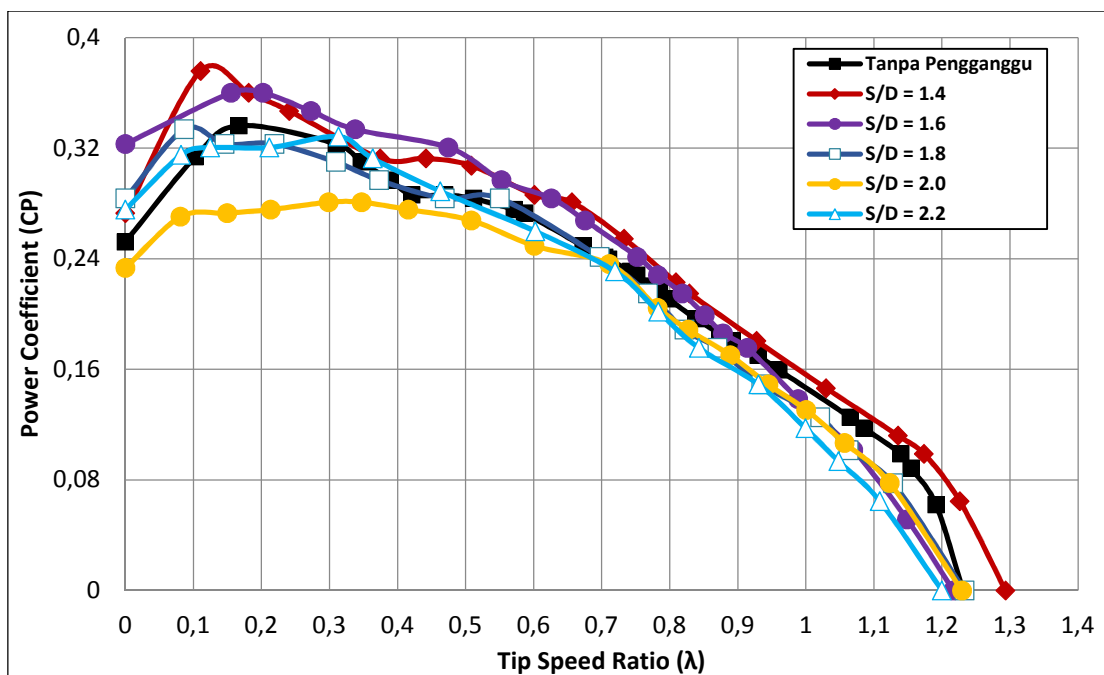
Gambar 4.16 Evolusi *Moment Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

Gambar 4.16 menunjukkan grafik hubungan antara *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin angin Savonius berpengganggu pada bilangan *Reynolds*  $9 \times 10^4$  dengan variasi posisi *S/D*. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Moment Coefficient* menurun dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ). Pada *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ )  $> 0,5$  pada posisi *S/D* = 1,4; 1,6 dan 1,8 didapatkan nilai *Moment Coefficient* yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu dan posisi *S/D* = 2,0 dan 2,2 . Sehingga dapat diketahui penempatan pengganggu silinder sirkular efektif pada bilangan *Reynolds* yang sama yaitu  $9 \times 10^4$  ada pada posisi *S/D*  $\leq 1,8$ . Nilai *Moment Coefficient* pada posisi tersebut lebih tinggi dikarenakan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada sisi returning blade sehingga resultan gaya drag semakin tinggi dan torsi yang dihasilkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penghalang. Pada posisi silinder

pengganggu 2,0 dan 2,2 penambahan silinder pengganggu kurang efektif dikarenakan reduksi gaya drag kurang signifikan.

#### 4.4.2.2 *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada Bilangan Reynolds $12,7 \times 10^4$

Pada hasil ini pengukuran dengan menggunakan Brake dynamometer didapatkan nilai *Moment Coefficient* pada setiap posisi S/D pengganggu pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$ . *Moment Coefficient* merupakan perbandingan antara Torsi dinamis hasil dari turbin angin Savonius dengan torsi yang dihasilkan oleh energi angin.



Gambar 4.17 Evolusi *Moment Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* dengan pengganggu pada posisi Bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

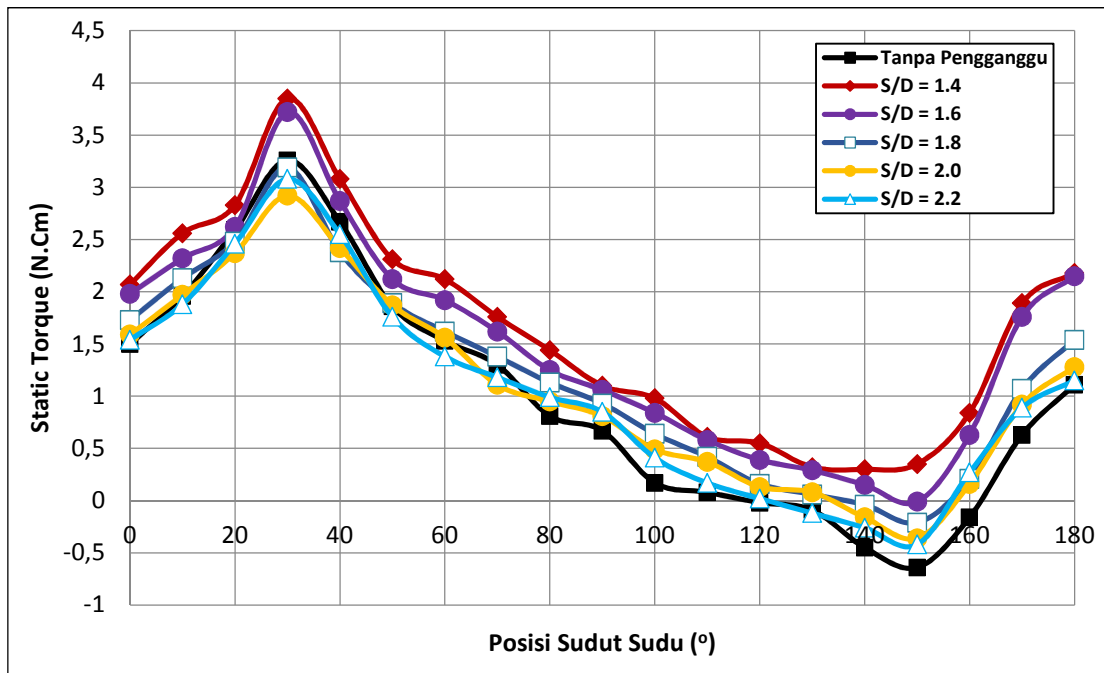
Gambar 4.17 menunjukkan grafik hubungan antara *Moment Coefficient* terhadap *Tip Speed Ratio* pada turbin angin Savonius berpengganggu pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  dengan variasi posisi S/D. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai *Moment Coefficient* menurun dengan meningkatnya *Tip Speed Ratio* ( $\lambda$ ). Pada *Tip Speed*

Ratio ( $\lambda$ ) 0,4 – 0,9 , pada posisi S/D = 1,4 dan 1,6 didapatkan nilai *Moment Coefficient* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu dan posisi S/D > 1,6 . Sehingga dapat diketahui penempatan pengganggu silinder sirkular efektif pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$  ada pada posisi S/D  $\leq$  1,6. Nilai *Moment Coefficient* pada posisi tersebut lebih besar dikarenakan silinder pengganggu dapat mengurangi gaya drag pada sisi returning blade sehingga resultan gaya drag semakin tinggi dan torsi yang dihasilkan akan lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penghalang. Pada posisi silinder pengganggu S/D > 1,6 penambahan silinder pengganggu kurang efektif dikarenakan reduksi gaya drag kurang signifikan.

#### **4.4.3 Analisa Torsi Statis pada Turbin Angin Savonius dengan Pengganggu Silinder Sirkular dengan Variasi S/D**

4.4.3.1 Perbandingan Nilai Torsi Statis antara Turbin Tanpa Pengganggu dengan Turbin dengan Pengganggu pada bilangan *Reynolds* =  $9 \times 10^4$

Dalam pemanfaatan energi angin yang paling penting dalam turbin angin adalah kemampuan dalam sistem self-starting. Untuk menentukan masalah ini pengukuran torsi statis ( $T_s$ ) dilakukan sebagai fungsi dari posisi sudut sudu ( $\theta$ ), dengan memvariasikan dengan pengganggu (variasi S/D) atau tanpa pengganggu silinder sirkuler jenis silinder di depan sudu returning blade di mana posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dimulai pada sudut  $0^\circ$  (blade ke arah aliran) hingga  $180^\circ$  dengan peningkatan  $10^\circ$ . Pada pengukuran torsi statis pengganggu I-53 $^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  pada jarak S / D = 1,4 dan 1.6 dapat menghasilkan nilai tertinggi dari torsi statis seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.18.



Gambar 4.18 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$

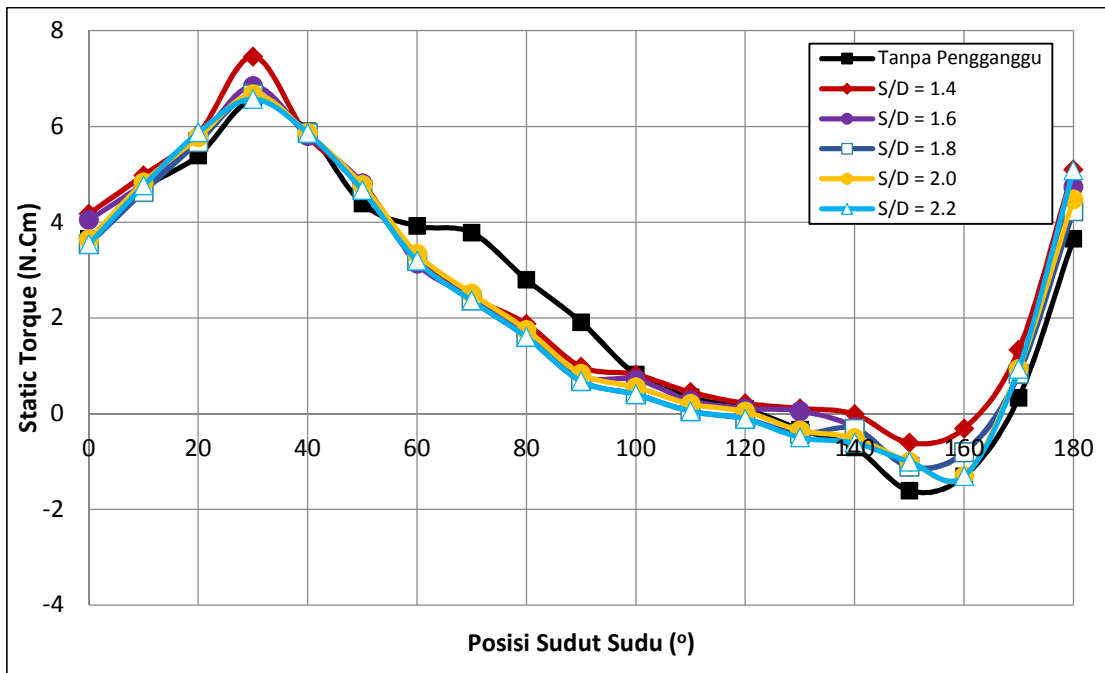
Gambar 4.18 merupakan grafik nilai Torsi Statis terhadap sudut bukaan turbin terhadap arah datangnya angin. Berdasarkan gambar 4.18 dapat diketahui nilai torsi statis paling tinggi sebesar 3,85 N.Cm pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $30^\circ$  adalah turbin *Savonius* berpengganggu dengan jarak  $S/D = 1,4$ . Selanjutnya pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $> 70^\circ$  turbin *Savonius* berpengganggu didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $30^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai gangguan diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi sudut sudu *blade* tersebut diduga *advancing blade* menerima gaya drag yang lebih tinggi yang menyebabkan peningkatan torsi positif. Kemudian perbedaan dalam torsi kedua sudu lebih besar sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dari  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu silinder sirkular sebagai pengganggu diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi sudut ini *blade Savonius* posisi *advancing blade* hampir searah dengan aliran udara. Sehingga

aliran udara yang sangat sedikit dapat dikumpulkan oleh *advancing blade*. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari pada *advancing blade*. Sehingga perbedaan gaya drag dari kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan arah turbin. Dengan demikian, nilai negatif dari torsi statis menunjukkan kemampuan *self-starting* yang rendah dari turbin angin *Savonius*, dan itu diperoleh pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu. Tetapi dengan memasang pengganggu silinder sirkular di depan *returning blade* turbin memberikan kemampuan *self-starting* yang lebih baik ditunjukkan oleh gambar 4.11 pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $> 70^\circ$  nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $9 \times 10^4$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi statis pada turbin konvensional yang tanpa silinder pengganggu.

#### **4.4.3.2 Perbandingan Nilai Torsi Statis antara Turbin Tanpa Pengganggu dengan Turbin dengan Pengganggu pada bilangan Reynolds = $12,7 \times 10^4$**

Dalam pemanfaatan energi angin yang paling penting dalam turbin angin adalah kemampuan dalam sistem *self-starting*. Untuk menentukan masalah ini pengukuran torsi statis ( $T_s$ ) dilakukan sebagai fungsi dari posisi sudut sudu ( $\theta$ ), dengan memvariasikan dengan pengganggu (variasi S/D) atau tanpa pengganggu silinder sirkuler jenis silinder di depan sudu *returning blade* di mana posisi sudut sudu ( $\theta$ ) dimulai pada sudut  $0^\circ$  (*blade* ke arah aliran) hingga  $180^\circ$  dengan peningkatan  $10^\circ$ . Pada pengukuran torsi statis pengganggu Silinder Sirkular dengan bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada jarak S/D = 1,4 dapat menghasilkan nilai tertinggi dari torsi statis seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.19.



Gambar 4.19 Evolusi Torsi Statis sebagai fungsi dari posisi sudut sudu dengan pengganggu pada posisi bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$

Gambar 4.19 merupakan grafik nilai Torsi Statis terhadap sudut bukaan turbin terhadap arah datangnya angin. Berdasarkan gambar 4.12 dapat diketahui nilai torsi statis paling tinggi sebesar 7,4 N.Cm pada sudut( $\theta$ ) *blade*  $30^\circ$  adalah turbin savonius berpengganggu dengan jarak S/D 1,4. Selanjutnya pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $> 90^\circ$  turbin savonius berpengganggu didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tanpa pengganggu .

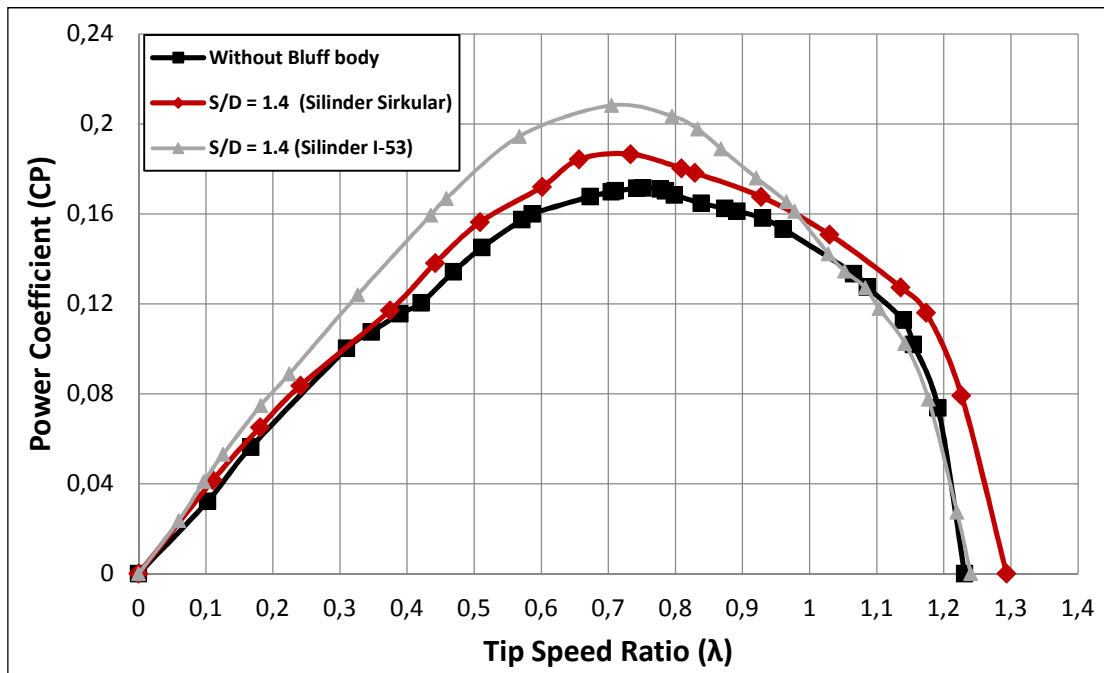
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada sudut *blade* rotor ( $\theta$ )  $30^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu I-53 $^\circ$  sebagai gangguan diperoleh torsi statis maksimum karena pada posisi sudut rotor *blade* tersebut diduga *advancing blade* menerima gaya drag yang lebih tinggi yang menyebabkan peningkatan torsi positif. Kemudian perbedaan dalam torsi kedua sudu lebih besar sehingga diperlukan torsi yang lebih besar untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada sudut *blade* rotor ( $\theta$ ) dari  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu silinder sirkular sebagai pengganggu diperoleh torsi statis minimum karena pada posisi sudut ini *blade* rotor posisi *advancing blade* hampir searah dengan aliran udara. Sehingga



aliran udara yang sangat sedikit dapat dikumpulkan oleh *advancing blade*. Nilai negatif pada torsi statis menunjukkan bahwa gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari pada *advancing blade*. Sehingga perbedaan gaya drag dari kedua sudu menghasilkan torsi negatif yang berputar berlawanan arah turbin. Dengan demikian, nilai negatif dari torsi statis menunjukkan kemampuan *self-starting* yang rendah dari turbin angin *Savonius*, dan itu diperoleh pada sudut *blade* ( $\theta$ )  $150^\circ$  tanpa dan dengan pengganggu. Tetapi dengan memasang pengganggu silinder sirkular di depan *returning blade* turbin memberikan kemampuan *self-starting* yang lebih baik ditunjukkan oleh gambar 4.12 pada posisi sudut sudu ( $\theta$ )  $> 130^\circ$  nilai torsi statis pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai torsi statis pada turbin konvensional yang tanpa silinder pengganggu.

#### **4.5 Perbandingan *Power Coefficient* antara pengganggu (Silinder Sirkular dan Silinder Tipe I-53° ) dengan tanpa pengganggu pada S/D = 1,4 pada Re = 127000.**

Pada hasil ini dilakukan perbandingan nilai CP terhadap *Tip Speed Ratio* pada S/D = 1,4 dan pada bilangan Reynolds yang sama yaitu  $12,7 \times 10^4$ . *Power Coefficient* merupakan perbandingan antara energi yang di hasilkan oleh turbin terhadap energi yang diberikan oleh angin. Posisi S/D= 1,4 dipilih karena posisi tersebut memiliki puncak CP yang lebih tinggi diperkirakan posisi tersebut efektif dalam mengurangi gaya drag pada sisi *returning blade* sehingga selisih total gaya drag antara kedua sudu *returning* dan *advancing* semakin besar. Gambar 4.20 merupakan Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* antara tanpa pengganggu dan menggunakan pengganggu pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada S/D = 1,4 silinder pengganggu tipe I-53. Pada grafik tersebut didapatkan nilai  $CP_{max}$  tertinggi dengan nilai 20,82% pada TSR = 0,70 dan nilai  $CP_{max}$  terendah pada posisi tanpa pengganggu sebesar 17,15 % pada TSR = 0,75 . Jika dilakukan perbandingan dengan performa turbin tanpa pengganggu, Pengganggu dengan tipe I-53° pada S/D = 1.4 merupakan yang lebih efektif. Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.20 .



Gambar 4.20 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* antara tanpa pengganggu dan menggunakan pengganggu pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada  $S/D = 1,4$

Tabel 4.6 Perubahan Nilai  $CP_{max}$  pada  $S/D = 1,4$  pengganggu dibandingkan dengan turbin tanpa pengganggu pada bilangan Reynolds  $=12,7 \times 10^4$

S/D	Cpmax (%)	Prosentase Kenaikan (%)	TSR ( $\lambda$ )
Tanpa Pengganggu	17,15%	-	0,75
1,4 (Silinder Sirkular)	18.66%	8.78%	0.73
1,4 (I-53°)	20,82%	21,41%	0,70

Pada tabel 4.6 terlihat bahwa pada  $Re = 12,7 \times 10^4$  dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional tanpa pengganggu, Pemasangan pengganggu silinder sirkular di depan *returning blade* pada jarak  $S/D = 1,4$  dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$  8,78%. Sedangkan pada pengganggu silinder tipe I-53° dapat menaikkan nilai  $CP_{max}$  menjadi 21,41%. Prosentase kenaikan tersebut dapat menaikkan  $CP_{max}$  hingga 2 kali lipat antara pengganggu silinder sirkular dan silinder tipe I-53°. Sehingga secara

umum dapat disimpulkan bahwa pengganggu silinder tipe I-53° lebih efektif dalam meningkatkan performa.

## 4.6 Simulasi Numerik pada Turbin angin Savonius Dengan Pengganggu

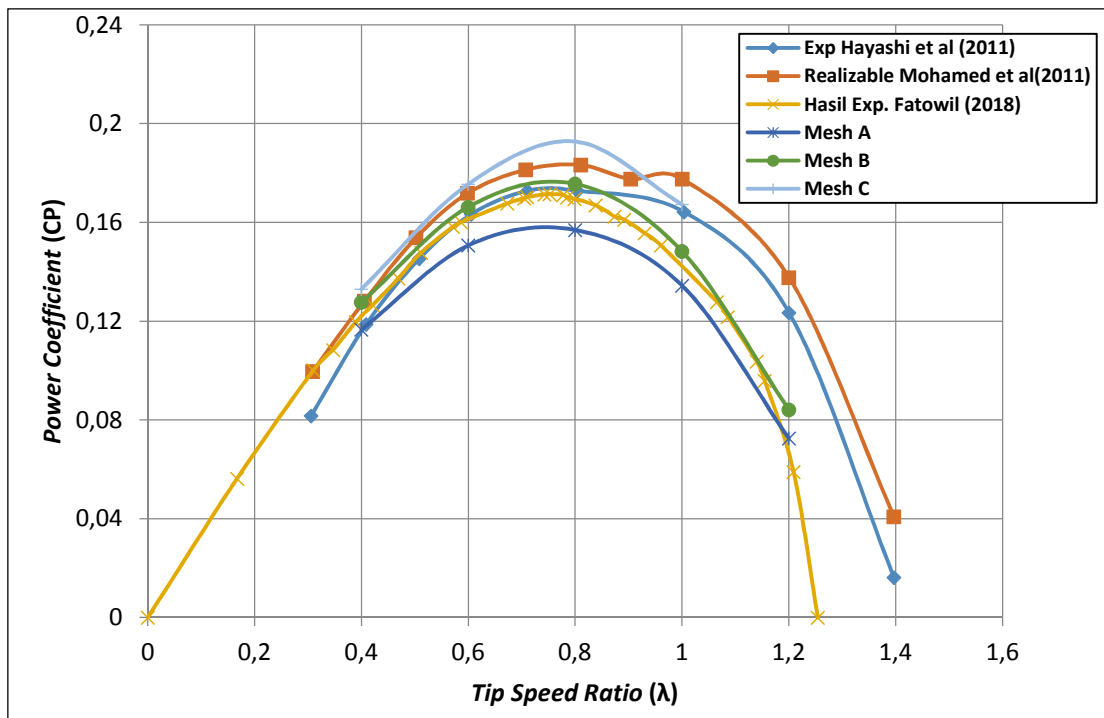
### 4.6.1 Validasi

Pada validasi ini dilakukan pemilihan jenis mesh yang dibandingkan oleh peneliti sebelumnya yaitu *mohamed et al (2011)*. Dari perbandingan ini akan dipilih jenis *mesh* dan jumlah *cell number* yang memiliki nilai *error* yang rendah dan mendekati hasil eksperimen. Tabel *grid independency test* ditunjukkan oleh tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil *grid independency test*

No.	Data	Cell Number	Hasil Cp				Perbandingan Error Cp				Rata rata Error
			TSR 0.4	TSR 0.6	TSR 0.8	TSR 1	TSR 0.4	TSR 0.6	TSR 0.8	TSR 1	
1	Exp. Hayashi et al 2005	-	0,119	0,163	0,173	0,164	-	-	-	-	-
2	Realizable k-3 model Mohamed et al (2011)	75000-95000	0,128	0,172	0,183	0,178	-	-	-	-	-
3	Mesh A	150000	0,117	0,151	0,157	0,134	9%	12%	14%	24%	15%
4	Mesh B	170000	0,128	0,166	0,176	0,148	0%	3%	4%	16%	6%
5	Mesh C	220000	0,133	0,175	0,193	0,167	-4%	-2%	-5%	6%	-1%

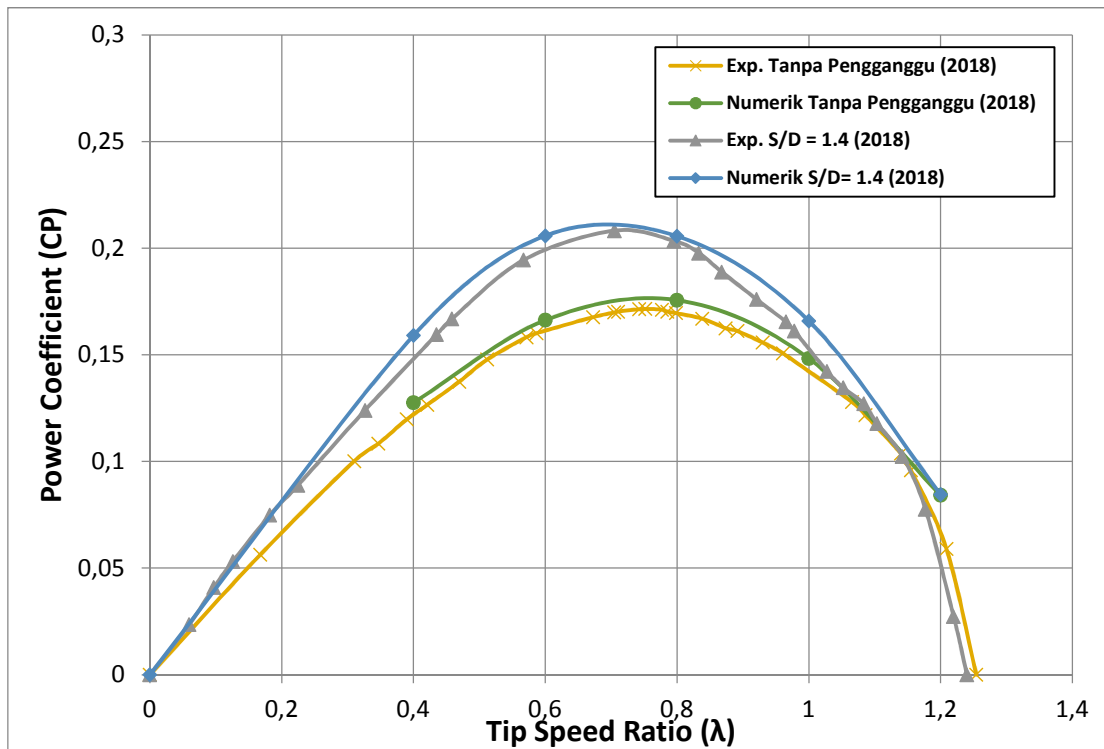
Trendline dari nilai *Power Coefficient* sebagai validasi ditunjukkan oleh gambar 4.21 . Simulasi tersebut dilakukan dengan 2-D pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$ . jadi berdasarkan Hasil validasi model 2-D didapatkan nilai *error* yang rendah sebesar 6% pada mesh B dengan *Cell Number* 170000 dipilih karena pada nilai meshing tersebut cukup mendekati hasil dari nilai eksperimen. Selanjutnya simulasi akan dilakukan dengan menggunakan pengganggu pada posisi jarak  $S/D = 1,4$  .



Gambar 4.21 Validasi Nilai *Power Coefficient* tanpa pengganggu dengan peneliti sebelumnya dengan mesh yang berbeda

#### 4.6.2 Perbandingan Hasil Numerik dan Hasil Eksperimen

Pada perbandingan kali didapatkan nilai  $C_p$  dari hasil simulasi dan dibuat grafik seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.22 . Simulasi dengan pengganggu dilakukan dengan 2-D pada bilangan Reynolds  $12,7 \times 10^4$  pada posisi jarak  $S/D = 1.4$ . Untuk mengetahui seberapa besar perbedaan dari hasil simulasi.



Gambar 4.22 Evolusi *Power Coefficient* sebagai fungsi dari *Tip Speed Ratio* Eksperimen dan Numerik

Gambar 4.22 merupakan grafik trendline dari *Power Coefficient* antara eksperimen dan Numerik dapat dilihat bahwa nilai  $C_p$  numerik lebih tinggi dari pada eksperimen. Pada eksperimen dan Numerik dengan jarak  $S/D = 1,4$  pada *Tip Speed Ratio* = 0,4 ; 0,6 ; 0,8 dan 1,0 tersebut jika dibandingkan didapatkan gap perbedaan berturut-turut 6,47% ; 3,12% ; 0,88% dan 6,64% Sehingga didapatkan rata-rata perbedaan persentase error antara eksperimen dan numerik sebesar 4,28%. seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.9 .

Tabel 4.9 Persentase Error antara Eksperimen dan Numerik pada  $S/D = 1,4$

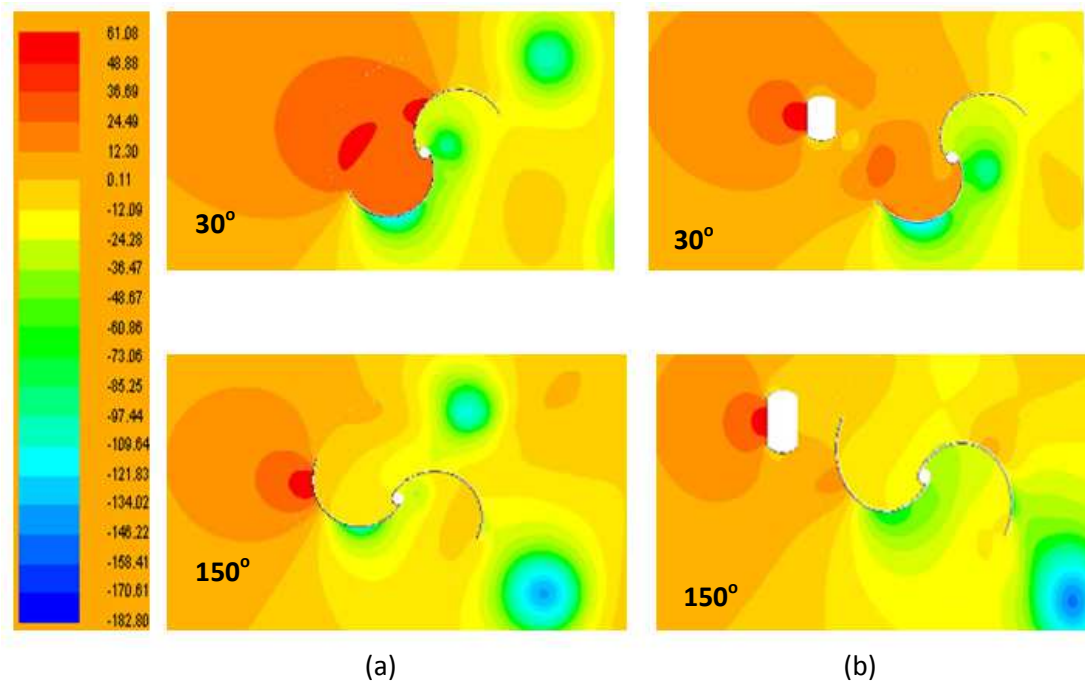
Data		Hasil $C_p$				Perbandingan Nilai Persentase Error $C_p$				Rata rata Persentase Error
		TSR 0.4	TSR 0.6	TSR 0.8	TSR 1	TSR 0.4	TSR 0.6	TSR 0.8	TSR 1	
Dengan pengganggu $S/D = 1.4$	Eksperimen	0.149	0.200	0.204	0.152	6.47%	3.12%	0.88%	6.64%	4.28%
	Numerik	0.159	0.206	0.206	0.166					

### **4.6.3 Karakteristik Aliran pada Savonius**

Karakteristik aliran yang melewati turbin bisa digunakan untuk mendapatkan data kualitatif yang meliputi beberapa parameter. Parameter – parameter ini cukup sulit untuk dianalisa menggunakan eksperimen secara langsung. Parameter tersebut kontur tekanan aliran, pola kecepatan aliran, dan vektor kecepatan aliran. Simulasi memiliki kelebihan untuk dapat menampilkan karakteristik aliran agar diketahui penyebab gaya yang dihasilkan sudu turbin. Karakteristik aliran yang didapatkan digunakan untuk mengetahui faktor – faktor yang mempengaruhi performa dari turbin. Visualisasi karakteristik aliran ditampilkan pada 2D tampak atas turbin agar terlihat jelas *wake* yang berada dibelakang turbin. Visualisasi tersebut dapat memberikan beberapa informasi penting karakteristik aliran turbin tersebut.

#### **4.6.3.1 Karakteristik Kontur Tekanan Aliran pada Savonius**

Karakteristik kontur tekanan pada turbin dapat menjelaskan penyebab dari turbin berputar dan menghasilkan suatu nilai gaya. Karakteristik tekanan yang diperhatikan yaitu pada turbin Savonius pada bilangan Reynolds 127000. Turbin diposisikan pada posisi sudut sudu  $30^\circ$  dimana pada sudut ini posisi sebagian besar sudu memiliki nilai gaya dan torsi statis yang tinggi. Perbedaan tekanan ini dapat menjelaskan seberapa efektif suatu sudu dengan jumlah dan konfigurasi tertentu. Pada hasil ini dapat terlihat juga perbedaaan antara turbin tanpa pengganggu dan turbin dengan pengganggu. Selain itu juga dapat dilihat tekanan *downstream* turbin pada berbagai model turbin. Kontur tekanan pada turbin Savonius dapat dilihat pada gambar 4.23.

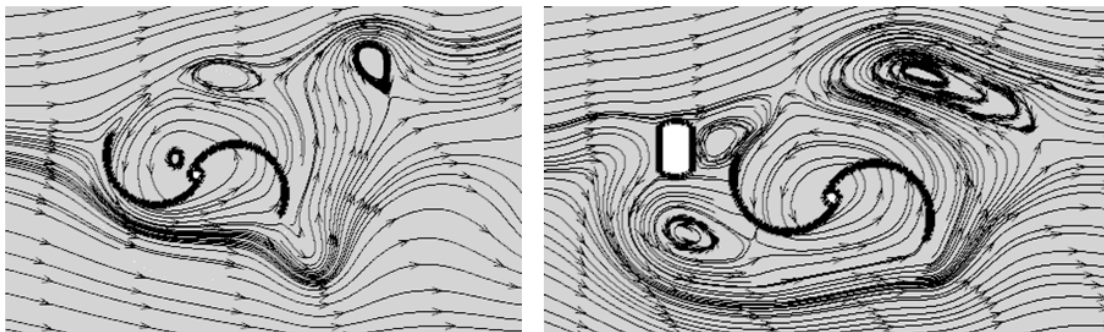


Gambar 4.23 Kontur Tekanan posisi sudut 30° dan 150° (a). tanpa pengganggu 30°  
 (b) dengan pengganggu I-53° pada posisi S/D = 1.4

Pada gambar 4.23(a) merupakan posisi sudut 30° apabila diamati terdapat perbedaan nilai tekanan pada posisi didepan (*upstream*) sudu *Returning Blade* Savonius. Pada posisi didepan *returning* tanpa pengganggu terdapat luasan yang berwarna merah yang menandakan bahwa tekanan pada area tersebut tinggi. Sedangkan dengan adanya pengganggu dapat menurunkan tekanan didepan *Returning Blade* yang ditandai perubahan warna dari sebelumnya merah menjadi orange, warna yang berwarna merah berada pada posisi didepan pengganggu. Sehingga menyebabkan selisih total antara tekanan didepan dan dibelakang *Blade* akan menurun. Akibatnya *pressure drag* akan menurun dan selisih gaya drag antara kedua sudu turbin akan semakin besar yang menyebabkan daya turbin dapat meningkat. Pada posisi sudut 30° menerima tekanan yang lebih besar dari pada posisi sudut 150° sehingga pada posisi sudut 30° didapatkan nilai torsi statis yang lebih tinggi yang ditunjukkan oleh gambar 4.23 warna merah pada sudu *advancing* menguasai daerah luasan.

#### 4.6.3.2 Karakteristik *Streamline* Aliran pada Savonius

Pola *streamline* aliran digunakan untuk menganalisis aliran dan *wake* yang berada disekitar turbin. *Wake* akan terlihat sebagai turbulensi aliran dan memungkinkan membentuk *vortex* dimana aliran udara akan membentuk sebuah pusaran. Pola kecepatan aliran juga dapat menunjukkan bagaimana angin yang mengenai turbin berubah kecepatannya pada arah tertentu dan menggerakkan turbin. Perubahan arah dan kecepatan ini dapat mempengaruhi kinerja dari turbin. *Wake* aliran udara yang dilihat dari nilai kecepatan yang terbentuk dibelakang turbin dan pengganggu. Terlihat bahwa *wake* memiliki kecepatan yang rendah dan membentuk *vortex* yang ditunjukkan oleh gambar 4.24 .



Gambar 4.24 Streamline Aliran pada posisi sudu  $150^\circ$  (a). Savonius tanpa pengganggu (b) Savonius dengan pengganggu

Pada gambar 4.24(a) merupakan pola streamline aliran turbin Savonius tanpa pengganggu pada posisi sudu  $150^\circ$  pada sudu bagian depan (*returning blade*) hampir searah dengan datangnya aliran. Pola aliran menunjukkan aliran udara sangat sedikit yang dapat diterima oleh *advancing blade* sehingga pada pengukuran eksperimen didapatkan nilai negatif pada torsi statis. Hal ini menunjukkan bahwa gaya drag pada *returning blade* lebih besar dari pada *advancing blade*. Sedangkan pada gambar 4.24(b) dengan adanya pengganggu pola aliran dibelakang pengganggu membentuk *vortex* yang menyebabkan penurunan tekanan pada sisi *upstream returning blade*. Pada gambar 4.24(b) dengan posisi sudu  $150^\circ$  juga membentuk *vortex* pada sisi



samping dari pengganggu, jika diamati vortex tersebut membantu aliran udara kembali pada *advancing blade*. Sehingga pada hasil eksperimen didapatkan bahwa dengan adanya pengganggu pada posisi  $S/D=1,4$  dapat meningkatkan nilai torsi negatif pada posisi sudut  $150^\circ$  .

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Pada studi ini dengan menempatkan silinder pengganggu tipe I-53° d/D=0,5 di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada posisi jarak yang divariasikan S/D = 1,2 - 2,2 , dengan bilangan Reynolds =  $9 \times 10^4$ ,  $12,7 \times 10^4$  dan  $16,3 \times 10^4$  diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemberian silinder pengganggu tipe I-53° pada jarak S/D=1,4 sangat efektif dalam meningkatkan *Power Coefficient* (CP) turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds = 90000, 127000, dan 163000 berturut-turut sebesar 27,34% ; 21,41% dan 22,94% .
2. Pemberian silinder pengganggu tipe I-53° pada jarak S/D=1,4 sangat efektif dalam meningkatkan *Moment Coefficient* (Cm) .
3. Pemberian silinder pengganggu tipe I-53° pada posisi sudut sudu >80° dapat meningkatkan nilai torsi statis jika dibandingkan dengan Savonius konvensional tanpa pengganggu.
4. Hasil simulasi dan eksperimen didapatkan perbandingan persentase error rata-rata sebesar 4,28% .

#### 5.2 Saran

Adapun saran mengenai penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan *brake dynamometer* harus lebih diperhatikan karena rawan terjadinya *slip* antara poros dan benang.
2. Lebih memperhatikan konstruksi penyangga turbin angin Savonius agar getaran yang terjadi dapat diminimalisir.

*(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

1. Aiba, S., & Watanabe, H. (1997). Flow characteristics of a bluff body cut from a circular cylinder. *Journal of Fluids Engineering*, 119(2), 453-454.
2. Igarashi, T., & Shiba, Y. (2006). Drag Reduction for D-Shape and I-Shape Cylinders. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(4), 1036-1042.
3. Tsutsui, T., & Igarashi, T. (2002). Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(4), 527-541.
4. Lee, S. J., Lee, S. I., & Park, C. W. (2004). Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod. *Fluid dynamics research*, 34(4), 233-250.
5. Triyogi, Y., Suprayogi, D., & Spirda, E. (2009). Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of an I-type bluff body as passive control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(10), 2291-2296.
6. Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., & Thévenin, D. (2010). Optimization of Savonius turbines using an obstacle shielding the returning blade. *Renewable Energy*, 35(11), 2618-2626.
7. Mahmoud, N. H., El-Haroun, A. A., Wahba, E., & Nasef, M. H. (2012). An experimental study on improvement of Savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1), 19-25.
8. Jeon, K. S., Jeong, J. I., Pan, J. K., & Ryu, K. W. (2015). Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 79, 167-176.
9. Tian, W., Song, B., VanZwieten, J. H., & Pyakurel, P. (2015). Computational fluid dynamics prediction of a modified Savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*, 8(8), 7915-7929.
10. Hayashi, T., Li, Y., & Hara, Y. (2005). Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 48(1), 9-16.
11. Al-Shemmeri, T. 2010. ***Wind Turbines : First Edition***. ISBN 978-87-7681-692-6

*(Halaman Ini Sengaja Dikongkan)*

## LAMPIRAN

**Tabel A-1 Tanpa Pengganggu bilangan Reynolds 90000**

Re = 90000												
Tanpa Pengganggu												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	361.000	37.785	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.080	0.000	0.000	0.000
28.2	5	342.067	35.803	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.023	0.008	0.045	0.044
28.2	5	333.200	34.875	35	150	0.0095	0.08574	1.1772	0.997	0.011	0.059	0.059
28.2	5	322.867	33.793	55	225	0.0095	0.08574	1.1772	0.966	0.016	0.085	0.088
28.2	5	299.600	31.358	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.896	0.021	0.104	0.116
28.2	5	271.200	28.386	95	425	0.0095	0.08574	1.1772	0.811	0.031	0.138	0.171
28.2	5	255.600	26.753	115	500	0.0095	0.08574	1.1772	0.765	0.036	0.152	0.199
28.2	5	232.200	24.304	135	625	0.0095	0.08574	1.1772	0.695	0.046	0.176	0.253
28.2	5	216.600	22.671	155	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.648	0.051	0.183	0.282
28.2	5	200.867	21.024	195	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.601	0.056	0.188	0.313
28.2	5	191.267	20.019	215	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.572	0.059	0.188	0.328
28.2	5	177.800	18.610	235	900	0.0095	0.08574	1.1772	0.532	0.062	0.183	0.344
28.2	5	160.800	16.830	275	950	0.0095	0.08574	1.1772	0.481	0.063	0.168	0.349
28.2	5	146.800	15.365	295	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.439	0.063	0.154	0.352
28.2	5	133.429	13.966	315	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.399	0.064	0.141	0.354
28.2	5	125.467	13.132	335	1025	0.0095	0.08574	1.1772	0.375	0.064	0.134	0.357
28.2	5	106.733	11.171	375	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.319	0.063	0.111	0.349
28.2	5	90.667	9.490	395	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.271	0.066	0.099	0.364
28.2	5	83.000	8.687	415	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.248	0.068	0.094	0.380
28.2	5	72.933	7.634	435	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.218	0.071	0.086	0.395
28.2	5	61.467	6.434	495	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.184	0.070	0.072	0.390
28.2	5	42.600	4.459	555	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.127	0.069	0.049	0.385
28.2	5	0.000	0.000	575	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.054	0.000	0.297

**Tabel A-2 Tanpa Pengganggu bilangan Reynolds 127000**

Re = 127000												
Tanpa Pengganggu												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	576.180	60.307	0	0	0.0095	0.0857	1.1772	1.231	0.000	0.000	0.000
28.2	7	557.600	58.362	15	250	0.0095	0.0857	1.1772	1.191	0.022	0.074	0.062
28.2	7	540.440	56.566	35	370	0.0095	0.0857	1.1772	1.155	0.031	0.102	0.088
28.2	7	533.427	55.832	75	450	0.0095	0.0857	1.1772	1.140	0.035	0.113	0.099
28.2	7	508.220	53.194	115	560	0.0095	0.0857	1.1772	1.086	0.041	0.127	0.117
28.2	7	498.660	52.193	155	630	0.0095	0.0857	1.1772	1.065	0.044	0.133	0.125
28.2	7	449.540	47.052	195	800	0.0095	0.0857	1.1772	0.961	0.056	0.153	0.160
28.2	7	435.193	45.550	235	880	0.0095	0.0857	1.1772	0.930	0.060	0.158	0.170
28.2	7	417.400	43.688	275	960	0.0095	0.0857	1.1772	0.892	0.064	0.161	0.181
28.2	7	408.933	42.802	315	1020	0.0095	0.0857	1.1772	0.874	0.066	0.162	0.186
28.2	7	392.367	41.068	355	1100	0.0095	0.0857	1.1772	0.838	0.069	0.165	0.196
28.2	7	373.733	39.117	395	1195	0.0095	0.0857	1.1772	0.799	0.075	0.168	0.211
28.2	7	367.513	38.466	515	1337	0.0095	0.0857	1.1772	0.785	0.077	0.170	0.217
28.2	7	363.729	38.070	615	1450	0.0095	0.0857	1.1772	0.777	0.078	0.171	0.220
28.2	7	351.873	36.829	635	1500	0.0095	0.0857	1.1772	0.752	0.081	0.172	0.228
28.2	7	347.567	36.379	675	1550	0.0095	0.0857	1.1772	0.743	0.082	0.171	0.231
28.2	7	332.407	34.792	715	1624	0.0095	0.0857	1.1772	0.710	0.085	0.170	0.240
28.2	7	329.720	34.511	735	1649	0.0095	0.0857	1.1772	0.705	0.085	0.170	0.241
28.2	7	314.867	32.956	775	1720	0.0095	0.0857	1.1772	0.673	0.088	0.168	0.249
28.2	7	274.507	28.732	815	1850	0.0095	0.0857	1.1772	0.587	0.096	0.160	0.273
28.2	7	267.440	27.992	835	1880	0.0095	0.0857	1.1772	0.571	0.097	0.157	0.276
28.2	7	239.487	25.066	875	1950	0.0095	0.0857	1.1772	0.512	0.100	0.145	0.284
28.2	7	219.653	22.990	915	2000	0.0095	0.0857	1.1772	0.469	0.101	0.134	0.286
28.2	7	197.053	20.625	1015	2100	0.0095	0.0857	1.1772	0.421	0.101	0.120	0.286
28.2	7	182.387	19.090	1075	2200	0.0095	0.0857	1.1772	0.390	0.105	0.116	0.297
28.2	7	162.313	16.989	1175	2350	0.0095	0.0857	1.1772	0.347	0.110	0.107	0.310
28.2	7	145.133	15.191	1275	2500	0.0095	0.0857	1.1772	0.310	0.114	0.100	0.323
28.2	7	78.267	8.192	1375	2650	0.0095	0.0857	1.1772	0.167	0.119	0.056	0.336
28.2	7	47.067	4.926	1475	2750	0.0095	0.0857	1.1772	0.103	0.116	0.032	0.314
28.2	7	0.000	0.000	1575	2600	0.0095	0.0857	1.1772	0.000	0.093	0.000	0.252

**Tabel A-3 Tanpa Pengganggu bilangan Reynolds 163000**

Re = 163000												
Tanpa Pengganggu												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	638.267	66.805	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.061	0.000	0.000	0.000
28.2	9	621.667	65.068	15	50	0.0095	0.08574	1.1772	1.033	0.003	0.006	0.006
28.2	9	605.467	63.372	75	200	0.0095	0.08574	1.1772	1.006	0.012	0.020	0.020
28.2	9	579.867	60.693	175	400	0.0095	0.08574	1.1772	0.964	0.021	0.035	0.036
28.2	9	553.533	57.936	275	650	0.0095	0.08574	1.1772	0.920	0.035	0.055	0.060
28.2	9	527.267	55.187	335	825	0.0095	0.08574	1.1772	0.876	0.046	0.069	0.078
28.2	9	506.600	53.024	435	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.842	0.053	0.076	0.090
28.2	9	472.667	49.472	635	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.786	0.062	0.083	0.106
28.2	9	443.000	46.367	835	1600	0.0095	0.08574	1.1772	0.736	0.071	0.090	0.122
28.2	9	418.933	43.848	935	1800	0.0095	0.08574	1.1772	0.696	0.081	0.096	0.138
28.2	9	404.067	42.292	1135	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.672	0.085	0.098	0.146
28.2	9	370.200	38.748	1235	2300	0.0095	0.08574	1.1772	0.615	0.099	0.105	0.170
28.2	9	334.667	35.028	1335	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.556	0.113	0.108	0.194
28.2	9	323.533	33.863	1635	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.538	0.118	0.109	0.202
28.2	9	299.800	31.379	1735	3100	0.0095	0.08574	1.1772	0.498	0.127	0.109	0.218
28.2	9	277.933	29.090	1835	3300	0.0095	0.08574	1.1772	0.462	0.137	0.108	0.234
28.2	9	237.667	24.876	2035	3600	0.0095	0.08574	1.1772	0.395	0.146	0.099	0.250
28.2	9	218.533	22.873	2235	3825	0.0095	0.08574	1.1772	0.363	0.148	0.092	0.254
28.2	9	192.733	20.173	2435	4000	0.0095	0.08574	1.1772	0.320	0.146	0.080	0.250
28.2	9	173.800	18.191	2635	4175	0.0095	0.08574	1.1772	0.289	0.144	0.071	0.246
28.2	9	155.267	16.251	2835	4350	0.0095	0.08574	1.1772	0.258	0.141	0.062	0.242
28.2	9	144.267	15.100	3035	4600	0.0095	0.08574	1.1772	0.240	0.146	0.060	0.250
28.2	9	128.933	13.495	3235	4850	0.0095	0.08574	1.1772	0.214	0.151	0.055	0.258
28.2	9	100.467	10.516	3335	4925	0.0095	0.08574	1.1772	0.167	0.148	0.042	0.254
28.2	9	69.067	7.229	3435	5000	0.0095	0.08574	1.1772	0.115	0.146	0.029	0.250
28.2	9	0.000	0.000	3535	4700	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.109	0.000	0.186



**Tabel B-A1 bilangan Reynolds 90000 S/D =1.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 1.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	406.467	42.544	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.216	0.000	0.000	0.000
28.2	5	395.667	41.413	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.184	0.008	0.052	0.044
28.2	5	386.800	40.485	35	150	0.0095	0.08574	1.1772	1.157	0.011	0.069	0.059
28.2	5	375.067	39.257	55	200	0.0095	0.08574	1.1772	1.122	0.014	0.084	0.075
28.2	5	334.200	34.980	95	375	0.0095	0.08574	1.1772	1.000	0.026	0.145	0.145
28.2	5	315.333	33.005	115	450	0.0095	0.08574	1.1772	0.943	0.031	0.163	0.173
28.2	5	297.933	31.184	135	525	0.0095	0.08574	1.1772	0.891	0.036	0.180	0.202
28.2	5	274.467	28.728	155	625	0.0095	0.08574	1.1772	0.821	0.044	0.199	0.243
28.2	5	263.667	27.597	195	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.789	0.047	0.206	0.261
28.2	5	252.600	26.439	235	775	0.0095	0.08574	1.1772	0.756	0.050	0.211	0.279
28.2	5	245.000	25.643	275	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.733	0.054	0.218	0.297
28.2	5	233.733	24.464	315	925	0.0095	0.08574	1.1772	0.699	0.057	0.220	0.315
28.2	5	226.733	23.731	335	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.678	0.060	0.224	0.331
28.2	5	212.067	22.196	355	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.634	0.065	0.228	0.359
28.2	5	184.600	19.321	375	1125	0.0095	0.08574	1.1772	0.552	0.070	0.214	0.388
28.2	5	169.467	17.738	415	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.507	0.073	0.206	0.406
28.2	5	155.467	16.272	435	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.465	0.076	0.196	0.421
28.2	5	127.867	13.383	455	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.382	0.079	0.167	0.437
28.2	5	116.467	12.190	475	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.348	0.082	0.158	0.452
28.2	5	99.533	10.418	515	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.298	0.082	0.136	0.457
28.2	5	90.600	9.483	555	1425	0.0095	0.08574	1.1772	0.271	0.081	0.122	0.450
28.2	5	81.200	8.499	595	1450	0.0095	0.08574	1.1772	0.243	0.080	0.107	0.442
28.2	5	67.533	7.068	635	1475	0.0095	0.08574	1.1772	0.202	0.078	0.088	0.434
28.2	5	0.000	0.000	655	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.060	0.000	0.333

**Tabel B-A2 bilangan Reynolds 90000 S/D =1.4 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 1.4												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	412.333	43.158	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.233	0.000	0.000	0.000
28.2	5	401.267	41.999	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.200	0.008	0.053	0.044
28.2	5	386.533	40.457	35	175	0.0095	0.08574	1.1772	1.156	0.013	0.084	0.072
28.2	5	369.467	38.671	55	250	0.0095	0.08574	1.1772	1.105	0.018	0.111	0.101
28.2	5	342.867	35.887	95	375	0.0095	0.08574	1.1772	1.026	0.026	0.148	0.145
28.2	5	321.867	33.689	115	475	0.0095	0.08574	1.1772	0.963	0.034	0.179	0.186
28.2	5	307.533	32.188	135	550	0.0095	0.08574	1.1772	0.920	0.039	0.197	0.215
28.2	5	291.400	30.500	155	625	0.0095	0.08574	1.1772	0.872	0.044	0.212	0.243
28.2	5	276.333	28.923	175	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.827	0.049	0.224	0.271
28.2	5	258.200	27.025	195	775	0.0095	0.08574	1.1772	0.772	0.054	0.232	0.300
28.2	5	238.267	24.939	215	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.713	0.059	0.234	0.328
28.2	5	230.267	24.101	255	925	0.0095	0.08574	1.1772	0.689	0.062	0.239	0.346
28.2	5	221.067	23.138	275	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.661	0.065	0.239	0.362
28.2	5	207.200	21.687	315	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.620	0.068	0.235	0.380
28.2	5	167.200	17.500	335	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.500	0.076	0.211	0.421
28.2	5	153.667	16.084	355	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.460	0.079	0.201	0.437
28.2	5	129.933	13.600	375	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.389	0.082	0.176	0.452
28.2	5	113.600	11.890	415	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.340	0.082	0.155	0.457
28.2	5	96.067	10.055	455	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.287	0.083	0.133	0.463
28.2	5	75.600	7.913	515	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.226	0.082	0.103	0.457
28.2	5	46.400	4.857	545	1425	0.0095	0.08574	1.1772	0.139	0.082	0.063	0.455
28.2	5	0.000	0.000	575	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.063	0.000	0.349

**Tabel B-A3 bilangan Reynolds 90000 S/D =1.6 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 1.6												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	406.333	42.530	0	0	0.0095	0.0857	1.1772	1.215	0.000	0.000	0.000
28.2	5	390.733	40.897	15	100	0.0095	0.0857	1.1772	1.169	0.008	0.051	0.044
28.2	5	376.533	39.410	35	150	0.0095	0.0857	1.1772	1.126	0.011	0.067	0.059
28.2	5	357.133	37.380	75	275	0.0095	0.0857	1.1772	1.068	0.019	0.110	0.103
28.2	5	340.467	35.636	115	375	0.0095	0.0857	1.1772	1.018	0.024	0.137	0.134
28.2	5	324.133	33.926	135	450	0.0095	0.0857	1.1772	0.970	0.029	0.158	0.163
28.2	5	313.600	32.823	175	525	0.0095	0.0857	1.1772	0.938	0.033	0.170	0.181
28.2	5	297.267	31.114	195	600	0.0095	0.0857	1.1772	0.889	0.038	0.186	0.209
28.2	5	280.667	29.376	215	675	0.0095	0.0857	1.1772	0.840	0.043	0.200	0.238
28.2	5	261.667	27.388	255	775	0.0095	0.0857	1.1772	0.783	0.048	0.210	0.269
28.2	5	234.800	24.576	295	925	0.0095	0.0857	1.1772	0.702	0.059	0.229	0.326
28.2	5	222.733	23.313	335	1000	0.0095	0.0857	1.1772	0.666	0.062	0.229	0.344
28.2	5	210.600	22.043	375	1075	0.0095	0.0857	1.1772	0.630	0.065	0.228	0.362
28.2	5	206.000	21.561	395	1100	0.0095	0.0857	1.1772	0.616	0.066	0.225	0.364
28.2	5	191.000	19.991	435	1150	0.0095	0.0857	1.1772	0.571	0.067	0.211	0.370
28.2	5	176.000	18.421	455	1200	0.0095	0.0857	1.1772	0.526	0.069	0.203	0.385
28.2	5	151.333	15.840	475	1250	0.0095	0.0857	1.1772	0.453	0.072	0.181	0.401
28.2	5	136.667	14.304	495	1300	0.0095	0.0857	1.1772	0.409	0.075	0.170	0.416
28.2	5	118.600	12.413	535	1350	0.0095	0.0857	1.1772	0.355	0.076	0.149	0.421
28.2	5	97.133	10.167	575	1400	0.0095	0.0857	1.1772	0.291	0.077	0.124	0.426
28.2	5	81.133	8.492	595	1400	0.0095	0.0857	1.1772	0.243	0.075	0.101	0.416
28.2	5	52.133	5.457	635	1450	0.0095	0.0857	1.1772	0.156	0.076	0.066	0.421
28.2	5	0.000	0.000	675	1300	0.0095	0.0857	1.1772	0.000	0.058	0.000	0.323

**Tabel B-A4 bilangan Reynolds 90000 S/D =1.8 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 1.8												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	382.267	40.011	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.144	0.000	0.000	0.000
28.2	5	372.867	39.027	15	75	0.0095	0.08574	1.1772	1.115	0.006	0.019	0.017
28.2	5	365.600	38.266	35	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.094	0.006	0.037	0.034
28.2	5	347.667	36.389	55	200	0.0095	0.08574	1.1772	1.040	0.014	0.078	0.075
28.2	5	326.200	34.142	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.976	0.021	0.113	0.116
28.2	5	313.733	32.837	115	375	0.0095	0.08574	1.1772	0.938	0.024	0.126	0.134
28.2	5	296.600	31.044	155	475	0.0095	0.08574	1.1772	0.887	0.030	0.147	0.165
28.2	5	273.467	28.623	195	575	0.0095	0.08574	1.1772	0.818	0.035	0.161	0.196
28.2	5	247.067	25.860	235	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.739	0.043	0.178	0.240
28.2	5	227.000	23.759	275	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.679	0.049	0.184	0.271
28.2	5	219.933	23.020	295	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.658	0.052	0.189	0.287
28.2	5	204.467	21.401	315	925	0.0095	0.08574	1.1772	0.612	0.057	0.193	0.315
28.2	5	196.933	20.612	355	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.589	0.058	0.189	0.320
28.2	5	174.133	18.226	395	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.521	0.063	0.183	0.352
28.2	5	150.933	15.798	415	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.451	0.064	0.160	0.354
28.2	5	136.667	14.304	435	1125	0.0095	0.08574	1.1772	0.409	0.064	0.146	0.357
28.2	5	100.733	10.543	475	1175	0.0095	0.08574	1.1772	0.301	0.065	0.109	0.362
28.2	5	75.533	7.906	515	1225	0.0095	0.08574	1.1772	0.226	0.066	0.083	0.367
28.2	5	58.267	6.099	555	1275	0.0095	0.08574	1.1772	0.174	0.067	0.065	0.372
28.2	5	0.000	0.000	575	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.063	0.000	0.349

**Tabel B-A5 bilangan Reynolds 90000 S/D =2.0 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 2.0												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	384.467	40.241	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.150	0.000	0.000	0.000
28.2	5	372.133	38.950	15	75	0.0095	0.08574	1.1772	1.113	0.006	0.035	0.031
28.2	5	349.000	36.529	55	175	0.0095	0.08574	1.1772	1.044	0.011	0.065	0.062
28.2	5	329.267	34.463	95	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.985	0.019	0.104	0.106
28.2	5	304.733	31.895	135	425	0.0095	0.08574	1.1772	0.912	0.027	0.137	0.150
28.2	5	290.800	30.437	175	500	0.0095	0.08574	1.1772	0.870	0.030	0.146	0.168
28.2	5	272.667	28.539	215	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.816	0.036	0.162	0.199
28.2	5	251.800	26.355	255	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.753	0.041	0.173	0.230
28.2	5	233.533	24.443	295	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.699	0.047	0.182	0.261
28.2	5	223.400	23.383	355	900	0.0095	0.08574	1.1772	0.668	0.051	0.188	0.282
28.2	5	213.333	22.329	395	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.638	0.054	0.191	0.300
28.2	5	191.667	20.061	435	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.573	0.060	0.190	0.331
28.2	5	172.267	18.031	475	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.515	0.063	0.180	0.349
28.2	5	144.133	15.086	515	1225	0.0095	0.08574	1.1772	0.431	0.066	0.158	0.367
28.2	5	127.000	13.293	535	1275	0.0095	0.08574	1.1772	0.380	0.069	0.145	0.383
28.2	5	109.000	11.409	555	1325	0.0095	0.08574	1.1772	0.326	0.072	0.130	0.398
28.2	5	82.867	8.673	575	1375	0.0095	0.08574	1.1772	0.248	0.075	0.103	0.414
28.2	5	47.600	4.982	595	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.142	0.075	0.059	0.416
28.2	5	0.000	0.000	615	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.059	0.000	0.328

**Tabel B-A6 bilangan Reynolds 90000 S/D =2.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 90000												
S/D = 2.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	366.467	38.357	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.096	0.000	0.000	0.000
28.2	5	355.867	37.247	15	75	0.0095	0.08574	1.1772	1.065	0.006	0.033	0.031
28.2	5	327.800	34.310	55	200	0.0095	0.08574	1.1772	0.981	0.014	0.073	0.075
28.2	5	311.067	32.558	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.931	0.021	0.108	0.116
28.2	5	283.200	29.642	115	425	0.0095	0.08574	1.1772	0.847	0.029	0.136	0.160
28.2	5	266.200	27.862	135	500	0.0095	0.08574	1.1772	0.796	0.034	0.150	0.189
28.2	5	224.467	23.494	175	675	0.0095	0.08574	1.1772	0.671	0.047	0.174	0.258
28.2	5	208.267	21.799	195	750	0.0095	0.08574	1.1772	0.623	0.052	0.179	0.287
28.2	5	183.133	19.168	215	875	0.0095	0.08574	1.1772	0.548	0.062	0.187	0.341
28.2	5	167.667	17.549	235	950	0.0095	0.08574	1.1772	0.502	0.067	0.185	0.370
28.2	5	148.200	15.512	255	1025	0.0095	0.08574	1.1772	0.443	0.072	0.176	0.398
28.2	5	129.200	13.523	275	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.386	0.075	0.160	0.414
28.2	5	105.933	11.088	295	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.317	0.075	0.132	0.416
28.2	5	88.667	9.280	315	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.265	0.073	0.108	0.406
28.2	5	75.667	7.920	335	1125	0.0095	0.08574	1.1772	0.226	0.074	0.092	0.408
28.2	5	61.333	6.420	355	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.183	0.074	0.075	0.411
28.2	5	42.733	4.473	375	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.128	0.077	0.055	0.426
28.2	5	0.000	0.000	395	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.066	0.000	0.364

**Tabel B-B1 bilangan Reynolds 127000 S/D =1.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 1.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	580.600	60.769	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.241	0.000	0.000	0.000
28.2	7	572.333	59.904	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.223	0.008	0.027	0.022
28.2	7	562.067	58.830	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.201	0.021	0.071	0.059
28.2	7	542.800	56.813	135	450	0.0095	0.08574	1.1772	1.160	0.029	0.096	0.083
28.2	7	542.133	56.743	195	550	0.0095	0.08574	1.1772	1.158	0.033	0.108	0.094
28.2	7	532.067	55.690	255	650	0.0095	0.08574	1.1772	1.137	0.037	0.118	0.104
28.2	7	526.467	55.104	315	750	0.0095	0.08574	1.1772	1.125	0.041	0.129	0.115
28.2	7	499.467	52.278	375	900	0.0095	0.08574	1.1772	1.067	0.049	0.148	0.138
28.2	7	494.267	51.733	435	1000	0.0095	0.08574	1.1772	1.056	0.053	0.157	0.149
28.2	7	464.867	48.656	535	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.993	0.062	0.174	0.175
28.2	7	450.600	47.163	635	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.963	0.067	0.182	0.189
28.2	7	416.600	43.604	835	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.890	0.076	0.191	0.215
28.2	7	388.067	40.618	1035	1950	0.0095	0.08574	1.1772	0.829	0.085	0.200	0.241
28.2	7	368.400	38.559	1235	2225	0.0095	0.08574	1.1772	0.787	0.092	0.206	0.261
28.2	7	345.533	36.166	1435	2500	0.0095	0.08574	1.1772	0.738	0.099	0.207	0.281
28.2	7	317.400	33.221	1635	2750	0.0095	0.08574	1.1772	0.678	0.104	0.199	0.294
28.2	7	260.333	27.248	1835	3050	0.0095	0.08574	1.1772	0.556	0.113	0.178	0.320
28.2	7	248.667	26.027	2035	3250	0.0095	0.08574	1.1772	0.531	0.113	0.170	0.320
28.2	7	192.733	20.173	2055	3350	0.0095	0.08574	1.1772	0.412	0.121	0.141	0.342
28.2	7	123.800	12.958	2075	3450	0.0095	0.08574	1.1772	0.265	0.128	0.096	0.363
28.2	7	77.533	8.115	2095	3550	0.0095	0.08574	1.1772	0.166	0.136	0.064	0.384
28.2	7	71.467	7.480	2115	3600	0.0095	0.08574	1.1772	0.153	0.138	0.060	0.392
28.2	7	43.133	4.515	2215	3650	0.0095	0.08574	1.1772	0.092	0.134	0.035	0.378
28.2	7	0.000	0.000	2275	3500	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.114	0.000	0.323

**Tabel B-B2 bilangan Reynolds 127000 S/D =1.4 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 1.4												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	580.333	60.742	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.240	0.000	0.000	0.000
28.2	7	570.867	59.751	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.220	0.008	0.027	0.022
28.2	7	550.867	57.657	75	325	0.0095	0.08574	1.1772	1.177	0.023	0.078	0.066
28.2	7	534.467	55.941	135	475	0.0095	0.08574	1.1772	1.142	0.032	0.102	0.090
28.2	7	516.467	54.057	195	600	0.0095	0.08574	1.1772	1.104	0.038	0.118	0.107
28.2	7	507.000	53.066	255	700	0.0095	0.08574	1.1772	1.083	0.041	0.127	0.117
28.2	7	492.467	51.545	315	800	0.0095	0.08574	1.1772	1.052	0.045	0.135	0.128
28.2	7	481.000	50.345	375	900	0.0095	0.08574	1.1772	1.028	0.049	0.142	0.138
28.2	7	457.667	47.902	475	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.978	0.058	0.161	0.165
28.2	7	451.800	47.288	575	1225	0.0095	0.08574	1.1772	0.965	0.061	0.165	0.171
28.2	7	430.867	45.097	775	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.921	0.068	0.176	0.191
28.2	7	406.267	42.523	975	1800	0.0095	0.08574	1.1772	0.868	0.077	0.189	0.218
28.2	7	389.867	40.806	1175	2075	0.0095	0.08574	1.1772	0.833	0.084	0.198	0.237
28.2	7	372.200	38.957	1380	2350	0.0095	0.08574	1.1772	0.795	0.090	0.203	0.256
28.2	7	329.933	34.533	1580	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.705	0.104	0.208	0.295
28.2	7	265.533	27.792	1600	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.567	0.121	0.195	0.343
28.2	7	214.600	22.461	1620	3000	0.0095	0.08574	1.1772	0.459	0.129	0.167	0.364
28.2	7	203.667	21.317	1660	3050	0.0095	0.08574	1.1772	0.435	0.130	0.160	0.367
28.2	7	152.800	15.993	1860	3300	0.0095	0.08574	1.1772	0.326	0.134	0.124	0.380
28.2	7	105.067	10.997	1900	3400	0.0095	0.08574	1.1772	0.224	0.140	0.089	0.396
28.2	7	85.133	8.911	2040	3600	0.0095	0.08574	1.1772	0.182	0.145	0.075	0.411
28.2	7	58.933	6.168	2100	3700	0.0095	0.08574	1.1772	0.126	0.149	0.053	0.422
28.2	7	45.467	4.759	2200	3800	0.0095	0.08574	1.1772	0.097	0.149	0.041	0.422
28.2	7	27.933	2.924	2400	3900	0.0095	0.08574	1.1772	0.060	0.140	0.024	0.396
28.2	7	0	0	2420	3700	0.0095	0.08574	1.1772	0	0.119	0.000	0.338



**Tabel B-B3 bilangan Reynolds 127000 S/D =1.6 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 1.6												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	565.933	59.234	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.209	0.000	0.000	0.000
28.2	7	556.467	58.244	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.189	0.008	0.014	0.012
28.2	7	522.267	54.664	75	275	0.0095	0.08574	1.1772	1.116	0.019	0.059	0.053
28.2	7	498.200	52.145	135	400	0.0095	0.08574	1.1772	1.065	0.025	0.074	0.070
28.2	7	470.133	49.207	195	550	0.0095	0.08574	1.1772	1.005	0.033	0.094	0.094
28.2	7	438.333	45.879	255	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.937	0.041	0.110	0.117
28.2	7	417.800	43.730	315	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.893	0.050	0.126	0.141
28.2	7	408.667	42.774	375	950	0.0095	0.08574	1.1772	0.873	0.054	0.132	0.152
28.2	7	393.067	41.141	435	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.840	0.060	0.142	0.169
28.2	7	373.867	39.131	635	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.799	0.067	0.151	0.189
28.2	7	347.333	36.354	695	1550	0.0095	0.08574	1.1772	0.742	0.080	0.167	0.225
28.2	7	330.933	34.638	755	1675	0.0095	0.08574	1.1772	0.707	0.086	0.172	0.243
28.2	7	320.800	33.577	815	1775	0.0095	0.08574	1.1772	0.685	0.089	0.174	0.253
28.2	7	307.400	32.175	875	1900	0.0095	0.08574	1.1772	0.657	0.096	0.178	0.270
28.2	7	294.933	30.870	935	2000	0.0095	0.08574	1.1772	0.630	0.099	0.177	0.281
28.2	7	272.400	28.511	995	2100	0.0095	0.08574	1.1772	0.582	0.103	0.170	0.291
28.2	7	251.933	26.369	1055	2200	0.0095	0.08574	1.1772	0.538	0.107	0.163	0.302
28.2	7	223.333	23.376	1115	2300	0.0095	0.08574	1.1772	0.477	0.110	0.149	0.313
28.2	7	203.600	21.310	1175	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.435	0.114	0.141	0.323
28.2	7	176.267	18.449	1235	2500	0.0095	0.08574	1.1772	0.377	0.118	0.126	0.334
28.2	7	142.600	14.925	1295	2600	0.0095	0.08574	1.1772	0.305	0.122	0.105	0.344
28.2	7	126.067	13.195	1395	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.269	0.122	0.093	0.344
28.2	7	76.667	8.024	1435	2800	0.0095	0.08574	1.1772	0.164	0.127	0.059	0.360
28.2	7	43.400	4.543	1495	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.093	0.131	0.034	0.371
28.2	7	0.000	0.000	1595	2800	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.112	0.000	0.318

**Tabel B-B4 bilangan Reynolds 127000 S/D =1.8 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 1.8												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	540.933	56.618	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.156	0.000	0.000	0.000
28.2	7	531.800	55.662	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.136	0.008	0.014	0.012
28.2	7	489.867	51.273	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.047	0.021	0.062	0.059
28.2	7	472.267	49.431	135	450	0.0095	0.08574	1.1772	1.009	0.029	0.084	0.083
28.2	7	451.333	47.240	195	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.964	0.038	0.103	0.107
28.2	7	431.267	45.139	255	750	0.0095	0.08574	1.1772	0.921	0.046	0.120	0.131
28.2	7	417.067	43.653	315	875	0.0095	0.08574	1.1772	0.891	0.052	0.132	0.148
28.2	7	400.000	41.867	375	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.855	0.058	0.141	0.165
28.2	7	373.067	39.048	435	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.797	0.067	0.150	0.189
28.2	7	354.200	37.073	495	1275	0.0095	0.08574	1.1772	0.757	0.073	0.156	0.206
28.2	7	348.733	36.501	555	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.745	0.074	0.156	0.210
28.2	7	327.133	34.240	615	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.699	0.082	0.163	0.233
28.2	7	317.267	33.207	675	1600	0.0095	0.08574	1.1772	0.678	0.086	0.165	0.244
28.2	7	296.400	31.023	735	1750	0.0095	0.08574	1.1772	0.633	0.095	0.170	0.268
28.2	7	290.667	30.423	795	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.621	0.098	0.173	0.278
28.2	7	276.867	28.979	855	1950	0.0095	0.08574	1.1772	0.592	0.102	0.171	0.289
28.2	7	249.533	26.118	915	2100	0.0095	0.08574	1.1772	0.533	0.110	0.167	0.313
28.2	7	241.200	25.246	975	2175	0.0095	0.08574	1.1772	0.515	0.112	0.163	0.316
28.2	7	221.133	23.145	1035	2300	0.0095	0.08574	1.1772	0.472	0.118	0.158	0.334
28.2	7	185.933	19.461	1075	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.397	0.123	0.139	0.349
28.2	7	165.267	17.298	1115	2450	0.0095	0.08574	1.1772	0.353	0.124	0.124	0.352
28.2	7	132.133	13.830	1155	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.282	0.130	0.104	0.368
28.2	7	111.000	11.618	1195	2600	0.0095	0.08574	1.1772	0.237	0.131	0.088	0.371
28.2	7	99.000	10.362	1255	2650	0.0095	0.08574	1.1772	0.212	0.130	0.078	0.368
28.2	7	84.933	8.890	1295	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.181	0.131	0.067	0.371
28.2	7	37.133	3.887	1335	2750	0.0095	0.08574	1.1772	0.079	0.132	0.030	0.373
28.2	7	0.000	0.000	1375	2600	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.114	0.000	0.323

**Tabel B-B5 bilangan Reynolds 127000 S/D = 2.0 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 2.0												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	535.333	56.032	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.144	0.000	0.000	0.000
28.2	7	520.800	54.510	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.113	0.008	0.013	0.012
28.2	7	493.333	51.636	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.054	0.021	0.063	0.059
28.2	7	475.467	49.766	135	450	0.0095	0.08574	1.1772	1.016	0.029	0.084	0.083
28.2	7	453.533	47.470	195	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.969	0.038	0.104	0.107
28.2	7	433.333	45.356	255	725	0.0095	0.08574	1.1772	0.926	0.044	0.115	0.124
28.2	7	412.267	43.151	315	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.881	0.050	0.124	0.141
28.2	7	394.733	41.315	375	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.843	0.056	0.133	0.158
28.2	7	380.667	39.843	435	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.813	0.060	0.137	0.169
28.2	7	372.000	38.936	495	1175	0.0095	0.08574	1.1772	0.795	0.063	0.143	0.179
28.2	7	354.133	37.066	555	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.757	0.069	0.149	0.196
28.2	7	344.133	36.019	615	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.735	0.073	0.152	0.207
28.2	7	323.200	33.828	675	1550	0.0095	0.08574	1.1772	0.691	0.082	0.159	0.231
28.2	7	314.467	32.914	735	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.672	0.085	0.162	0.241
28.2	7	297.600	31.149	795	1800	0.0095	0.08574	1.1772	0.636	0.094	0.169	0.265
28.2	7	283.533	29.676	855	1925	0.0095	0.08574	1.1772	0.606	0.100	0.171	0.282
28.2	7	279.000	29.202	915	2000	0.0095	0.08574	1.1772	0.596	0.101	0.171	0.286
28.2	7	248.067	25.964	1015	2200	0.0095	0.08574	1.1772	0.530	0.110	0.166	0.313
28.2	7	232.333	24.318	1075	2300	0.0095	0.08574	1.1772	0.496	0.114	0.160	0.323
28.2	7	218.533	22.873	1135	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.467	0.118	0.156	0.334
28.2	7	208.533	21.826	1195	2450	0.0095	0.08574	1.1772	0.446	0.117	0.147	0.331
28.2	7	184.200	19.280	1255	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.394	0.121	0.134	0.342
28.2	7	161.000	16.851	1315	2625	0.0095	0.08574	1.1772	0.344	0.122	0.119	0.345
28.2	7	147.267	15.414	1375	2750	0.0095	0.08574	1.1772	0.315	0.128	0.114	0.363
28.2	7	131.533	13.767	1435	2850	0.0095	0.08574	1.1772	0.281	0.132	0.105	0.373
28.2	7	120.000	12.560	1495	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.256	0.131	0.095	0.371
28.2	7	77.733	8.136	1555	2950	0.0095	0.08574	1.1772	0.166	0.130	0.061	0.368
28.2	7	56.267	5.889	1615	3000	0.0095	0.08574	1.1772	0.120	0.129	0.044	0.365
28.2	7	39.333	4.117	1675	3050	0.0095	0.08574	1.1772	0.084	0.128	0.030	0.363
28.2	7	0.000	0.000	1775	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.105	0.000	0.297

**Tabel B-B6 bilangan Reynolds 127000 S/D = 2.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 127000												
S/D = 2.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	524.733	54.922	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.121	0.000	0.000	0.000
28.2	7	515.400	53.945	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.101	0.008	0.013	0.012
28.2	7	473.067	49.514	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.011	0.021	0.060	0.059
28.2	7	442.000	46.263	135	500	0.0095	0.08574	1.1772	0.944	0.034	0.091	0.096
28.2	7	417.933	43.744	195	650	0.0095	0.08574	1.1772	0.893	0.042	0.107	0.120
28.2	7	386.667	40.471	255	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.826	0.055	0.130	0.157
28.2	7	364.467	38.148	315	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.779	0.064	0.141	0.181
28.2	7	351.533	36.794	375	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.751	0.072	0.154	0.204
28.2	7	336.867	35.259	435	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.720	0.076	0.155	0.215
28.2	7	322.867	33.793	495	1375	0.0095	0.08574	1.1772	0.690	0.082	0.160	0.232
28.2	7	308.667	32.307	555	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.660	0.088	0.164	0.249
28.2	7	281.467	29.460	615	1675	0.0095	0.08574	1.1772	0.601	0.099	0.168	0.280
28.2	7	276.333	28.923	675	1750	0.0095	0.08574	1.1772	0.590	0.100	0.167	0.284
28.2	7	247.000	25.853	735	1925	0.0095	0.08574	1.1772	0.528	0.111	0.166	0.314
28.2	7	225.400	23.592	795	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.482	0.117	0.159	0.331
28.2	7	208.533	21.826	855	2175	0.0095	0.08574	1.1772	0.446	0.123	0.155	0.348
28.2	7	187.333	19.608	915	2250	0.0095	0.08574	1.1772	0.400	0.124	0.141	0.352
28.2	7	176.800	18.505	1015	2425	0.0095	0.08574	1.1772	0.378	0.131	0.140	0.372
28.2	7	162.000	16.956	1075	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.346	0.137	0.135	0.389
28.2	7	146.267	15.309	1135	2675	0.0095	0.08574	1.1772	0.313	0.144	0.127	0.406
28.2	7	128.200	13.418	1195	2800	0.0095	0.08574	1.1772	0.274	0.150	0.116	0.423
28.2	7	119.533	12.511	1255	2850	0.0095	0.08574	1.1772	0.255	0.149	0.107	0.421
28.2	7	76.467	8.004	1315	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.163	0.148	0.068	0.418
28.2	7	59.800	6.259	1375	2975	0.0095	0.08574	1.1772	0.128	0.149	0.054	0.422
28.2	7	38.533	4.033	1435	3050	0.0095	0.08574	1.1772	0.082	0.151	0.035	0.426
28.2	7	0.000	0.000	1495	2900	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.131	0.000	0.371

**Tabel B-C1 bilangan Reynolds 163000 S/D = 1.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 1.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	656.533	68.717	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.091	0.000	0.000	0.000
28.2	9	636.600	66.631	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.058	0.008	0.014	0.014
28.2	9	615.933	64.468	55	250	0.0095	0.08574	1.1772	1.024	0.018	0.032	0.031
28.2	9	586.400	61.377	95	450	0.0095	0.08574	1.1772	0.975	0.033	0.055	0.057
28.2	9	561.133	58.732	135	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.933	0.043	0.069	0.074
28.2	9	532.533	55.738	235	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.885	0.053	0.080	0.090
28.2	9	510.267	53.408	335	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.848	0.062	0.090	0.106
28.2	9	495.600	51.873	535	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.824	0.067	0.094	0.114
28.2	9	470.933	49.291	735	1550	0.0095	0.08574	1.1772	0.783	0.076	0.102	0.130
28.2	9	446.067	46.688	835	1750	0.0095	0.08574	1.1772	0.741	0.085	0.108	0.146
28.2	9	422.600	44.232	1035	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.702	0.095	0.114	0.162
28.2	9	392.667	41.099	1235	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.653	0.109	0.121	0.186
28.2	9	364.133	38.113	1435	2750	0.0095	0.08574	1.1772	0.605	0.123	0.127	0.210
28.2	9	345.467	36.159	1535	2925	0.0095	0.08574	1.1772	0.574	0.130	0.127	0.222
28.2	9	324.333	33.947	1635	3125	0.0095	0.08574	1.1772	0.539	0.139	0.128	0.238
28.2	9	311.667	32.621	1735	3250	0.0095	0.08574	1.1772	0.518	0.141	0.125	0.242
28.2	9	290.267	30.381	1835	3400	0.0095	0.08574	1.1772	0.482	0.146	0.120	0.250
28.2	9	275.200	28.804	1935	3550	0.0095	0.08574	1.1772	0.457	0.151	0.118	0.258
28.2	9	246.733	25.825	2035	3700	0.0095	0.08574	1.1772	0.410	0.155	0.109	0.266
28.2	9	235.333	24.632	2135	3850	0.0095	0.08574	1.1772	0.391	0.160	0.107	0.274
28.2	9	218.600	22.880	2235	3975	0.0095	0.08574	1.1772	0.363	0.162	0.101	0.278
28.2	9	209.200	21.896	2335	4100	0.0095	0.08574	1.1772	0.348	0.164	0.098	0.282
28.2	9	193.267	20.229	2435	4250	0.0095	0.08574	1.1772	0.321	0.169	0.093	0.290
28.2	9	171.400	17.940	2535	4375	0.0095	0.08574	1.1772	0.285	0.171	0.084	0.294
28.2	9	149.933	15.693	2635	4500	0.0095	0.08574	1.1772	0.249	0.174	0.074	0.298
28.2	9	137.467	14.388	2735	4650	0.0095	0.08574	1.1772	0.228	0.178	0.070	0.306
28.2	9	121.733	12.741	2835	4725	0.0095	0.08574	1.1772	0.202	0.176	0.061	0.302
28.2	9	104.867	10.976	2935	4800	0.0095	0.08574	1.1772	0.174	0.174	0.052	0.298
28.2	9	84.533	8.848	3035	4900	0.0095	0.08574	1.1772	0.140	0.174	0.042	0.298
28.2	9	66.267	6.936	3135	4950	0.0095	0.08574	1.1772	0.110	0.169	0.032	0.290
28.2	9	0.000	0.000	3235	4700	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.137	0.000	0.234

**Tabel B-C2 bilangan Reynolds 163000 S/D = 1.4 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 1.4												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	675.400	70.692	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.122	0.000	0.000	0.000
28.2	9	653.133	68.361	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.085	0.008	0.015	0.013
28.2	9	619.533	64.844	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.030	0.021	0.037	0.035
28.2	9	597.400	62.528	175	550	0.0095	0.08574	1.1772	0.993	0.035	0.059	0.060
28.2	9	572.133	59.883	275	750	0.0095	0.08574	1.1772	0.951	0.044	0.072	0.076
28.2	9	552.933	57.874	375	950	0.0095	0.08574	1.1772	0.919	0.054	0.084	0.092
28.2	9	530.533	55.529	475	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.882	0.063	0.095	0.108
28.2	9	523.067	54.748	575	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.869	0.068	0.101	0.116
28.2	9	482.333	50.484	775	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.802	0.082	0.112	0.140
28.2	9	465.333	48.705	975	1925	0.0095	0.08574	1.1772	0.773	0.089	0.117	0.152
28.2	9	436.733	45.711	1175	2250	0.0095	0.08574	1.1772	0.726	0.100	0.124	0.172
28.2	9	425.400	44.525	1375	2500	0.0095	0.08574	1.1772	0.707	0.105	0.127	0.179
28.2	9	419.400	43.897	1675	2825	0.0095	0.08574	1.1772	0.697	0.107	0.128	0.183
28.2	9	400.133	41.881	1975	3200	0.0095	0.08574	1.1772	0.665	0.114	0.130	0.195
28.2	9	365.933	38.301	2075	3450	0.0095	0.08574	1.1772	0.608	0.128	0.133	0.219
28.2	9	359.600	37.638	2175	3525	0.0095	0.08574	1.1772	0.598	0.126	0.129	0.215
28.2	9	340.800	35.670	2375	3800	0.0095	0.08574	1.1772	0.566	0.133	0.129	0.227
28.2	9	307.267	32.161	2575	4100	0.0095	0.08574	1.1772	0.511	0.142	0.124	0.243
28.2	9	278.667	29.167	2675	4300	0.0095	0.08574	1.1772	0.463	0.151	0.120	0.259
28.2	9	246.733	25.825	2975	4700	0.0095	0.08574	1.1772	0.410	0.161	0.113	0.275
28.2	9	205.667	21.526	3075	4850	0.0095	0.08574	1.1772	0.342	0.165	0.097	0.283
28.2	9	185.067	19.370	3175	5000	0.0095	0.08574	1.1772	0.308	0.170	0.090	0.291
28.2	9	163.867	17.151	3275	5150	0.0095	0.08574	1.1772	0.272	0.175	0.081	0.299
28.2	9	140.533	14.709	3375	5300	0.0095	0.08574	1.1772	0.234	0.179	0.072	0.307
28.2	9	127.400	13.335	3475	5350	0.0095	0.08574	1.1772	0.212	0.175	0.063	0.299
28.2	9	103.000	10.781	3575	5400	0.0095	0.08574	1.1772	0.171	0.170	0.050	0.291
28.2	9	77.333	8.094	3675	5450	0.0095	0.08574	1.1772	0.129	0.165	0.036	0.283
28.2	9	0.000	0.000	3775	5100	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.123	0.000	0.211

**Tabel B-C3 bilangan Reynolds 163000 S/D = 1.6 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 1.6												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	621.000	64.998	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.032	0.000	0.000	0.000
28.2	7	581.067	60.818	75	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.966	0.021	0.035	0.036
28.2	7	527.133	55.173	175	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.876	0.040	0.059	0.068
28.2	7	511.733	53.561	275	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.850	0.049	0.071	0.084
28.2	7	479.267	50.163	375	1025	0.0095	0.08574	1.1772	0.796	0.061	0.083	0.104
28.2	7	463.733	48.537	475	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.771	0.068	0.089	0.116
28.2	7	439.733	46.025	675	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.731	0.077	0.096	0.132
28.2	7	421.467	44.114	975	1900	0.0095	0.08574	1.1772	0.700	0.086	0.103	0.148
28.2	7	385.200	40.318	1275	2350	0.0095	0.08574	1.1772	0.640	0.100	0.110	0.172
28.2	7	341.267	35.719	1575	2850	0.0095	0.08574	1.1772	0.567	0.119	0.115	0.203
28.2	7	324.933	34.010	1875	3225	0.0095	0.08574	1.1772	0.540	0.126	0.116	0.215
28.2	7	298.800	31.274	2075	3500	0.0095	0.08574	1.1772	0.497	0.133	0.113	0.227
28.2	7	240.933	25.218	2275	3750	0.0095	0.08574	1.1772	0.400	0.137	0.094	0.235
28.2	7	211.933	22.182	2475	3950	0.0095	0.08574	1.1772	0.352	0.137	0.083	0.235
28.2	7	174.933	18.310	2675	4150	0.0095	0.08574	1.1772	0.291	0.137	0.068	0.235
28.2	7	128.333	13.432	2875	4400	0.0095	0.08574	1.1772	0.213	0.142	0.052	0.243
28.2	7	89.067	9.322	3075	4700	0.0095	0.08574	1.1772	0.148	0.151	0.038	0.259
28.2	7	0.000	0.000	3175	4500	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.123	0.000	0.211

**Tabel B-C4 bilangan Reynolds 163000 S/D = 1.8 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 1.8												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	612.800	64.140	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.018	0.000	0.000	0.000
28.2	9	565.467	59.186	75	350	0.0095	0.08574	1.1772	0.940	0.026	0.041	0.044
28.2	9	529.667	55.438	175	550	0.0095	0.08574	1.1772	0.880	0.035	0.053	0.060
28.2	9	495.933	51.908	275	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.824	0.049	0.069	0.084
28.2	9	469.667	49.158	475	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.781	0.058	0.078	0.100
28.2	9	442.333	46.298	675	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.735	0.068	0.085	0.116
28.2	9	413.267	43.255	975	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.687	0.082	0.096	0.140
28.2	9	396.933	41.546	1275	2225	0.0095	0.08574	1.1772	0.660	0.089	0.100	0.152
28.2	9	327.733	34.303	1575	2825	0.0095	0.08574	1.1772	0.545	0.116	0.109	0.199
28.2	9	303.867	31.805	1775	3125	0.0095	0.08574	1.1772	0.505	0.126	0.109	0.215
28.2	9	252.133	26.390	1975	3400	0.0095	0.08574	1.1772	0.419	0.133	0.095	0.227
28.2	9	208.733	21.847	2075	3600	0.0095	0.08574	1.1772	0.347	0.142	0.084	0.243
28.2	9	174.333	18.247	2175	3700	0.0095	0.08574	1.1772	0.290	0.142	0.070	0.243
28.2	9	134.133	14.039	2275	3850	0.0095	0.08574	1.1772	0.223	0.147	0.056	0.251
28.2	9	112.867	11.813	2375	3950	0.0095	0.08574	1.1772	0.188	0.147	0.047	0.251
28.2	9	91.067	9.532	2475	4200	0.0095	0.08574	1.1772	0.151	0.161	0.042	0.275
28.2	9	57.733	6.043	2575	4300	0.0095	0.08574	1.1772	0.096	0.161	0.026	0.275
28.2	9	0.000	0.000	2675	4000	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.123	0.000	0.211



**Tabel B-C5 bilangan Reynolds 163000 S/D = 2.0 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 2.0												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	597.93 3	62.58 4	0	0	0.009 5	0.08574	1.1772	0.99 4	0.00 0	0.00 0	0.00 0
28.2	9	557.06 7	58.30 6	75	350	0.009 5	0.08574	1.1772	0.92 6	0.02 6	0.04 1	0.04 3
28.2	9	514.53 3	53.85 4	175	550	0.009 5	0.08574	1.1772	0.85 5	0.03 5	0.05 1	0.05 9
28.2	9	468.86 7	49.07 5	275	850	0.009 5	0.08574	1.1772	0.77 9	0.05 4	0.07 1	0.09 0
28.2	9	445.26 7	46.60 5	375	1050	0.009 5	0.08574	1.1772	0.74 0	0.06 3	0.08 0	0.10 5
28.2	9	435.33 3	45.56 5	575	1300	0.009 5	0.08574	1.1772	0.72 3	0.06 8	0.08 4	0.11 3
28.2	9	406.53 3	42.55 0	775	1625	0.009 5	0.08574	1.1772	0.67 6	0.07 9	0.09 2	0.13 3
28.2	9	387.46 7	40.55 5	875	1800	0.009 5	0.08574	1.1772	0.64 4	0.08 6	0.09 5	0.14 4
28.2	9	359.06 7	37.58 2	975	2050	0.009 5	0.08574	1.1772	0.59 7	0.10 0	0.10 2	0.16 8
28.2	9	332.73 3	34.82 6	1175	2375	0.009 5	0.08574	1.1772	0.55 3	0.11 2	0.10 6	0.18 7
28.2	9	320.06 7	33.50 0	1575	2850	0.009 5	0.08574	1.1772	0.53 2	0.11 7	0.10 6	0.19 5
28.2	9	304.86 7	31.90 9	1775	3075	0.009 5	0.08574	1.1772	0.50 7	0.12 1	0.10 5	0.20 3
28.2	9	256.26 7	26.82 3	1975	3400	0.009 5	0.08574	1.1772	0.42 6	0.13 3	0.09 7	0.22 3
28.2	9	209.33 3	21.91 0	2075	3600	0.009 5	0.08574	1.1772	0.34 8	0.14 2	0.08 5	0.23 8
28.2	9	177.33 3	18.56 1	2175	3700	0.009 5	0.08574	1.1772	0.29 5	0.14 2	0.07 2	0.23 8
28.2	9	142.46 7	14.91 2	2275	3850	0.009 5	0.08574	1.1772	0.23 7	0.14 7	0.05 9	0.24 6
28.2	9	117.26 7	12.27 4	2375	3950	0.009 5	0.08574	1.1772	0.19 5	0.14 7	0.04 9	0.24 6
28.2	9	95.400	9.985	2475	4200	0.009 5	0.08574	1.1772	0.15 9	0.16 1	0.04 4	0.26 9
28.2	9	57.733	6.043	2575	4300	0.009 5	0.08574	1.1772	0.09 6	0.16 1	0.02 6	0.26 9
28.2	9	0.000	0.000	2675	3900	0.009 5	0.08574	1.1772	0.00 0	0.11 4	0.00 0	0.19 1

**Tabel B-C6 bilangan Reynolds 163000 S/D = 2.2 dengan Pengganggu I-53°**

Re = 163000												
S/D = 2.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	9	596.200	62.402	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	0.991	0.000	0.000	0.000
28.2	9	569.200	59.576	75	275	0.0095	0.08574	1.1772	0.946	0.019	0.030	0.032
28.2	9	540.667	56.590	135	450	0.0095	0.08574	1.1772	0.899	0.029	0.045	0.050
28.2	9	520.400	54.469	175	550	0.0095	0.08574	1.1772	0.865	0.035	0.052	0.060
28.2	9	492.933	51.594	215	675	0.0095	0.08574	1.1772	0.819	0.043	0.060	0.073
28.2	9	465.600	48.733	275	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.774	0.054	0.071	0.092
28.2	9	447.467	46.835	375	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.744	0.063	0.080	0.108
28.2	9	429.800	44.986	575	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.714	0.068	0.083	0.116
28.2	9	407.800	42.683	775	1600	0.0095	0.08574	1.1772	0.678	0.077	0.089	0.132
28.2	9	382.533	40.038	875	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.636	0.091	0.099	0.156
28.2	9	358.267	37.499	975	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.595	0.100	0.102	0.172
28.2	9	336.467	35.217	1175	2350	0.0095	0.08574	1.1772	0.559	0.110	0.105	0.187
28.2	9	320.200	33.514	1575	2825	0.0095	0.08574	1.1772	0.532	0.116	0.106	0.199
28.2	9	305.467	31.972	1775	3075	0.0095	0.08574	1.1772	0.508	0.121	0.105	0.207
28.2	9	269.467	28.204	1975	3400	0.0095	0.08574	1.1772	0.448	0.133	0.102	0.227
28.2	9	239.733	25.092	2075	3600	0.0095	0.08574	1.1772	0.398	0.142	0.097	0.243
28.2	9	210.067	21.987	2175	3750	0.0095	0.08574	1.1772	0.349	0.147	0.088	0.251
28.2	9	189.333	19.817	2275	3900	0.0095	0.08574	1.1772	0.315	0.151	0.082	0.259
28.2	9	162.000	16.956	2375	4000	0.0095	0.08574	1.1772	0.269	0.151	0.070	0.259
28.2	9	128.533	13.453	2475	4200	0.0095	0.08574	1.1772	0.214	0.161	0.059	0.275
28.2	9	94.533	9.894	2575	4300	0.0095	0.08574	1.1772	0.157	0.161	0.043	0.275
28.2	9	52.533	5.498	2675	4400	0.0095	0.08574	1.1772	0.087	0.161	0.024	0.275
28.2	9	0.000	0.000	2775	4100	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.123	0.000	0.211

**Tabel C-A1 bilangan Reynolds 90000 S/D = 1.4 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 90000												
S/D = 1.4												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	402.867	42.167	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.205	0.000	0.000	0.000
28.2	5	348.733	36.501	55	250	0.0095	0.08574	1.1772	1.043	0.018	0.105	0.101
28.2	5	317.267	33.207	95	400	0.0095	0.08574	1.1772	0.949	0.028	0.150	0.158
28.2	5	306.333	32.063	135	475	0.0095	0.08574	1.1772	0.916	0.032	0.161	0.176
28.2	5	281.200	29.432	175	600	0.0095	0.08574	1.1772	0.841	0.040	0.185	0.220
28.2	5	241.400	25.267	215	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.722	0.050	0.198	0.275
28.2	5	231.600	24.241	255	825	0.0095	0.08574	1.1772	0.693	0.053	0.204	0.295
28.2	5	216.400	22.650	295	925	0.0095	0.08574	1.1772	0.647	0.059	0.211	0.326
28.2	5	204.333	21.387	335	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.611	0.062	0.210	0.344
28.2	5	189.400	19.824	375	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.567	0.065	0.205	0.362
28.2	5	168.733	17.661	415	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.505	0.068	0.192	0.380
28.2	5	139.200	14.570	455	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.416	0.069	0.160	0.385
28.2	5	104.000	10.885	495	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.311	0.070	0.121	0.390
28.2	5	81.467	8.527	535	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.244	0.071	0.096	0.395
28.2	5	70.733	7.403	555	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.212	0.074	0.087	0.411
28.2	5	56.733	5.938	575	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.170	0.077	0.072	0.426
28.2	5	0.000	0.000	595	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.061	0.000	0.339

**Tabel C-A2 bilangan Reynolds 90000 S/D = 1.6 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 90000												
S/D = 1.6												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	407.533	42.655	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.219	0.000	0.000	0.000
28.2	5	381.733	39.955	35	150	0.0095	0.08574	1.1772	1.142	0.011	0.068	0.059
28.2	5	356.400	37.303	75	275	0.0095	0.08574	1.1772	1.066	0.019	0.110	0.103
28.2	5	331.000	34.645	115	400	0.0095	0.08574	1.1772	0.990	0.027	0.146	0.147
28.2	5	296.000	30.981	155	525	0.0095	0.08574	1.1772	0.885	0.034	0.169	0.191
28.2	5	271.867	28.455	195	625	0.0095	0.08574	1.1772	0.813	0.040	0.181	0.222
28.2	5	262.867	27.513	235	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.786	0.043	0.189	0.240
28.2	5	243.133	25.448	275	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.727	0.049	0.197	0.271
28.2	5	221.267	23.159	315	900	0.0095	0.08574	1.1772	0.662	0.055	0.200	0.302
28.2	5	198.400	20.766	355	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.593	0.060	0.198	0.333
28.2	5	177.600	18.589	395	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.531	0.061	0.180	0.339
28.2	5	158.000	16.537	435	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.473	0.062	0.162	0.344
28.2	5	147.600	15.449	475	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.442	0.063	0.154	0.349
28.2	5	125.067	13.090	515	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.374	0.064	0.132	0.354
28.2	5	96.667	10.118	555	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.289	0.065	0.104	0.359
28.2	5	81.467	8.527	595	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.244	0.066	0.089	0.364
28.2	5	56.733	5.938	495	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.170	0.080	0.075	0.442
28.2	5	0.000	0.000	535	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.061	0.000	0.340

**Tabel C-A3 bilangan Reynolds 90000 S/D = 1.8 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 90000												
S/D = 1.8												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	389.067	40.722	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.164	0.000	0.000	0.000
28.2	5	372.400	38.978	15	100	0.0095	0.08574	1.1772	1.114	0.008	0.026	0.024
28.2	5	345.867	36.201	55	200	0.0095	0.08574	1.1772	1.035	0.014	0.078	0.075
28.2	5	320.867	33.584	95	325	0.0095	0.08574	1.1772	0.960	0.021	0.114	0.119
28.2	5	309.400	32.384	135	400	0.0095	0.08574	1.1772	0.926	0.025	0.127	0.137
28.2	5	283.400	29.663	175	525	0.0095	0.08574	1.1772	0.848	0.033	0.153	0.181
28.2	5	257.867	26.990	215	650	0.0095	0.08574	1.1772	0.771	0.041	0.173	0.225
28.2	5	227.867	23.850	255	775	0.0095	0.08574	1.1772	0.682	0.048	0.183	0.269
28.2	5	212.400	22.231	295	875	0.0095	0.08574	1.1772	0.635	0.054	0.190	0.300
28.2	5	192.800	20.180	335	975	0.0095	0.08574	1.1772	0.577	0.060	0.191	0.331
28.2	5	177.200	18.547	375	1050	0.0095	0.08574	1.1772	0.530	0.063	0.185	0.349
28.2	5	158.667	16.607	395	1100	0.0095	0.08574	1.1772	0.475	0.066	0.173	0.364
28.2	5	140.267	14.681	415	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.420	0.068	0.159	0.380
28.2	5	126.600	13.251	435	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.379	0.071	0.150	0.395
28.2	5	110.400	11.555	455	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.330	0.074	0.136	0.411
28.2	5	87.867	9.197	475	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.263	0.077	0.112	0.426
28.2	5	68.800	7.201	495	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.206	0.080	0.091	0.442
28.2	5	55.133	5.771	515	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.165	0.082	0.075	0.457
28.2	5	36.267	3.796	535	1450	0.0095	0.08574	1.1772	0.108	0.085	0.051	0.473
28.2	5	0.000	0.000	555	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.060	0.000	0.333

**Tabel C-A4 bilangan Reynolds 90000 S/D = 2.0 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 90000												
S/D = 2.0												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	376.733	39.431	0	0	0.0095	0.0857	1.1772	1.127	0.000	0.000	0.000
28.2	5	351.267	36.766	15	75	0.0095	0.0857	1.1772	1.051	0.006	0.033	0.031
28.2	5	325.400	34.059	55	200	0.0095	0.0857	1.1772	0.973	0.014	0.073	0.075
28.2	5	301.067	31.512	95	350	0.0095	0.0857	1.1772	0.901	0.024	0.119	0.132
28.2	5	278.867	29.188	135	450	0.0095	0.0857	1.1772	0.834	0.029	0.136	0.163
28.2	5	268.533	28.106	175	525	0.0095	0.0857	1.1772	0.803	0.033	0.145	0.181
28.2	5	246.867	25.839	215	625	0.0095	0.0857	1.1772	0.738	0.038	0.157	0.212
28.2	5	224.200	23.466	255	750	0.0095	0.0857	1.1772	0.671	0.046	0.172	0.256
28.2	5	201.533	21.094	295	850	0.0095	0.0857	1.1772	0.603	0.052	0.173	0.287
28.2	5	175.067	18.324	335	950	0.0095	0.0857	1.1772	0.524	0.057	0.166	0.318
28.2	5	160.267	16.775	375	1000	0.0095	0.0857	1.1772	0.479	0.058	0.155	0.323
28.2	5	148.200	15.512	415	1050	0.0095	0.0857	1.1772	0.443	0.059	0.146	0.328
28.2	5	122.133	12.783	455	1100	0.0095	0.0857	1.1772	0.365	0.060	0.122	0.333
28.2	5	99.533	10.418	495	1150	0.0095	0.0857	1.1772	0.298	0.061	0.101	0.339
28.2	5	80.000	8.373	535	1200	0.0095	0.0857	1.1772	0.239	0.062	0.082	0.344
28.2	5	61.933	6.482	555	1250	0.0095	0.0857	1.1772	0.185	0.065	0.067	0.359
28.2	5	43.400	4.543	575	1300	0.0095	0.0857	1.1772	0.130	0.068	0.049	0.375
28.2	5	0.000	0.000	595	1200	0.0095	0.0857	1.1772	0.000	0.056	0.000	0.313

**Tabel C-A5 bilangan Reynolds 90000 S/D = 2.2 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 90000												
S/D = 2.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	5	318.333	33.319	95	300	0.0095	0.08574	1.1772	0.952	0.019	0.101	0.106
28.2	5	296.200	31.002	135	400	0.0095	0.08574	1.1772	0.886	0.025	0.121	0.137
28.2	5	266.800	27.925	175	525	0.0095	0.08574	1.1772	0.798	0.033	0.144	0.181
28.2	5	237.333	24.841	215	650	0.0095	0.08574	1.1772	0.710	0.041	0.160	0.225
28.2	5	221.267	23.159	255	750	0.0095	0.08574	1.1772	0.662	0.046	0.169	0.256
28.2	5	207.400	21.708	295	850	0.0095	0.08574	1.1772	0.620	0.052	0.178	0.287
28.2	5	191.000	19.991	335	925	0.0095	0.08574	1.1772	0.571	0.055	0.174	0.305
28.2	5	177.867	18.617	375	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.532	0.058	0.172	0.323
28.2	5	157.000	16.433	415	1075	0.0095	0.08574	1.1772	0.470	0.062	0.160	0.341
28.2	5	143.200	14.988	455	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.428	0.065	0.154	0.359
28.2	5	126.467	13.237	495	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.378	0.066	0.138	0.364
28.2	5	103.467	10.830	515	1250	0.0095	0.08574	1.1772	0.310	0.068	0.118	0.380
28.2	5	93.000	9.734	535	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.278	0.071	0.110	0.395
28.2	5	72.467	7.585	555	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.217	0.074	0.089	0.411
28.2	5	59.933	6.273	575	1400	0.0095	0.08574	1.1772	0.179	0.077	0.076	0.426
28.2	5	39.600	4.145	595	1450	0.0095	0.08574	1.1772	0.118	0.080	0.052	0.442
28.2	5	0.000	0.000	615	1300	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.064	0.000	0.354

**Tabel C-B1 bilangan Reynolds 127000 S/D = 1.4 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 127000												
S/D = 1.4												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	569.467	59.60	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.217	0.000	0.000	0.000
28.2	7	537.667	56.28	55	250	0.0095	0.08574	1.1772	1.149	0.018	0.059	0.051
28.2	7	500.667	52.40	115	500	0.0095	0.08574	1.1772	1.070	0.036	0.109	0.102
28.2	7	462.867	48.45	175	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.989	0.049	0.137	0.138
28.2	7	427.800	44.78	235	900	0.0095	0.08574	1.1772	0.914	0.062	0.160	0.175
28.2	7	411.133	43.03	295	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.878	0.066	0.163	0.186
28.2	7	398.600	41.72	395	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.852	0.070	0.170	0.199
28.2	7	383.200	40.11	535	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.819	0.076	0.176	0.215
28.2	7	366.400	38.35	635	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.783	0.081	0.179	0.228
28.2	7	352.067	36.85	735	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.752	0.085	0.182	0.241
28.2	7	316.267	33.10	835	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.676	0.095	0.181	0.268
28.2	7	293.133	30.68	975	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.626	0.100	0.178	0.284
28.2	7	258.800	27.09	1075	2200	0.0095	0.08574	1.1772	0.553	0.105	0.164	0.297
28.2	7	222.133	23.25	1035	2250	0.0095	0.08574	1.1772	0.475	0.113	0.152	0.320
28.2	7	158.000	16.54	1135	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.338	0.118	0.113	0.334
28.2	7	127.667	13.36	1235	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.273	0.123	0.095	0.347
28.2	7	94.600	9.90	1335	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.202	0.127	0.073	0.360
28.2	7	72.800	7.62	1435	2800	0.0095	0.08574	1.1772	0.156	0.127	0.056	0.360
28.2	7	0.000	0.00	1475	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.114	0.000	0.323



**Tabel C-B2 bilangan Reynolds 127000 S/D = 1.6 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 127000												
S/D = 1.6												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	569.467	59.604	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.217	0.000	0.000	0.000
28.2	7	537.667	56.276	55	250	0.0095	0.08574	1.1772	1.149	0.018	0.059	0.051
28.2	7	500.667	52.403	115	500	0.0095	0.08574	1.1772	1.070	0.036	0.109	0.102
28.2	7	462.867	48.447	175	700	0.0095	0.08574	1.1772	0.989	0.049	0.137	0.138
28.2	7	427.800	44.776	235	900	0.0095	0.08574	1.1772	0.914	0.062	0.160	0.175
28.2	7	411.133	43.032	295	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.878	0.066	0.163	0.186
28.2	7	398.600	41.720	395	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.852	0.070	0.170	0.199
28.2	7	383.200	40.108	535	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.819	0.076	0.176	0.215
28.2	7	366.400	38.350	635	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.783	0.081	0.179	0.228
28.2	7	352.067	36.850	735	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.752	0.085	0.182	0.241
28.2	7	316.267	33.103	835	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.676	0.095	0.181	0.268
28.2	7	293.133	30.681	975	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.626	0.100	0.178	0.284
28.2	7	258.800	27.088	1075	2200	0.0095	0.08574	1.1772	0.553	0.105	0.164	0.297
28.2	7	222.133	23.250	1035	2250	0.0095	0.08574	1.1772	0.475	0.113	0.152	0.320
28.2	7	158.000	16.537	1135	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.338	0.118	0.113	0.334
28.2	7	127.667	13.362	1235	2550	0.0095	0.08574	1.1772	0.273	0.123	0.095	0.347
28.2	7	94.600	9.901	1335	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.202	0.127	0.073	0.360
28.2	7	72.800	7.620	1435	2800	0.0095	0.08574	1.1772	0.156	0.127	0.056	0.360
28.2	7	0.000	0.000	1475	2700	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.114	0.000	0.323

**Tabel C-B3 bilangan Reynolds 127000 S/D = 1.8 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 127000												
S/D = 1.8												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	577.317	60.426	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.234	0.000	0.000	0.000
28.2	7	528.100	55.274	55	350	0.0095	0.08574	1.1772	1.128	0.027	0.088	0.078
28.2	7	497.680	52.091	95	480	0.0095	0.08574	1.1772	1.063	0.036	0.108	0.101
28.2	7	477.914	50.022	155	630	0.0095	0.08574	1.1772	1.021	0.044	0.128	0.125
28.2	7	437.517	45.793	235	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.935	0.053	0.139	0.149
28.2	7	407.240	42.624	335	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.870	0.062	0.153	0.175
28.2	7	384.613	40.256	435	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.822	0.067	0.155	0.189
28.2	7	359.580	37.636	535	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.768	0.076	0.165	0.215
28.2	7	326.240	34.146	635	1550	0.0095	0.08574	1.1772	0.697	0.085	0.168	0.241
28.2	7	257.700	26.973	775	1850	0.0095	0.08574	1.1772	0.551	0.100	0.156	0.284
28.2	7	219.700	22.995	875	1950	0.0095	0.08574	1.1772	0.469	0.100	0.133	0.284
28.2	7	174.717	18.287	975	2100	0.0095	0.08574	1.1772	0.373	0.105	0.111	0.297
28.2	7	144.920	15.168	1075	2250	0.0095	0.08574	1.1772	0.310	0.110	0.096	0.310
28.2	7	102.617	10.741	1175	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.219	0.114	0.071	0.323
28.2	7	68.317	7.150	1275	2500	0.0095	0.08574	1.1772	0.146	0.114	0.047	0.323
28.2	7	40.500	4.239	1315	2580	0.0095	0.08574	1.1772	0.087	0.118	0.029	0.334
28.2	7	0.000	0.000	1355	2430	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.100	0.000	0.284

**Tabel C-B4 bilangan Reynolds 127000 S/D = 2.0 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 127000												
S/D = 2.0												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	575.450	60.230	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.230	0.000	0.000	0.000
28.2	7	525.667	55.020	55	350	0.0095	0.08574	1.1772	1.123	0.027	0.087	0.078
28.2	7	494.640	51.772	95	500	0.0095	0.08574	1.1772	1.057	0.038	0.113	0.107
28.2	7	468.350	49.021	155	650	0.0095	0.08574	1.1772	1.001	0.046	0.131	0.131
28.2	7	442.229	46.287	235	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.945	0.053	0.141	0.149
28.2	7	416.188	43.561	335	980	0.0095	0.08574	1.1772	0.889	0.060	0.151	0.170
28.2	7	387.325	40.540	435	1150	0.0095	0.08574	1.1772	0.828	0.067	0.156	0.189
28.2	7	366.250	38.334	535	1310	0.0095	0.08574	1.1772	0.783	0.072	0.160	0.204
28.2	7	333.000	34.854	635	1530	0.0095	0.08574	1.1772	0.712	0.083	0.168	0.236
28.2	7	281.480	29.462	835	1780	0.0095	0.08574	1.1772	0.601	0.088	0.150	0.249
28.2	7	237.975	24.908	935	1950	0.0095	0.08574	1.1772	0.508	0.095	0.136	0.268
28.2	7	194.600	20.368	1035	2080	0.0095	0.08574	1.1772	0.416	0.097	0.115	0.276
28.2	7	162.500	17.008	1135	2200	0.0095	0.08574	1.1772	0.347	0.099	0.098	0.281
28.2	7	139.743	14.626	1235	2300	0.0095	0.08574	1.1772	0.299	0.099	0.084	0.281
28.2	7	100.025	10.469	1335	2380	0.0095	0.08574	1.1772	0.214	0.097	0.059	0.276
28.2	7	70.114	7.339	1435	2470	0.0095	0.08574	1.1772	0.150	0.096	0.041	0.273
28.2	7	38.000	3.977	1475	2500	0.0095	0.08574	1.1772	0.081	0.096	0.022	0.270
28.2	7	0.000	0.000	1515	2400	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.082	0.000	0.233

**Tabel C-B4 bilangan Reynolds 127000 S/D = 2.2 dengan Pengganggu Silinder Sirkular**

Re = 127000												
S/D = 2.2												
T	V	n	$\omega$	m	s	r	A	$\rho$	$\lambda$	Td	CP	Cm
(°C)	(m/s)	(rpm)	(rad/s)	(gr)	(gr)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )		(Nm)		
28.2	7	561.725	58.794	0	0	0.0095	0.08574	1.1772	1.200	0.000	0.000	0.000
28.2	7	518.867	54.308	55	300	0.0095	0.08574	1.1772	1.109	0.023	0.072	0.065
28.2	7	490.500	51.339	95	450	0.0095	0.08574	1.1772	1.048	0.033	0.098	0.094
28.2	7	467.850	48.968	155	600	0.0095	0.08574	1.1772	1.000	0.041	0.117	0.117
28.2	7	435.525	45.585	235	800	0.0095	0.08574	1.1772	0.931	0.053	0.139	0.149
28.2	7	394.480	41.289	335	1000	0.0095	0.08574	1.1772	0.843	0.062	0.148	0.175
28.2	7	366.556	38.366	435	1200	0.0095	0.08574	1.1772	0.783	0.071	0.158	0.202
28.2	7	336.783	35.250	475	1350	0.0095	0.08574	1.1772	0.720	0.082	0.166	0.231
28.2	7	282.120	29.529	515	1500	0.0095	0.08574	1.1772	0.603	0.092	0.157	0.260
28.2	7	216.750	22.687	555	1650	0.0095	0.08574	1.1772	0.463	0.102	0.134	0.289
28.2	7	170.200	17.814	595	1780	0.0095	0.08574	1.1772	0.364	0.110	0.114	0.313
28.2	7	146.567	15.341	635	1880	0.0095	0.08574	1.1772	0.313	0.116	0.103	0.328
28.2	7	99.000	10.362	735	1950	0.0095	0.08574	1.1772	0.212	0.113	0.068	0.320
28.2	7	58.450	6.118	835	2050	0.0095	0.08574	1.1772	0.125	0.113	0.040	0.320
28.2	7	38.450	4.024	935	2130	0.0095	0.08574	1.1772	0.082	0.111	0.026	0.315
28.2	7	0.000	0.000	1035	2080	0.0095	0.08574	1.1772	0.000	0.097	0.000	0.276

**Tabel D-1 Torsi Statis Tanpa Pengganggu**

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) (tanpa silinder pengganggu)		
	Re = 90000	Re = 127000	Re = 163000
0	1.5	3.65	5.11
10	1.96	4.7	6.62
20	2.59	5.39	7.52
30	3.26	6.56	10.01
40	2.67	5.9	8.3
50	1.86	4.39	6.634
60	1.53	3.92	4.85
70	1.3	3.78	2.33
80	0.81	2.8	1.31
90	0.67	1.91	0.8
100	0.17	0.82	0.21
110	0.08	0.34	-0.3
120	-0.02	0.1	-0.38
130	-0.09	-0.33	-0.56
140	-0.45	-0.71	-0.65
150	-0.64	-1.61	0.47
160	-0.16	-1.31	1.7
170	0.63	0.33	2.81
180	1.11	3.65	5.11

**Tabel D-2 Torsi Statis dengan Pengganggu tipe I-53° pada bilangan Reynolds 90000**

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) pada Bilangan Reynolds = 90000					
	S/D = 1.2	S/D = 1.4	S/D = 1.6	S/D = 1.8	S/D = 2.0	S/D = 2.2
0	2.06	2.15	2.06	1.89	1.9	1.87
10	2.38	2.52	2.5	2.22	2.16	2.06
20	2.38	2.62	2.77	2.32	2.22	2.15
30	3.39	3.72	3.32	2.92	2.68	2.66
40	2.76	2.87	2.66	2.13	2.16	2.1
50	2.03	2.12	1.97	1.87	1.85	1.77
60	1.77	2.04	1.81	1.58	1.54	1.48
70	1.44	1.62	1.65	1.45	1.47	1.29
80	1.05	1.25	1.29	0.9	0.99	1
90	0.91	1.06	0.9	0.71	0.7	0.64
100	0.74	0.84	0.76	0.44	0.41	0.39
110	0.48	0.58	0.67	0.37	0.26	0.28
120	0.17	0.39	0.43	0.19	0.1	0.17
130	0.06	0.29	0.38	0.1	-0.07	0.01
140	-0.08	0.15	0.05	-0.01	-0.12	-0.14
150	-0.29	-0.01	-0.07	-0.13	-0.27	-0.54
160	0.57	0.63	0.36	0.85	0.8	0.62
170	1.62	1.76	1.75	1.67	1.66	1.56
180	2.06	2.15	2.06	1.89	1.9	1.87

**Tabel D-3 Torsi Statis dengan Pengganggu tipe I-53° pada bilangan Reynolds 127000**

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) pada Bilangan Reynolds = 127000					
	S/D = 1.2	S/D = 1.4	S/D = 1.6	S/D = 1.8	S/D = 2.0	S/D = 2.2
0	3.83	3.9	3.5	3.76	3.71	3.52
10	4.58	4.68	4.68	3.87	3.71	3.72
20	5.69	5.68	5.23	4.2	4.02	3.82
30	7.97	8.3	7.23	5.85	5.11	4.96
40	6.09	6.59	5.44	5.37	4.08	4.05
50	4.56	5.44	4.69	4.41	3.62	3.56
60	4.05	4.94	4.09	3.81	3.06	3.02
70	3.47	3.44	3.26	3.02	2.67	2.58
80	2.95	3.07	2.85	2.29	2.14	2.13
90	2	2.03	2	1.9	1.94	1.93
100	1.48	1.46	1.34	1.83	1.59	1.47
110	1.13	1.12	0.94	1.23	1.43	1.34
120	0.9	0.93	0.67	0.85	1.14	1.09
130	0.77	0.73	0.6	0.78	0.94	0.87
140	0.53	0.47	0.28	0.43	0.46	0.23
150	-0.01	0.22	-0.08	-0.26	-0.29	-0.95
160	0.74	0.75	1.31	1.1	1.15	0.06
170	2.3	2.45	2.14	2.38	2.72	1.94
180	3.83	3.9	3.5	3.76	3.71	3.52

**Tabel D-4 Torsi Statis dengan Pengganggu tipe I-53° pada bilangan Reynolds 163000**

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) pada Bilangan Reynolds = 163000					
	S/D = 1.2	S/D = 1.4	S/D = 1.6	S/D = 1.8	S/D = 2.0	S/D = 2.2
0	5.16	5.39	4.85	4.45	3.66	3.65
10	5.94	6.66	6.4	6.16	5.03	4.85
20	8.18	8.75	7.64	7.52	7.23	6.54
30	10.68	11.73	10.29	10.36	10.2	9.17
40	9.01	9.42	8.36	8.29	8.24	8.41
50	7.38	8.05	6.68	6.51	6.41	7.1
60	6.69	7.04	5.64	5.1	4.92	4.68
70	5.75	6.02	4.75	4.32	4.11	3.81
80	3.93	3.97	3.24	3.22	2.99	2.7
90	1.72	2.2	2.12	2.15	2.14	1.74
100	1.32	1.58	1.54	1.39	1.4	1.24
110	1.19	1.19	1	1.04	0.88	1.04
120	1.08	1.1	0.92	0.89	0.72	0.49
130	0.83	0.91	0.56	0.33	0.5	0.19
140	-0.37	0.13	0.09	0.07	0.32	-0.04
150	-0.44	-0.26	-0.28	-0.39	-0.3	-0.65
160	1.67	1.71	1.2	0.75	0.41	0.96
170	2.91	3.06	2.37	2.16	1.86	2.21
180	5.16	5.39	4.85	4.45	3.66	3.65



**Tabel D-5 Torsi Statis dengan Pengganggu Silinder Sirkular pada bilangan Reynolds 90000**

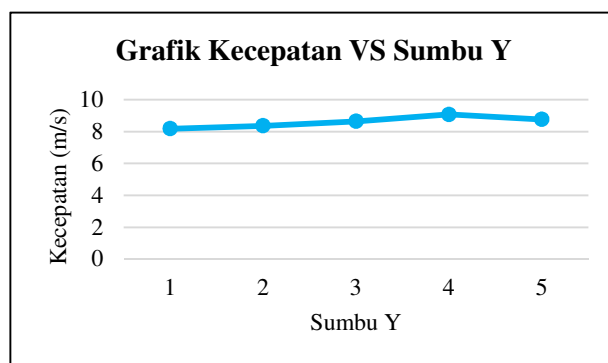
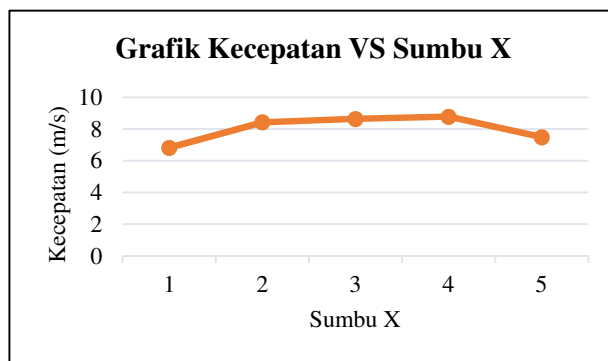
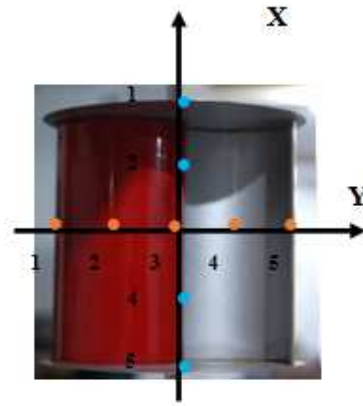
$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) pada Bilangan Reynolds = 90000				
	S/D = 1.4	S/D = 1.6	S/D = 1.8	S/D = 2.0	S/D = 2.2
0	2.07	1.98	1.73	1.59	1.54
10	2.56	2.32	2.13	1.97	1.88
20	2.83	2.62	2.48	2.37	2.46
30	3.85	3.72	3.19	2.92	3.08
40	3.08	2.87	2.38	2.42	2.55
50	2.31	2.12	1.89	1.87	1.76
60	2.12	1.92	1.62	1.56	1.38
70	1.76	1.62	1.38	1.11	1.18
80	1.44	1.25	1.13	0.95	0.99
90	1.1	1.06	0.93	0.81	0.85
100	0.98	0.84	0.64	0.49	0.41
110	0.61	0.58	0.42	0.37	0.17
120	0.55	0.39	0.16	0.13	0.02
130	0.32	0.29	0.06	0.08	-0.12
140	0.3	0.15	-0.04	-0.16	-0.26
150	0.35	-0.01	-0.21	-0.36	-0.42
160	0.84	0.63	0.21	0.16	0.27
170	1.89	1.76	1.07	0.92	0.89
180	2.18	2.15	1.54	1.28	1.15

**Tabel D-6 Torsi Statis dengan Pengganggu Silinder Sirkular pada bilangan Reynolds 127000**

$\theta(^{\circ})$	Ts (N-cm) pada Bilangan Reynolds = 127000				
	S/D = 1.4	S/D = 1.6	S/D = 1.8	S/D = 2.0	S/D = 2.2
0	4.18	4.04	3.54	3.64	3.54
10	4.98	4.80	4.63	4.83	4.76
20	5.84	5.72	5.67	5.77	5.87
30	7.46	6.84	6.67	6.67	6.57
40	5.80	5.80	5.86	5.86	5.86
50	4.81	4.81	4.67	4.78	4.67
60	3.24	3.13	3.19	3.34	3.19
70	2.44	2.44	2.36	2.51	2.36
80	1.87	1.66	1.60	1.75	1.60
90	0.98	0.78	0.68	0.83	0.68
100	0.81	0.71	0.40	0.55	0.40
110	0.45	0.28	0.05	0.20	0.05
120	0.21	0.11	-0.11	0.04	-0.11
130	0.11	0.05	-0.42	-0.35	-0.50
140	-0.01	-0.28	-0.32	-0.51	-0.61
150	-0.61	-1.11	-1.11	-1.01	-1.01
160	-0.31	-0.81	-0.81	-1.31	-1.31
170	1.33	0.83	0.83	0.93	0.93
180	5.10	4.73	4.23	4.48	5.08

Tabel E.1 Data *uniformity* pada jarak 2900 mm

Posisi	Sumbu	
	X	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



## RIWAYAT PENULIS



Nur Fatowil Aulia dilahirkan di Surabaya pada tanggal 7 September 1990. Penulis menempuh pendidikan di SDN 2 Gabel Ponorogo, SMP Negeri 1 Kauman Ponorogo, dan kemudian melanjutkan SMA BAKTI Ponorogo. Pada tahun 2008, penulis melanjutkan ke perguruan tinggi negeri, untuk menempuh gelar Diploma di Jurusan Teknik Permesinan Kapal Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Selanjutnya pada tahun 2011 penulis melanjutkan program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya. Pada tahun 2016 Penulis melanjutkan pendidikannya pada program Magister dengan bidang keahlian Rekayasa Konversi Energi. Harapan penulis adalah memanfaatkan waktu untuk sebaik-baiknya, Jangan pernah menyerah dengan kesempatan yang ada. Karena terkadang kesempatan tidak datang untuk kedua kalinya "L'effort Est Ma Force". Apabila terdapat kritik maupun saran, dapat menghubungi penulis melalui e-mail dengan fatowil889@gmail.com.