

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENINGKATAN PERFORMA TURBIN
ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER DI
SAMPING *ADVANCING BLADE***

“Studi Kasus Untuk Sudu Advancing Menggunakan Silinder Sirkuler
Dengan Jarak $Y/D = 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; 1,42 ; 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ;$
 $1,95 ; 2,09$ dan kecepatan 4 & 6 m/s”

HANIF AGHA FADHILA

NRP. 02111840000102

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

NIP. 196001291987011001

PROGRAM STUDI SARJANA

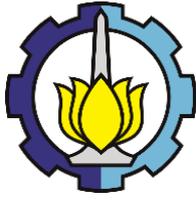
Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR – TM184835

**STUDI NUMERIK PENINGKATAN PERFORMA
TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN
SILINDER DI SAMPING *ADVANCING BLADE***

**“Studi Kasus Untuk Sudu Advancing Menggunakan Silinder Sirkuler
Dengan Jarak Y/D = 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; 1,42 ; 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09
dan Kecepatan 4 & 6 m/s”**

HANIF AGHA FADHILA
NRP. 02111840000102

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

NIP. 196001291987011001

PROGRAM STUDI SARJANA

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT – TM184835

NUMERICAL STUDY INCREASING SAVONIUS ROTOR PERFORMANCE BY ADDING CIRCULAR CYLINDER BEHIND THE *ADVANCING BLADE*

“Case Study for *Advancing blades* Using Circular Cylinders With Y/D Distance = 1.23 ; 1, 27 ; 1.32 ; 1.42 ; 1.51 ; 1.66 ; 1.80 ; 1.95 ; 2,09 and velocity inlet 4 & 6 m/s”

**HANIF AGHA FADHILA
NRP. 02111840000102**

Advisor

Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA

NIP. 196001291987011001

UNDERGRADUATE STUDY PROGRAM

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER DI SAMPING *ADVANCING BLADE*

“Studi Kasus Untuk Sudu Advancing Menggunakan Silinder Sirkuler Dengan Jarak Y/D = 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; 1,42 ; 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09 dan Kecepatan 4 & 6 m/s”

TUGAS AKHIR

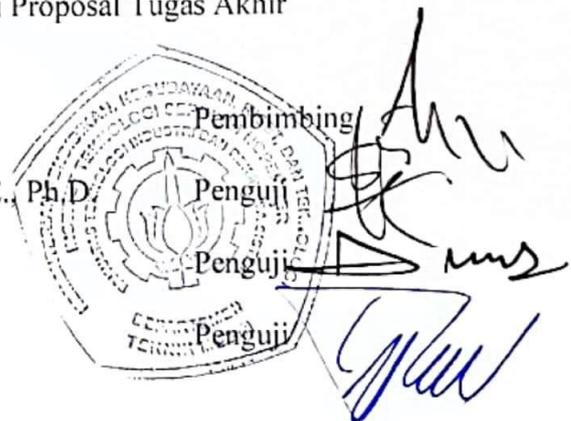
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **HANIF AGHA FADHILA**

NRP. 02111840000102

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA
2. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.



SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY INCREASING SAVONIUS ROTOR PERFORMANCE BY ADDING CIRCULAR CYLINDER BEHIND THE *ADVANCING BLADE*

“Case Study for *Advancing blades* Using Circular Cylinders With Y/D Distance = 1.23; 1.27; 1.32; 1.42; 1.51; 1.66; 1.80; 1.95; 2,09 and velocity inlet 4 & 6 m/s”

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology

HANIF AGHA FADHILA

NRP. 082111840000102

Approved by Final Project Proposal Examiner Team

1. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA Advisor
2. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. Examiner
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. Examiner
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. Examiner



Handwritten signatures in blue ink, corresponding to the names of the examiners listed on the left.

SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama mahasiswa / NRP : Hanif Agha Fadhila / 02111840000102

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing/NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA / 196001291987011001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul

STUDI NUMERIK PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS DENGAN PENEMPATAN SILINDER DI SAMPING *ADVANCING BLADE*

“Studi Kasus Untuk Sudu Advancing Menggunakan Silinder Sirkuler Dengan Jarak Y/D = 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; 1,42 ; 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09 dan Kecepatan 4 & 6 m/s”

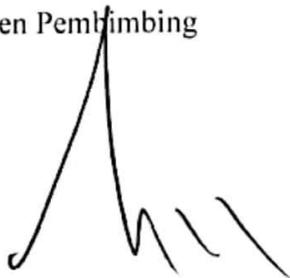
adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2022

Mengetahui

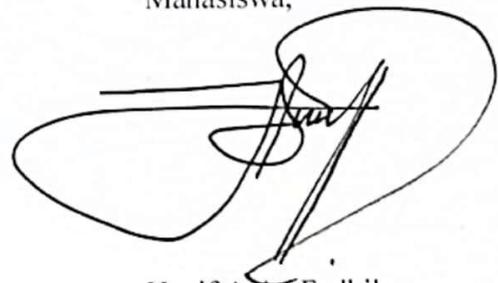
Dosen Pembimbing



(Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA)

NIP. 196001291987011001

Mahasiswa,



Hanif Agha Fadhila

NRP. 02111840000102

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : Hanif Agha Fadhila / 02111840000102

Department : Mechanical Engineering

Advisor/NIP : Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA / 196001291987011001

Hereby declare that the Final Project with the title of

NUMERICAL STUDY INCREASING SAVONIUS ROTOR PERFORMANCE BY ADDING CIRCULAR CYLINDER BEHIND THE ADVANCING BLADE

“Case Study for Advancing blades Using Circular Cylinders With Y/D Distance = 1.23; 1.27;
1.32; 1.42; 1.51; 1.66; 1.80; 1.95; 2,09 and velocity inlet 4 & 6 m/s”

is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 July 2022

Acknowledged

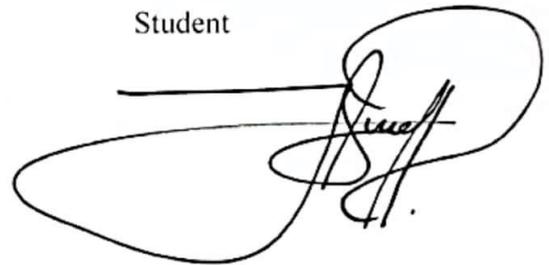
Advisor



(Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA)

NIP. 196001291987011001

Student



Hanif Agha Fadhila

NRP. 02111840000102

ABSTRAK

Energi listrik tak akan pernah bisa lepas dari kehidupan manusia. Sebagian besar manusia memerlukan energi listrik untuk pekerjaan, pendidikan, bahkan urusan rumah tangga. Seiring lama populasi manusia semakin meningkat, menyebabkan kebutuhan energi listrik juga meningkat. Sedangkan batu bara yang merupakan sumber utama energi listrik kian menipis dan diperkirakan akan habis dalam 65 tahun kedepan. Permasalahan energi listrik tidak hanya dari terbatasnya jumlah batubara yang tersisa, namun juga banyaknya penyakit dan kematian tiap tahunnya yang disebabkan oleh operasional pembangkit listrik. Salah satu energi yang bisa menjadi solusi bagi permasalahan tersebut adalah energi angin. Indonesia adalah negara katulistiwa dengan potensi energi angin yang rendah. Namun ada turbin angin yang bekerja dengan baik pada kecepatan angin rendah yaitu turbin angin Savonius. Penelitian dilakukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius agar bisa mencapai performa terbaiknya. Penelitian akan dilakukan dengan cara memberikan silinder disamping *advancing blade*. Penambahan silinder akan membuat celah antara *advancing blade* dengan silinder itu sendiri, sehingga akan terbentuk efek nozzle dan attached flow. Sehingga kecepatan angin akan meningkat dan torsi positif akan meningkat pula. Metode yang digunakan ada numerik karena lebih baik dalam melakukan analisa fenomena aliran yang terjadi.

Penelitian menggunakan software ansys Fluent 2021R dengan mesh yang telah melalui proses grid independency test. Model yang digunakan adalah realizable k-epsilon karena model tersebut memiliki nilai coefficient of moment yang mendekati hasil eksperimen. Untuk Penelitian peningkatan C_m dan C_p , turbin Savonius akan dicatat torsi dinamisnya pada setiap 1° selama 10 revolusi. Revolusi ke 10 akan dianggap paling stabil dan akan diambil rata rata C_m pada revolusi ke 10. Untuk torsi statis akan dianalisa setiap 10° mulai dari sudut rotor 0° hingga 180° dan dianalisa peningkatan performanya.

Berdasarkan penelitian torsi dinamis yang telah dilakukan, jarak optimal yang didapatkan adalah Y/D 1,32 untuk kedua variasi kecepatan dengan nilai $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$ masing-masing 1,0 dan 1,1 untuk kecepatan 4 & 6 m/s secara berturut-turut. Untuk torsi statis, jarak optimal terletak pada Y/D 1,51 untuk kedua variasi kecepatan dengan rata-rata C_t masing-masing 1,62 dan 1,76 untuk kecepatan 4 & 6 m/s secara berturut-turut. Analisis torsi dinamis menghasilkan bahwa penambahan silinder pada kecepatan 4m/s menyebabkan turunnya tekanan stagnasi, turunnya attached flow pada jarak silinder rendah, meningkatnya tekanan sisi cekung *advancing blade* dan meningkatnya base pressure. Sedangkan pada variasi kecepatan 6m/s menyebabkan meningkatnya tekanan stagnasi, meningkatnya attached flow pada jarak silinder rendah, meningkatnya tekanan sisi cekung *advancing blade* dan menurunnya base pressure.

Kata Kunci : *Turbin Angin Savonius, Silinder Sirkuler, Sudu Advancing, Attached Flow, Tekanan.*

ABSTRACT

Electrical energy can never be separated from human life. Most humans need electrical energy for work, education, and even household matters. As the human population continues to increase, the demand for electrical energy also increases. Meanwhile, coal, which is the main source of electrical energy, is running low and is expected to run out in the next 65 years. The problem of electrical energy is not only from the limited amount of coal left, but also the number of diseases and deaths each year caused by the operation of power plants. One of the energy that can be a solution to these problems is wind energy. Indonesia is an equatorial country with low wind energy potential. However, there is a wind turbine that works well at low wind speeds, namely the Savonius wind turbine. The research was conducted to improve the performance of the Savonius wind turbine in order to achieve its best performance. Research will be carried out by providing a cylinder in addition to the *advancing blade*. The addition of a cylinder will create a gap between the *advancing blade* and the cylinder itself, so that the nozzle effect and attached flow will form. So that the wind speed will increase and the positive torque will also increase. The method used is numerical because it is better in analyzing the flow phenomena that occur.

The research uses ansys Fluent 2021R software with a mesh that has gone through a grid independence test process. The model used is realizable k-epsilon because the model has a coefficient of moment value that is close to the experimental results. For the study of increasing C_m and C_p , the Savonius turbine will record its dynamic torque at every 1° for 10 revolutions. The 10th revolution will be considered the most stable and the average C_m will be taken at the 10th revolution. Static torque will be analyzed every 10° from 0° to 180° of rotor angle and analyzed for performance improvements.

Based on the dynamic torque research that has been carried out, the optimal distance obtained at Y/D 1.32 for both speed variations with $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}} = 1.09$ and 1.11 for speeds of 4 & 6 m/s, respectively. For static torque, the optimal distance obtained at Y/D 1.51 for both speed variations with an average C_t s 1.62 and 1.76 for speeds of 4 & 6 m/s, respectively. Dynamic torque analysis results that the addition of cylinders at a speed of 4m/s causes a decrease in stagnation pressure, a decrease in attached flow at a low cylinder distance, an increase in the pressure of the *advancing blade* concave and increase base pressure. Meanwhile at 6m/s speed variation causes stagnation pressure to increase, attached flow increases at low cylinder spacing, increasing pressure on the concave side of *advancing blade* and decreasing base pressure.

Keywords : *Savonius Wind Turbine, Circular Cylinder, Advancing blade, Attached Flow, Pressure.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala limpahan berkat dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul:“*Studi numerik Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder di Samping Advancing Blade*”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan kelancaran dengan segala anugerah-Nya hingga sampai saat ini. Rasulullah SAW sebagai panutan hidup bagi seluruh umat manusia.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang memberikan motivasi dan bimbingan sehingga Tugas Akhir dapat diselesaikan
3. Papa, mama, kakak, dan adik yang telah memberi dukungan selama proses perkuliahan.
4. Artha, Ghani, Ojan & Tiya selaku teman yang selalu memberi semangat karena keadaan.
5. Pak Banta, Pak lutfi & Mas Adit yang telah memberikan ruang diskusi yang sangat bermanfaat.
6. Bapak Gunawan Sakti yang telah memberikan ilmu sehingga penelitian bisa dilakukan dan diselesaikan tepat waktu.
7. Diva Alma Putriani sebagai seseorang yang sangat berperan bagi saya 7 tahun terakhir ini.
8. Seluruh teman-teman KKO yang telah mendoakan penulis sehingga lancar dalam proses penelitian.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih sempurna belum. Maka dari itu, penulis mohon maaf apabila ada kesalahan. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, 21 Juli 2022

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Turbin Angin	5
2.2 Turbin Angin Savonius	6
2.3 Drag	7
2.4 Tip Speed Ratio (λ)	8
2.5 Coefficient of Moment (Cm)	9
2.6 Coefficient of Power (Cp)	9
2.7 Penelitian Terdahulu	10
2.7.1 An experimental study on improvement of Savonius rotor performance (Mahmoud et al., 2012)	10
2.7.2 The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors (Altan & Atilgan, 2010)	14
2.7.3 Harvesting Wind Energy for Improving Performance of Savonius Rotor (El- Askary et al., 2015)	18
2.7.4 Experimental and Numerical Investigation of I-65[□] Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance (Sakti et al., 2019)	22
2.7.5 Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade	26
2.7.6 Effect of a Circular Cylinder in Front of <i>Advancing blade</i> on the Savonius Water Turbine by Using Transient Simulation (Setiawan et al., 2019)	30
2.8 Rangkuman	36

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	37
3.1 Variasi Simulasi	37
3.2 Pre-Processing.....	37
3.2.1 Geometri & Domain	37
3.2.2 Parameter	38
3.2.3 Meshing & Grid Indpendence Test.....	39
3.3 Processing	41
3.4 Post Processing.....	43
3.5 Diagram Alir	44
BAB IV HASIL ANALISIS DAN DISKUSI.....	45
4.1 Validasi Simulasi.....	45
4.2 Hasil Penelitian	46
4.2.1 Nilai Cm dan Cp Setiap Variasi Kecepatan 4 m/s.....	46
4.2.2 Nilai Cm dan Cp Setiap Variasi Kecepatan 6 m/s.....	47
4.2.4 Analisis Torsi Dinamis Satu Putaran Turbin	49
4.2.5 Pengaruh Kecepatan dan Distribusi Hasil Torsi Dinamis.....	50
4.2.6 Analisis Kontur Kecepatan & Tekanan	51
4.2.7 Tekanan pada turbin angin Savonius.....	59
4.2.8 Analisis Torsi Statis.....	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Turbin angin dengan sumbu horizontal (Casini, 2015)	5
Gambar 2. 2 Turbin angin dengan sumbu vertical (VAWT) (Casini, 2015).....	6
Gambar 2. 3 Perbandingan efisiensi berbagai macam turbin angin (Libii, 2013).....	6
Gambar 2. 4 Turbin angin Savonius tampak atas (Pranta et al., 2021)	7
Gambar 2. 5 Gaya drag pada turbin angin Savonius (Pranta et al., 2021)	7
Gambar 2. 6 (a) Skema eksperimen dengan keterangan; 1 – wind tunnel, 2 – bearing, 3 – steel housing, 4 – steel shaft, 5 – blade dan 6 – end plate (Mahmoud et al., 2012).....	10
Gambar 2. 7 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan Single Stage; (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas. (Mahmoud et al., 2012)	10
Gambar 2. 8 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu. (Mahmoud et al., 2012).....	11
Gambar 2. 9 Grafik Pengaruh Jumlah Blad terhadap Daya Aktual Turbin Angin Savonius. (Mahmoud et al., 2012)	11
Gambar 2. 10 Grafik Hubungan Spesific Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Satu Stage dan Dua Stage. (Mahmoud et al., 2012).....	12
Gambar 2. 11 Grafik Hubungan Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio. (Mahmoud et al., 2012).....	12
Gambar 2. 12 Grafik Hubungan Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio. (Mahmoud et al., 2012).....	13
Gambar 2. 13 Grafik Hubungan antara Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan End Plate dan Without End Plate. (Mahmoud et al., 2012)	13
Gambar 2. 14 Geometri dan susunan Design curtain (Altan & Atilgan, 2010)	14
Gambar 2. 15 Skema pengaturan eksperimen (Altan & Atilgan, 2010).....	15
Gambar 2. 16 Torsi statis pada rotor tanpa curtain ketika rotor pada posisi θ (Altan & Atilgan, 2010).....	15
Gambar 2. 17 Perubahan torsi statis dari sudut curtain α terhadap sudut curtain $\beta = 10^\circ$ dan 15° ketika posisi rotor $\theta = 90^\circ$ 60° dan 45° (Altan & Atilgan, 2010)	16
Gambar 2. 18 Perbandingan torsi statis maksimal dengan dan tanpa curtain ketika posisi rotor $\theta = 45^\circ$ 60° dan 90° (Altan & Atilgan, 2010).....	16

Gambar 2. 19 Torsi statis yang didapatkan dari studi eksperimen dan numerik pada posisi rotor $\theta = 60^\circ$ dan curtain angle $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Altan & Atilgan, 2010).....	17
Gambar 2. 20 Distribusi kecepatan maksimal ketika rotor berada pada posisi $\theta = 60^\circ$ (Altan & Atilgan, 2010).....	17
Gambar 2. 21 Perbandingan torsi dan power pada rotor dengan dan tanpa curtain (Altan & Atilgan, 2010).....	18
Gambar 2. 22 Perbandingan koefisien power dengan dan tanpa curain (Altan & Atilgan, 2010)	18
Gambar 2. 23 Desain 3D dari alat pengumpul angin (El-Askary et al., 2015).....	19
Gambar 2. 24 Tiga desain yang berbeda untuk mengontrol arah angin (a) Design I, (b) Design II, (c) Design III (El-Askary et al., 2015)	19
Gambar 2. 25 (a) Boundari condition simulasi, (b) grid didekat dinding Savonius (El-Askary et al., 2015)	20
Gambar 2. 26 Variasi dari koefisien torsi dan koefisien daya pada λ yang berbeda (El-Askary et al., 2015)	20
Gambar 2. 27 Variasi torsi statis terhadap sudut rotor (El-Askary et al., 2015)	21
Gambar 2. 28 Kontur kecepatan (m/s) disekitar rotor pada sudut rotor 135° (a) Design I, (b) Design II, (c) Design III (El-Askary et al., 2015).....	21
Gambar 2. 29 Kontur kecepatan (m/s) disekitar rotor pada $\lambda = 1$ (a) Turbin angin Savonius konvensional, (b) Design I, (c) Design II, (d) Design III (El-Askary et al., 2015)	22
Gambar 2. 30 Skema penelitian eksperimen (Sakti et al., 2019)	22
Gambar 2. 31 (a) Skema konfigurasi dengan silinder tipe I-65. (b) Skema pengukuran denfan dynamometer (Sakti et al., 2019).....	23
Gambar 2. 32 (a) Domain wake zone dan fixed zone (b) Posisi silinder I-65 (Sakti et al., 2019).....	23
Gambar 2. 33 Validasi koefisien daya pada TSR 0,3 sampai 1,0 (Sakti et al., 2019)	24
Gambar 2. 34 Peningkatan koefisien daya turbin terhadap TSR pada $S/D = 1,4$ dan $Re = 99.000$ (Sakti et al., 2019).....	24
Gambar 2. 35 Peningkatan torsi statis terhadap sudut pada $Re = 99.000$, perbandingan antara turbin savonius konvensional dengan penelitian sekarang (Sakti et al., 2019)	25
Gambar 2. 36 Perbandingan kontur tekanan antara turbinkonvensionaldan sesudah diberi silinder pengganggu Tipe I-65 $^\circ$ pada $\lambda = 0,8$; $Re = 9,9 \times 10^4$ dan $S/D = 1,4$; (a) Turbin	

Konvensional pada sudut bilah 30o, (b) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (c) Turbin Konvensional pada sudut bilah 90°, (d) Turbin pada sudut bilah 90° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (e) Turbin Konvensional pada sudut bilah 150°(f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder pengganggu Tipe I-65° (Sakti et al., 2019).....	26
Gambar 2. 37 Skema penelitian secara eksperimen(Triyogi et al., 2020).....	27
Gambar 2. 38 (a)Konfigurasi turbin angin Savonius dengan silinder sirkular (b) Skema pengukuran torsi dinamis(Triyogi et al., 2020)	27
Gambar 2. 39 Perubahan koefisien daya terhadap TSR untuk S/D = 1,4 ; 1,6 ; dan 1,8 (Triyogi et al., 2020).....	27
Gambar 2. 40 Perubahan koefisien daya terhadap TSR untuk S/D = 2,0 ; dan 2,2 (Triyogi et al., 2020).....	28
Gambar 2. 41 Perubahan rasio Cpmax/Cp0max terhadap jarak S/D (Triyogi et al., 2020)	28
Gambar 2. 42 Perubahan koefisien momen terhadap TSR untuk S/D = 1,4 ; 1,6 ; dan 1,8 (Triyogi et al. 2020).....	29
Gambar 2. 43 Perubahan koefisien momen terhadap TSR untuk S/D = 2,0 ; dan 2,2 (Tiyogi et al. 2020).....	29
Gambar 2. 44 Perubahan torsi statis terhadap sudut turbin pada S/D = 1,4 ; 1,6 dan 1,8 (Triyogi et al. 2020).....	30
Gambar 3. 1 Konfigurasi penelitian	37
Gambar 3. 2 Boundary condition	38
Gambar 3. 3 (a) Meshing keseluruhan domain simulasi, (b) Meshing pada rotating domain, (c) Mesh pada sekitar sudu turbin	40
Gambar 3. 4 Perbedaan Cm pada setiap jenis mesh	40
Gambar 3. 5 Grafik grid independency test.....	41
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan koefisien daya (Cp) penelitian Sakti et al. (2019) dengan penelitian sekarang.	45
Gambar 4. 2 Grafik koefisien daya (Cm) seluruh variasi pada kecepatan 4m/s	46
Gambar 4. 3 Grafik koefisien daya (Cp) seluruh variasi pada kecepatan 4m/s.....	46

Gambar 4. 4 Grafik koefisien daya (C_m) seluruh variasi pada kecepatan 6m/s	47
Gambar 4. 5 Grafik koefisien daya (C_p) seluruh variasi pada kecepatan 6m/s.....	48
Gambar 4. 6 Toris dinamis kecepatan 4 dan 6 m/s pada variasi tanpa silinder, 1,23 ; 1,32 dan 2,09 TSR 0,8.....	49
Gambar 4. 7 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 30° kecepatan 4 m/s.....	59
Gambar 4. 8 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 60° kecepatan 4 m/s.....	60
Gambar 4. 9 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 90° kecepatan 4 m/s.....	61
Gambar 4. 10 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 30° kecepatan 6 m/s.....	62
Gambar 4. 11 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 60° kecepatan 6 m/s.....	62
Gambar 4. 12 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 90° kecepatan 6 m/s.....	63
Gambar 4.13 Grafik rata-rata kenaikan koefisien torsi statis (C_{ts}) pada seluruh variasi	64
Gambar 4. 14 Koefisien torsi statis seluruh variasi jarak Y/D untuk kecepatan 4 m/s	65
Gambar 4. 15 Koefisien torsi statis seluruh variasi jarak Y/D untuk kecepatan 6 m/s	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Drag coefficient untuk berbagai geometri 2 dimensi (Aziz et al., 2008)	8
Tabel 2. 2 Tabel rangkuman penelitian terdahulu	36
Tabel 3. 1 Geometri turbin angin Savoius	37
Tabel 3. 2 Boundary conditions yang digunakan pada simulasi	38
Tabel 3. 3 Grid Independency Test	40
Tabel 3. 4 Input RPM dan time step size untuk kecepatan 4 m/s.....	41
Tabel 3. 5 Input RPM dan time step size untuk kecepatan 6 m/s.....	42
Tabel 3. 6 Setup solver untuk simulasi transient	43
Tabel 4. 1 Perbandingan koefisien daya ($C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$) turbin angin Savonius seluruh variasi.	50
Tabel 4.2 Kontur kecepatan 4m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°	52
Tabel 4.3 Kontur kecepatan 6m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°	54
Tabel 4.4 Kontur tekanan untuk kecepatan 4m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°	56
Tabel 4. 5 Kontur tekanan untuk kecepatan 6m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°	58
Tabel 4. 6 Rata-rata kenaikan koefisien torsi statis (Cts) pada seluruh variasi.	64
Tabel 4. 7 Kontur kecepatan dan tekanan pada kecepatan 6m/s untuk tanpa silinder dan variasi jarak Y/D 1,23 & 2,09	67

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik tak akan pernah bisa lepas dari kehidupan manusia. Sebagian besar manusia memerlukan energi listrik untuk pekerjaan, pendidikan, bahkan urusan rumah tangga. Seiring berjalannya waktu, populasi manusia semakin meningkat. Fenomena tersebut sangat berkaitan dengan kebutuhan energi listrik yang juga meningkat. Untuk saat ini sebagian besar listrik dihasilkan PLTU dari uap air yang menggerakkan turbin generator. Uap air tersebut dihasilkan dari air yang dipanaskan menggunakan bahan bakar batubara yang merupakan energi tidak bias terbarukan (*Non-Renewable Energy*). Oleh karena itu, cadangan batubara inilah yang menjadi persoalan energi listrik di Indonesia. Menurut Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) yang bersumber dari <https://www.esdm.go.id/>. Ridwan Djamaluddin mengatakan bahwa cadangan batubara Indonesia saat ini mencapai 38,84 miliar ton. Dengan rata-rata produksi batubara sebesar 600 juta ton per tahun, maka umur cadangan batubara masih 65 tahun apabila diasumsikan tidak ada temuan cadangan baru. Hal tersebut didapatkan dengan asumsi tidak memperhatikan laju pertumbuhan populasi.

Permasalahan energi listrik di Indonesia tidak hanya tentang batu bara melainkan dampak yang dihasilkan terhadap lingkungan. Penambangan batubara menyebabkan kerusakan tanah, air, dan udara yang tidak dapat diperbaiki. Menurut studi yang dilakukan greenpeace pada 2014 lalu, sepanjang 3000km atau 45% dari seluruh sungai di Kalimantan selatan berpotensi tercemar limbah pertambangan (Greenpeace Indonesia, 2016). Hal itu tentu saja akan mengganggu kehidupan dan Kesehatan masyarakat Kalimantan selatan terutama masyarakat disekitar pertambangan. Tak hanya populasi darat, menurut Badan Energi Internasional (IEA), batubara yang menjadi sumber utama energi listrik menyumbang 44% dari total emisi CO₂ global. Pembakaran batubara adalah sumber terbesar emisi gas GHG (*green house gas*), yang memicu perubahan iklim. Pembakaran batubara tersebut juga memancarkan polusi seperti NO_x dan SO₂. Kedua senyawa tersebut merupakan contributor utama dalam kasus hujan asam (Greenpeace Indonesia, 2016). Partikel-partikel polutan yang sangat berbahaya tersebut, saat ini mengakibatkan kematian dini sekitar 6.500 jiwa per tahun di Indonesia. Estimasi yang dilakukan Universitas Harvard dalam laporan Greenpeace Indonesia 2016, menunjukkan Penyebab utama dari kematian dini termasuk stroke (2.700), penyakit jantung iskemik (2.300), kanker paru-paru (300), penyakit paru obstruktif kronik (400), serta penyakit pernafasan dan kardiovaskular lainnya (800). Estimasi angka tersebut diperkirakan akan melonjak menjadi sekitar 15.700 jiwa/tahun seiring dengan rencana pembangunan PLTU Batubara baru (Greenpeace Indonesia, 2016).

Energi baru terbarukan adalah sumber energi ramah lingkungan yang tidak mencemati lingkungan dan tidak memberi kontribusi terhadap perubahan iklim dan pemanasan global, karena energi yang didapatkan berasal dari alam itu sendiri yang berkelanjutan, seperti sinar matahari, *biofuel*, air, angin, dan geothermal. Sangat berlawanan dengan energi fosil yang dijelaskan diparagraf sebelumnya, energi baru dan terbarukan memiliki sifat seperti namanya yang berarti energi tersebut selalu terbarukan dan tidak akan pernah habis. Indonesia sebagai negara kepulauan yang terletak di khatulistiwa memiliki potensi yang besar terhadap energi baru terbarukan. Salah satunya adalah angin yang memiliki potensi hingga kecepatan 8 m/s pada posisi onshore disepanjang pesisir selatan pulau jawa yang arah anginnya juga dapat dengan mudah diprediksi (**Kementrian ESDM, 2020**)

Besarnya potensi energi angin bisa dimanfaatkan dengan baik menggunakan turbin angin untuk memutar generator dan menghasilkan listrik. Dengan putaran yang tepat maka generator akan bekerja dengan baik pula. Namun berbeda dengan didaerah pesisir, untuk penggunaan di daerah perkotaan atau padat bangunan akan lebih sulit untuk memprediksi arah kecepatan angina, dengan adanya turbin angin sumbu vertical (*vertical axis wind turbine* atau VAWT) permasalahan arah angin tidak lagi menjadi hal yang perlu dikhawatirkan karena turbin tersebut bisa dengan mudah berputar walaupun arah angin tidak sebaik didaerah pesisir. Salah satu VAWT yang terbaik yaitu turbin angin Savonius karena memiliki kelebihan diantaranya; bisa digerakkan oleh arah angin yang bervariasi, kemampuan untuk beroperasi pada berbagai kondisi angin (tingkat turbulensi, kecepatan angin), tidak menghasilkan emisi, torsi awal yang tinggi, ukuran yang kecil, dan konstruksi yang murah (Sai & Rao, 2018). Namun turbin angin Savonius memiliki efisiensi yang paling rendah dibandingkan dengan turbin tipe yang lain. Oleh karena itu, banyak penelitian dilakukan untuk mengoptimalkan performa turbin angin Savonius dengan cara mengurangi *drag* pada *returning blade* maupun menambahkan *force* pada *advancing blade*.

Penelitian yang dilakukan oleh Mahmoud *et al.* (2012), ditujukan untuk menganalisa konfigurasi terbaik untuk turbin angin Savonius. Penelitian yang dilakukan dengan metode eksperimen ini memiliki 5 konfigurasi; yaitu, Jumlah sudu, jumlah *stage*, *overlap ratio*, *aspect ratio*, dan *endplate*. Penelitian dilakukan pada kecepatan 0 hingga 13m/s. Hasil akhir menunjukkan bahwa C_p tertinggi didapatkan ketika jumlah sudu turbin yang digunakan adalah 2 melainkan 3 dan 4. Konfigurasi 1 stage memiliki C_p yang lebih tinggi dibandingkan turbin dengan konfigurasi 2 stage. *Overlap* dan *aspect ratio* memiliki C_p tertinggi berturut turut dengan nilai 0 dan 5. Pemberian *endplate* pada turbin Savonius juga memiliki C_p yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang tidak menggunakan *endplate*.

Meningkatkan performa turbin Savonius tidak hanya bisa dilakukan dengan menurunkan *drag* pada *returning blade*, namun juga bisa dilakukan dengan meningkatkan *drag* pada *advancing blade*. Seperti yang dilakukan oleh Altan and Atilgan, (2010) yaitu menggunakan plat 1 untuk mendefeksikan aliran udara menuju *advancing blade* dan plat 2 untuk menutup *returning blade*. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan l_1 , l_2 , α , dan β . Dimana l_1 dan l_2 adalah Panjang dari plat 1 dan 2 secara berurutan sedangkan α dan β adalah besar sudut kemiringan dari plat 1 dan plat 2 secara berurutan. Dari 4 data tersebut dihasilkan 3 konfigurasi yang dinamakan curtain 1, curtain 2 dan curtain 3. Data hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi yang dilakukan telah berhasil meningkatkan performa dari turbin Savonius. Konfigurasi curtain 1 dengan l_1 dan l_2 45 cm dan 52 cm secara beurutan serta α dan β bernilai 45 dan 15 meningkatkan *coefficient of power* dari 0,18 menjadi 0,38.

Penelitian yang dilakukan oleh El-Askary *et al.* (2015) dilakukan secara numerik ini bertujuan untuk memperbesar torsi positif dengan cara mengumpulkan energi angin dan mengeluarkannya melalui belakang *returning blade*. Penelitian dilakukan menggunakan 3 desain yang memiliki geometri serupa. Ketiga Design dibandingkan secara numerik untuk mengetahui C_m dan C_m nya. Ketiga desain memiliki fenomena yang serupa dimana pada *advancing blade* terdapat *wind jet*, begitu pula pada *returning blade* yang disebabkan oleh *exit jet* yang telah diterapkan. Dari ketiga desain, Design III memiliki C_m dan C_p yang paling tinggi dengan C_p mencapai 0,52 dari turbin Savonius konvensional yang hanya sekitar 0,18.

Penelitian yang dilakukan oleh Sakti *et al.* (2019) ditujukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder tipe I-65 didepan *returning blade*. Penempatan tersebut ditujukan untuk mengurangi tekanan diantara silinder dengan sudu *returning*. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen dan numerik pada

angka Reynold sebesar 99.000 menggunakan variasi S/D dimana S adalah jarak poros turbin dengan poros silinder, sedangkan D adalah diameter sudu turbin. S/D yang digunakan memiliki nilai 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; dan 2,2. Kenaikan C_p terjadi pada S/D 1,4 hingga 1,8. Sedangkan pada S/D > 1,8 terjadi penurunan C_p . Kenaikan maksimal terjadi pada S/D = 1,4.

Penelitian yang dilakukan oleh Triyogi *et al.*, (2020) ditujukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder sirkuler didepan *returning blade*. Penempatan tersebut ditujukan untuk mengurangi tekanan diantara silinder dengan sudu *returning*. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen menggunakan variasi S/D dimana S adalah jarak poros turbin dengan poros silinder, sedangkan D adalah diameter sudu turbin. S/D yang digunakan memiliki nilai 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; dan 2,2. Kenaikan C_p terjadi pada S/D 1,4 hingga 1,8. Sedangkan pada S/D > 1,8 terjadi penurunan C_p . Kenaikan maksimal terjadi pada S/D = 1,4. Hal tersebut menandakan bahwa jarak silinder pengganggu yang terlalu jauh tidak akan berpengaruh atau bahkan malah menurunkan performa turbin angin

Hasil penelitian diatas menunjukkan bahwa banyak sekali cara yang dapat digunakan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan cara meningkatkan gaya *drag* pada *advancing blade* maupun menurunkan gaya *drag* pada *returning blade*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa turbin angin Savonius masih bisa dan perlu dikembangkan lagi untuk mencapai performa optimalnya. Oleh karena itu, kali ini dilakukan penelitian dengan metode numerik untuk meningkatkan performa turbin Savonius dengan cara menempatkan silinder sirkuler disamping *advancing blade* pada jarak yang bervariasi untuk meningkatkan gaya *drag* *advancing blade*. Penelitian dilakukan dengan variasi kecepatan untuk mengetahui bagaimana pengaruh masing-masing kecepatan terhadap posisi silinder sirkuler

1.2 Rumusan Masalah

Perbedaan nilai antara gaya *drag* pada *returning blade* dengan *advancing blade* menyebabkan putaran pada turbin Savonius. Selisih dari gaya *drag* antara *returning blade* dengan *advancing blade* adalah daya yang dihasilkan turbin Savonius atau dengan kata lain semakin besar selisih gaya *drag* tersebut, maka akan semakin besar daya yang dihasilkan. Dalam penelitian ini upaya peningkatan daya turbin dilakukan dengan meningkatkan gaya *drag* pada sudu *advancing* dengan cara memasang silinder sirkuler disamping sudu *advancing*. Adapun hipotesa dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemasangan silinder sirkuler disamping *advancing blade* dengan jarak yang optimal dapat menimbulkan *attached flow* pada sisi cembung *advancing blade* dan efek *nozzle*. Kedua fenomena tersebut meningkatkan kecepatan angin pada sisi *advancing blade*. Dengan begitu, gaya *drag* pada *advancing blade* dan torsi positif akan meningkat. Peningkatan tersebut berbanding lurus dengan kenaikan daya turbin angin Savonius. Namun pemasangan silinder sirkuler yang terlalu dekat bisa menimbulkan efek *blockage*, sedangkan apabila terlalu jauh silinder sirkuler tidak akan berpengaruh satu sama lain seperti dua buah objek yang berdiri sendiri.
2. Penelitian ini dilakukan dengan variasi kecepatan angin. Pada rentang tertentu kenaikan kecepatan angin sebanding dengan peningkatan C_p . Namun, kecepatan angin yang terlalu tinggi akan menyebabkan efek *blockage* dari silinder sirkuler terhadap turbin angin Savonius. Efek *blockage* terjadi karena putaran turbin yang terlalu cepat sehingga turbin angin Savonius akan diselimuti oleh angin yang menyebabkan turunnya torsi positif dan akan memperkecil nilai C_p .

Untuk membuktikan hipotesa diatas maka penelitian dilakukan penelitian dengan memasang silinder di samping *advancing blade* dengan rasio jarak poros turbin dengan pusat silinder terhadap diameter sudu turbin (Y/D) sebesar 1,23; 1,27; 1,32; 1,42; 1,51; 1,66; 1,80; 1,95; 2,09 dan perbandingan diameter silinder terhadap diameter sudu turbin (d/D) bernilai 0,5. Penelitian dilakukan dengan variasi kecepatan angin sebesar 4 & 6 m/s.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian tugas akhir adalah untuk mengetahui performa turbin Savonius akibat pengaruh pemasangan sebuah silinder yang diletakkan disamping sudu *advancing* dengan cara:

1. Menganalisa secara numerik koefisien momen dan koefisien daya dari turbin Savonius pada setiap variasi jarak Y/D .
2. Menganalisa pengaruh kecepatan angin terhadap performa turbin angin Savonius pada setiap variasi Y/D .
3. Menganalisa fenomena yang terjadi pada aliran.
4. Menganalisa torsi statis turbin angin Savonius pada setiap variasi jarak Y/D .

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini digunakan batasan masalah sebagai berikut.

1. Studi numerik dilakukan secara *unsteady* pada penampang dua dimensi.
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *steady flow, incompressible flow, dan uniform flow* pada *upstream*.
3. Analisa aliran adalah *external flow*.
4. Kecepatan aliran yang digunakan satu arah dari arah *inlet*.
5. Studi numerik mengabaikan analisa bahan yang dipakai.
6. Putaran turbin disimulasikan sebagai *rotating domain* yang telah diatur kecepatan putarnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini antara lain

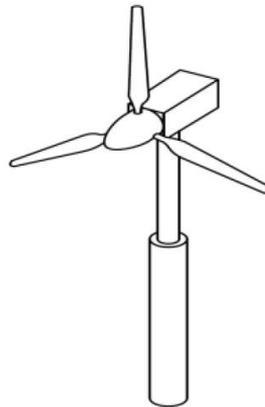
1. Memberikan data tambahan terkait *moment coefficient, power coefficient*, dan torsi statis untuk perancangan turbin angin Savonius.
2. Memberikan analisa fenomena aliran yang terjadi diantara turbin angin Savonius dengan silinder sirkuler.
3. Sebagai referensi tambahan untuk penelitian turbin Savonius selanjutnya.

BAB II DASAR TEORI

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah sebuah sistem yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik menjadi energi mekanik. Energi kinetik yang berasal dari angin digunakan untuk mendorong sudu turbin untuk menghasilkan putaran terhadap poros turbin tersebut. Energi mekanik berupa putaran tersebut dihubungkan dengan generator listrik, sehingga menghasilkan listrik.

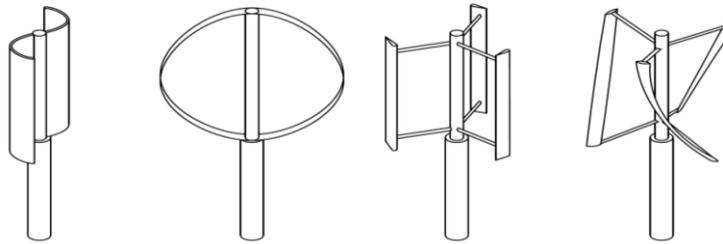
Berdasarkan arah sumbunya, turbin angin dibagi menjadi 2 kategori yaitu horizontal axis wind turbine (HAWT) dan vertical axis wind turbine (VAWT). HAWT adalah tipe turbin yang paling terkenal luas karena efisiensinya yang tinggi terutama pada aliran laminar dengan kecepatan tinggi (Zemamou et al., 2017). Turbin angin sumbu horizontal umumnya memiliki 3 buah sudu dan beroperasi dengan melawan arah angin (upwind) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. walaupun ada pula yang beroperasi searah dengan arah angin (downwind). HAWT memiliki efisiensi yang tinggi ketika beroperasi pada satu arah angin. Namun, HAWT memiliki beberapa kekurangan yaitu harus selalu diarahkan ke arah datangnya angin agar bisa beroperasi secara efisien. Untuk HAWT skala besar diperlukan yaw meter untuk memposisikan turbin ke arah yang tepat. yaw adalah komponen yang diperlukan untuk turbin angin sumbu horizontal dimana mekanisme yaw dapat menjaga rotor menghadap angin saat arah angin berubah. Karena keterbatasan tersebut, HAWT beroperasi dengan baik pada lingkungan yang memiliki turbulensi aliran yang rendah dan ruang yang besar. (Johari et al., 2018)



Gambar 2. 1 Turbin angin dengan sumbu horizontal (Casini, 2015)

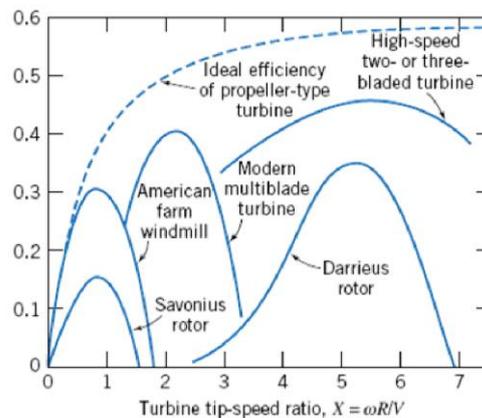
Horizontal axis wind turbine pada gambar 2.2 memiliki prinsip kerja dimana rotor berputar pada sumbu vertical. Tipe turbin ini akan menghasilkan drag atau gaya angkat atau kombinasi dari gaya drag dan gaya angkat. Pada umumnya VAWT dibagi menjadi 2 desain dimana masing masing beroperasi dengan prinsip kerja yang berbeda. Yang pertama adalah darrieus yang menggunakan sirip aerodinamik untuk menghasilkan gaya angkat dan menggerakkan turbin. Yang kedua yaitu Savonius yang menggunakan gaya drag untuk menggerakkan turbin. Meskipun VAWT tidak sebaik HAWT dalam segi performa, VAWT memiliki keunggulan yang tidak dimiliki HAWT yaitu dapat beroperasi dengan arah angin yang tidak menentu, dengan keunggulan tersebut VAWT merupakan pilihan terbaik untuk

digunakan pada daerah perkotaan. VAWT dapat beroperasi dengan baik pada aliran turbulen dan kecepatan angin yang rendah (Johari et al., 2018)



Gambar 2. 2 Turbin angin dengan sumbu vertical (VAWT) (Casini, 2015)

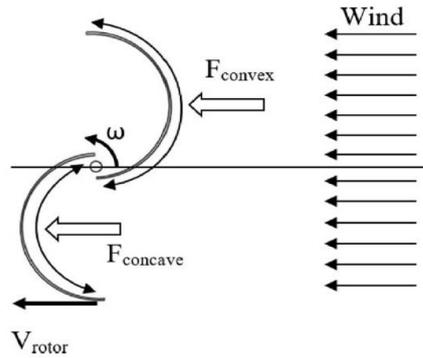
Gambar 2.3 merupakan perbandingan power coefficient terhadap λ pada beberapa turbin angin



Gambar 2. 3 Perbandingan efisiensi berbagai macam turbin angin (Libii, 2013)

2.2 Turbin Angin Savonius

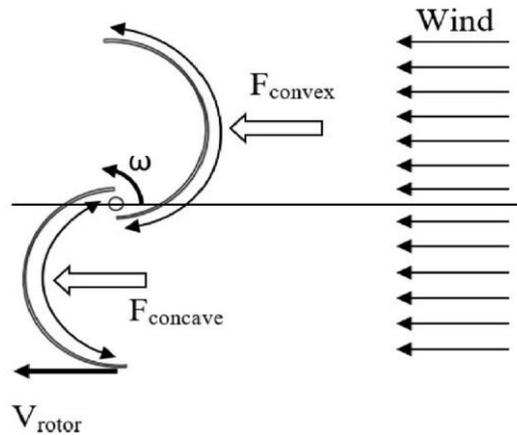
Turbin angin Savonius ditemukan oleh engineer asal Finlandia Bernama Sigurd Johannes Savonius pada tahun 1922 dan dipatenkan pada tahun 1926 (Solari, Giovanni 2019). Turbin Savonius merupakan salah satu contoh dari VAWT yang paling sederhana. Secara aerodinamis, turbin ini adalah turbin tipe drag, karena putarannya yang disebabkan oleh gaya drag. Jika dilihat dari atas, turbin tersebut terlihat menyerupai huruf S seperti pada gambar 2.4. Karena lengkungan tersebut, maka sudu advancing akan selalu menghasilkan drag yang lebih besar dari pada sudu returning. Selisih gaya drag inilah yang menyebabkan turbin Savonius berputar. Semakin besar selisih yang dihasilkan, maka putaran turbin yang dihasilkan akan lebih cepat (Science Daily, 2016)



Gambar 2. 4 Turbin angin Savonius tampak atas (Pranta et al., 2021)

Untuk saat ini penggunaan turbin angin Savonius tidak sebanyak turbin turbin lainnya, ini disebabkan oleh efisiensi yang rendah karena gaya drag yang dihasilkan pada sudu returning. Turbin ini memiliki coefficient puncak pada tip speed ratio yang relative kecil yaitu 1 atau dibawahnya. Hal tersebut yang menyebabkan power yang dihasilkan tidak sebesar turbin lainnya.

2.3 Drag



Gambar 2. 5 Gaya drag pada turbin angin Savonius (Pranta et al., 2021)

Turbin angin memanfaatkan gaya aerodinamis yang timbul ketika angin bertiup pada sudu turbin, dan bilah bergerak relatif terhadap angin. Setiap benda yang dikenai aliran fluida akan mengalami gaya dan momen (gaya putar). Gaya dan momen bergantung pada bentuk benda dan rotasinya. Gaya yang sejajar dengan arah aliran angin disebut gaya drag (hambatan udara). Drag adalah kerugian yang disebabkan oleh gerakan benda ketika memasuki atau melalui fluida seperti udara maupun air. Gaya drag diberi tanda positif apabila searah dengan arah gerak benda. Gaya drag pada turbin angin Savonius ditunjukkan oleh gambar 2.5, dimana F_{convex} adalah gaya drag negative yang menyebabkan adanya torsi negative dan $F_{concave}$ merupakan gaya drag positif yang menghasilkan torsi positif.

Gaya drag bergantung luas area, massa jenis atau densitas fluida, drag coefficient, kecepatan relative, bentuk, dan faktor lain yang berhubungan dengan geometri dan jenis aliran. Gaya drag bisa diketahui dengan persamaan

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

Dimana

F_D = gaya drag (N)

C_D = drag coefficient

A = luas permukaan benda (m^2)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

V = kecepatan relative (m/s)

Tabel 2. 1 Drag coefficient untuk berbagai geometri 2 dimensi (Aziz et al., 2008)

Type of body	Reference area S ($b = \text{length}$)	Reynolds number Re	Drag coefficient C_D	
Square rod		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 2.00$
		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.50$
Semicircular shell		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.20$ $\leftarrow 2.30$
Semicircular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.15$ $\leftarrow 2.15$
Equilateral triangle cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.40$ $\leftarrow 2.10$
Flat plate		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.90$
T-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.80$ $\leftarrow 1.65$
I-beam		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 2.05$
Hexagon		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 1.00$
		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 0.70$
Circular cylinder		$S = b D$	$Re > 10^4$	$\rightarrow 0.51$

Drag coefficient adalah bilangan tak berdimensi yang menyatakan hambatan dari benda yang dilewati fluida. Nilai drag coefficient tergantung pada geometri benda dan angka Reynolds fluida. Tabel 2.1 menunjukkan nilai drag coefficient dari beberapa geometri 2D dan angka Reynolds nya.

2.4 Tip Speed Ratio (λ)

Hubungan antara kecepatan angin dan rotasi dari rotor didefinisikan dengan bilangan tanpa dimensi yang disebut tip speed ratio atau λ . Tip speed ratio pada penelitian ini adalah

rasio antara kecepatan angin dengan kecepatan tangensial ujung dari sudu turbin. Tip speed ratio berhubungan dengan efisiensi turbin. Semakin tinggi momen yang dihasilkan pada λ tertentu, maka semakin tinggi pula efisiensi yang dihasilkan. Tip speed ratio memiliki persamaan sebagai berikut

$$TSR = \frac{\omega \cdot L}{2 \cdot U} \quad (2.2)$$

Dimana

- λ = Tip Speed Ratio
- ω = kecepatan angular (rad/s)
- L = panjang karakteristik turbin (m)
- U = kecepatan angin (m/s)

2.5 Coefficient of Moment (C_m)

Coefficient of Moment (C_m) merupakan bilangan tak berdimensi yang berasal dari perbandingan antar nilai torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin dengan nilai torsi teoritis. Nilai C_m didapatkan melalui persamaan dibawah ini

$$T = Fr \quad (2.3)$$

Dimana F adalah gaya yang bekerja pada poros dan r adalah jari jari turbin. Untuk menentukan koefisien momen pada setiap sudu, digunakan luas penampang turbin tampak depan dengan persamaan dibawah

$$A = L \cdot H \quad (2.4)$$

Dimana A adalah luas area, H adalah tinggi tubin angin Savonius dan L adalah lebar sudu turbin. Dengan nilai A yang telah diketahui, C_m bisa didapatkan dengan persamaan berikut

$$C_m = \frac{4T}{\rho A L U^2} \quad (2.5)$$

Dimana

- T = torsi teoritis (N.m)
- ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)
- D = panjang karakteristik turbin (m)
- U = kecepatan angin (m/s)

2.6 Coefficient of Power (C_p)

Koefisien daya (C_p) merupakan bilangan tak berdimensi yang menunjukkan kemampuan turbin dalam mengkonversi energi angin menjadi energi listrik. C_p didapatkan melalui persamaan persamaan dibawah ini.

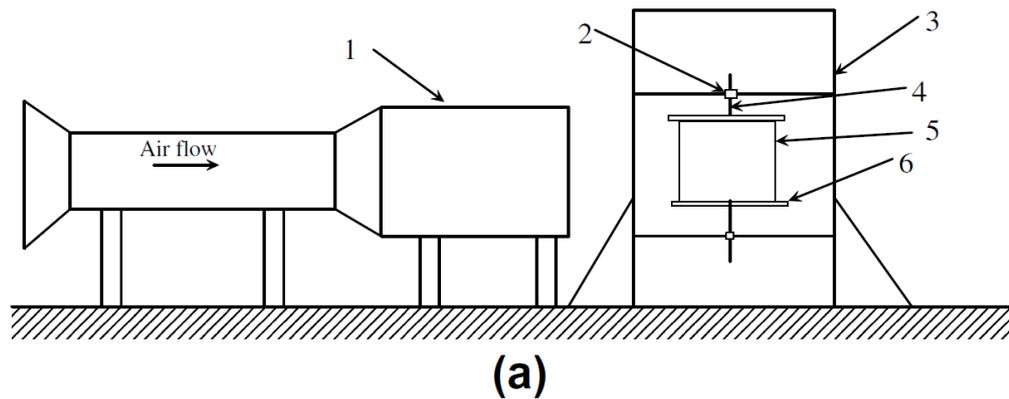
$$C_p = \frac{T\omega}{0,5\rho A U^3} = TSR \cdot C_m \quad (2.6)$$

2.7 Penelitian Terdahulu

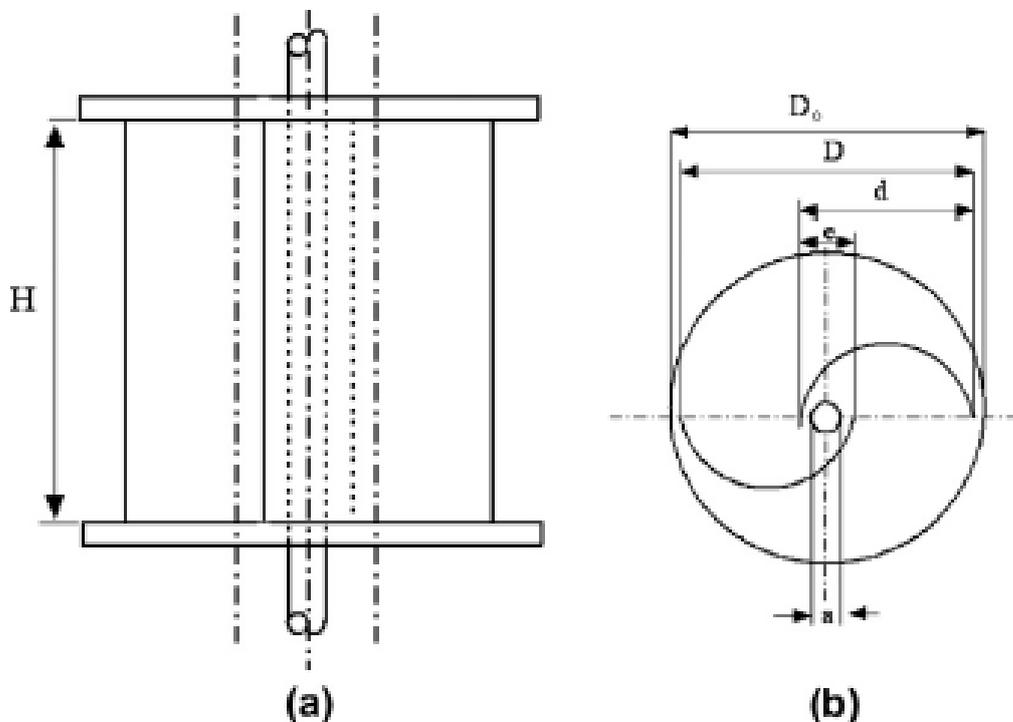
2.7.1 An experimental study on improvement of Savonius rotor performance

(Mahmoud et al., 2012)

Penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan melakukan variasi pada geometri turbin angin dilakukan oleh Mahmoud et al (2010). Variasi geometri yang digunakan adalah jumlah blade, yakni dua blade (2b), tiga blade (3b), empat blade (4b); jumlah stage turbin yakni satu stage dan dua stage; overlap ratio (β) sebesar 0; 0.2; 0,25; 0,3; dan 0,35, dan aspect ratio (α) sebesar 0,5, 1, 2, 4 dan 5 dengan ada dan tidak adanya end plate pada turbin angin Savonius.

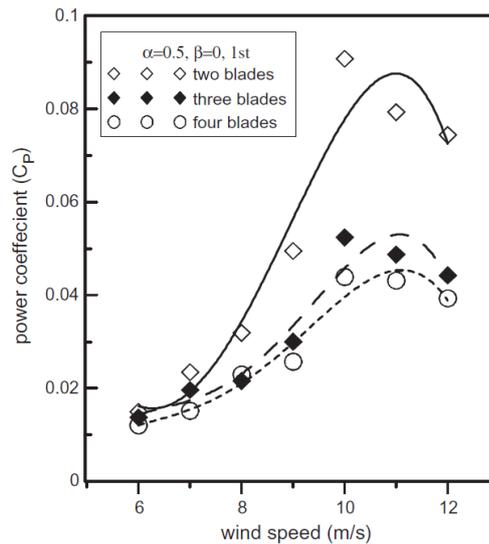


Gambar 2. 6 (a) Skema eksperimen dengan keterangan; 1 – wind tunnel, 2 – bearing, 3 – steel housing, 4 – steel shaft, 5 – blade dan 6 – end plate (Mahmoud et al., 2012)

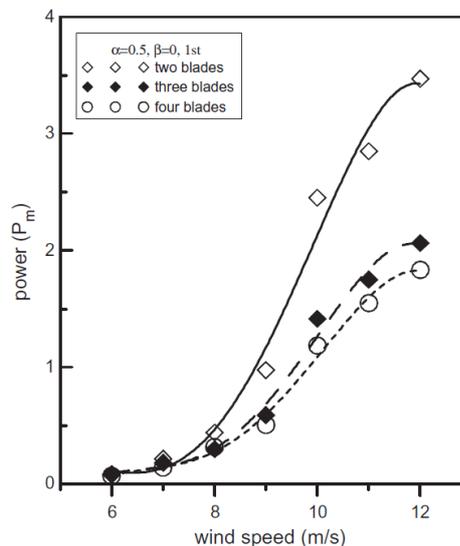


Gambar 2. 7 Skema Geometri Turbin Angin Savonius dengan Single Stage; (a) Tampak Samping dan (b) Tampak Atas. (Mahmoud et al., 2012)

Penelitian ini dilakukan di wind tunnel yang memiliki diameter sebesar 49 cm dengan jarak antara keluaran wind tunnel dengan sampai turbin Savonius sebesar 125 cm serta dilakukan variasi kecepatan angin dari 0-13 m/s pada sisi keluaran dari wind tunnel. Material yang digunakan untuk blade terbuat dari bahan pipa PVC dengan ukuran diameter yang bervariasi, yaitu 0,3;0,2;0,1; dan 0,08 m. Plat kayu dengan ketebalan 2,5 mm digunakan untuk membuat end plate. End plate tersebut memiliki diameter yang lebih besar 10% dari diameter turbin. Poros turbin memiliki ukuran sebesar 14 mm dengan 62 cm yang terbuat dari bahan baja. Skema geomteri turbin Savonius pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.6 dan 2.7.



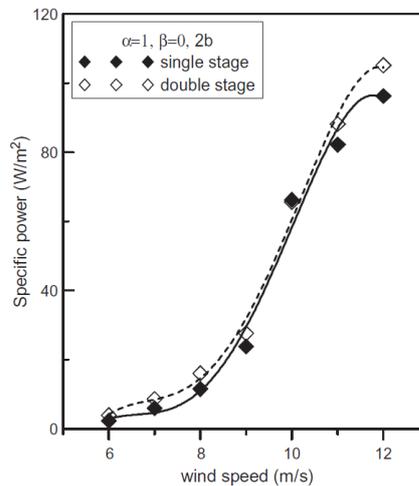
Gambar 2. 8 Grafik Hubungan antara Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Dua, Tiga, dan Empat Sudu. (Mahmoud et al., 2012)



Gambar 2. 9 Grafik Pengaruh Jumlah Blade terhadap Daya Aktual Turbin Angin Savonius. (Mahmoud et al., 2012)

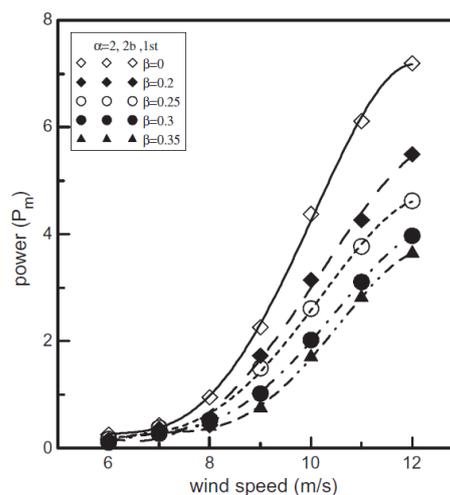
Pengaruh jumlah blade terhadap performa turbin angin Savonius dapat diketahui melalui penelitian ini. Gambar 2.8 diatas merupakan grafik hubungan antara Coefficient of Power terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan aspect ratio 0,5; overlap

ratio 0; dan single stage. Melalui gambar 2.8 dapat diketahui bahwa nilai Coefficient of Power turbin dengan dua blade lebih tinggi daripada turbin dengan tiga atau empat blade. Ini disebabkan karena pada turbin dengan dua blade memiliki selisih gaya drag yang lebih besar dibandingkan turbin dengan tiga atau empat blade. Jumlah blade pada turbin angin Savonius juga berpengaruh terhadap daya aktual yang dihasilkan oleh turbin, seperti yang dapat dilihat pada gambar 2.9



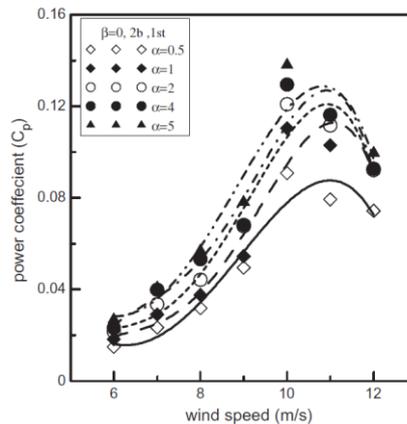
Gambar 2. 10 Grafik Hubungan Spesific Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan SatuStage dan Dua Stage. (Mahmoud et al., 2012)

Performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi oleh jumlah stage yang ada. Pada penelitian ini jumlah stage yang digunakan ada dua, yakni satu stage dan dua stage. Melalui grafik hubungan antara specific Power terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius satu stage dan dua stage dengan aspect ratio 0,5; overlap ratio 0; dan menggunakan turbin dengan dua blade (2b) diperoleh bahwa turbin dengan dua stage memiliki nilai specific Power yang lebih tinggi daripada turbin dengan satu stage, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.



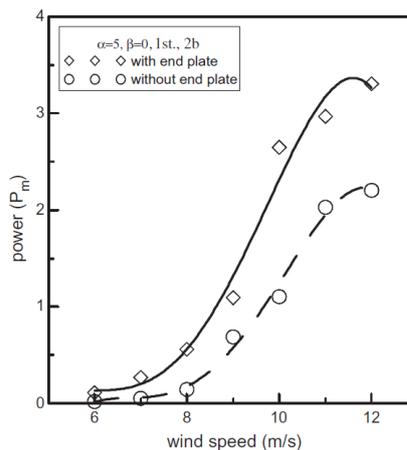
Gambar 2. 11 Grafik Hubungan Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Overlap Ratio. (Mahmoud et al., 2012)

Gambar 2.11 diatas merupakan grafik hubungan Power terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan menggunakan aspect ratio 2 dengan menggunakan dua blade; satu stage dan dilakukan variasi pada nilai overlap ratio dari nilai 0 hingga 0,35. Melalui gambar 2.15 dapat dilihat bahwa overlap ratio (β) juga berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Dimana turbin dengan overlap ratio 0 memiliki nilai Power yang lebih tinggi daripada turbin dengan overlap ratio 0,2;0,25;0,3; dan 0,35.



Gambar 2. 12 Grafik Hubungan Coefficient of Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan Variasi Aspect Ratio. (Mahmoud et al., 2012)

Pada penelitian ini juga diperoleh bagaimana pengaruh aspect ratio terhadap performa turbin angin Savonius. Seperti yang bisa dilihat pada gambar 2.12. Gambar 2.12 merupakan grafik hubungan antara Coefficient of Power terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan overlap ratio 0; dengan menggunakan turbin dua blade; satu stage dan dilakukan variasi pada nilai aspect ratio dari nilai 0,5 sampai 5. Hasil yang diperoleh dari grafik tersebut adalah nilai Coefficient of Power semakin naik dengan seiring naiknya nilai aspect ratio, dimana pada aspect ratio 5 memiliki Coefficient of Power yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya.



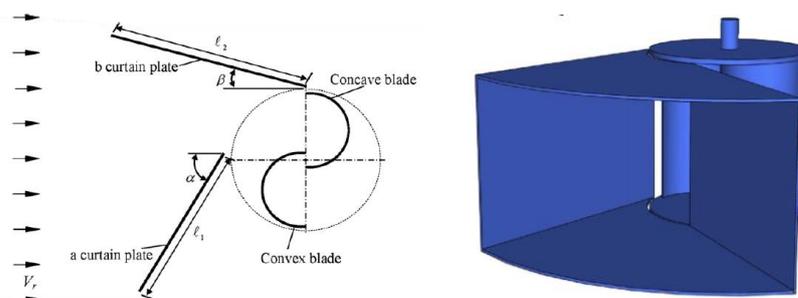
Gambar 2. 13 Grafik Hubungan antara Power terhadap Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius dengan End Plate dan Without End Plate. (Mahmoud et al., 2012)

Selain itu performa turbin angin Savonius juga dipengaruhi dengan keberadaan end plate. Hasil yang didapat pada penelitian ini bahwa turbin angin Savonius dengan adanya end plate memiliki Power yang lebih tinggi daripada turbin tanpa menggunakan end plate. Grafik

hubungan antara Power terhadap kecepatan angin pada turbin angin Savonius dengan penggunaan end plate atau tidak dapat dilihat pada gambar 2.13. Sehingga hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa turbin angin Savonius dengan dua blade lebih efisien daripada dengan menggunakan tiga atau empat blade. Turbin dengan menggunakan dua stage memiliki nilai specific Power yang lebih tinggi daripada satu stage. Dengan overlap ratio 0, turbin angin Savonius memiliki nilai Power yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan overlap ratio (β). Nilai dari Coefficient of Power juga akan meningkat dengan seiring kenaikan dari aspect ratio (α). Kemudian, penggunaan end plate pada turbin angin Savonius akan membuat efisiensi menjadi lebih tinggi dibandingkan tanpa menggunakan end plate.

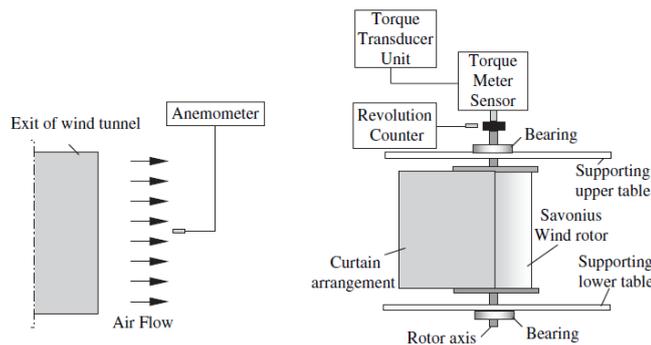
2.7.2 The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors (Altan & Atilgan, 2010)

Penelitian secara eksperimen dan numerik ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius menggunakan desain tertentu. Desain yang dimaksud adalah menempatkan sebuah alat yang menyerupai Lorong. Sebagai bentuk simplifikasi untuk studi numerik, maka alat tersebut akan, apabila dilihat dari atas alat tersebut akan tampak seperti dua buah plat datar seperti gambar 2.14 dibawah



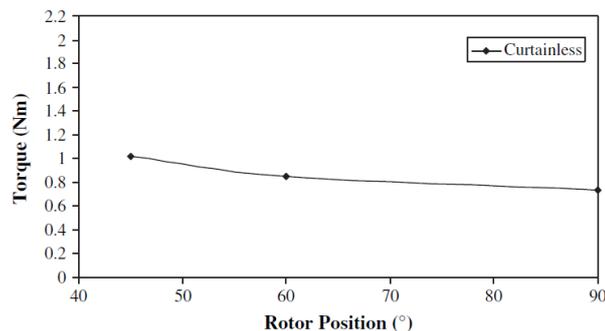
Gambar 2. 14 Geometri dan susunan Design curtain (Altan & Atilgan, 2010)

Untuk meningkatkan performa Savonius, digunakan beberapa konfigurasi yang diberi nama curtain 1, curtain 2 dan curtain 3. Dimana curtain 1 memiliki panjang optimal. Panjang curtain 2 dan 3 berturut-turut adalah 75% dan 50% dari panjang optimal. Setiap susunan curtain terbuat dari pelat baja dengan tinggi 32 cm dan tebal 2 mm. ℓ_1 dan ℓ_2 adalah 45 cm dan 52 cm untuk curtain 1, 34 cm dan 39 cm untuk curtain 2, 22 cm dan 26 cm untuk curtain 3. Curtain telah dirancang dengan pelat bawah dan atas yang stabil dan pelat samping dapat disesuaikan dengan sudut yang diinginkan. Pengaturan curtain telah dirancang sedemikian rupa untuk berputar 360° di sekitar rotor melalui sensor agar tidak menghilangkan kemampuan rotor angin Savonius untuk menerima angin dari segala arah.



Gambar 2. 15 Skema pengaturan eksperimen (Altan & Atilgan, 2010)

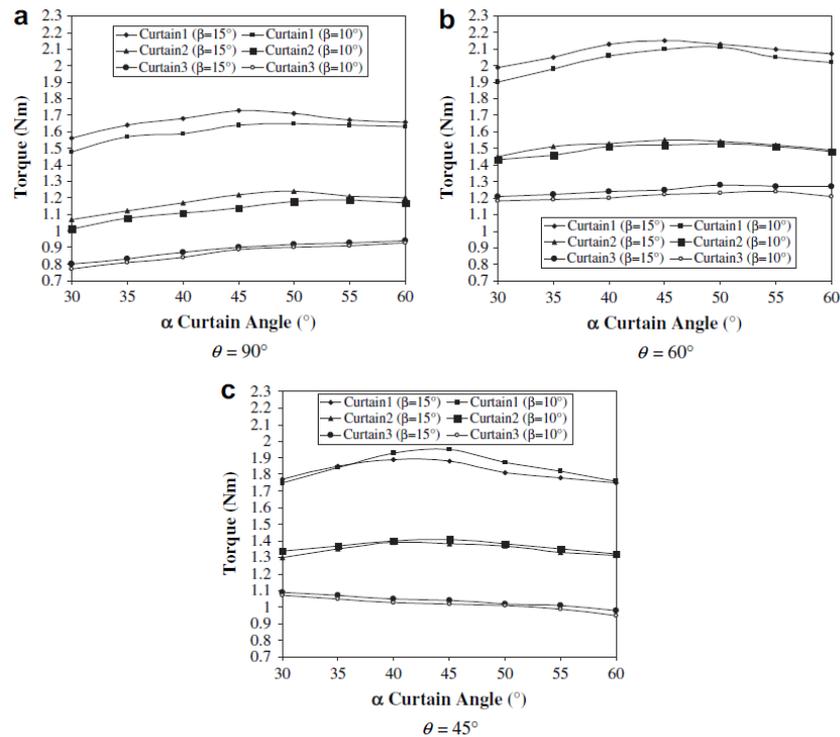
Skema eksperimen dilakukan sesuai dengan gambar 2.15 . Peralatan yang dibutuhkan adalah wind tunnel, Savonius rotor, pengaturan curtain, digital torque meter anemometer dan tachometer. Untuk menghasilkan aliran yang uniform, rotor diletakkan 5 meter didepan pintu keluar wind tunnel. Anemometer diletakkan tepat didepan wind tunnel untuk mengukur besarnya kecepatan angin. Pada awalnya kecepatan angin yang digunakan bervariasi dari 10-13 m/s, namun terlihat mustahil untuk meningkatkan performa Savonius. Hal tersebut diakibatkan karena curtain bersifat menjadi blockage atau penghalang pada kecepatan tersebut. Oleh karena itu digunakan kecepatan yang lebih rendah yakni 7 m/s dengan angka Reynolds $1,5 \times 10^5$



Gambar 2. 16 Torsi statis pada rotor tanpa curtain ketika rotor pada posisi θ (Altan & Atilgan, 2010)

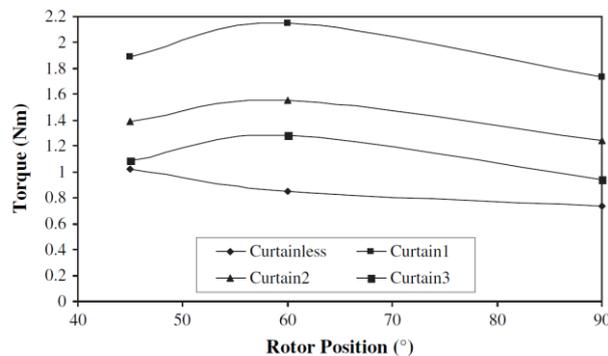
Penelitian dimulai dengan turbin Savonius tanpa curtain untuk mengetahui torsi statisnya pada sudut awal 45° , 60° dan 90° . Torsi statis paling tinggi terdapat pada sudut awal 45° seperti yang digambarkan pada gambar 2.16

Selanjutnya, beberapa persiapan percobaan telah dilakukan untuk menentukan sudut curtain pada percobaan yang akan dilakukan dengan menyusun curtain di depan turbin angin Savonius. Sudut α dibawah 30° ($\alpha < 30^\circ$) memberi torsi negative yang lebih besar. Penyusunan dilakukan lagi dan ditemukan bahwa torsi negatif meningkat pula pada sudut α diatas 60° ($\alpha > 60^\circ$). Lalu optimasi dilakukan dengan menaikkan sudut per 5° . Begitu pula dilakukan dengan sudut β yang ditemukan bahwa nilai optimal berada di sekitar 10° dan 15° .

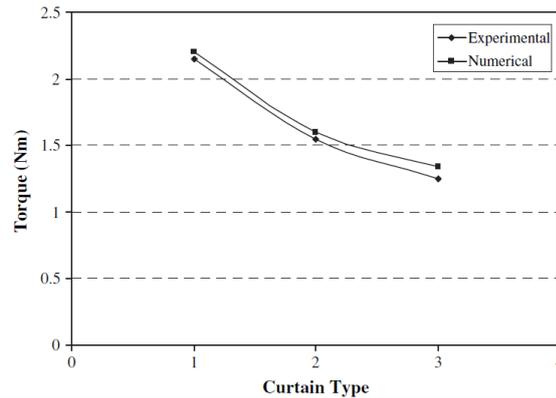


Gambar 2. 17 Perubahan torsi statis dari sudut curtain α terhadap sudut curtain $\beta = 10^\circ$ dan 15° ketika posisi rotor $\theta = 90^\circ$ 60° dan 45° (Altan & Atilgan, 2010)

Setelah range sudut curtain ditemukan dari proses sebelumnya, hasil eksperimen dibuat dalam 3 posisi rotor seperti gambar 2.17. Grafik a menunjukkan bahwa torsi terbesar dihasilkan pada curtain 1 dengan sudut $\beta = 15^\circ$ dan ketika sudut $\alpha = 45^\circ$. Grafik b menunjukkan hal yang dengan grafik a. Namun berbeda dengan grafik c yang memiliki torsi statis tertinggi pada sudut $\beta = 45^\circ$. Dari ketiga grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa sudut curtain yang terbaik adalah $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$

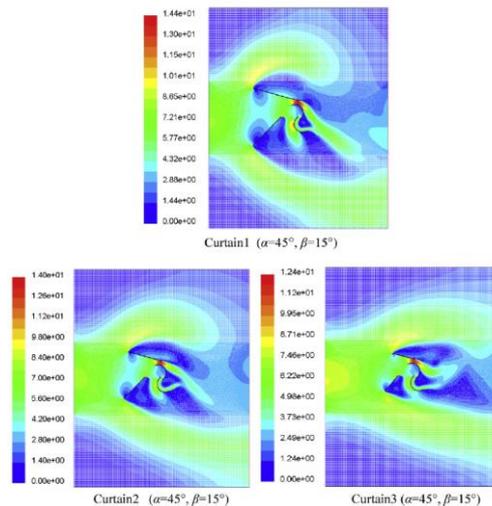


Gambar 2. 18 Perbandingan torsi statis maksimal dengan dan tanpa curtain ketika posisi rotor $\theta = 45^\circ$ 60° dan 90° (Altan & Atilgan, 2010)



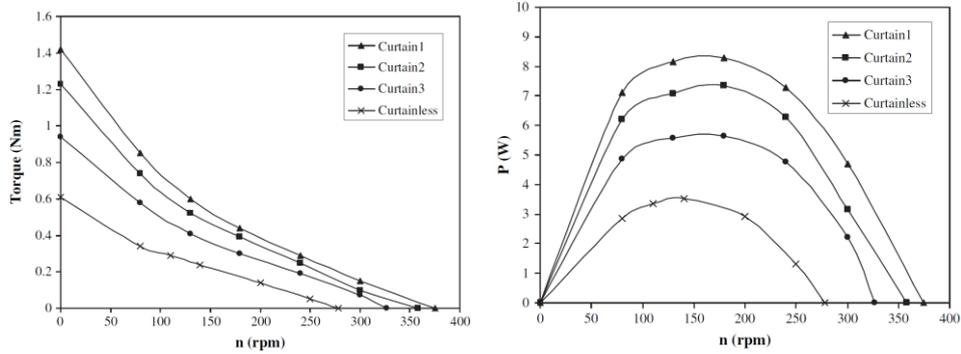
Gambar 2. 19 Torsi statis yang didapatkan dari studi eksperimen dan numerik pada posisi rotor $\theta = 60^\circ$ dan curtain angle $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Altan & Atilgan, 2010)

Dari percobaan diatas didapatkan torsi statis maksimal dari eksperimen pada posisi rotor Savonius yang berbeda. Berdasarkan grafik 2.18. Torsi statis maksimal pada Savonius tanpa curtain terjadi di posisi 45° , sedangkan curtain 1, 2, dan 3 memiliki torsi statis maksimal pada posisi sudut 60° . Gambar 2.19 merupakan perbandingan torsi antara data eksperimen dan numerical pada ketiga curtain. Curtain 1 memiliki nilai tertinggi dibandingkan curtain 2 dan curtain 3



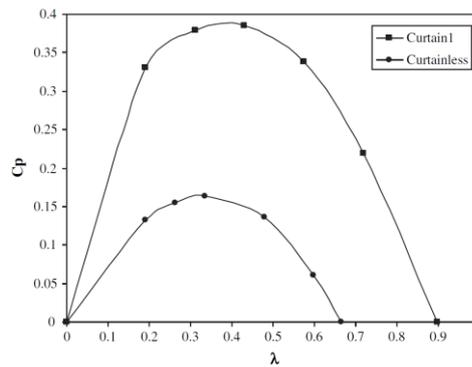
Gambar 2. 20 Distribusi kecepatan maksimal ketika rotor berada pada posisi $\theta = 60^\circ$ (Altan & Atilgan, 2010)

Studi numerik dengan fluent 6.0 dilakukan pada setiap curtain untuk mendukung data eksperimen. Karena torsi terbesar terletak pada sudut 60° pada sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ untuk curtain 1 dan 2, maka Analisa numerik dilakukan untuk semua curtain pada sudut 60° . Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.20 terdapat sebuah efek nozzle pada *advancing blade*. Efek nozzle tersebut yang meningkatkan torsi positif. Dari ketiga curtain, curtain 1 memiliki pengaruh yang besar pada kenaikan torsi statis. Dari gambar 2.18 bisa dilihat bahwa kenaikan torsi mencapai 100% pada sudut rotor 60°



Gambar 2. 21 Perbandingan torsi dan power pada rotor dengan dan tanpa curtain (Altan & Atilgan, 2010)

Pada posisi rotor bergerak, eksperimen dilakukan tanpa curtain dan dengan curtain. Hasilnya, rotor dengan curtain memiliki torsi dan power yang meningkat secara signifikan dibandingkan rotor tanpa curtain. Curtain 1 memiliki torsi dan power yang paling tinggi diikuti curtain 2 dan curtain 3 secara berurutan. Hasilnya ditunjukkan oleh gambar 2.21. Torsi tertinggi dihasilkan oleh curtain 1 dengan nilai 1,4 N.m sedangkan power tertinggi dihasilkan oleh curtain 1 dengan nilai sekitar 8 Watt



Gambar 2. 22 Perbandingan koefisien power dengan dan tanpa curain (Altan & Atilgan, 2010)

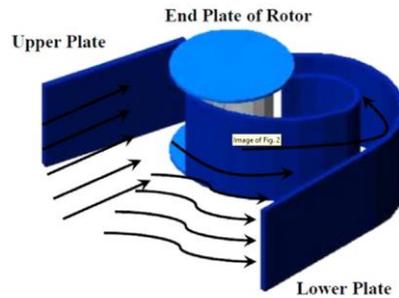
Studi numerik dilakukan untuk curtain 1 dengan sudut $\alpha = 45$ dan $\beta = 15$. Gambar 2.22 menunjukkan kenaikan yang signifikan dari rotor tanpa curtain dan dengan curtain 1. Kenaikan performa mencapai lebih dari 100%.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa torsi statis tertinggi dihasilkan pada sudut rotor 60 dengan sudut curtain adalah $\alpha=45$ dan $\beta=10$. Dari ketiga tipe curtain yang menghasilkan power tertinggi adalah curtain terpanjang pada penelitian ini yaitu curtain 1 pada sudut curtain yang sama.

2.7.3 Harvesting Wind Energy for Improving Performance of Savonius Rotor (El-Askary et al., 2015)

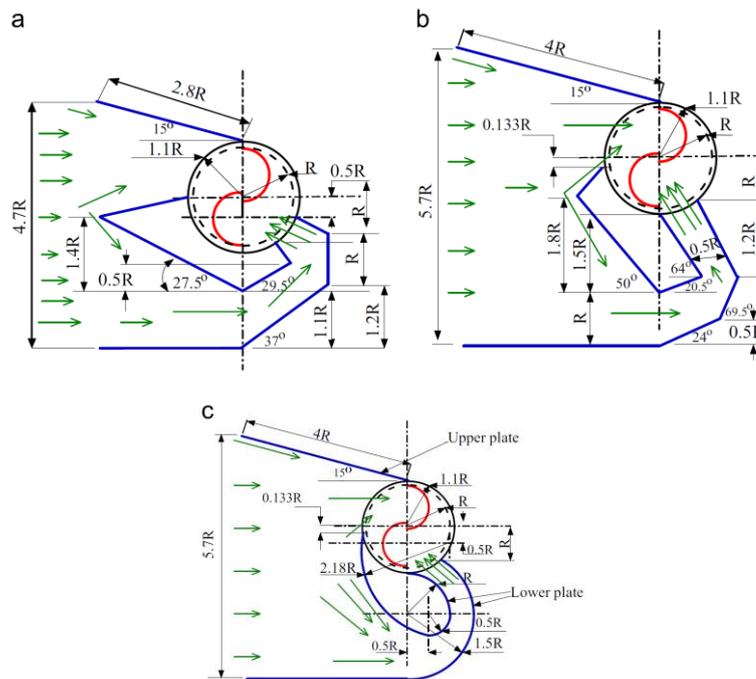
Penelitian yang dilakukan oleh (El-Askary et al., 2015) ini dilakukan dengan metode numerik, bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara mengarahkan aliran angin dengan sebuah tirai/curtain. Software yang digunakan adalah fluent 6.3.26 dengan permodelan k omega SST. Sebelumnya peneliti sudah mempelajari berbagai permodelan yang digunakan dalam studi numerik ini, diantaranya adalah standard k epsilon, RNG k-epsilon, realizable k-epsilon, dan SST k- ω . Studi tersebut menunjukkan bahwa SST k-

ω adalah permodelan yang terbaik untuk turbin Savonius. Studi tersebut juga menyimpulkan bahwa overlap ratio terbaik adalah 0,15



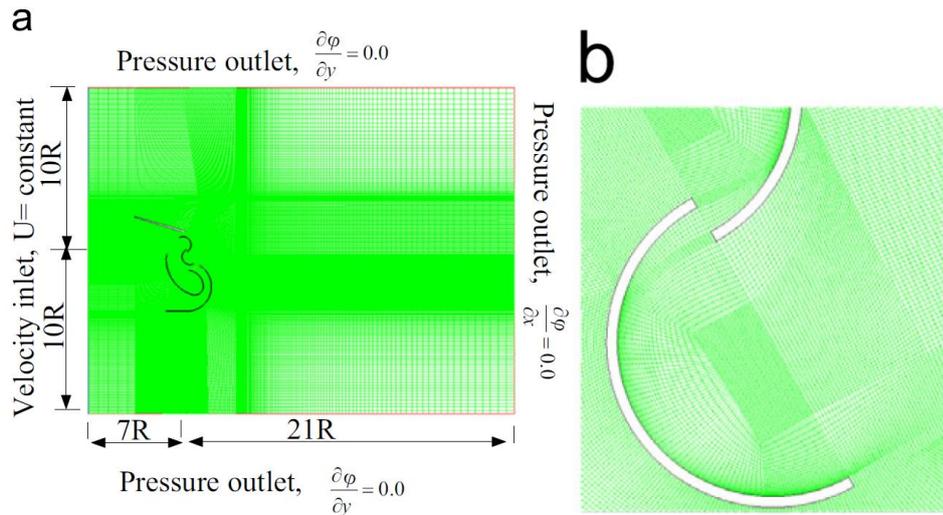
Gambar 2. 23 Desain 3D dari alat pengumpul angin (El-Askary et al., 2015)

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengurangi torsi negative yang dihasilkan pada *returning blade* untuk meningkatkan performa turbin. Digunakan desain curtain seperti gambar 2.23 untuk mengurangi drag tersebut. Desain curtain dibagi menjadi tiga dan dinamai Design I, Design II, dan Design III seperti pada gambar 2.24



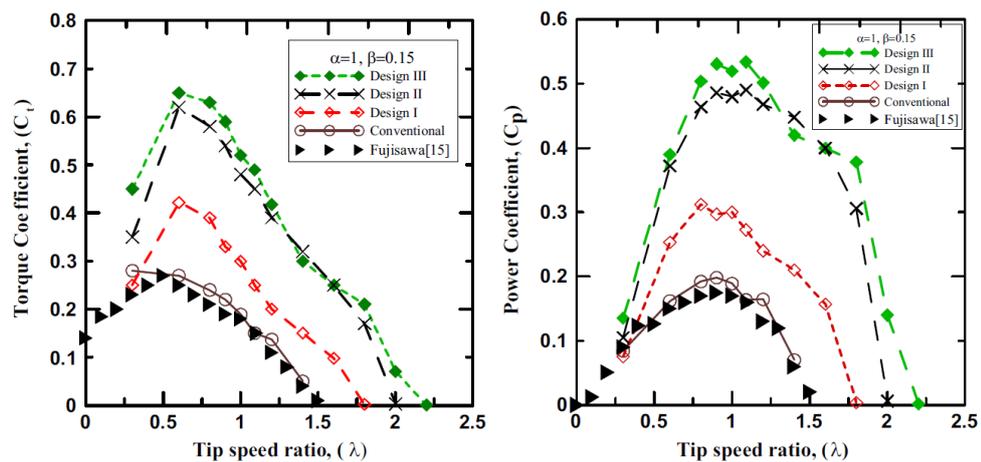
Gambar 2. 24 Tiga desain yang berbeda untuk mengontrol arah angin (a) Design I, (b) Design II, (c) Design III (El-Askary et al., 2015)

Desain diatas memiliki kesamaan yaitu terdapat upper plate dengan sudut 15. Hal ini diterapkan karena upper plate 15 sudah terbukti mampu meningkatkan performa Savonius wind turbine (Altan, 2010). Pada Design I panjang dari upper plate adalah 2,8R. Panjang tersebut bisa mencapai 4R pada Design II dan III untuk memberikan developing length yang cukup. Upper plate juga digunakan untuk mengambil aliran angin yang lebih banyak. Setiap design memiliki tempat keluarnya fluida yang dinamakan exit-jet. Namun pemempatan exit jet berbeda untuk Design I. Perbedaan posisi ini ditujukan untuk mencegah terjadinya torsi negative pada *returning blade*. Studi ini dilakukan pada Reynolds number 141500



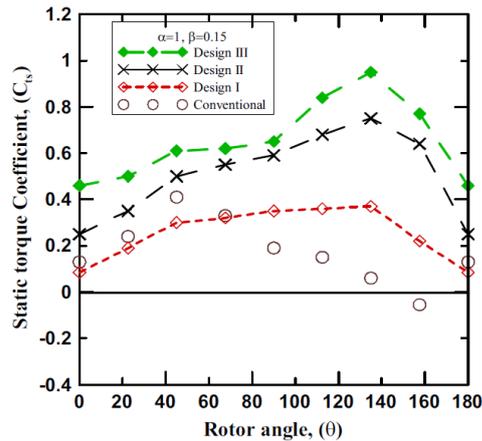
Gambar 2. 25 (a) Boundari condition simulasi, (b) grid didekat dinding Savonius (El-Askary et al., 2015)

Meshing dilakukan dengan software ANSYS Gambit 2.3.16 dan difokuskan pada blade Savonius seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.25. Structure grid diterapkan dengan jumlah sel 273.000. No slip wall diterapkan pada blade Savonius



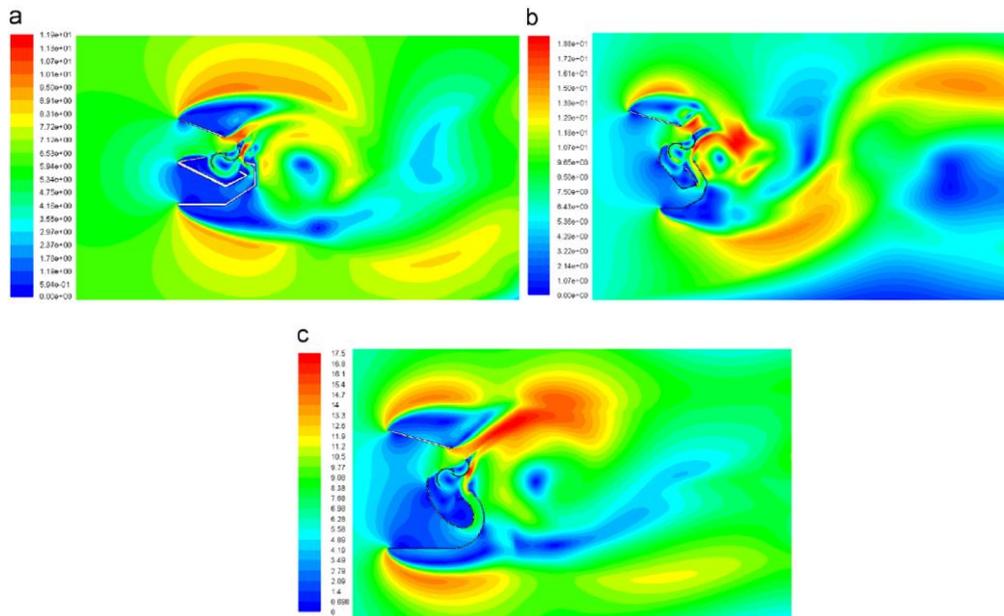
Gambar 2. 26 Variasi dari koefisien torsi dan koefisien daya pada λ yang berbeda (El-Askary et al., 2015)

Output data didapatkan dan untuk membuktikan valid atau tidaknya data, digunakan data milik Fujisawa(1992) seperti yang ditunjukkan gambar 2.26. Pada grafik tersebut membuktikan bahwa model SST k- ω cocok digunakan pada simulasi ini. Grafik menunjukkan secara jelas bahwa conventional turbin memiliki kesamaan dengan data milik Fujisawa. Hasil tertinggi ditunjukkan oleh Design III yang mencapai $c_p=0,52$ pada λ 1,1.



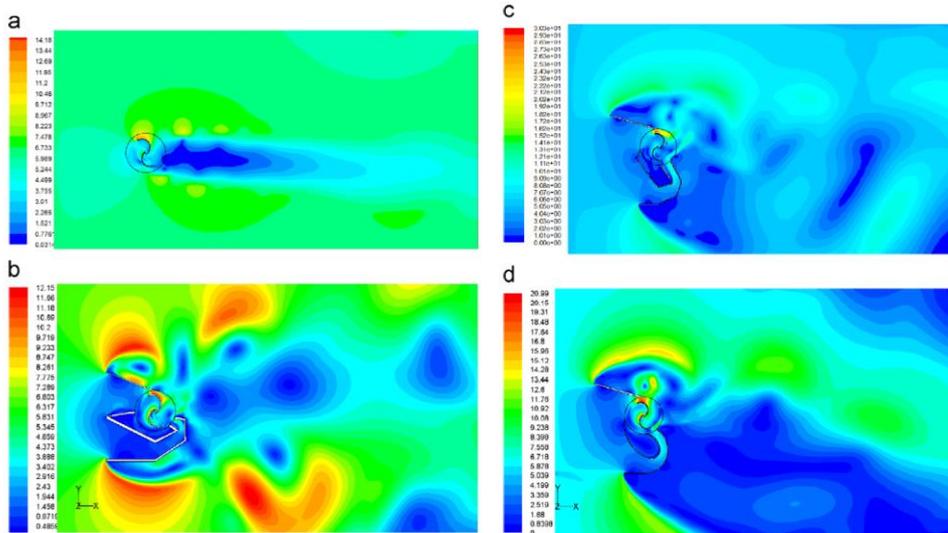
Gambar 2. 27 Variasi torsi statis terhadap sudut rotor (El-Askary et al., 2015)

Gambar 2.27 menunjukkan variasi torsi statis dari semua desain dan turbin Savonius konvensional. Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa tidak ada torsi negative dari semua Design. Untuk ketiga Design, koefisien torsi statis meningkat pada sudut rotor 90-135. Kenaikan tersebut disebabkan oleh exit jet pada *returning blade*. Design III memiliki koefisien torsi statis tertinggi dibandingkan Design lainnya. Penurunan torsi statis setelah sudut 135 disebabkan oleh wake yang tinggi dibelakang rotor.



Gambar 2. 28 Kontur kecepatan (m/s) disekitar rotor pada sudut rotor 135° (a) Design I, (b) Design II, (c) Design III (El-Askary et al., 2015)

Gambar 2.28 merupakan kontur dari kecepatan pada sudut rotor 135. Dapat dilihat bahwa terjadi wake yang cukup kuat pada belakang rotor yang terbentuk berdasarkan Design. Aliran upstream memasuki desain dan membentuk 2 buah aliran; yang pertama membentuk wind jet pada sisi cekung *advancing blade* dan wind jet yang kedua terbentuk pada sisi cekung *returning blade*.



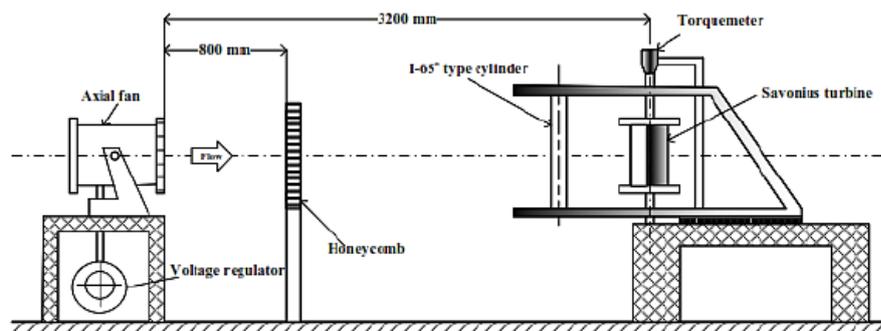
Gambar 2. 29 Kontur kecepatan (m/s) disekitar rotor pada $\lambda = 1$ (a) Turbin angin Savonius konvensional, (b) Design I, (c) Design II, (d) Design III (El-Askary et al., 2015)

Gambar 2.29 menunjukkan wake yang terjadi pada $\lambda = 1$. Ketika ketiga Design dibandingkan, turbin angin Savonius konvensional memiliki wake yang paling kecil, sedangkan ketiga Design memiliki wake yang besar, asimetris, dan menimbulkan vortex. Tentu saja ini akan membuat turbin angin memiliki tingkat kebisingan yang tinggi

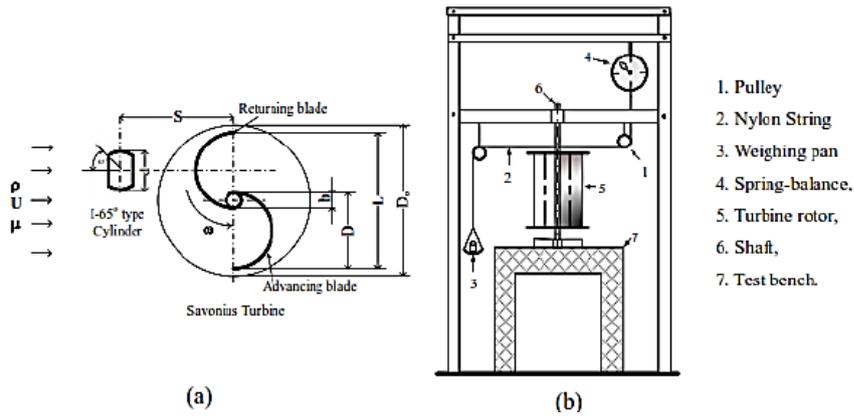
Penelitian ini menyatakan bahwa model yang paling cocok digunakan dalam simulasi adalah SST $k-\omega$ turbulence model berdasarkan penelitian sebelumnya. Penelitian yang menggunakan turbin angin Savonius dengan overlap 0,15 ini meningkatkan C_p dari rotor secara signifikan. Exit-jet yang diterapkan pada belakang *returning blade* mengurangi torsi negative secara signifikan

2.7.4 Experimental and Numerical Investigation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance (Sakti et al., 2019)

Penelitian secara eksperimen dan numerik terkait pengaruh silinder pengganggu tipe I-65° terhadap performa turbin angin Savonius juga dilakukan oleh Sakti et al. (2019). Pada penelitian ini silinder pengganggu tipe I-65° diletakkan di depan *returning blade* dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm, diameter end plate (D_o) = 333,7 mm dan tinggi (H) = 294,4 mm, dengan diameter poros (e) = 19 mm. Silinder pengganggu tipe I-65° ini memiliki diameter sebesar (d) 88,5 mm dan tinggi (h) = 500 mm.

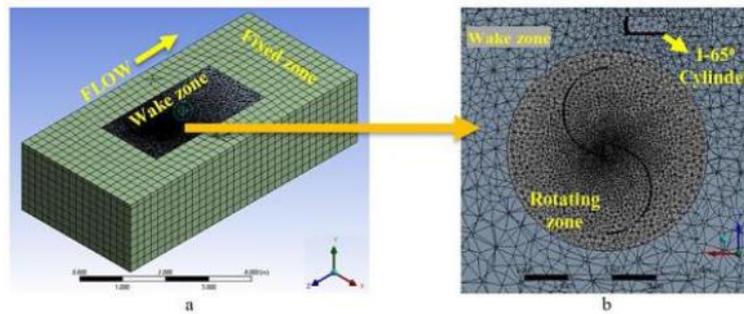


Gambar 2. 30 Skema penelitian eksperimen (Sakti et al., 2019)



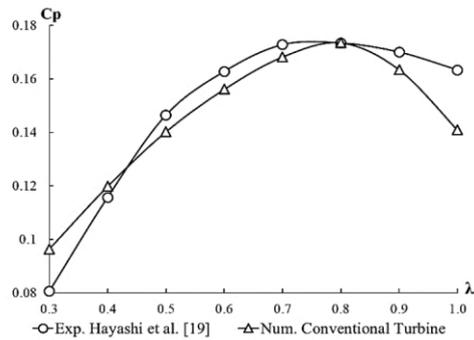
Gambar 2. 31 (a) Skema konfigurasi dengan silinder tipe I-65. (b) Skema pengukuran denfan dynamometer (Sakti et al., 2019)

Penelitian ini dilakukan pada $Re = 9,9 \times 10^4$ dengan rasio posisi jarak silinder pengganggu terhadap diameter turbin (S/D) = 1,4 dan rasio diameter silinder pengganggu terhadap diameter turbin (d/D) = 0,54. Turbin angin Savonius dengan axial fan berjarak 3200 mm, dan jarak antara axial fan dengan Honeycomb yaitu 800 mm. Skema penelitian dan geometri turbin dapat dilihat pada gambar 2.30 dan 2.31.



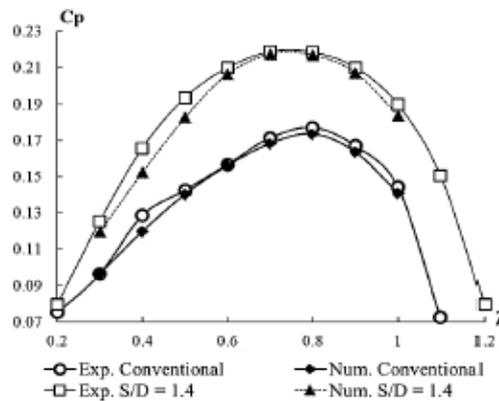
Gambar 2. 32 (a) Domain wake zone dan fixed zone (b) Posisi silinder I-65 (Sakti et al., 2019)

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik, diawali dengan pembuatan geometri 3D dari turbin Savonius seperti gambar 2.32 yang kemudian disimulasikan menggunakan software CFD ANSYS Fluent 19.1. Permodelan yang digunakan adalah k-epsilon dengan discretization SIMPLE



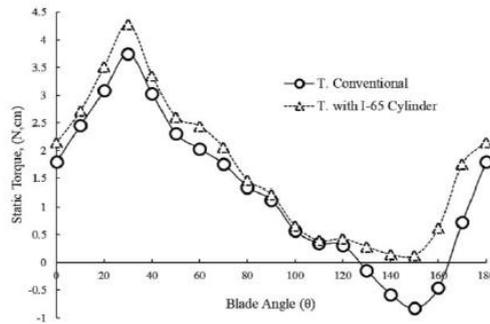
Gambar 2. 33 Validasi koefisien daya pada TSR 0,3 sampai 1,0 (Sakti et al., 2019)

Sebelum penelitian dilakukan Sakti melakukan validasi terlebih dahulu menggunakan penelitian milik Hayashi et al. seperti yang ditunjukkan gambar 2.33. Pada λ 0,3 dan 1,0 menunjukkan perbedaan yang cukup besar, namun pada λ lainnya menunjukkan C_p yang relative sama dengan error dibawah 4,4%.



Gambar 2. 34 Peningkatan koefisien daya turbin terhadap TSR pada $S/D = 1,4$ dan $Re = 99.000$ (Sakti et al., 2019)

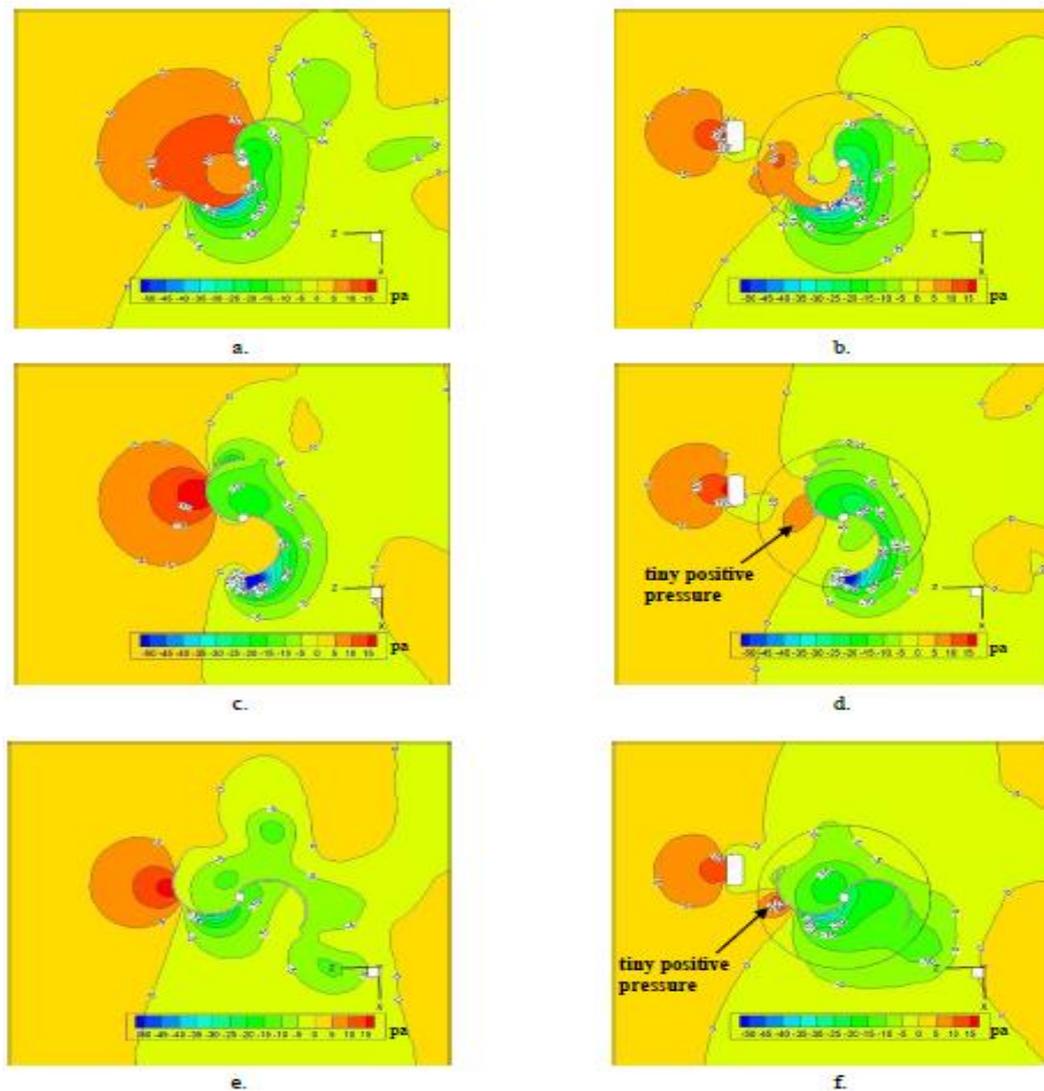
Melalui gambar 2.34 dapat dilihat bahwa pemberian silinder pengganggu Type I-65° pada $S/D = 1,4$ memiliki hasil yang lebih efektif dalam meningkatkan performa dari turbin Savonius, dimana Coefficient of Power dari $S/D = 1,4$ mengalami kenaikan dari 17,7% secara eksperimen dan 17,3% melalui simulasi numerik pada Tip speed ratio 0,8, menjadi 21,8% dan 21,7 %. Begitu juga dengan nilai torsi statis turbin yang mengalami kenaikan setelah diberikan silinder pengganggu Type I-65°, seperti yang ada pada gambar 2.35 dibawah ini.



Gambar 2. 35 Peningkatan torsi statis terhadap sudut pada $Re = 99.000$, perbandingan antara turbin savonius konvensional dengan penelitian sekarang (Sakti et al., 2019)

Dari gambar, dapat dilihat bahwa dengan pemberian silinder pengganggu dapat menaikkan nilai torsi statis turbin dengan nilai torsi statis tertinggi pada sudut bilah turbin 30° , dari 3,75 Ncm tanpa pengganggu menjadi 4,3 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150° , dari -0,8 Ncm tanpa pengganggu menjadi 0,13 Ncm setelah diberi silinder pengganggu. Dari gambar 2.35 dapat disimpulkan juga, bahwa dengan pemberian silinder pengganggu nilai torsi statis yang dihasilkan bernilai positif untuk semua sudut bilah. Hal ini menunjukkan bahwa dengan pemberian silinder pengganggu menyebabkan turbin memiliki kemampuan untuk melakukan self starting.

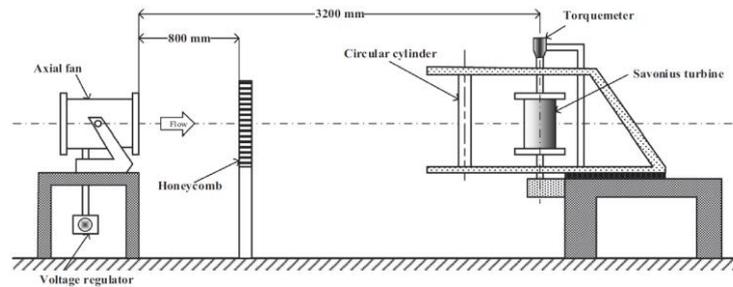
Dari simulasi seperti pada gambar didapatkan bahwa terjadi penurunan tekanan di daerah depan dari sisi *returning blade* turbin Savonius setelah diberi silinder pengganggu Tipe I-65°, dengan menurunnya tekanan pada daerah depan dari sisi *returning blade* turbin Savonius menyebabkan pressure drag dari *returning blade* turun. Pressure drag pada *advancing blade* lebih tinggi dibandingkan *returning blade* sehingga selisih torsi turbin meningkat dan daya dan performa dari turbin Savonius turut meningkat. Melalui simulasi diatas dapat dilihat bahwa dengan penambahan silinder pengganggu Tipe I-65° pada keadaan Turbin pada sudut bilah 30° , memiliki dampak paling efektif dalam meningkatkan torsi turbin dibandingkan dengan keadaan Turbin pada sudut bilah 90° dan 150° . Seperti pada gambar 2.36 pada posisi sudut bilah 30° , merupakan sudut dimana nilai torsi statis mencapai titik puncaknya untuk konfigurasi turbin Savonius konvensional maupun dengan silinder pengganggu Tipe I-65°.



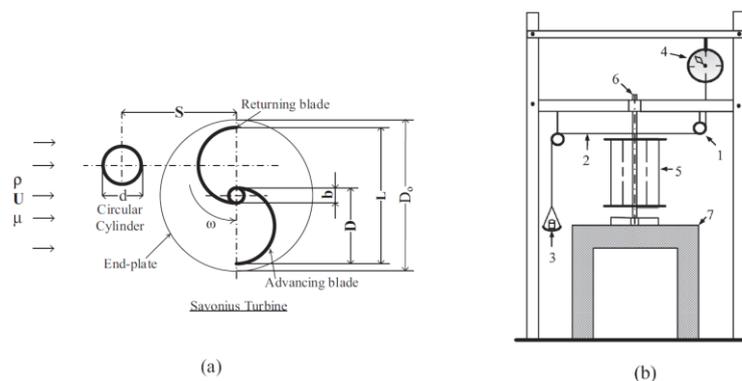
Gambar 2. 36 Perbandingan kontur tekanan antara turbinkonvensional dan sesudah diberi silinder pengganggu Tipe I-65° pada $\lambda = 0,8$; $Re = 9,9 \times 10^4$ dan $S/D = 1,4$; (a) Turbin Konvensional pada sudut bilah 30°, (b) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (c) Turbin Konvensional pada sudut bilah 90°, (d) Turbin pada sudut bilah 90° dengan silinder pengganggu Tipe I-65°, (e) Turbin Konvensional pada sudut bilah 150°, (f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder pengganggu Tipe I-65° (Sakti et al., 2019)

2.7.5 Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade

Penelitian secara eksperimen yang dilakukan oleh Triyogi et al. (2020) ditujukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara menempatkan silinder sirkular di depan *returning blade*. Penempatan silinder tersebut diharapkan bisa mengurangi gaya drag atau torsi negative yang dihasilkan oleh *returning blade*

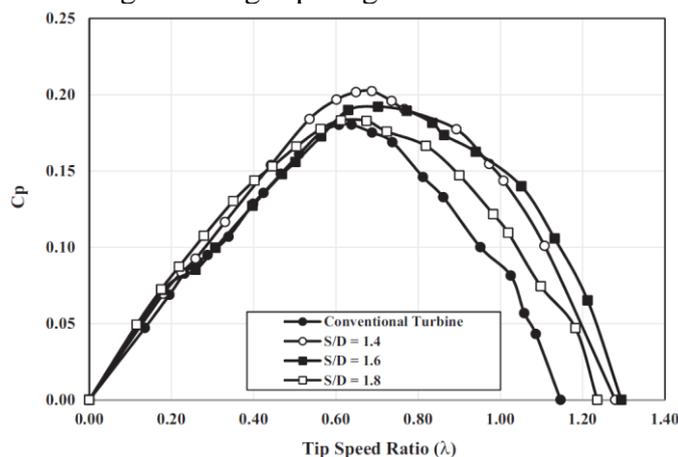


Gambar 2. 37 Skema penelitian secara eksperimen (Triyogi et al., 2020)



Gambar 2. 38 (a) Konfigurasi turbin angin Savonius dengan silinder sirkular (b) Skema pengukuran torsi dinamis (Triyogi et al., 2020)

Penelitian dilakukan dengan beberapa konfigurasi S/D dimana S adalah jarak pusat antara *returning blade* sedangkan D merupakan diameter sudu turbin. Konfigurasi yang digunakan adalah S/D dengan nilai 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2 dengan Re 99.000 atau kecepatan 5 m/s. Penelitian dilakukan dengan setting seperti gambar 2.37 dan 2.38

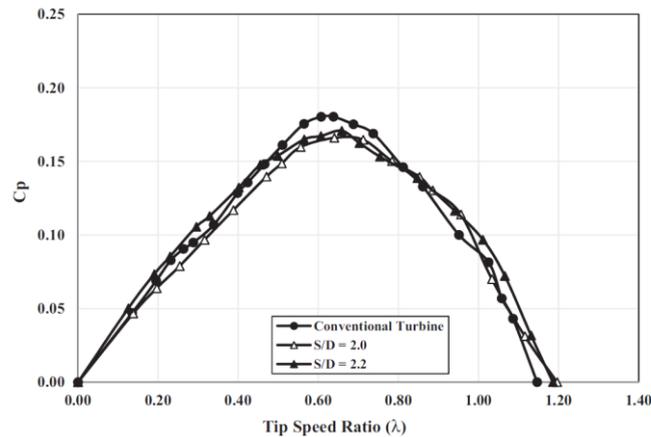


Gambar 2. 39 Perubahan koefisien daya terhadap TSR untuk $S/D = 1,4$; $1,6$; dan $1,8$ (Triyogi et al., 2020)

Dari gambar 2.39 dapat dilihat bahwa C_p mengalami kenaikan ketika silinder diterapkan pada turbin angin Savonius di depan *returning blade*. C_p maksimum terjadi pada $\lambda = 0,65$ $0,70$ dan $0,67$ di S/D 1,8; 1,6; dan 1,4 secara berurutan. Terjadi kenaikan 12,2 % pada S/D 1,4

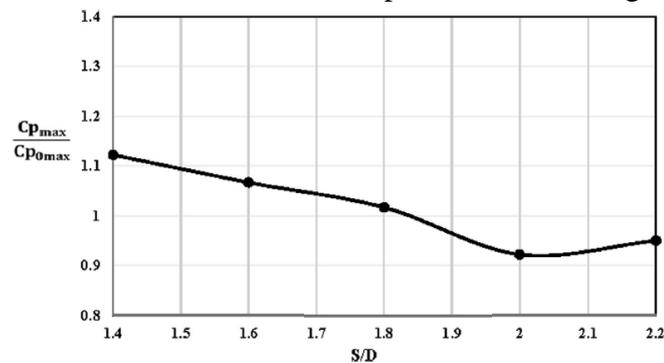
Fenomena turunnya drag ini disebabkan oleh distribusi aliran yang terganggu di belakang silinder. Terganggunya distribusi aliran tersebut diakibatkan oleh silinder itu sendiri. Sehingga boundary layer pada permukaan retutning blade terganggu pula. Sehingga menyebabkan separasi tertnda dan drag force menurun.

Hal ini juga memungkinkan apabila wake di belakang silinder menyebabkan menurunnya tekanan diantara silinder dan *returning blade*. Dan juga tekanan balik di belakang silinder meningkat.



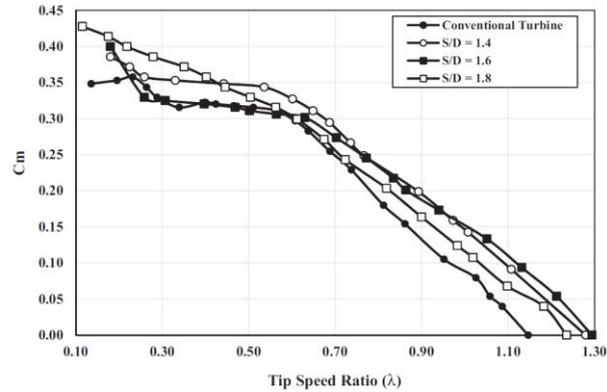
Gambar 2. 40 Perubahan koefisien daya terhadap TSR untuk S/D = 2,0 ; dan 2,2 (Triyogi et al., 2020)

Dari gambar 2.40 terlihat bahwa pada S/D > 1,8, performa turbin lebih rendah dari pada turbin angin conventional atau tanpa silinder pengganggu. Fenomena tersebut terjadi pada puncak Cp. Hal ini menandakan bahwa jarak silinder pengganggu yang terlalu jauh tidak akan berpengaruh atau bahkan malah menurunkan performa turbin angin



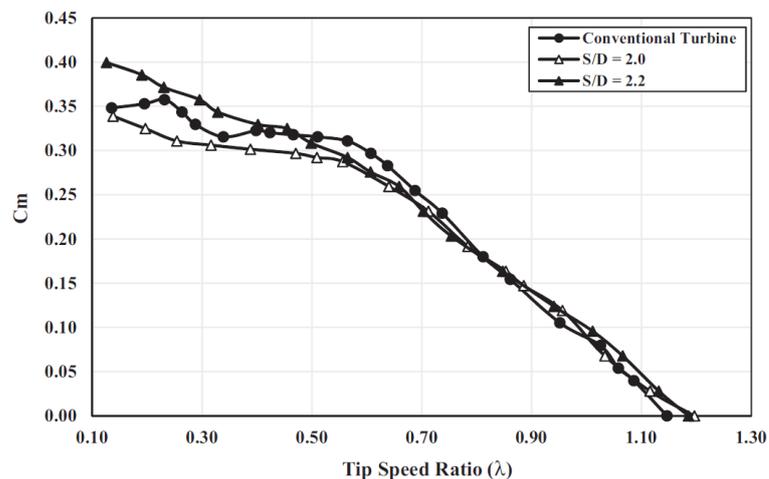
Gambar 2. 41 Perubahan rasio Cpmax/Cp0max terhadap jarak S/D (Triyogi et al., 2020)

Gambar 2.41 menunjukkan puncak coefficient power yang dihasilkan pada setiap variasi. S/D 1,4 menunjukkan bahwa pada jarak tersebut turbin angin Savonius memiliki Cp paling tinggi. Cp akan terus menurun hingga S/D = 2 dan naik Kembali pada S/D = 2,2



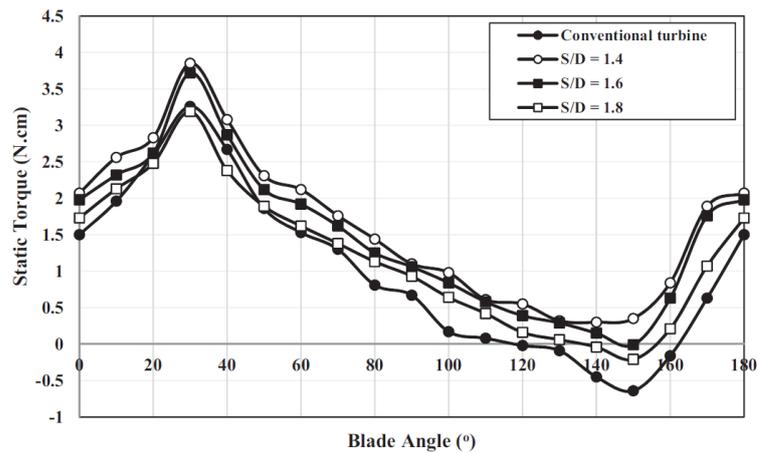
Gambar 2. 42 Perubahan koefisien momen terhadap TSR untuk $S/D = 1,4$; $1,6$; dan $1,8$ (Triyogi et al. 2020)

Gambar 2.42 menunjukkan coefficient of moment hasil eksperimen terhadap λ . Terlihat pada gambar bahwa $S/D = 1,4$; $1,6$; dan $1,8$ menghasilkan C_m yang lebih tinggi dibandingkan turbin angin Savonius konvensional. Kenaikan tersebut menandakan bahwa S/D dari $1,4$ hingga $1,8$ menurunkan torsi negative dengan baik pada *returning blade*



Gambar 2. 43 Perubahan koefisien momen terhadap TSR untuk $S/D = 2,0$; dan $2,2$ (Tiyogi et al. 2020)

Gambar 2.43 menunjukkan C_m ketika silinder sirkular terlalu jauh didepan *returning blade* atau pada $S/D > 1,8$. C_m memiliki perbandingan yang sedikit rumit dimana pada $\lambda < 0,44$ nilai C_m pada turbin angin Savonius konvensional lebih rendah apabila dibandingkan dengan yang diterapkan silinder sirkular dengan $S/D = 2,2$. Namun nilai C_m turbin angin Savonius konvensional lebih tinggi dari $S/D = 2,0$

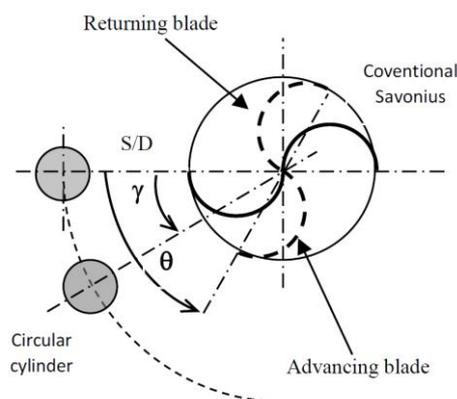


Gambar 2. 44 Perubahan torsi statis terhadap sudut turbin pada $S/D = 1,4 ; 1,6$ dan $1,8$ (Triyogi et al. 2020)

Gambar 2.44 menunjukkan torsi statis terhadap fungsi sudut putaran silinder pada S/D 1,4; 1,6; dan 1,8. Peningkatan torsi statis disebabkan oleh berkurangnya gaya drag pada *returning blade* karena tekanan yang disebabkan oleh silinder sirkular. Penurunan gaya drag menunjukkan pentingnya silinder sirkular untuk menurunkan tekanan didepan *returning blade*. Pada $S/D > 1,8$ torsi statis hampir menyamai nilai pada turbin Savonius konvensional.

2.7.6 Effect of a Circular Cylinder in Front of *Advancing blade* on the Savonius Water Turbine by Using Transient Simulation (Setiawan et al., 2019)

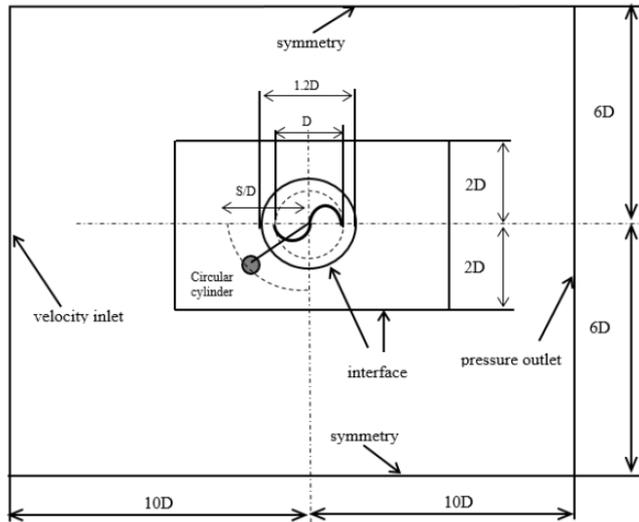
Penelitian yang dilakukan secara numerik oleh Setiawan et al. (2019) ditujukan untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dengan cara mencari posisi silinder sirkuler yang terbaik. Silinder sirkuler diletakkan didepan *advancing blade* dengan berbagai ukuran. Ukuran yang semakin besar akan menyebabkan penyempitan antara *advancing blade* dengan silinder sirkuler. Hal tersebut bisa menyebabkan efek nozzle dan meningkatkan kecepatan pada celah tersebut.



Gambar 2. 45 Posisi blade dan posisi silinder sirkuler pada konfigurasi penelitian (Setiawan et al., 2019)

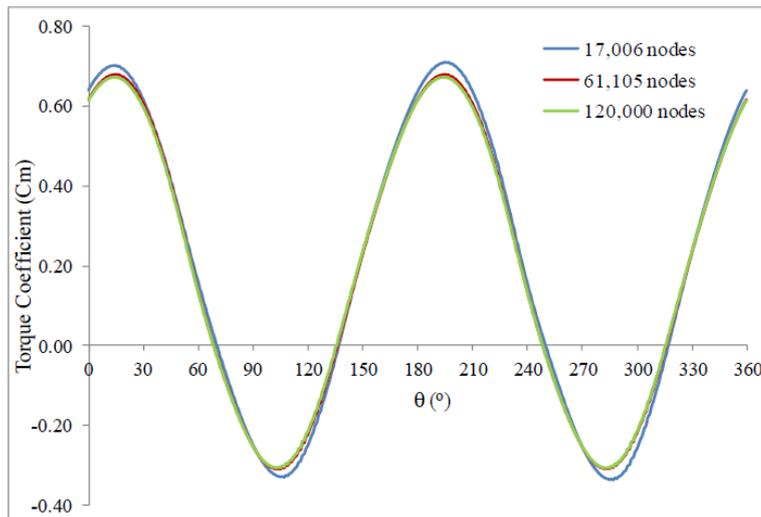
Variasi pada penelitian ini adalah diameter silinder sirkuler dengan diameter d_s/D 0,1 0,3 dan 0,5 dimana d_s adalah diameter silinder dan D adalah diameter sudu turbin. Variasi yang kedua diterapkan pada posisi silinder terhadap sumbu x dengan nilai $0^\circ, 30^\circ$ dan 60° .

Parameter tetap pada penelitian ini adalah jarak pusat silinder terhadap pusat turbin dengan jarak S/D 0,95. Konfigurasi tersebut bisa dilihat pada gambar 2.45

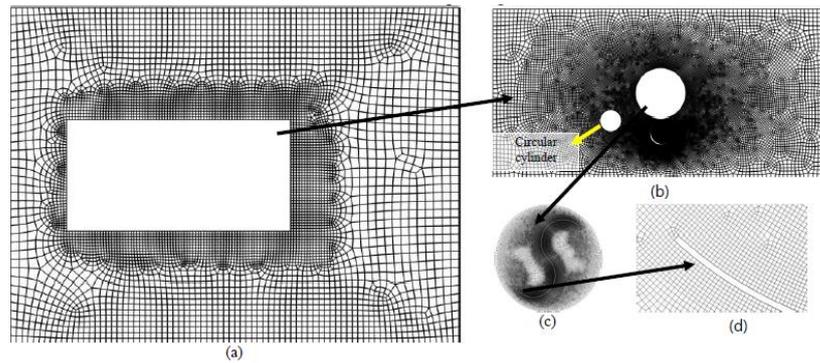


Gambar 2. 46 Boundary condition dan domain penelitian 2D (Setiawan et al., 2019)

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik 2 Dimensi menggunakan geometri seperti gambar 2.46. Geometri tersebut terdiri dari stationary zone, wake zone, dan rotating zone. Velocity yang digunakan sebesar 0,22 m/s

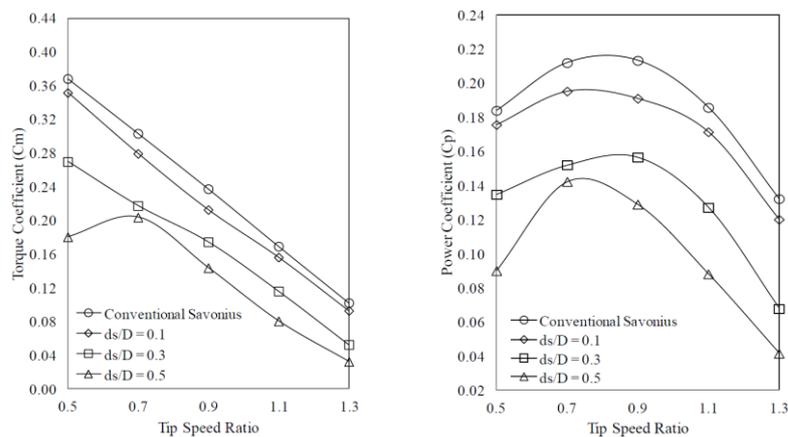


Gambar 2. 47 Perbandingan mesh pada proses grid independency test (Setiawan et al., 2019)



Gambar 2. 48 Mesh pada (a) Fixed zone (b) wake zone (c) rotating zone. ((Setiawan et al., 2019)

Grid independency dilakukan secara transient menggunakan nodes sebanyak 17k 61k dan 120k. Pada gambar 2.47 diketahui bahwa nodes 61k dan 120k sangat berhimpit sehingga digunakan mesh 60k untuk mempercepat waktu simulasi. Hasil mesh yang digunakan dapat dilihat pada gambar 2.48

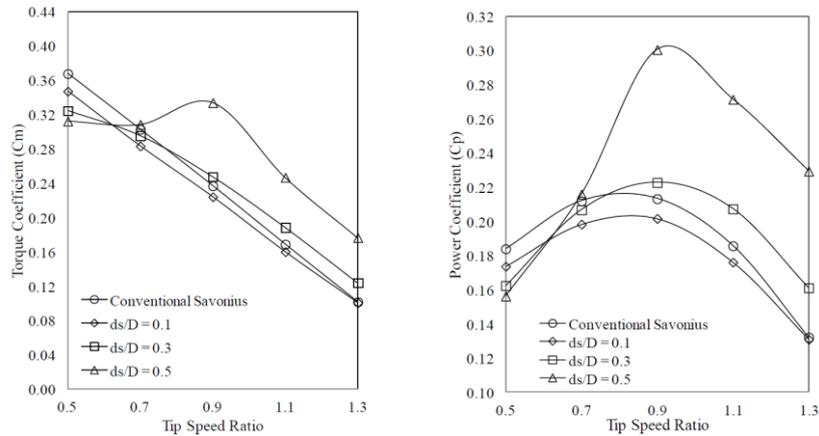


Gambar 2. 49 Perbandingan Cm (kiri) dan Cp (kanan) pada setiap ukuran silinder sirkuler pada posisi $\gamma = 0^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Pada gambar 2.49 ditunjukkan bahwa turbin angin Savonius tanpa silinder memiliki performa yang terbaik pada posisi $\gamma=0^\circ$ dibandingkan turbin dengan silinder. Turbin angin Savonius dengan silinder berukuran $ds/D = 0,1$ dan $0,3$ berturut turut memiliki erforma yang menurun setelah turbin angin Savonius konvensional. Silinder sirkuler dengan ukuran paling besar menghasilkan performa paling rendah. Pada TSR 0,5 Cm memiliki nilai yang rendah, namun Ketika TSR 0,7 Cm mulai meningkat. Puncak performa diketahui melalui table 2.2

Tabel 2. 2 Koefisien daya tertinggi pada $\gamma=0^\circ$

Variation	The peak power coefficient at $\gamma = 0^\circ$		
	Peak Cp	Corresponding TSR	Cp Gain (%) relative to conventional Savonius
Savonius conventional	0.213	0.9	0.00
ds/D = 0.1	0.195	0.7	-8.31
ds/D = 0.3	0.157	0.9	-26.50
ds/D = 0.5	0.142	0.7	-33.20

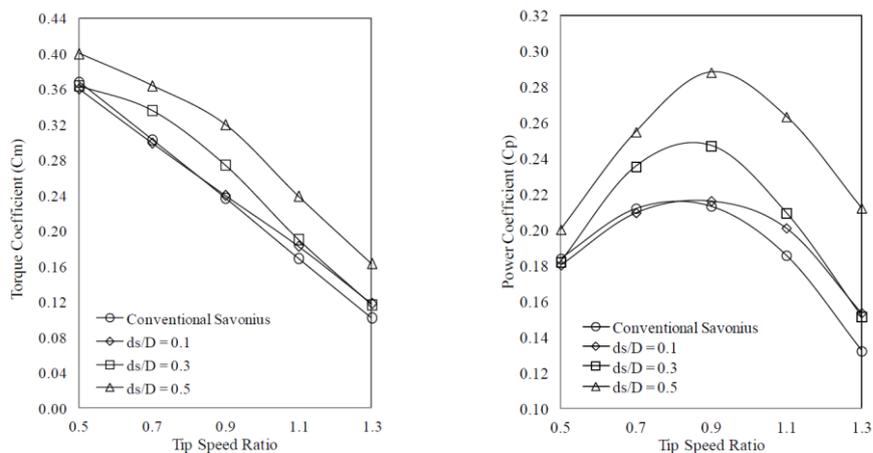


Gambar 2. 50 Perbandingan C_m (kiri) dan C_p (kanan) pada setiap ukuran silinder sirkuler pada posisi $\gamma = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Pada gambar 2.50 ditunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan silinder ds/D 0,5 s memiliki performa yang terbaik pada posisi $\gamma=30^\circ$ dibandingkan turbin tanpa silinder dan ukuran silinder lainnya. Berdasarkan grafik C_p , turbin angin Savonius dengan silinder sirkuler $ds/D = 0,3$ memiliki performa yang hampir sama dengan turbin angin tanpa silinder. Turbin Savonius dengan silinder $ds/D = 0,1$ memiliki performa paling rendah dibandingkan konfigurasi lainnya. Puncak performa pada tiap variasi diketahui melalui table 2.3

Tabel 2. 3 Koefisien daya tertinggi pada $\gamma=30^\circ$

The peak power coefficient at $\gamma = 30^\circ$			
Variation	Peak C_p	Corresponding TSR	C_p Gain (%) relative to conventional Savonius
Savonius conventional	0.213	0.9	0.00
$ds/D = 0.1$	0.202	0.9	-5.28
$ds/D = 0.3$	0.223	0.9	4.62
$ds/D = 0.5$	0.301	0.9	41.18

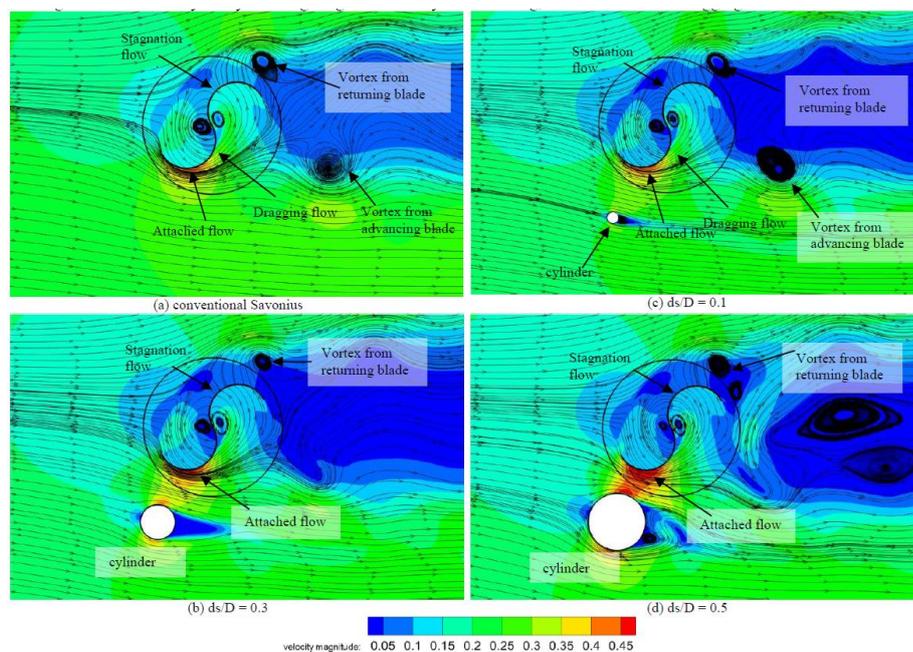


Gambar 2. 51 Perbandingan C_m (kiri) dan C_p (kanan) pada setiap ukuran silinder sirkuler pada posisi $\gamma = 60^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Pada gambar 2.51 ditunjukkan bahwa turbin angin Savonius dengan silinder ds/D 0,5 s memiliki performa yang terbaik pada posisi $\gamma=60^\circ$ dibandingkan turbin tanpa silinder dan ukuran silinder lainnya. Berdasarkan grafik C_p , turbin angin Savonius dengan silinder sirkuler $ds/D = 0,3$ memiliki peningkatan C_p yang cukup tinggi namun tidak setinggi $ds/D = 0,5$. Sedangkan $sd/D = 0,1$ dan Savonius konvensional memiliki C_p yang berhimpit dan puncak C_p yang hampir sama.

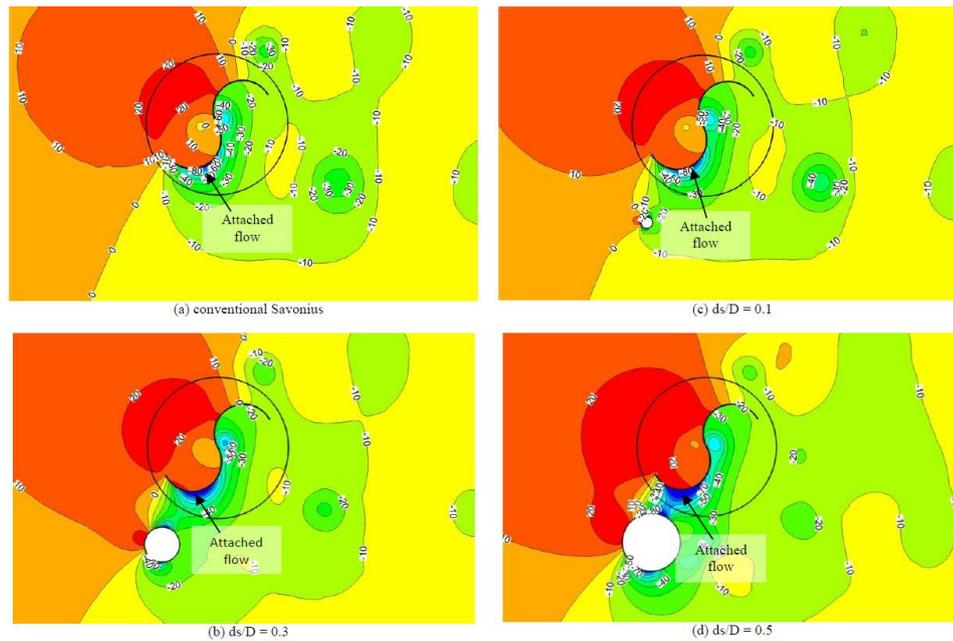
Tabel 2. 4 Koefisien daya tertinggi pada $\gamma=60^\circ$

The peak power coefficient at $\gamma = 60^\circ$			
Variation	Peak C_p	Corresponding TSR	C_p Gain (%) relative to conventional Savonius
Savonius conventional	0.213	0.9	0.00
$ds/D = 0.1$	0.216	0.9	1.53
$ds/D = 0.3$	0.247	0.9	15.98
$ds/D = 0.5$	0.288	0.7	35.29



Gambar 2. 52 Velocity pethline pada setiap variasi dengan $\gamma = 60^\circ$ sudut rotor $\Theta = 30^\circ$ dan TSR 0.9 (Setiawan et al., 2019)

Gambar 2.52 diatas menunjukkan bahwa turbin angin konvesional memiliki kontur yang velocity pathline yang relative sama dengan $ds/D = 0,1$. Pada semua variasi tidak ditemukan overlap flow. Aliran stagnasi, vortex, dan attached flow terbentuk pada semua variasi. Aliran stagnasi terjadi pada posisi yang sama didepan *returning blade* untuk semua variasi.



Gambar 2. 53 Kontur tekanan pada setiap variasi dengan $\gamma = 60^\circ$ sudut rotor $\Theta = 30^\circ$ dan TSR 0.9 (Setiawan et al., 2019)

Attached flow terjadi pada semua variasi, namun pada turbin konvensional, $ds/D = 0,1$ dan $ds/D = 0,3$ memiliki attached flow yang relative kecil. Berbeda dengan $ds/D = 0,5$ attached flow yang dihasilkan relative besar. Hal ini disebabkan oleh besarnya diameter yang membuat celah semakin kecil. Kecilnya celah akan menimbulkan attached flow. Pada gambar 2.53 ditunjukkan bahwa bagian attached flow memiliki tekanan yang rendah. Hal tersebut mampu mengurangi drag pada sisi cembung *advancing blade* dan meningkatkan torsi positif.

2.8 Rangkuman

Tabel 2.21 merupakan rangkuman dari penelitian terdahulu yang telah direview di sub bab diatas

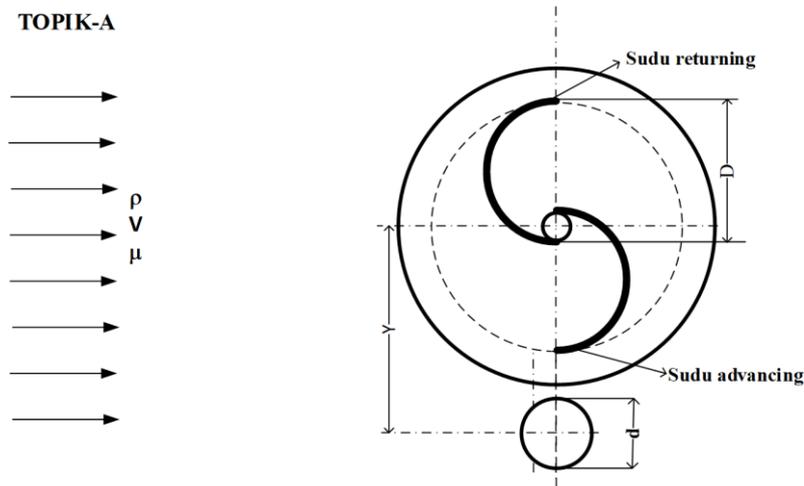
Tabel 2. 2 Tabel rangkuman penelitian terdahulu

	Mahmoud et al.	Altan et al.	Askary et al.	Sakti et al.	Triyogi et al.	Setiawan et al.
Metode	Eksperimen	Eksperimen & 2D Numerik	2D Numerik	Eksperimen & 3D Numerik	Eksperimen	Numerik
Variasi	- Jumlah sudu - jumlah stage - overlap ratio - aspect ratio - endplate	- Sudut curtain - Panjang curtain	- 3 buah Curtain Design	- S/D dengan silinger tipe I-65°	- S/D dengan silinder sirkular	-Posisi dan ukuran silinder
Model & Discretization		RKE & SIMPLe	SST k- ω	RKE enhanced wall treatment & SIMPLE		RKE & SIMPLE
Reynolds Number & Velocity	0 – 13 m/s	150.000 & 7m/s	141.500	99.000	99.000	0,22 m/s
Cell			273.000	1.200.000		61.000
Hasil Terbaik	- 2 sudu - 1 stage - ovelap ratio 0 - aspect ratio 5 - dengan endplate	- curtain 1 - $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$	- Curtain ke 3 (exit jet & efek nozzle)	- S/D = 1,4	- S/D = 1,4	- Ukuran silinder ds/D = 0,5 - Posisi silinder 60°

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Variasi Simulasi

Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan software ANSYS 2021 R2. Metode tersebut dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu pre-processing, processing, dan post processing. Penelitian ini menggunakan model berupa geometri 2 dimensi.



Gambar 3. 1 Konfigurasi penelitian

Optimasi performa turbin angin Savonius dilakukan dengan berbagai variasi Y/D dan kecepatan seperti gambar 3.1 dimana Y adalah jarak pusat turbin angin terhadap pusat silinder, sedangkan D adalah diameter sudu turbin. Nilai Y/D pada penelitian ini adalah 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; 1,42 ; 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09. Parameter d/D memiliki nilai tetap yaitu 0,5. Variasi kecepatan yaitu 4 m/s dan 6 m/s.

3.2 Pre-Processing

3.2.1 Geometri & Domain

Geometri terdiri dari 2 domain yaitu *fixed zone domain* dan *rotating domain*. *Fixed zone* memiliki zona belakang lebih Panjang yang ditujukan untuk memberi wilayah yang lebih besar untuk wake yang terjadi ketika simulasi. Pada *rotating zone* terdapat turbin angin Savonius yang berputar selama simulasi berlangsung

Turbin angin Savonius yang digunakan memiliki characteristic length sebesar 311 mm dengan detail dipaparkan pada table 3.1.

Tabel 3. 1 Geometri turbin angin Savoius

S	
Diameter sudu turbin (D)	165 mm
Diameter turbin (2D-b)	311 mm
Diameter poros (b)	19 mm
Tebal sudu turbin	4 mm

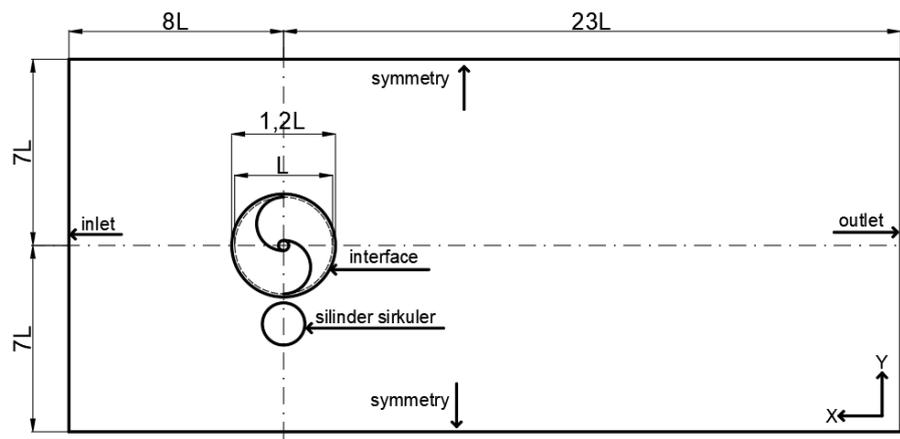
3.2.2 Parameter

3.2.2.1 Model Simulasi

Studi numerik dilakukan dengan model realizable k-epsilon. Pemilihan model ini didasari oleh penelitian yang dilakukan oleh Eshagh Nimvari, Fatahian, dan Fatahian (2020), dalam jurnalnya yang mengatakan bahwa selain SST k- ω , model realizable k-epsilon juga merupakan model terbaik untuk simulasi turbin angin.

3.2.2.3 Boundary Condition

Boundary condition perlu ditentukan agar fluent bisa mengenali parameter parameter yang akan digunakan pada simulasi. Boundary condition ditentukan berdasarkan kondisi real atau kondisi yang diinginkan. Pada kasus ini boundary condition terdiri dari inlet, outlet, wall untuk turbin angin Savonius dan silinder, symmetry, serta interface pada kedua domain seperti gambar 3.2



Gambar 3. 2 Boundary condition

Tabel 3. 2 Boundary conditions yang digunakan pada simulasi

Boundary condition	
Sisi kiri	Velocity Inlet = 4 & 6 m/s
	Turbulence Intensity = 1%
	Turbulence length scale = 0,02
Sisi kanan	Pressure outlet = 0 Pa
Sisi atas	Symmetry
Sisi bawah	Symmetry
Savonius	Moving wall
	Rotational, no slip
Silinder	Stationary wall
Mesh interface	Interface1, interface2

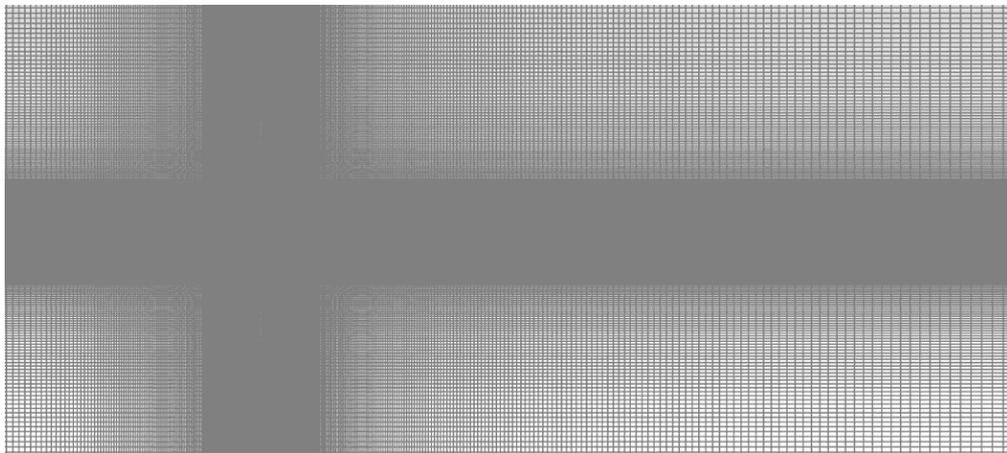
Tabel 3.2 menunjukkan nilai yang digunakan pada simulasi. Secara berturut-turut tabel mendefinisikan sisi kiri, kanan, atas, dan bawah sebagai velocity inlet, pressure outlet, dan symmetry. Boundary condition Savonius dan silinder memiliki fungsi sebagai wall, dimana pada wall tersebut yang akan dikalkulasi momen nya. Namun, pada kasus ini Savonius didefinisikan sebagai moving wall karena domain yang berputar. Interface

digunakan untuk menyatukan dua buah domain yang berbeda, sehingga node mesh pada domain yang berbeda akan terhubung satu sama lain.

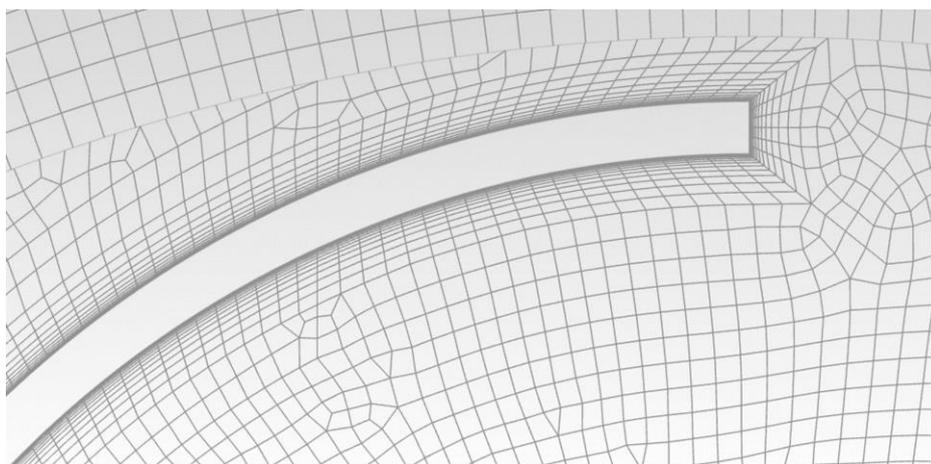
3.2.3 Meshing & Grid Independence Test

Meshing dilakukan dengan Software Ansys Meshing. Tipe meshing yang digunakan adalah campuran. Pada bagian fixed zone domain digunakan meshing tipe structure. Sedangkan pada rotating domain digunakan mesh tipe unstructured. Tipe structure mesh pada fixed zone diaplikasikan dengan cara membagi fixed zone domain menjadi beberapa face, lalu menggunakan edge sizing untuk mengatur lebar cell. Hasil meshing dapat dilihat pada gambar 3.3.

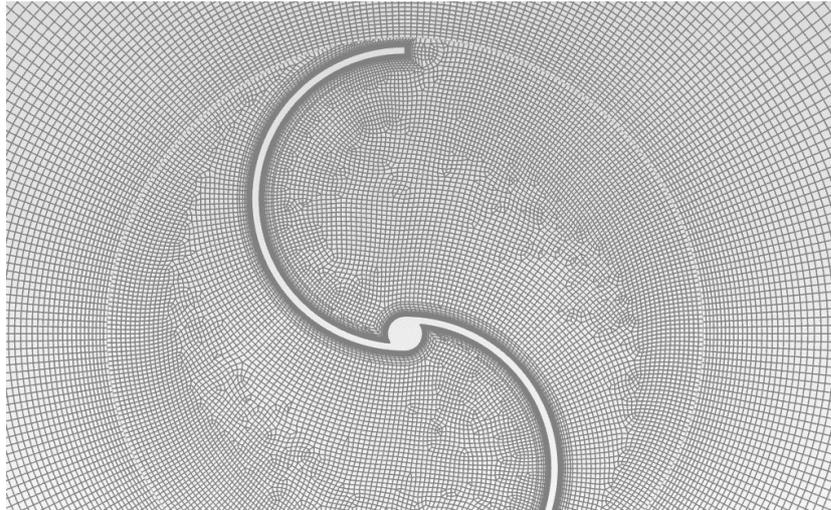
Grid Independence Test (GIT) merupakan metode untuk memastikan bahwa mesh yang kita gunakan tidak lagi sensitive terhadap perubahan jumlah sel. GIT dilakukan dengan cara membuat beberapa mesh dengan jumlah cell yang berbeda untuk menentukan grid yang paling optimal agar data yang dihasilkan bisa akurat sesuai dengan konfigurasi.



(a)



(b)



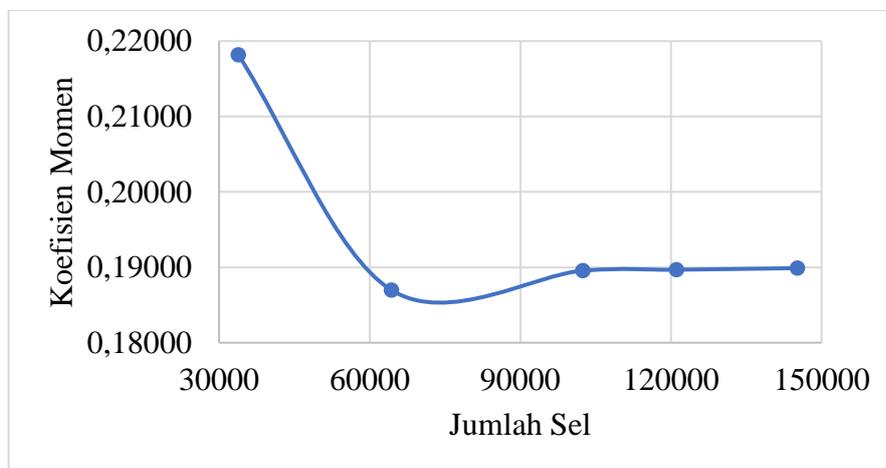
(c)

Gambar 3. 3 (a) Meshing keseluruhan domain simulasi, (b) Meshing pada rotating domain, (c) Mesh pada sekitar sudu turbin

Tabel 3. 3 Grid Independency Test

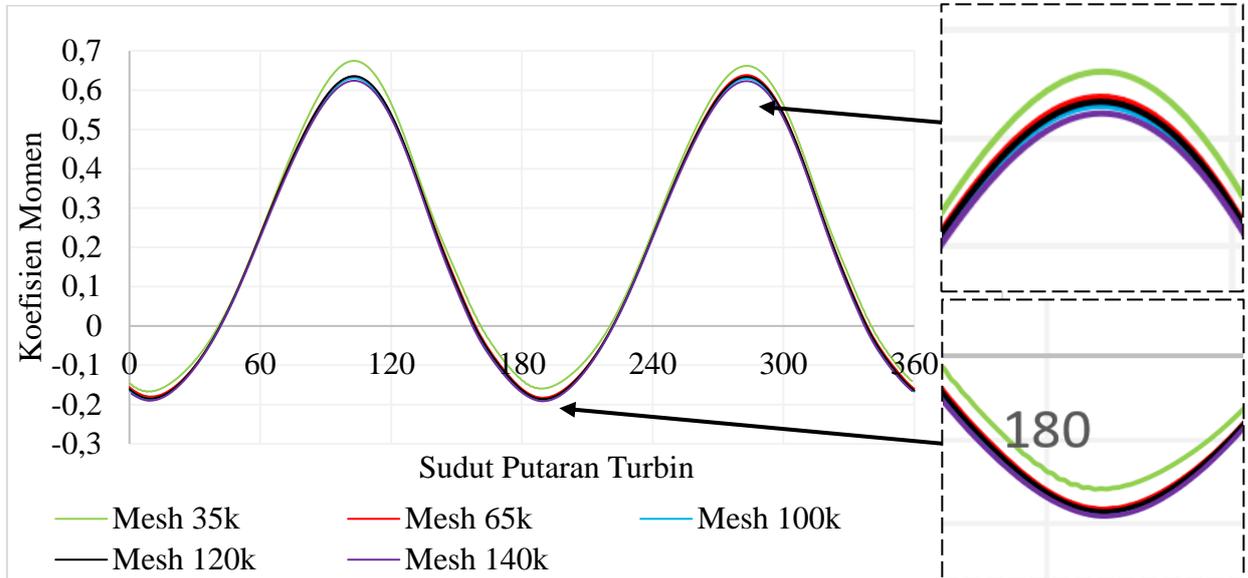
Simplifikasi	Cell	y+ max	Cm avg	Error (%)
35000	33842	3,429	0,21817	
65000	64311	1,835	0,18699	16,673
100000	102451	1,391	0,18956	1,356
120000	121075	0,988	0,18968	0,064
140000	145191	0,412	0,18989	0,112

Grid Independency dilakukan dengan mesh mulai dari 35k hingga 140k dengan rincian seperti pada table diatas. Tabel 3.2 dan Gambar 3.4 menunjukkan bahwa perubahan Cm avg dari mesh 100k hingga 140k sangatlah kecil. Tiga data terakhir menunjukkan nilai error dibawah 5%.



Gambar 3. 4 Perbedaan Cm pada setiap jenis mesh

Gambar 3.5 menunjukkan bahwa mesh 65k dan 35k belum stabil sedangkan mesh dengan cell 100k hingga 140k memiliki nilai yang hampir sama atau berhimpit. Oleh karena itu digunakan mesh dengan cell 100k untuk mempersingkat waktu simulasi dan sebagai upaya penghematan energi.



Gambar 3. 5 Grafik grid independency test

3.3 Processing

Tahap processing merupakan tahap komputasi fluida dengan jumlah iterasi yang telah ditentukan hingga mencapai kriteria konvergensi. Pada tahap ini, simulasi dilakukan dengan rotating domain yang telah diatur kecepatan rotasinya. Kecepatan rotasi tersebut dapat dilihat pada table dibawah.

Tabel 3. 4 Input RPM dan time step size untuk kecepatan 4 m/s

TSR	v (m/s)	rad/s	TSS / waktu per 1 deg
0,2	4	5,138086	0,00339684743
0,4		10,27617	0,00169842372
0,6		15,41426	0,00113228248
0,8		20,55234	0,00084921186
1		25,69043	0,00067936949
1,2		30,82852	0,00056614124

Tabel 3. 5 Input RPM dan time step size untuk kecepatan 6 m/s

TSR	v (m/s)	rad/s	TSS / waktu per 1 deg
0,2	6	7,7071	0,00226456495
0,4		15,41426	0,00113228248
0,6		23,12139	0,00075485498
0,8		30,82852	0,00056614124
1		38,53565	0,00045291299
1,2		46,24277	0,00037742749

Pada tahap processing setup solver membutuhkan input untuk menjalankan simulasi. Model solver yang digunakan adalah 2D double precision dengan model K-epsilon realizable. (RKE). Detail setup solver dapat dilihat pada table 3.5 dibawah.

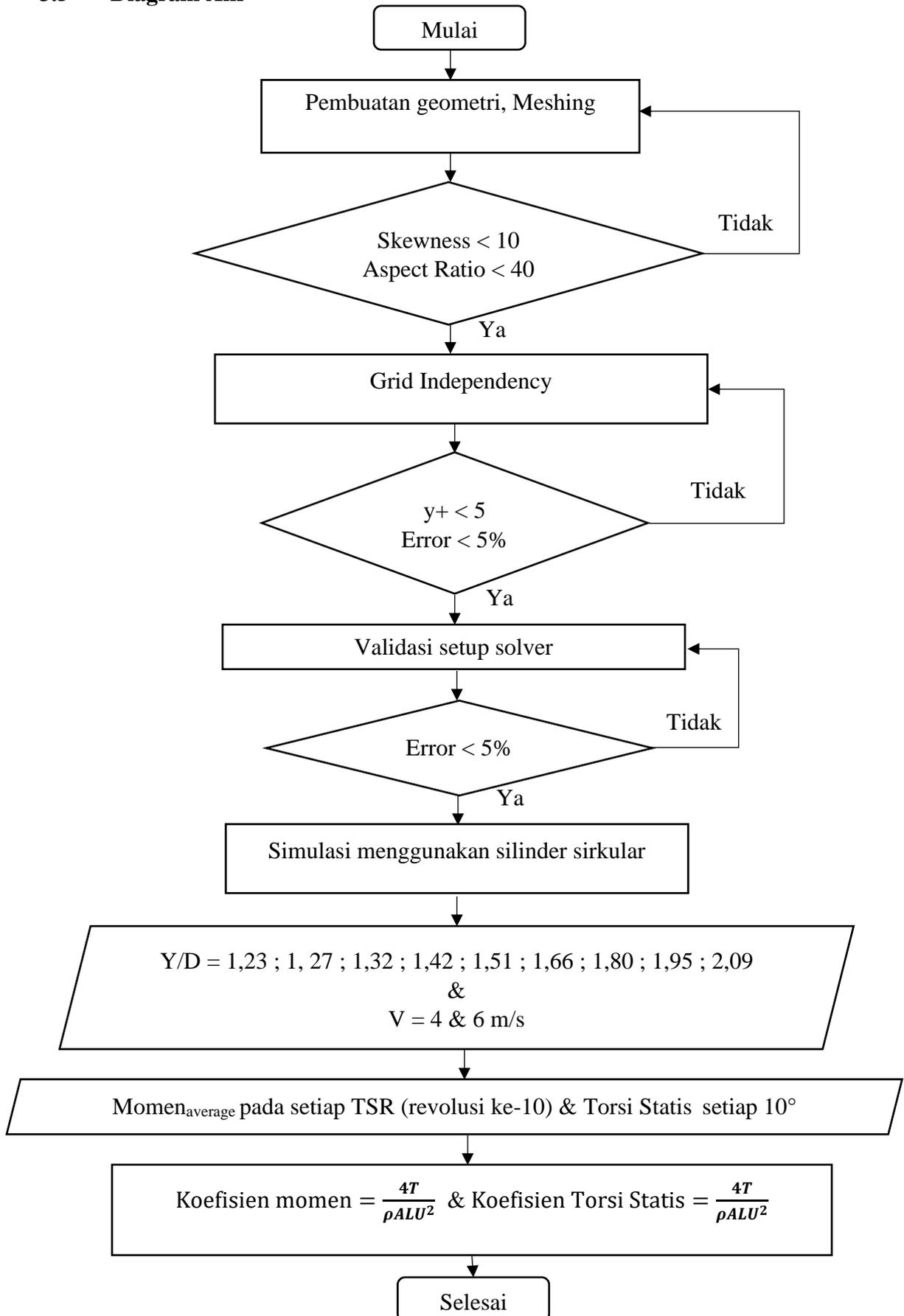
Tabel 3. 6 Setup solver untuk simulasi transient

Parameter		Input
General	Solver	Pressure based, transient, 2D
Model	Viscous	Realizable k- ϵ (RKE)
Material	air	$\rho = 1,184 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
Cell zone condition	Rotating domain	Mesh motion Rotational velocity (Tabel 3.3 dan 3.4)
	Fixed domain	Name of material : air
Methods	Scheme	Green-Gauss Node Based
	Gradient	Second Order
	Pressure	Second Order Upwind
	Momentum	Second Order Upwind
	Turbulence Kinetic Energy	Second Order Upwind
	Turbulence Dissipation Rate	Second Order Upwind
Solution	Residual	Absolute criteria 10^{-5}
	Run Calculation	Number of time step = 3600 Time step size = (Tabel 3.3 dan 3.4) Max iteration = 70

3.4 Post Processing

Data yang diambil dari hasil simulasi adalah momen rata-rata satu putaran. Simulasi dilakukan sebanyak 3600 time step atau 10 putaran. Output yang digunakan sebagai hasil simulasi adalah putaran ke 10 atau putaran dimana errornya lebih kecil dari 5% dari putaran sebelumnya metode ini didasari oleh jurnal Fatahian et al. (2022). Data lain yang diambil dari hasil simulasi adalah Torsi statis. Pengambilan data ini dilakukan dengan simulasi secara steady pada setiap 10 derajat putaran turbin. Kemudian data diolah untuk mendapatkan koefisien momen (C_m) dan koefisien torsi statis (C_t).

3.5 Diagram Alir

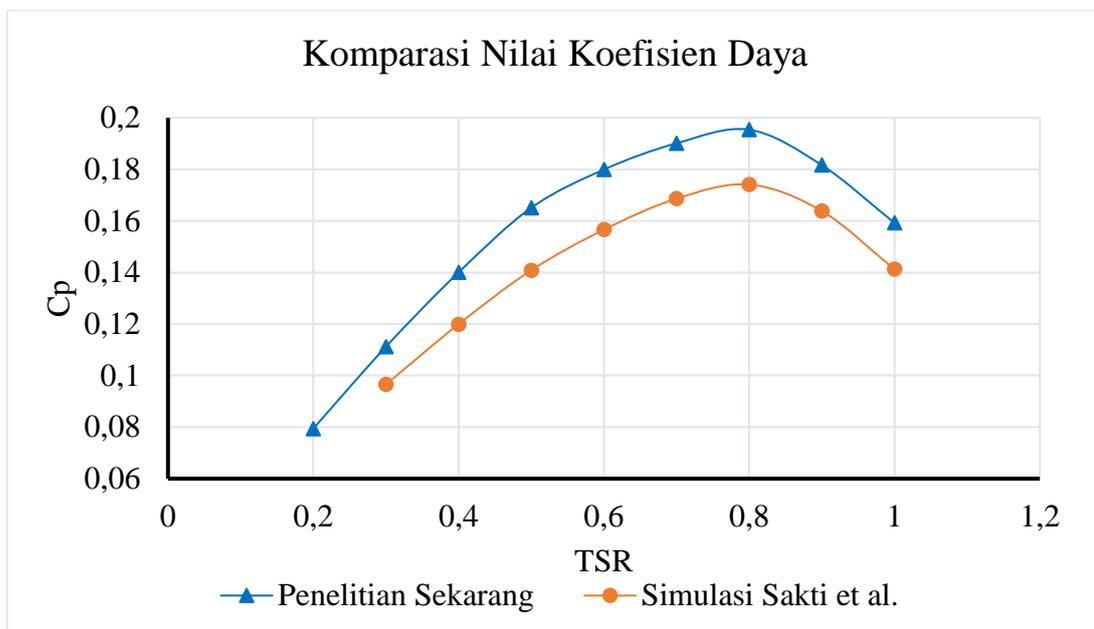


BAB IV HASIL ANALISIS DAN DISKUSI

Bab ini berisi hasil analisis dan diskusi dari penelitian numerik yang telah dilakukan. Hasil dan pembahasan berupa analisis secara kuantitatif dan kualitatif. Hasil kuantitatif yang akan dianalisis adalah nilai C_t pada interval 10° serta nilai C_m dan C_p pada setiap TSR dan variasi jarak Y/D , sedangkan hasil kualitatif adalah analisis kontur tekanan dan kecepatan pada tiap puncak *tip speed ratio*.

4.1 Validasi Simulasi

Komparasi bertujuan untuk mengetahui kesesuaian *setup solver* yang digunakan. Komparasi dilakukan dengan cara membandingkan Penelitian Sekarang dengan penelitian terdahulu. Data komparasi yang digunakan adalah koefisien daya (C_p), data tersebut dibandingkan dengan penelitian Sakti et al. (2019).



Gambar 4. 1 Grafik perbandingan koefisien daya (C_p) penelitian Sakti et al. (2019) dengan penelitian sekarang.

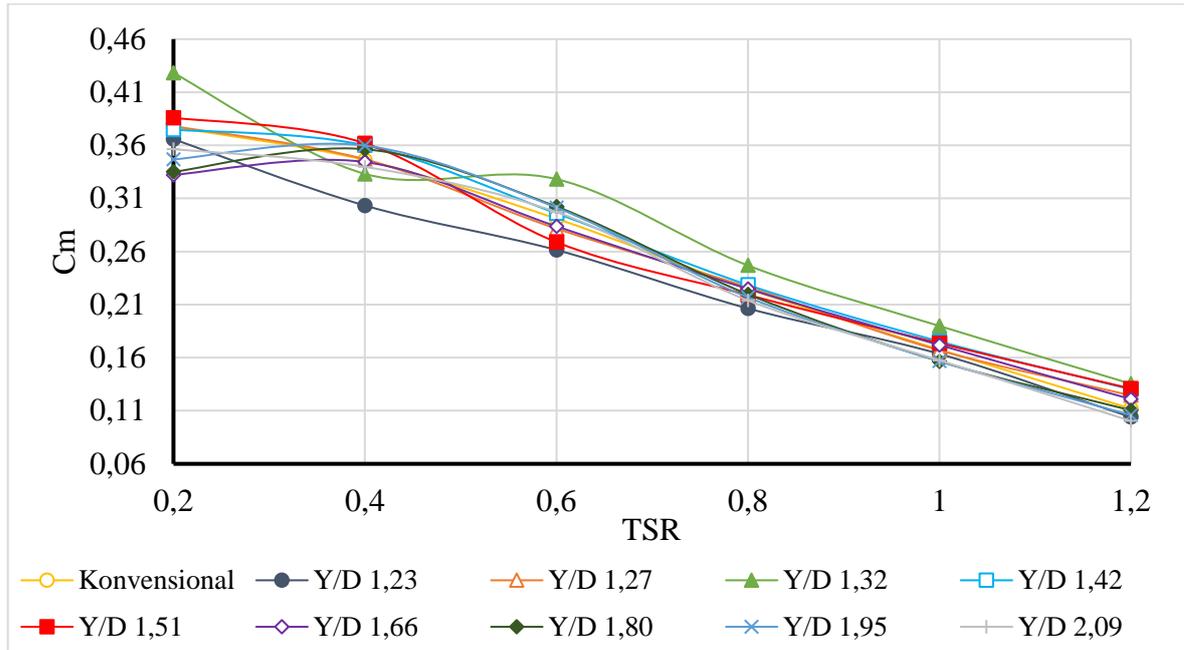
Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan C_p penelitian Sakti et al. (2019) dengan penelitian sekarang. Reynolds number sebesar 99.000 (kecepatan 5m/s) digunakan pada penelitian Sakti et al. (2019) begitu juga penelitian sekarang. Hasil komparasi menunjukkan bahwa penelitian sekarang memiliki nilai C_p yang lebih besar dengan error rata-rata 8,4%. Hal ini kemungkinan didasari oleh perbedaan metode penelitian yang digunakan, mengingat Sakti et al. (2019) menggunakan metode simulasi 3 Dimensi. Meskipun memiliki error yang cukup besar, trend grafik yang dihasilkan pada penelitian ini bisa menyesuaikan trend grafik penelitian Sakti et al. (2019).

4.2 Hasil Penelitian

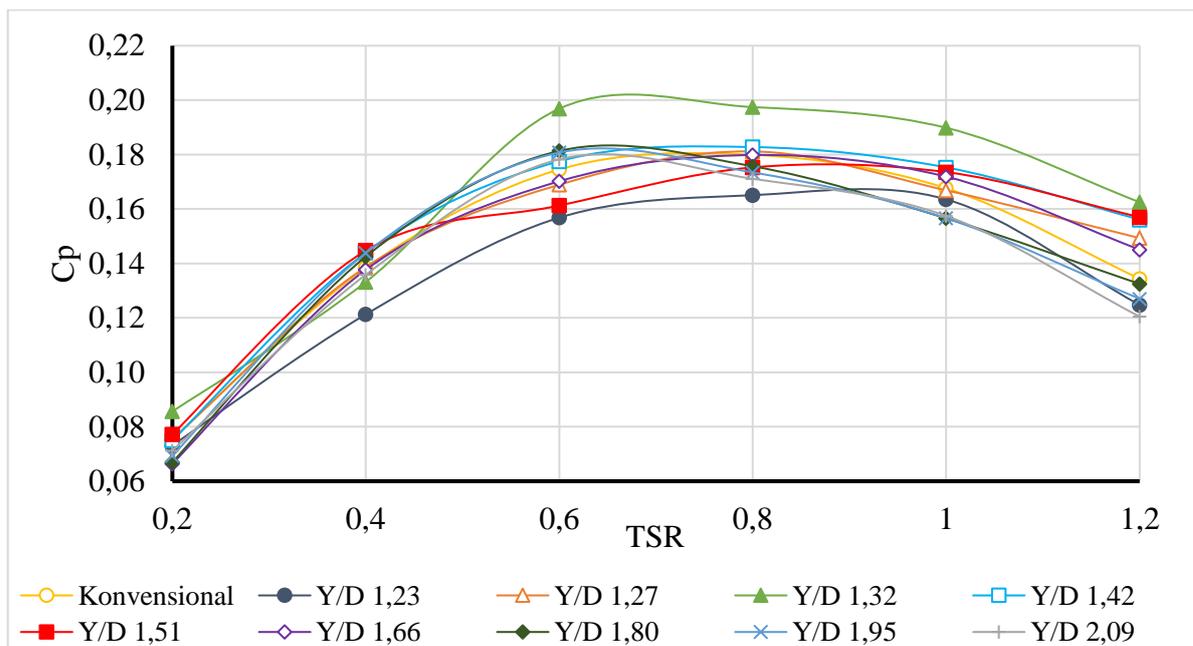
Sub bab berikut berisi tentang hasil penelitian yang telah dilakukan. Hasil tersebut antara lain koefisien momen (C_m), koefisien daya (C_p), kontur kecepatan, kontur tekanan, dan koefisien torsi statis (C_{ts}).

4.2.1 Nilai C_m dan C_p Setiap Variasi Kecepatan 4 m/s

Sub bab ini membahas Nilai C_m dan C_p seluruh variasi jarak pada kecepatan 4 m/s. Grafik yang dipaparkan menunjukkan peningkatan dan penurunan performa turbin angin Savonius dengan penambahan silinder sirkuler disamping *advancing blade*.



Gambar 4. 2 Grafik koefisien daya (C_m) seluruh variasi pada kecepatan 4m/s



Gambar 4. 3 Grafik koefisien daya (C_p) seluruh variasi pada kecepatan 4m/s

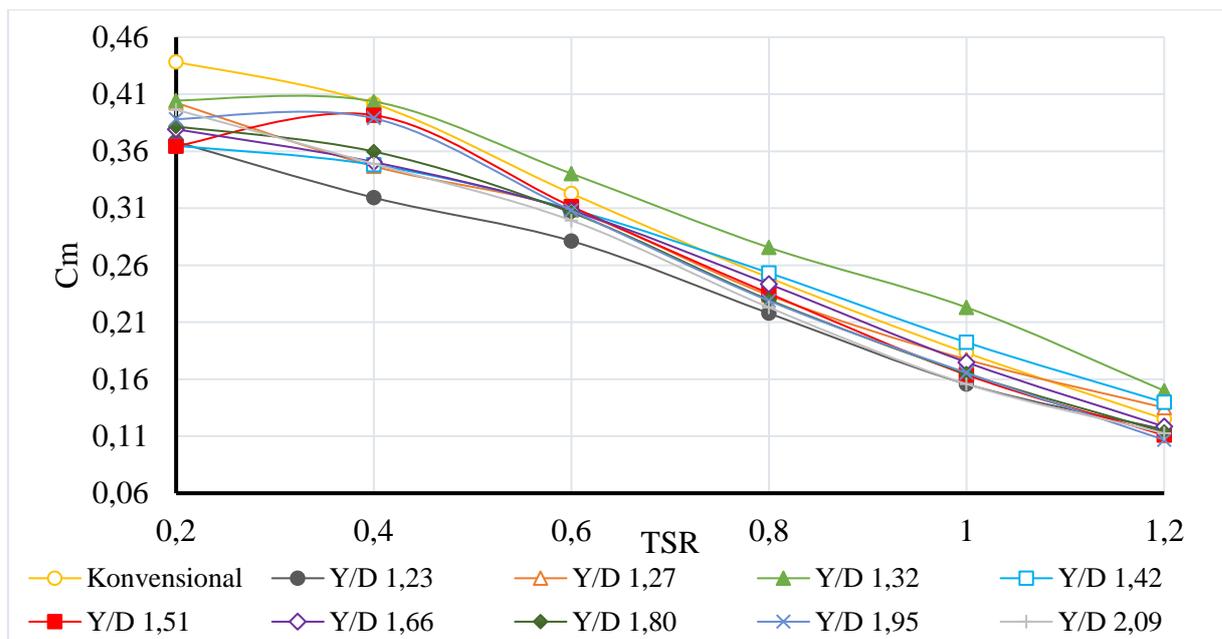
Gambar 4.2 dan gambar 4.3 menunjukkan peningkatan dan penurunan performa pada masing-masing variasi. Silinder dengan jarak Y/D 1,23 memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder, dimana Y/D 1,23 memiliki nilai penurunan performa sebesar 7,2%. Sedangkan Y/D 1,27 memiliki performa yang lebih tinggi dengan rata rata kenaikan sebesar 1,4%. Peningkatan selanjutnya terjadi pada Y/D 1,32 dengan nilai rata-rata peningkatan maksimal 11% atau peningkatan C_m hingga 20,9% pada TSR 1,2. Peningkatan pada jarak Y/D 1,32 dipengaruhi oleh efek *nozzle* dan *attached flow* serta tekanan stagnasi yang mengecil. Hal tersebut didukung oleh sub bab 4.2.6 yang membahas terkait kontur kecepatan dan tekanan.

Gambar tersebut menampilkan data bahwa pada jarak terpendek Y/D 1,23 memiliki performa lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder. Hal tersebut disebabkan oleh *base pressusre* yang terlalu besar pada sisi cembung *advancing blade* yang dibahas pada sub bab 4.2.6 pada analisis kontur tekanan. Setelah Y/D 1,32 performa akan mulai menurun. Jarak Y/D 1,42 dan 1,51 masih memiliki performa diatas turbin angin konvensional dengan kenaikan rata-rata sebesar 4,5% dan 2,8% secara berturut-turut. Hal tersebut menandakan melemahnya efek *nozzle* pada jarak Y/D 1,42 dan 1,51.

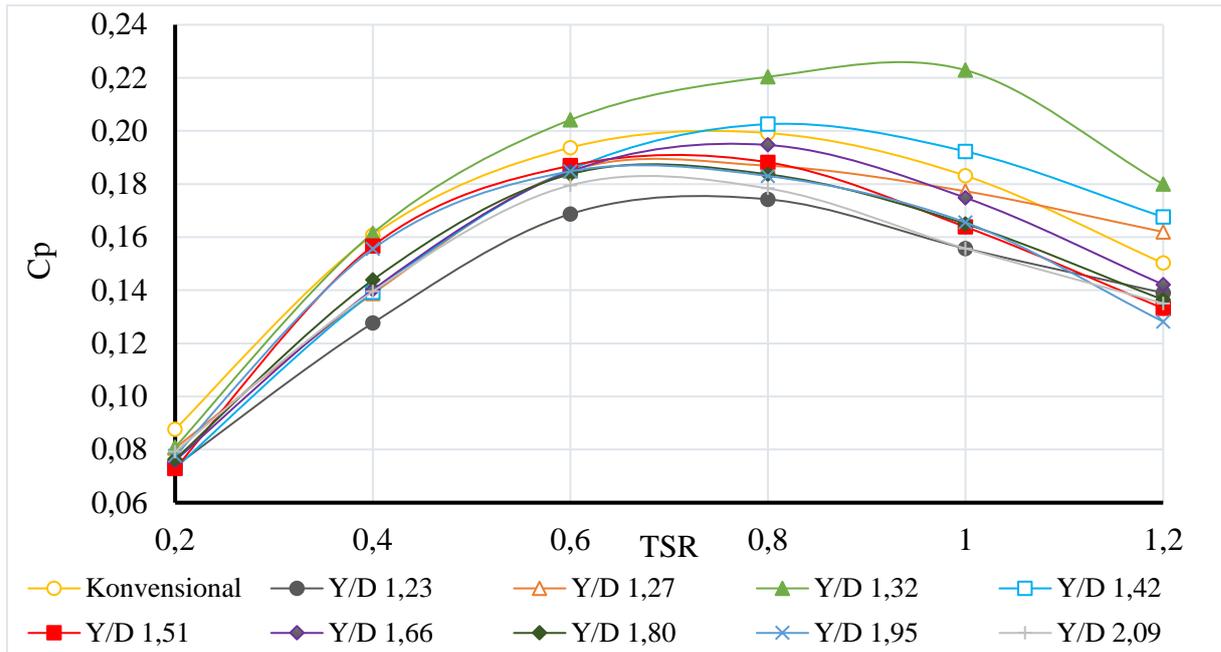
Lalu pemasangan dengan jarak Y/D diatas 1,51 memiliki performa yang lebih rendah atau bisa dikatakan hampir sama dengan turbin angin Savonius konvensional. Hal tersebut karena jarak yang terdekat memiliki tekanan stagnasi yang terkecil dan akan bertambah seiring menjauhnya jarak Y/D. Disamping itu, efek *nozzle* dan *attached flow* melemah. Pembahasan tersebut didukung oleh sub bab 4.2.6 yang membahas terkait kontur kecepatan dan tekanan.

4.2.2 Nilai C_m dan C_p Setiap Variasi Kecepatan 6 m/s

Sub bab ini membahas Nilai C_m dan C_p seluruh variasi jarak pada kecepatan 6 m/s. Grafik yang dipaparkan menunjukkan peningkatan dan penurunan performa turbin angin Savonius dengan penambahan silinder sirkuler disamping *advancing blade*.



Gambar 4. 4 Grafik koefisien daya (C_m) seluruh variasi pada kecepatan 6m/s



Gambar 4. 5 Grafik koefisien daya (C_p) seluruh variasi pada kecepatan 6m/s

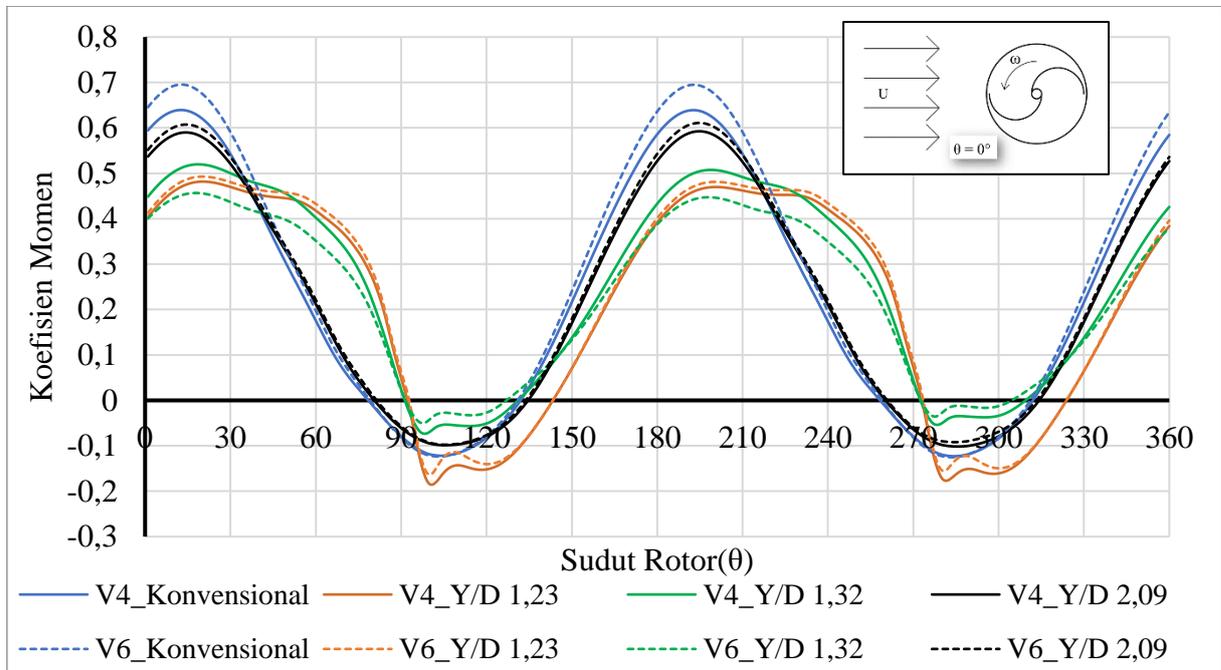
Gambar 4.4 dan gambar 4.5 menunjukkan penurunan dan peningkatan performa pada masing-masing variasi. Silinder dengan jarak Y/D 1,23 dan 1,27 memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder, dimana Y/D 1,23 memiliki nilai penurunan performa sebesar 14%. Sedangkan Y/D 1,27 memiliki rata-rata penurunan sebesar 4,6%. Peningkatan selanjutnya terjadi pada Y/D 1,32 dengan nilai rata-rata peningkatan performa hingga 8,3% atau peningkatan C_m sebesar 21,7% pada TSR 1,0. Peningkatan pada jarak Y/D 1,32 dipengaruhi oleh efek *nozzle* dan *attached flow* dan *base pressure* yang mengecil. Hal tersebut didukung oleh sub bab 4.2.6 yang membahas terkait kontur kecepatan dan tekanan.

Dari gambar 4.5 dan 4.6 dapat diamati bahwa pada jarak terpendek Y/D 1,23 memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan turbin angin Savonius tanpa silinder. Silinder yang terlalu dekat dengan sudu turbin menyebabkan besarnya momentum fluida yang masuk melalui celah dan meningkatkan *base pressure* sehingga memperbesar torsi negatif *advancing blade*. Dibuktikan dengan seiring menjauhnya jarak Y/D *base pressure* akan semakin mengecil, sehingga performa mulai naik hingga mencapai puncaknya pada Y/D 1,32. Hal tersebut dibahas lebih detail pada subab 4.2.6.

Pemasangan silinder dengan jarak diatas Y/D 1,32 dengan kecepatan 6 m/s memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan turbin angin konvensional. Penurunan performa tersebut tak lain karena meningkatnya tekanan stagnasi serta efek *nozzle* dan *attached flow* yang mulai melemah. Performa turbin angin Savonius pada jarak Y/D 1,42 memiliki penurunan C_m rata-rata sebesar 2,7%. Performa tersebut terus menurun seiring meningkatnya jarak Y/D hingga performa paling rendah pada Y/D 2,09 yaitu dengan penurunan C_m rata-rata sebesar 10,9%.

4.2.4 Analisis Torsi Dinamis Satu Putaran Turbin

Pada Sub bab ini dibahas torsi dinamis pada 1 revolusi terakhir turbin angin Savonius. Analisa ini ditujukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh silinder sirkuler terhadap posisi turbin angin Savonius



Gambar 4. 6 Toris dinamis kecepatan 4 dan 6 m/s pada variasi tanpa silinder, 1,23 ; 1,32 dan 2,09 pada TSR 0,8

Gambar 4.6 merupakan distribusi C_m pada satu putaran turbin angin Savonius pada jarak terpendek (Y/D 1,23), jarak optimal (Y/D 1,32) dan jarak terjauh (Y/D 2,09) pada penelitian ini. Pada jarak 1,23 sudut rotor 0, penambahan silinder akan mengurangi performa turbin angin Savonius hingga sudut rotor 38. Lalu menurut grafik, peningkatan terjadi pada sudut 40° hingga 100°. Jarak Y/D 1,32 memiliki trend grafik yang hampir sama dengan jarak 1,23. Namun Jarak Y/D 1,32 memiliki peningkatan yang lebih dini yaitu pada sudut 35 dan mulai turun pada sudut rotor 137. Hal tersebut membuktikan bahwa jarak Y/D 1,32 memiliki performa yang lebih baik dibandingkan jarak 1,23.

Berkurangnya torsi dinamis pada variasi 4 m/s sudut sekitar 30 jarak Y/D 1,23 dan 1,32 disebabkan oleh mengecilnya area *attached flow* dan peningkatan *base pressure*. Pada sudut 60, terdapat peningkatan yang signifikan yang disebabkan oleh membesarnya wilayah *attached flow* dan tekanan yang besar pada sisi cekung advancing blade. Pada sudut 90, performa Y/D 1,23 lebih rendah daripada konvensional. Meskipun kecepatan *nozzle* jauh lebih besar, tekanan stagnasi berkurang dan tekanan sisi cekung advancing bertambah, jarak Y/D 1,23 memiliki *base pressure* yang terlalu besar, berbeda dengan Y/D 1,32 dengan *base pressure* yang tidak terlalu besar.

Pada kecepatan 6 m/s, grafik hampir sama dengan variasi 4 m/s. Yang membedakan adalah pada tekanan stagnasi dan *base pressure* serta *attached flow* yang terjadi. Pada kecepatan 6m/s sudut 30, *attached flow* terbentuk dengan baik dan memiliki wilayah yang

besar dilihat pada tabel 4.3. Lalu tekanan stagnasi pada variasi 6m/s bertambah besar dan ketika diberi silinder dan *base pressure* semakin mengecil.

Pada gambar 4.6 Jarak terjauh (Y/D 2,09) memiliki trend grafik yang hampir sama dengan turbin angin Savonius tanpa silinder. Dimana jarak terjauh memiliki performa yang cenderung lebih rendah pada sudut rotor 0° hingga 40° dan 125° hingga 180°. Sudut rotor 41° hingga 124° memiliki performa yang cenderung sama.

4.2.5 Pengaruh Kecepatan dan Distribusi Hasil Torsi Dinamis

Pada sub bab ini dibahas distribusi peningkatan koefisien daya (C_p) yang dirangkum dalam bentuk tabel dan grafik. Dari Tabel dan grafik pada sub bab ini akan terlihat jelas bagaimana pengaruh penambahan silinder disamping *advancing blade* terhadap performa turbin angin Savonius.

Tabel 4. 1 Perbandingan koefisien daya ($C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$) turbin angin Savonius seluruh variasi.

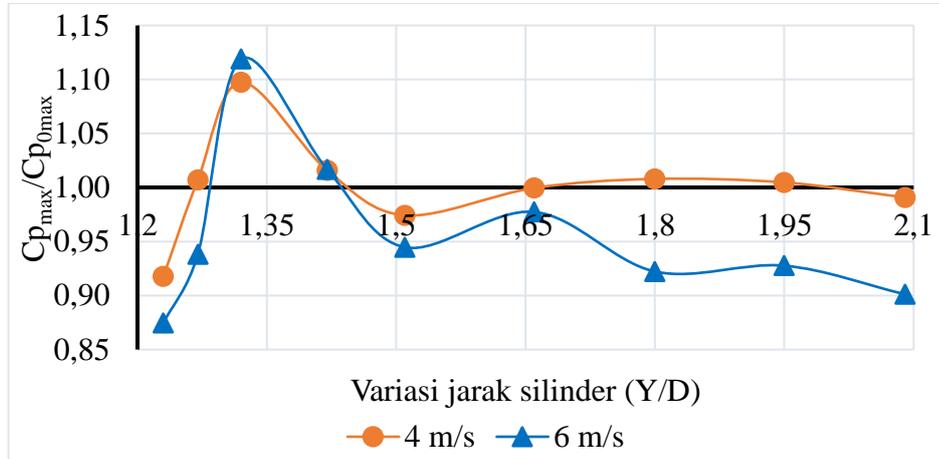
Jarak Y/D	$C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$	
	4 m/s	6 m/s
1,23	0,918	0,875
1,27	1,007	0,938
1,32	1,097	1,119
1,42	1,016	1,017
1,51	0,974	0,945
1,66	1,000	0,977
1,8	1,008	0,922
1,95	1,005	0,928
2,09	0,991	0,901

Keseluruhan hasil dirangkum pada tabel 4.1 dimana tabel tersebut berisi terkait peningkatan yang terjadi pada seluruh variasi kecepatan maupun jarak Y/D. Data tersebut didapatkan dari perbandingan C_p tertinggi dari tiap variasi jarak dengan C_p tertinggi turbin angin Konvensional ($C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$). Pada kecepatan 4 m/s, secara umum dapat dilihat bahwa $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$ memiliki nilai diatas satu. Hal tersebut menunjukkan penambahan silinder disamping *advancing blade* meningkatkan performa turbin angin Savonius. Dari tabel 4.1 terlihat bahwa peningkatan performa paling tinggi ada pada jarak Y/D 1,32 dengan nilai $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}} = 1,09$ untuk kecepatan 4 m/s. Sedangkan untuk kecepatan 6 m/s, performa paling tinggi terjadi pada jarak Y/D 1,32 dengan nilai $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}} 1,12$. Dengan demikian, dari tabel 4.1 secara umum dapat disimpulkan bahwa penempatan silinder sirkuler di dekat sudu *advancing* pada kecepatan angin 6 m/s memberikan peningkatan tertinggi relative terhadap turbin konvensional.

Gambar 4.7 memaparkan distribusi perbandingan koefisien daya ($C_{p_{max}}/CP_{0max}$) untuk setiap variasi jarak Y/D dan kecepatan inlet. Hasil $C_{p_{max}}/CP_{0max}$ yang memiliki nilai lebih dari 1 menandakan bahwa variasi tersebut memiliki peningkatan. Semakin besar hasil $C_{p_{max}}/CP_{0max}$ maka semakin besar peningkatan performa yang dihasilkan.

Pada variasi kecepatan 4 m/s, jarak terdekat (Y/D 1,23) $C_{p_{max}}/CP_{0max}$ memiliki nilai kurang dari 1 dengan performa terendah dibandingkan yang lainnya. Hal tersebut dibahas pada subab 4.2.6. Lalu, memiliki trend yang naik hingga variasi jarak Y/D 1,32. Jarak tersebut

merupakan jarak optimal untuk menghasilkan performa paling tinggi. Semakin lebar jarak trend akan semakin menurun, yang menandakan performa mulai melamah. Pada jarak Y/D 1,66 dan seterusnya trend grafik yang cenderung konstan. Trend grafik yang konstan tersebut, terjadi karena penambahan silinder pada jarak tersebut tidak memiliki pengaruh yang berarti.



Gambar 4.7 Perbandingan koefisien daya ($C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$) turbin angin Savonius seluruh variasi.

Variasi kecepatan 6 m/s memiliki trend yang hampir sama dengan kecepatan 4m/s. Yang membedakan adalah fenomena yang terjadi setelah jarak Y/D 1,66. Setelah jarak tersebut, trend grafik cenderung menurun hingga Y/D 2,09. Hal menunjukkan bahwa penempatan silinder masih berpengaruh terhadap performa rotor pada kecepatan 6 m/s. Fenomena yang mungkin terjadi adalah apabila kecepatan inlet diperbesar, maka momentum udara di celah antara silinder dan *advancing blade* akan semakin besar, sehingga *base pressure*, tekanan stagnasi dan fenomena lainnya memiliki efek yang lebih kuat terhadap pemasangan silinder disamping *advancing blade*.

Meskipun pada sub bab 4.2.1 dan 4.2.2 menunjukkan bahwa variasi 6m/s memiliki performa yang lebih baik, namun gambar 4.1 menunjukkan bahwa variasi kecepatan 4m/s memiliki peningkatan yang lebih baik hampir pada seluruh variasi Y/D kecuali pada Y/D 1,32.

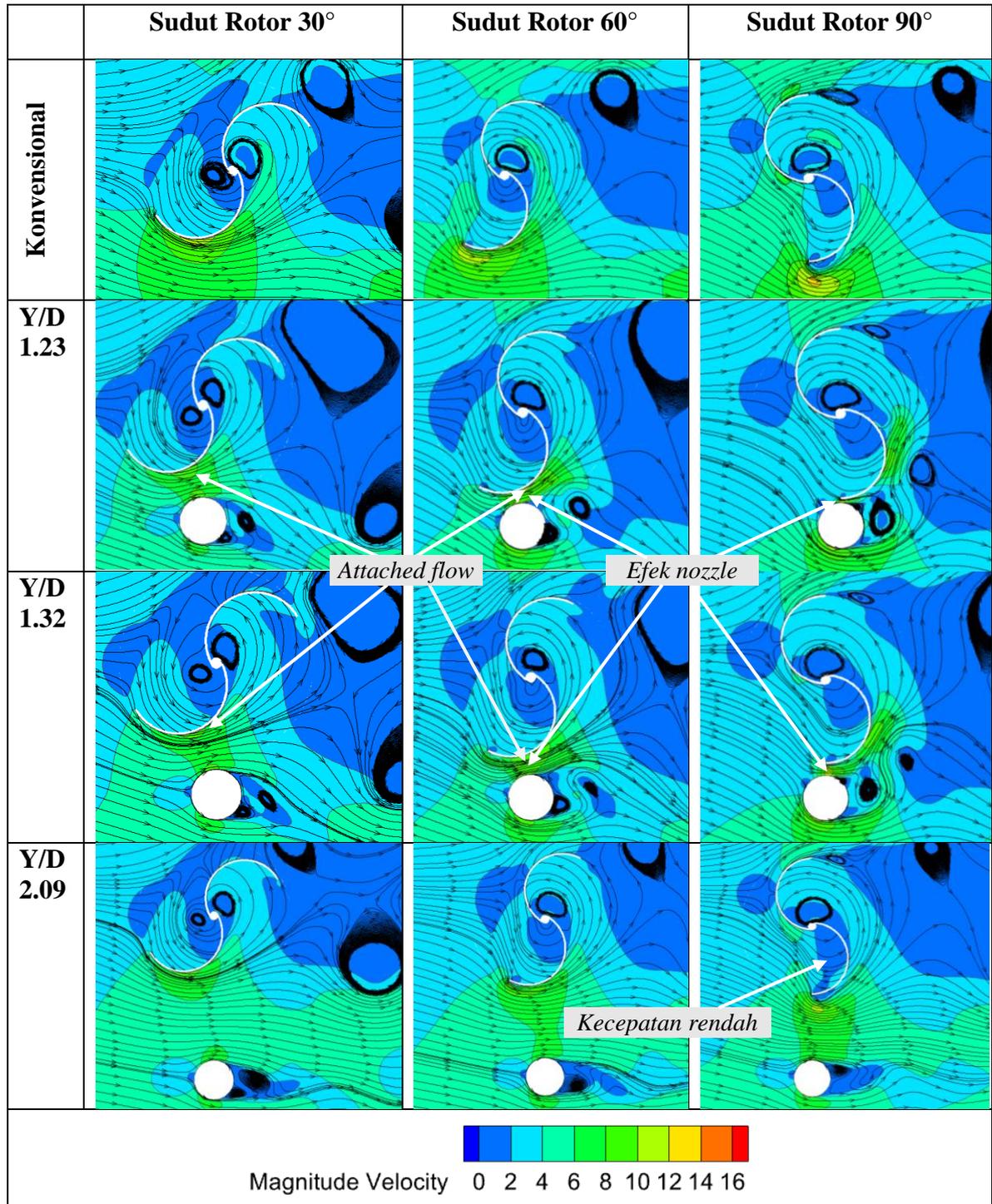
4.2.6 Analisis Kontur Kecepatan & Tekanan

Pada sub bab ini dibahas terkait kontur kecepatan dan tekanan yang menyebabkan naik dan turunnya performa turbin angin Savonius. Sudut rotor 30° , 60° , dan 90° diambil karena pada posisi 30° itulah rotor mulai menghasilkan momen terbesar. Posisi rotor 60° diambil karena *attached flow* terlihat jelas dan mudah dianalisis. Sudut rotor 90° adalah sudut yang menghasilkan celah paling sempit antara sudu *advancing* dan siliner sirkuler, dimana celah tersebut menghasilkan efek *nozzle*.

Pada analisa ini dibuktikan bahwa jarak Y/D 1.32 memilki performa yang terbaik dari masing masing kecepatan. Hal tersebut terbukti ketika pada sudut 60° terjadi peningkatan torsi dinamis yang sangat tinggi. Peningkatan disebabkan oleh meningkatnya efek *nozzle* yang menempel pada sisi cembung *advancing blade*. Atau dengan kata lain *attached flow* dengan kecepatan yang tinggi. Disamping itu kecepatan aliran yang tinggi menyebabkan tekanan sisi cembung *advancing blade* turun, sehingga mengurangi torsi negative. Pada sisi

cekung *advancing* juga terjadi peningkatan tekanan. Efek *nozzle* dan *attached flow* pada sisi cembung *advancing blade* serta meningkatnya tekanan pada sisi cekung *advancing blade* menyebabkan peningkatan torsi positif yang signifikan. Detail dari analisis tersebut dapat dilihat pada tabel kontur dibawah

Tabel 4.2 Kontur kecepatan 4m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°



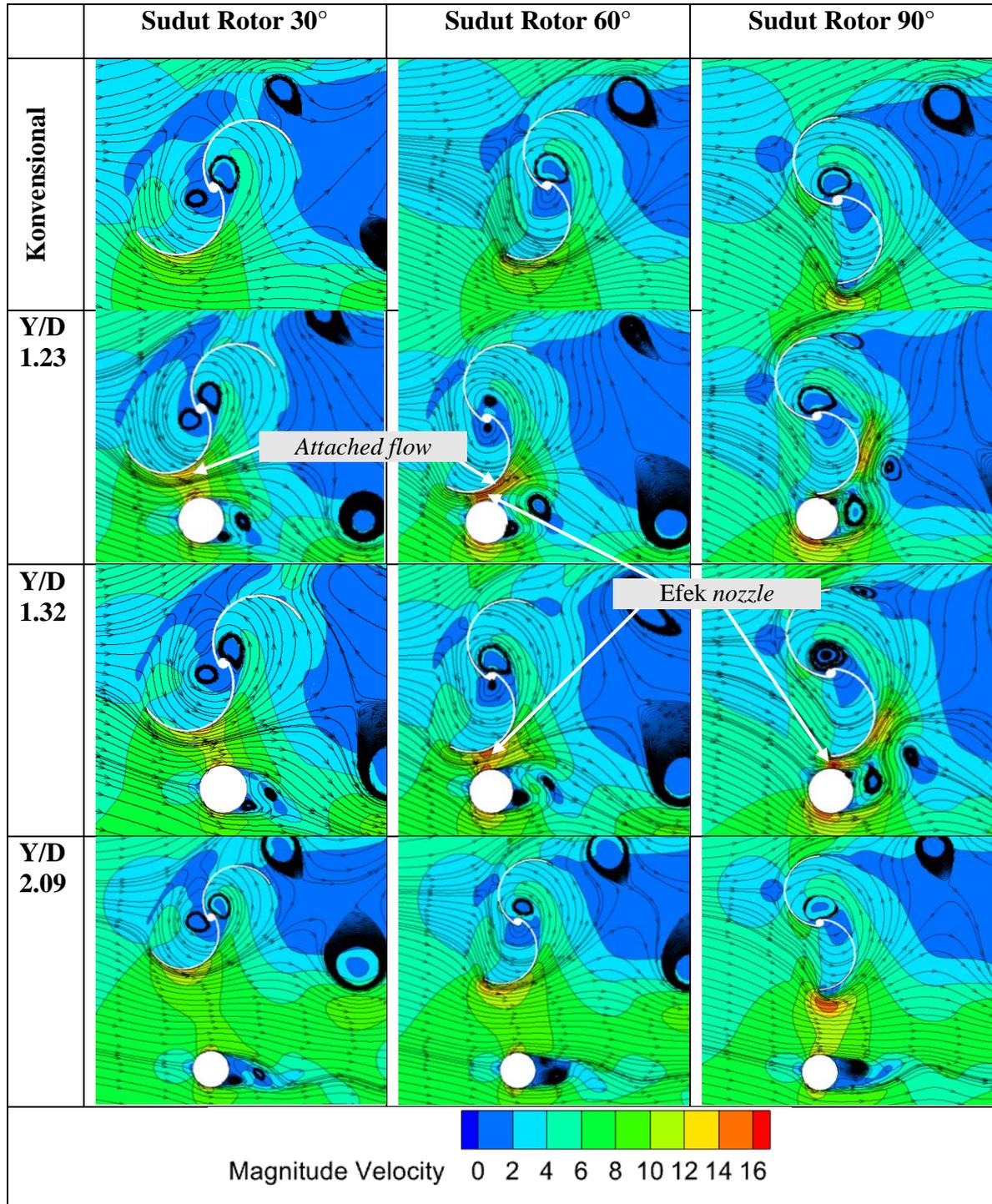
Pada table 4.2 Jarak Y/D 1.32 yang merupakan jarak optimal menghasilkan kecepatan *nozzle* hingga 10,9 m/s. Celah yang dihasilkan jarak Y/D 1.32 memberi cukup momentum

kepada turbin angin Savonius. *Attached flow* terjadi pada sudut 30° serta 60° yang ditandai dengan menempelnya kumpulan streamline pada sisi cembung *advancing blade*. Efek *nozzle* akan mempercepat aliran angin, dimana lebih cepat aliran angin maka tekanan pada titik tersebut akan semakin rendah.

Jarak Y/D 2.09 silinder menurunkan performa turbin angin Savonius. Hal tersebut disebabkan oleh hilangnya torsi positif pada sisi cekung *advancing blade*. Hilangnya torsi positif dapat diperhatikan dengan membandingkan sudut 90° turbin angin Savonius konvensional dengan Y/D 2.09. Terlihat bahwa sisi cekung *advancing blade* diselimuti oleh kontur yang berwarna biru tua dengan angka +2 yang berarti kecepatan rendah.

Tabel 4.2 menggambarkan perbandingan jarak kontur kecepatan dan streamline pada turbin angin Savonius konvensional dengan jarak terdekat (Y/D 1.23), jarak optimal (Y/D 1.32) dan jarak terjauh (Y/D 2.09) pada kecepatan 4m/s. Pada jarak 1.23 performa turbin angin Savonius menurun dengan nilai $C_{p_{max}}/C_{p_{0max}}$ 0,918. Jarak yang terlalu sempit menyebabkan besarnya momentum fluida yang masuk melalui celah dan meningkatkan kecepatan *nozzle* mencapai 11,4 m/s, sehingga hal tersebut meningkatkan base pressure, menyebabkan torsi negatif pada *advancing blade* memiliki nilai yang besar. Hal tersebut tampak jelas pada pembahasan kontur tekanan. Disamping itu *attached flow* pada sudut 30° memiliki wilayah yang menyempit yang menandakan berkurangnya *attached flow* pada sudut 30° Y/D 1,23.

Tabel 4.3 Kontur kecepatan 6m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°

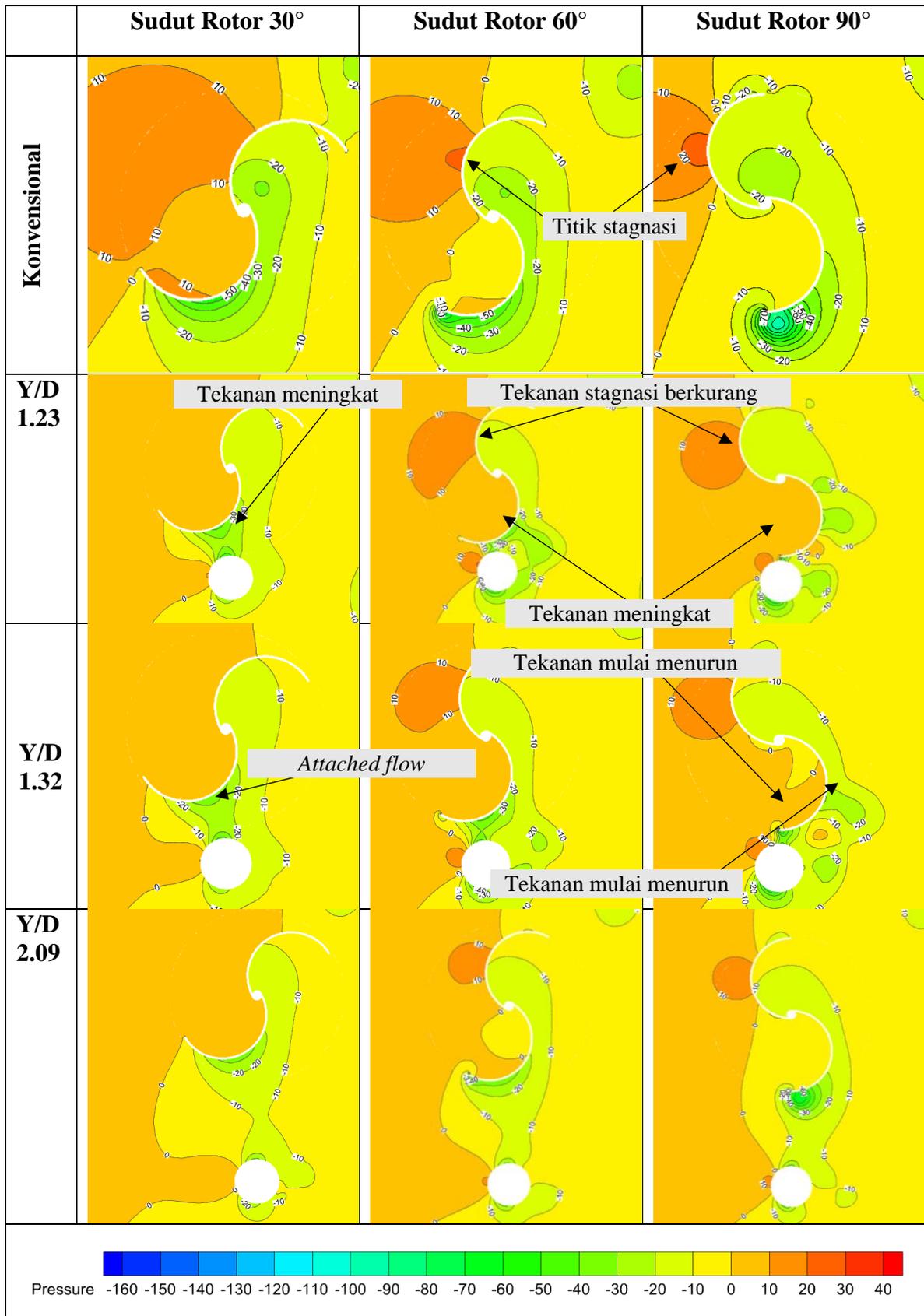


Tabel 4.3 berisi perbandingan jarak kontur kecepatan dan streamline pada turbin angin Savonius konvensional dengan jarak terdekat (Y/D 1.23), jarak optimal (Y/D 1.32) dan jarak terjauh (Y/D 2.09) pada kecepatan 6m/s. Pada jarak 1.23 performa turbin angin Savonius menurun hingga 14% hal tersebut dipengaruhi *base pressure*. Aliran yang terlalu cepat pada celah antara *advancing blade* dengan silinder akan menyebabkan tingginya momentum aliran dan meningkatkan *base pressure*. Sehingga, torsi negative sudu *advancing blade* meningkat dan mengurangi performa rotor.

Jarak Y/D 1.32 yang merupakan jarak optimal menghasilkan kecepatan *nozzle* hingga 16,6 m/s. Celah yang dihasilkan jarak Y/D 1.32 memberi cukup momentum kepada turbin angin Savonius. *Attached flow* juga terjadi pada sudut 30° serta 60° yang ditandai dengan menempelnya kumpulan streamline pada sisi cembung *advancing blade*. Efek *nozzle* akan mempercepat aliran angin, dimana lebih cepat aliran angin maka tekanan pada titik tersebut akan semakin rendah.

Pada tabel 4.3 jarak Y/D 2.09 memiliki kontur yang hampir sama dengan turbin angin Savonius konvensional. Meskipun pada sudut 90, jarak tersebut memiliki aliran yang jauh lebih cepat pada celah antara *advancing blade* dengan silinder. Pada celah antara silinder sirkuler dan rotor, terbentuk efek *nozzle* dengan kecepatan hingga 15,8 m/s.

Tabel 4.4 Kontur tekanan untuk kecepatan 4m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°



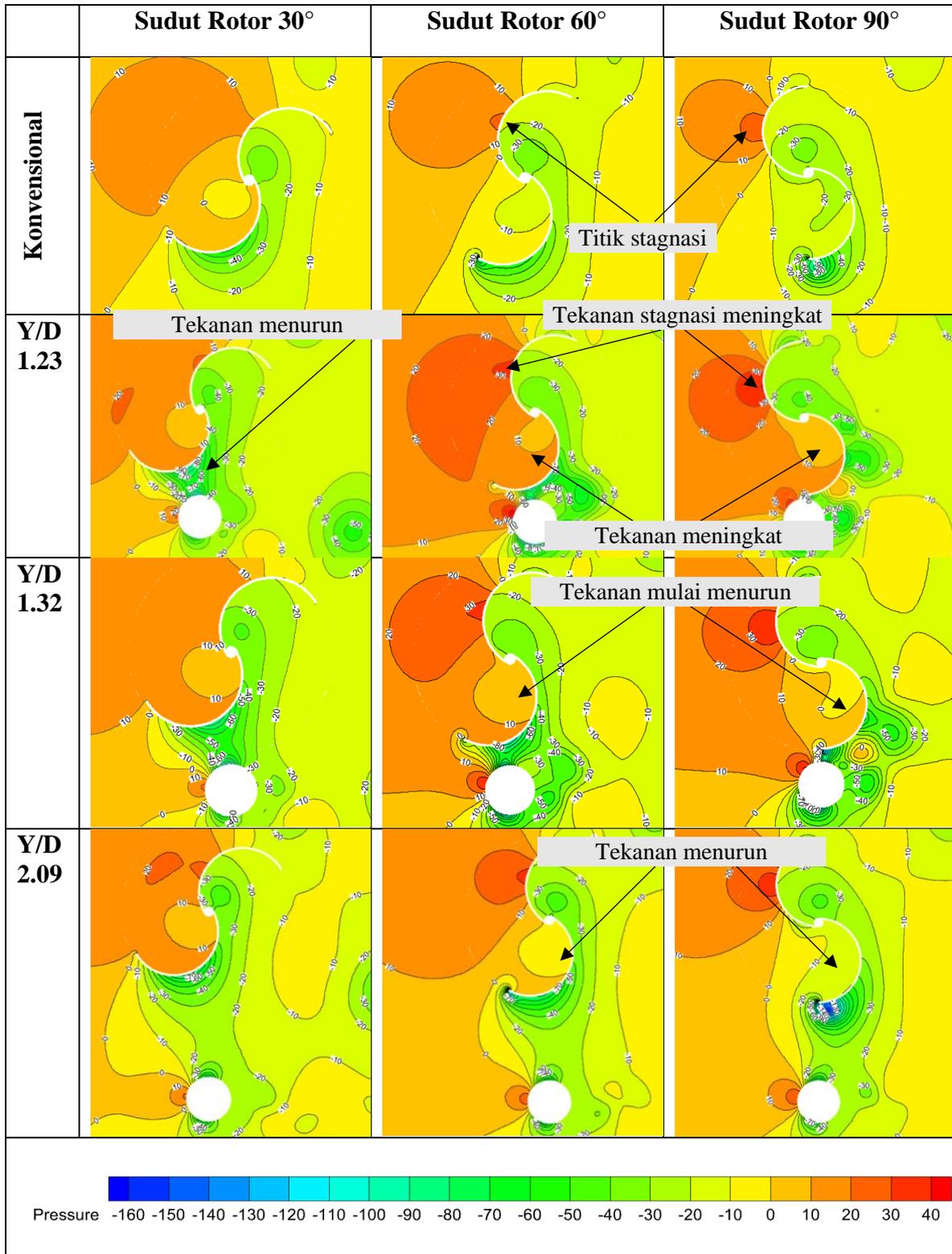
Tabel 4.4 merupakan perbandingan tekanan pada variasi jarak terdekat (Y/D 1,23), jarak optimal (Y/D 1,32), dan jarak terjauh (Y/D 2,09) dengan kecepatan 4m/s. Pada keseluruhan variasi, penambahan silinder dapat menurunkan tekanan stagnasi sisi cembung *returning blade*. Hal tersebut dapat dilihat pada kontur tekanan yang semakin mengecil pada sisi cembung *returning blade*. Ditunjukkan pula dengan label kontur pada sudut 90° yang semakin berkurang, dimana bila tanpa silinder menunjukkan angka +20 (konvensional) dan setelah penambahan silinder (Y/D 1,23) berkurang menjadi +10. Semakin jauh jarak Y/D, tekanan stagnasi yang dihasilkan semakin kecil.

Pada keseluruhan variasi, penambahan silinder akan memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dimana hal tersebut akan memperbesar torsi positif dan meningkatkan daya rotor. Tampak tekanan menjadi 0° pada sudut 60° Y/D 1,23 yang sebelumnya adalah -10 ketika tanpa silinder. Ketika jarak semakin menjauh, tekanan pada sisi cekung *advancing blade* juga semakin berkurang. Tampak pada sudut 60° Y/D 2,09 yang dikelilingi kontur tekanan +10, yang sebelumnya dikelilingi kontur tekanan 0 pada jarak Y/D 1,32. Hal tersebut membuktikan bahwa sub bab 4.2.4 memiliki nilai yang benar pada sudut 60°.

Penambahan silinder memperbesar *base pressure* pada kecepatan 4m/s. *Base pressure* adalah tekanan pada sisi cembung *advancing blade*. Hal tersebut tampak jelas pada sudut 90° tanpa silinder dimana sisi cembung dikelilingi tekanan -20 lalu Ketika penambahan silinder jarak Y/D 1,23 tekanan menjadi -10 dan di Sebagian kecil titik ada pula yang memiliki tekanan 0°. Efek *nozzle* terjadi ditandai dengan kecilnya tekanan pada Sebagian kecil wilayah sisi cembung *advancing blade*. Namun tetap saja, di Sebagian besar wilayah memiliki tekanan lebih besar. Semakin jauh jarak Y/D, *base pressure* semakin mengecil.

Pada intinya jarak Y/D 1,32 memiliki performa yang optimal karena memiliki titik stagnasi yang tidak sebesar Y/D 1,23 dan memiliki tekanan sisi cekung *advancing blade* yang tidak sekecil 2,09. Jarak Y/D 1,32 juga memiliki tekanan sisi cembung *advancing* yang tidak sebesar Y/D 1,23.

Tabel 4. 5 Kontur tekanan untuk kecepatan 6m/s variasi Y/D 1,23 ; 1,32 ; dan 2.09 pada sudut rotor 30°, 60°, dan 90°



Tabel 4.5 merupakan perbandingan tekanan pada variasi jarak terdekat (Y/D 1,23), jarak optimal (Y/D 1,32), dan jarak terjauh (Y/D 2,09) dengan kecepatan 6m/s. Pada keseluruhan variasi, penambahan silinder meningkatkan tekanan stagnasi. Hal tersebut dapat dilihat pada kontur tekanan yang membesar pada sisi cembung *returning blade*. Ditunjukkan

pula dengan label kontur pada sudut 90° yang semakin pekat dan besar, dimana tadinya dikelilingi tekanan dengan angka +20 (konvensional) dan setelah penambahan silinder (Y/D 1,23) meningkat menjadi +30. Semakin jauh jarak Y/D, tekanan stagnasi yang dihasilkan semakin kecil.

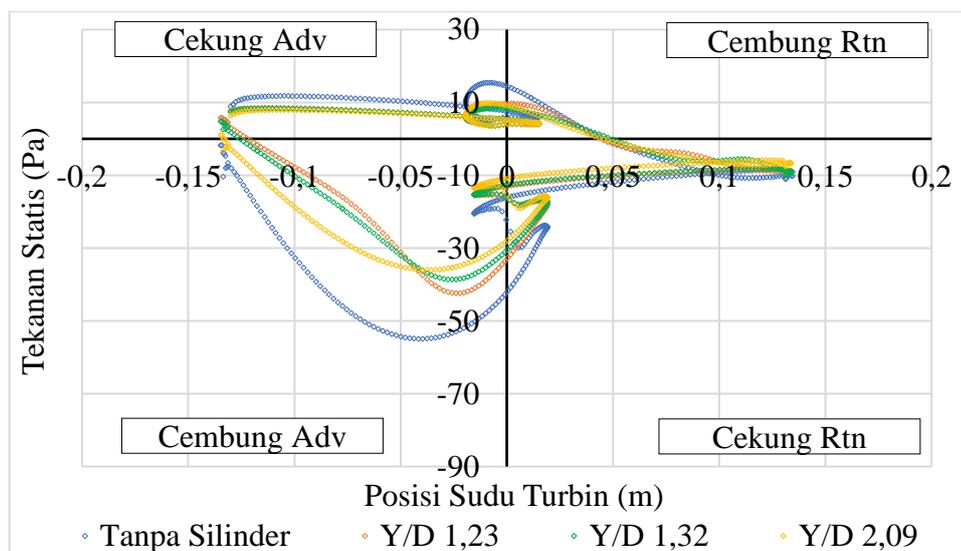
Pada keseluruhan variasi, penambahan silinder akan memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dimana hal tersebut akan memperbesar torsi positif dan meningkatkan daya rotor. Tampak tekanan menjadi +10 pada sudut 60° Y/D 1,23 yang sebelumnya dikelilingi label -10 ketika tanpa silinder. Ketika jarak semakin menjauh, tekanan pada sisi cekung *advancing blade* juga semakin berkurang. Tampak pada sudut 60° Y/D 2,09 yang dikelilingi kontur tekanan 0° , yang sebelumnya dikelilingi kontur tekanan +10 pada jarak Y/D 1,32.

Penambahan silinder pada kecepatan 6 m/s memperkecil *base pressure* pada sisi cembung *advancing blade*. Hal tersebut tampak jelas pada sudut 90° tanpa silinder dimana sisi cembung dikelilingi tekanan -20 lalu Ketika penambahan silinder tekanan mengecil pada Sebagian besar sisi cembung *advancing* dengan nilai -30 dan Sebagian kecil memiliki nilai -70. Efek *nozzle* terjadi ditandai dengan kecilnya tekanan pada sebagian kecil wilayah sisi cembung *advancing blade*.

Pada intinya jarak Y/D 1,32 memiliki performa yang optimal karena memiliki titik stagnasi yang tidak sebesar Y/D 1,23 dan memiliki tekanan di sisi cekung *advancing blade* yang tidak sekecil 1,23. Jarak Y/D 1,32 juga memiliki tekanan sisi cembung *advancing* yang tidak sebesar Y/D 2,09

4.2.7 Tekanan pada turbin angin Savonius

Pada sub bab ini dipaparkan grafik tekanan statis (Pa) terhadap sudu turbin Savonius. Turbin angin Savonius pada penelitian ini memiliki jari-jari 0,1555m dengan panjang total 0,311m. Sumbu x negative merupakan sisi cekung dan cembung *advancing blade*. Sedangkan sumbu positif merupakan sisi cekung dan cembung *returning blade*. Titik titik pada grafik merepresentasikan posisi turbin dan besarnya tekanan yang ada pada posisi tersebut.

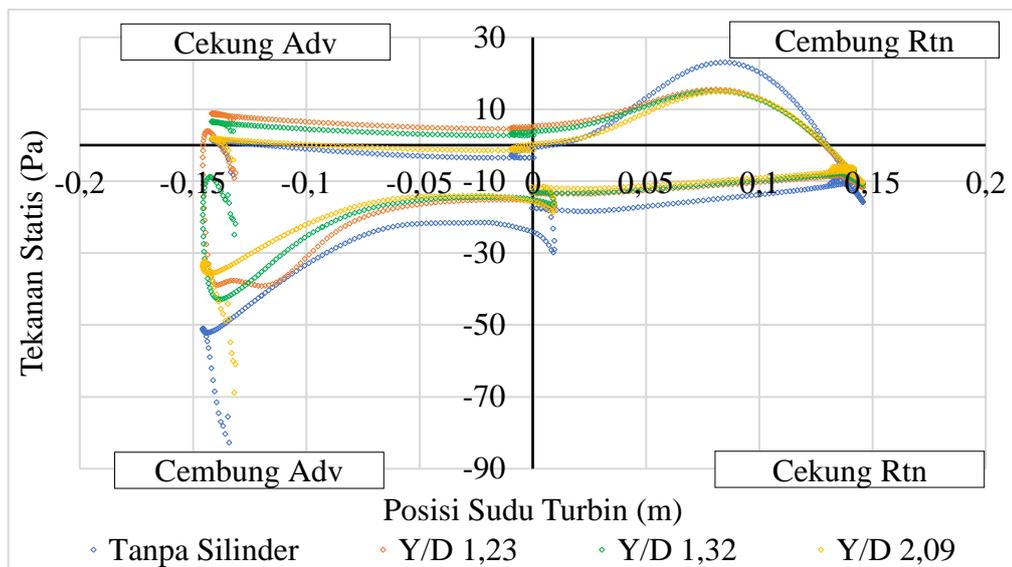


Gambar 4. 7 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 30° kecepatan 4 m/s

Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 30° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperkecil tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dengan ketiga nilai Y/D memiliki tekanan yang relatif sama. Pada sisi cembung *advancing blade*, penambahan silinder memperbesar tekanan. Terlihat pada gambar tersebut bahwa terjadi peningkatan tekanan yang signifikan. Nilai Y/D 1,32 memiliki nilai diantara Y/D 1,23 dan 2,09 dimana pada suatu titik nilai Y/D 1,23 lebih tinggi dari pada Y/D 2,09 lalu pada titik lain berkebalikan. Turunnya tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dan naiknya tekanan pada sisi cembung tersebut menandakan penurunan torsi positif turbin angin Savonius.

Pada sisi cekung *returning blade*, silinder menyebabkan meningkatnya tekanan. Peningkatan tersebut tidak terlalu signifikan. Pada sisi cembung tampak pula peningkatan tekanan pada ujung blade dan penurunan tekanan pada posisi setelah 0,05m. Peningkatan kecil pada sisi cekung menandakan meningkatnya torsi positif.

Pembahasan ini relevan dengan sub bab 4.2.4 dimana pada sudut 30° , penambahan silinder akan menurunkan performa turbin angin Savonius.



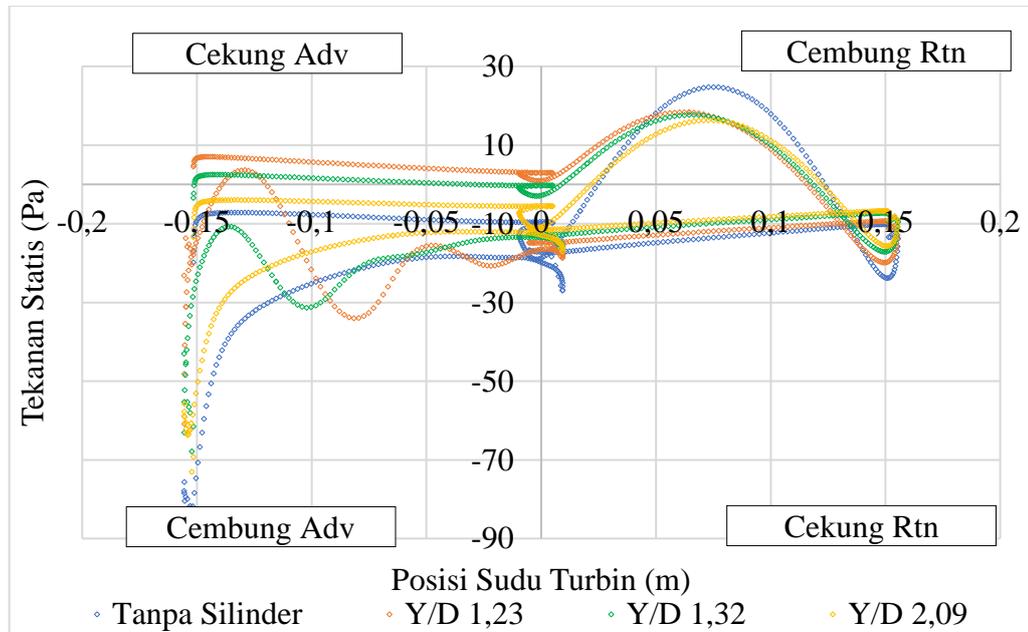
Gambar 4. 8 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 60° kecepatan 4 m/s

Gambar 4.8 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 60° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dengan nilai tertinggi hingga terendah secara berturut turut terjadi pada Y/D 1,23 1,32 dan 2,09. Pada sisi cembung *advancing blade*, penambahan silinder memperbesar tekanan. Terlihat pada gambar tersebut bahwa terjadi peningkatan tekanan yang signifikan. Peningkatan pada sisi cembung menurunkan torsi positif. Namun pada sudut 60 terjadi peningkatan pada sisi cekung *advancing blade* yang berarti torsi positif meningkat.

Pada sisi cekung *returning blade*, silinder menyebabkan meningkatnya tekanan dengan besar tekanan relative sama pada setiap variasi jarak Y/D. Pada sisi cembung *returning blade* terjadi penurunan tekanan stagnasi yang signifikan pada keseluruhan variasi

jarak Y/D. Peningkatan tekanan pada sisi cekung *returning blade* dan penurunan tekanan pada sisi cembung *returning blade* memperbesar torsi positif

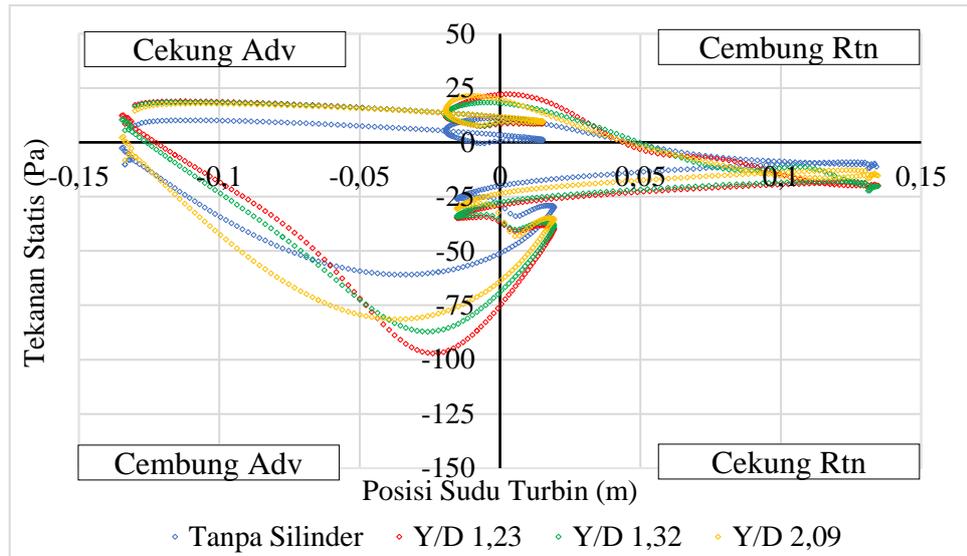
Pembahasan diatas relevan dengan sub bab 4.2.4. Dimana pada posisi 60 memiliki torsi peningkatan momen yang sangat besar. Hal tersebut disebabkan oleh meningkatnya torsi positif pada sisi cekung *advancing blade* dan *returning blade*, serta penurunan tekanan stagnasi yang signifikan.



Gambar 4. 9 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 90° kecepatan 4 m/s

Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 90° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dengan nilai tertinggi hingga terendah secara berturut turut terjadi pada Y/D 1,23 1,32 dan 2,09. Pada sisi cembung *advancing blade* terdapat fluktuasi tekanan relative terhadap tekanan rotor tanpa silinder. Pada ujung rotor Y/D 1,23 memiliki tekanan yang lebih kecil dari pada Y/D 1,32 sedangkan pada posisi tengah sudu hingga rotor berlaku sebaliknya. Tekanan sisi cembung pada jarak Y/D 2,09 memiliki trend yang hampir sama dengan rotor tanpa silinder, hanya saja memiliki tekanan yang lebih besar.

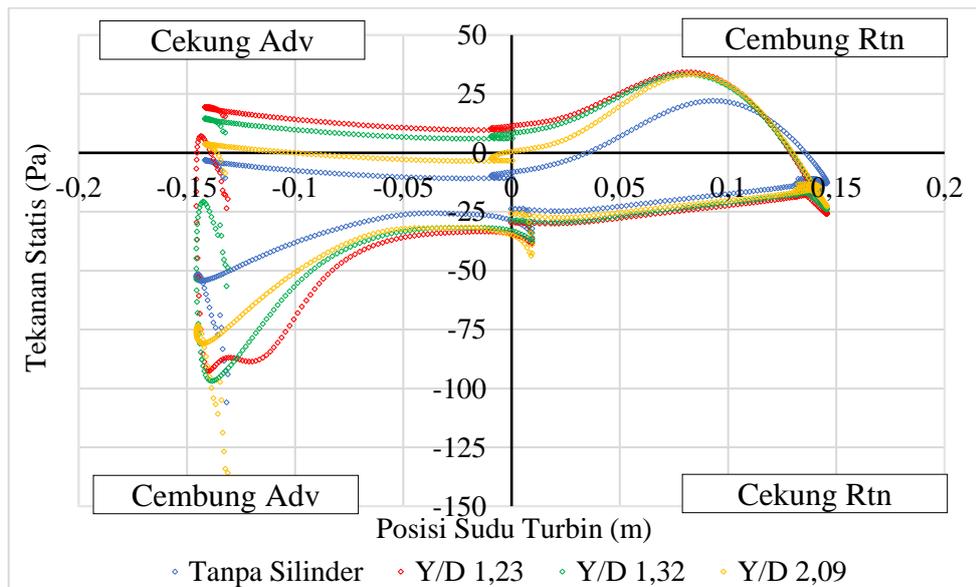
Tekanan pada sisi cekung *returning blade* membesar dengan peningkatan terbesar pada Y/D 2,09 lalu Y/D 1,32 dan 1,23. Pada sisi cembung *returning blade*, penambahan silinder menurunkan tekanan stagnasi. Meningkatnya tekanan pada sisi cekung dan turunnya tekanan pada sisi cembung memperbesar torsi positif yang meningkatkan momen. Hal tersebut sesuai dengan sub bab 4.2.4 pada sudut 90. Nilai Y/D 2,09 seringkali memiliki posisi dengan nilai yang berhimpit dengan rotor konvensional atau tanpa silinder. Hal tersebut menyebabkan pada sudut 90 tidak terjadi perubahan torsi dinamis yang signifikan.



Gambar 4. 10 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 30° kecepatan 6 m/s

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 30° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperbesar tekanan Pada sisi cekung *advancing blade* dengan ketiga nilai Y/D memiliki tekanan yang relatif sama. Pada sisi cembung *advancing blade*, penambahan silinder memperbesar tekanan Y/D 1,23 dan 1,32 pada ujung hingga tengah rotor dan memperkecil tekanan pada Y/D 2,09.

Pada sisi cekung *returning blade*, silinder menyebabkan turunnya tekanan. Pada sisi cembung tampak pula penurunan tekanan pada ujung blade dan meningkatnya tekanan pada posisi setelah 0,05m. Peningkatan kecil pada sisi cekung menandakan meningkatnya torsi positif. Pembahasan ini relevan dengan sub bab 4.2.4 dimana pada sudut 30, penambahan silinder akan menurunkan performa turbin angin Savonius.

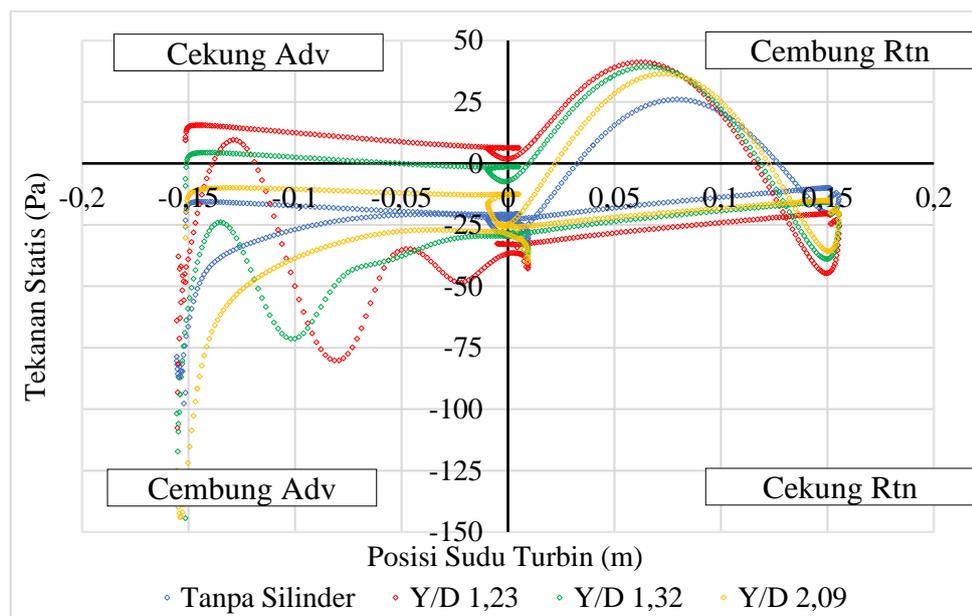


Gambar 4. 11 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 60° kecepatan 6 m/s

Gambar 4.11 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 60° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dengan nilai tertinggi hingga terendah secara berturut turut terjadi pada Y/D 1,23 1,32 dan 2,09. Pada sisi cembung *advancing blade*, penambahan silinder memperkecil tekanan. Terlihat pada gambar tersebut bahwa terjadi penurunan tekanan yang signifikan dengan penurunan terendah pada Y/D 1,23 diikuti 1,32 dan 2,09.

Pada sisi cekung *returning blade*, silinder menyebabkan turunnya tekanan yang tidak signifikan dengan nilai tekanan yang relative sama pada setiap variasi jarak Y/D. Pada sisi cembung *returning blade* terjadi peningkatan tekanan yang signifikan pada keseluruhan variasi jarak Y/D.

Dari analisa diatas diketahui bahwa penambahan silinder menyebabkan peningkatan torsi positif yang terjadi pada kedua sisi *advancing blade* dan penurunan torsi positif pada kedua sisi *returning blade*. Namun, apabila dilihat dari grafik sisi *advancing* memiliki peningkatan yang signifikan pada kedua sisi, dibandingkan *returning blade* yang memiliki penurunan pada satu sisi.



Gambar 4. 12 Tekanan statis turbin angin Savonius pada sudut 90° kecepatan 6 m/s

Gambar 4.12 menunjukkan pengaruh penambahan silinder terhadap tekanan pada sudu turbin pada sudut 90° keseluruhan variasi jarak Y/D. Gambar tersebut menunjukkan bahwa penambahan silinder memperbesar tekanan pada sisi cekung *advancing blade* dengan nilai tertinggi hingga terendah secara berturut turut terjadi pada Y/D 1,23 1,32 dan 2,09. Pada sisi cembung *advancing blade* terdapat fluktuasi tekanan relatif terhadap tekanan rotor tanpa silinder. Pada ujung rotor Y/D 1,23 memiliki tekanan yang lebih besar dari pada Y/D 1,32 sedangkan pada posisi tengah sudu hingga rotor berlaku sebaliknya. Tekanan sisi cembung pada jarak Y/D 2,09 memiliki trend yang hampir sama dengan rotor tanpa silinder, hanya saja memiliki tekanan yang lebih kecil. Tekanan pada sisi cekung *returning blade* menurun dengan nilai terkecil pada Y/D 1,23 lalu Y/D 1,32 dan 2,09. Pada sisi cembung *returning blade*,

penambahan silinder meningkatkan tekanan. Meningkatnya tekanan pada sisi cekung dan turunnya tekanan pada sisi cembung memperbesar torsi positif yang meningkatkan momen. Hal tersebut sesuai dengan sub bab 4.2.4 pada sudut 90. Nilai Y/D 2,09 seringkali memiliki posisi dengan nilai yang berhimpit dan trend yang hampir sama dengan rotor konvensional atau tanpa silinder. Hal tersebut menyebabkan pada sudut 90 tidak terjadi perubahan torsi dinamis yang signifikan.

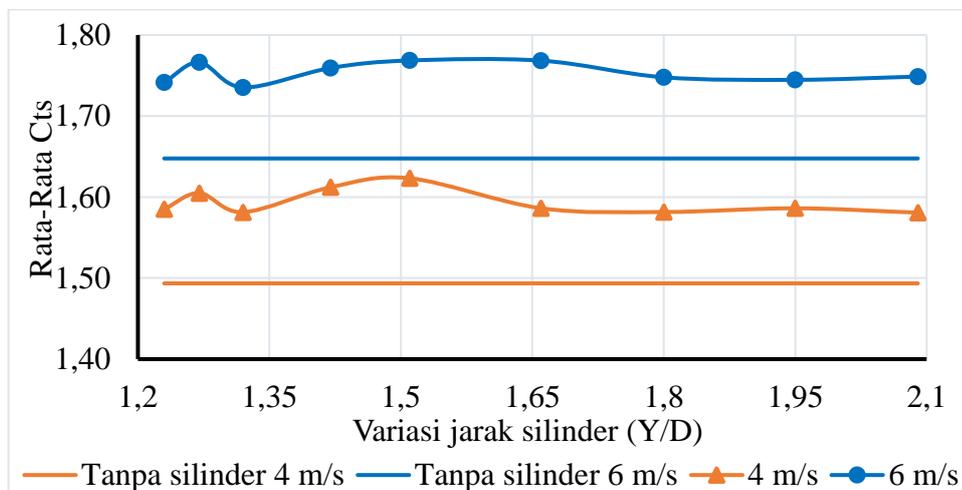
4.2.8 Analisis Torsi Statis

Sub bab ini ditujukan untuk menganalisis *self-starting* melalui torsi statis. Torsi statis merupakan kemampuan rotor untuk memulai berputar dan menghasilkan daya. Torsi statis diukur dengan keadaan rotor diam. Pada kasus ini digunakan interval 10° pada setiap variasi kecepatan dan jarak silinder.

Tabel 4. 6 Rata-rata kenaikan koefisien torsi statis (Cts) pada seluruh variasi.

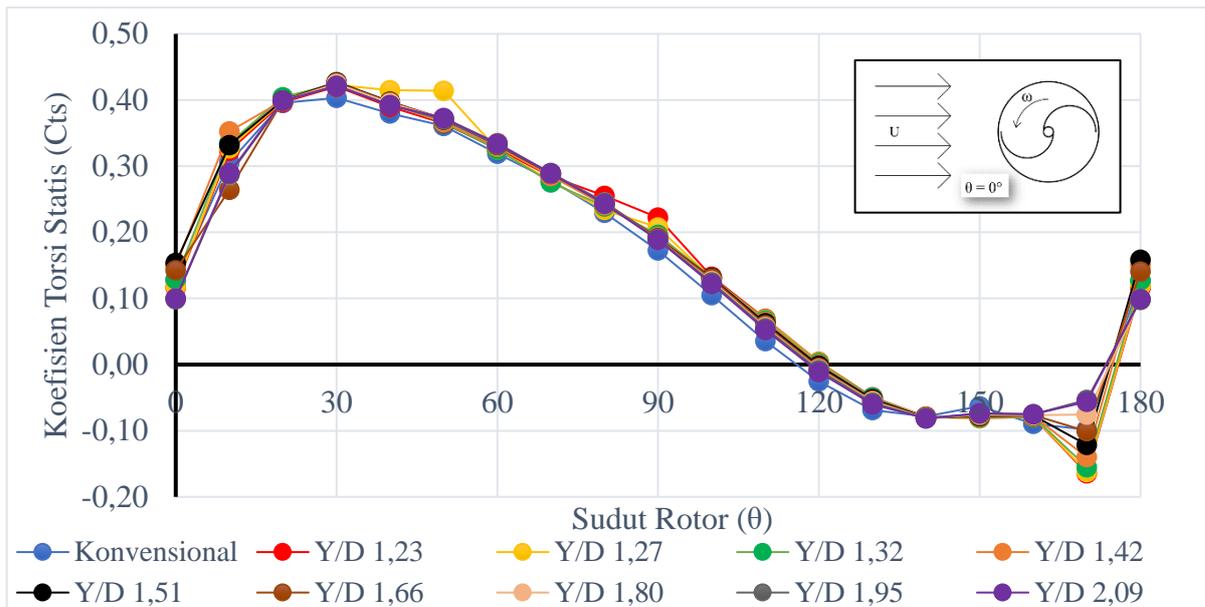
Variasi jarak Y/D	Rata-rata Koefisien Torsi Statis (Menggunakan Metode Integral)	
	4 m/s	6 m/s
Tanpa Silinder	1,493	1,648
1,23	1,585	1,742
1,27	1,605	1,766
1,32	1,581	1,735
1,42	1,612	1,759
1,51	1,623	1,769
1,66	1,586	1,768
1,8	1,582	1,748
1,95	1,586	1,745
2,09	1,581	1,749

Tabel 4.6 merupakan tabel rata-rata peningkatan performa torsi dinamis pada seluruh variasi jarak silinder. Data tersebut didapatkan dengan cara menghitung rata-rata Cts pada setiap variasi jarak dengan metode integral. Dari tabel tersebut didapatkan bahwa performa Cts tertinggi kecepatan 4 & 6 m/s keduanya terjadi pada jarak Y/D 1,51.



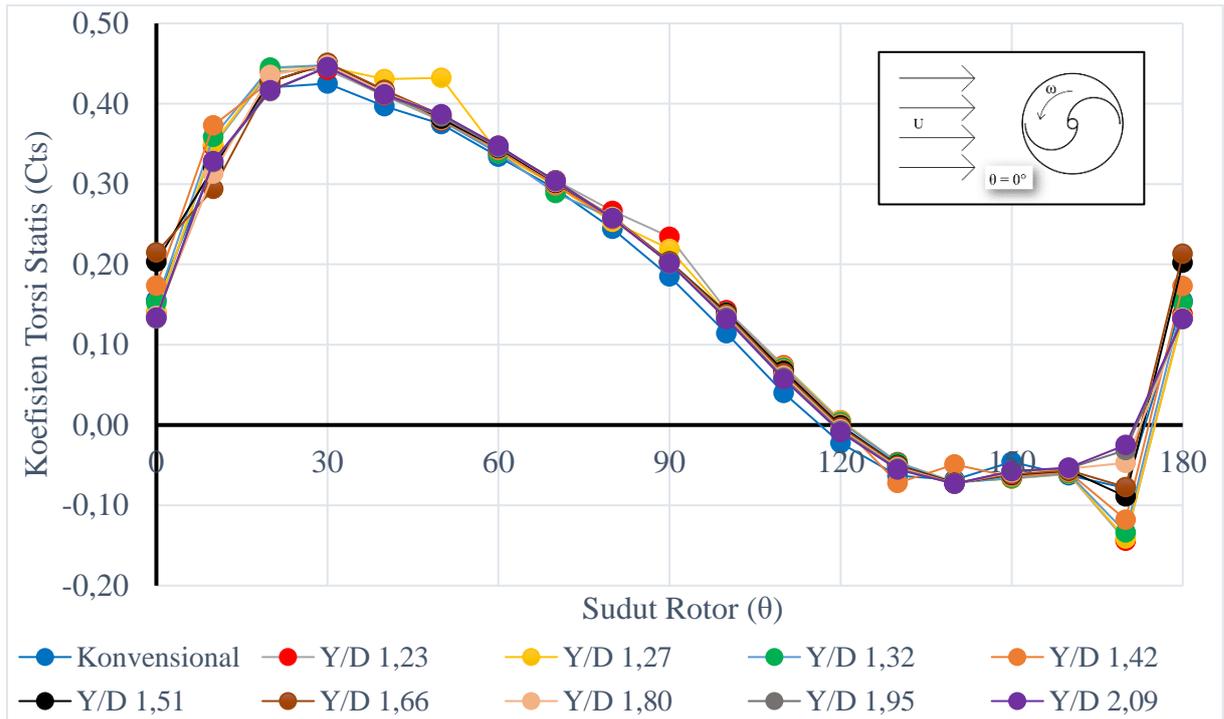
Gambar 4.13 Grafik rata-rata kenaikan koefisien torsi statis (Cts) pada seluruh variasi

Gambar 4.13 merupakan distribusi grafik yang menggambarkan distribusi peningkatan pada setiap variasi kecepatan dan jarak Y/D. Meskipun variasi kecepatannya berbeda, namun masing masing variasi kecepatan memiliki karakteristik trend yang sama. Penambahan silinder pada kecepatan 4 & 6m/s meningkatkan *self-starting* pada keseluruhan variasi jarak Y/D. Dapat dilihat bahwa Jarak Y/D 0 (konvensional) memiliki performa *self-starting* paling rendah. Menurunnya kemampuan *self-starting* pada jarak Y/D dianalisis pada tabel 4.7. Kemudian peningkatan terjadi lagi hingga mencapai puncaknya pada Y/D 1,51. Lalu relatif konstan pada jarak Y/D diatas 1,66.



Gambar 4. 14 Koefisien torsi statis seluruh variasi jarak Y/D untuk kecepatan 4 m/s

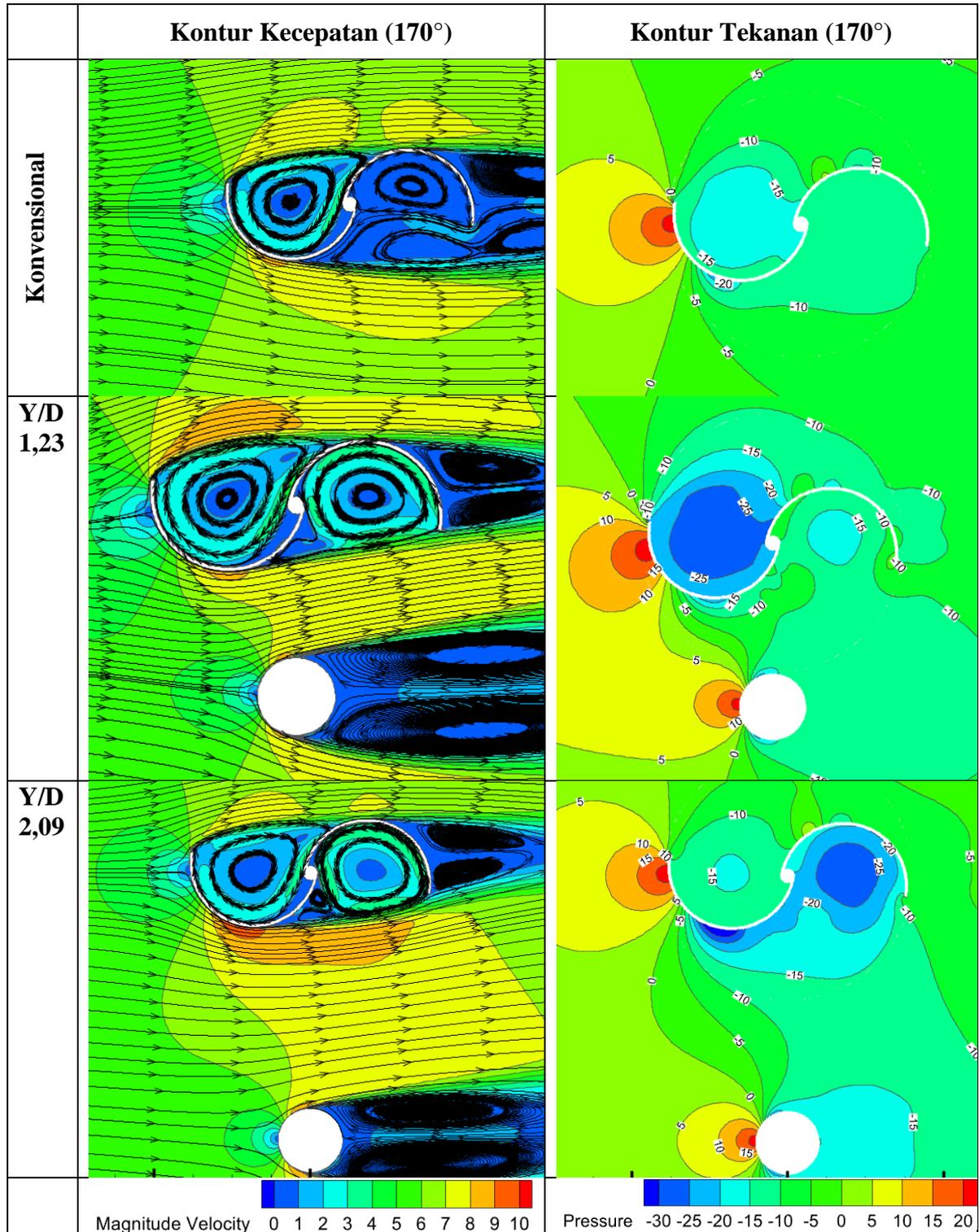
Gambar 4.14 merupakan torsi statis turbin angin Savonius konvensional dan seluruh variasi penambahan silinder pada kecepatan 4m/s. Keseluruhan variasi memiliki kecenderungan meningkat pada setiap interval 10 derajat. Pada sudut 170, Y/D 1,23 memiliki torsi statis yang paling rendah. Seiring melebarnya jarak Y/D, torsi statis pada sudut 170° semakin meningkat. Penurunan tersebut disebabkan sudu advancing yang seluruhnya tertutup sudu returning dan menghalangi aliran dari upstream. Pada sudut 90°, jarak Y/D 1,23 dan 1,27 memiliki peningkatan torsi statis yang tinggi. Hal tersebut disebabkan karena pada posisi rotor 90°, menghasilkan efek *nozzle* yang paling baik.



Gambar 4. 15 Koefisien torsi statis seluruh variasi jarak Y/D untuk kecepatan 6 m/s

Gambar 4.15 merupakan torsi statis turbin angin Savonius konvensional dan seluruh variasi penambahan silinder pada kecepatan 6m/s. Keseluruhan variasi memiliki kecenderungan meningkat pada setiap interval 10 derajat. Pada sudut 90°, jarak Y/D 1,23 dan 1,27 memiliki peningkatan torsi statis yang tinggi. Hal tersebut disebabkan karena pada posisi rotor 90°, menghasilkan efek *nozzle* yang paling baik. Pada sudut 170°, Y/D 1,23 memiliki torsi statis yang paling rendah. Seiring melebarnya jarak Y/D, torsi statis pada sudut 170° semakin meningkat. Kasus pada sudut 170° dibahas dengan tabel 4.7

Tabel 4. 7 Kontur kecepatan dan tekanan pada kecepatan 6m/s untuk tanpa silinder dan variasi jarak Y/D 1,23 & 2,09



Tabel 4.7 merupakan perbandingan karakteristik aliran dan tekanan pada variasi tanpa silinder, Y/D 1,23 dan Y/D 2,09 dengan kecepatan 6m/s. Paragraf ini membahas kasus *self-starting* yang buruk ketika penambahan silinder disamping *advancing blade* pada sudut 170°.

Pada keseluruhan variasi menunjukkan tekanan pada sisi cembung *returning blade* (blade kiri) lebih besar dari pada sisi cekung *returning blade* (blade kanan) yang menyebabkan terjadinya rotasi kearah clockwise.

Pada jarak Y/D 1,23 memiliki torsi statis yang paling rendah selisih tekanan sisi cekung dan cembung *returning* yang paling rendah dibandingkan variasi jarak yang lain. Tampak bahwa sisi cekung *returning blade* (blade kiri) Y/D 2,09 memiliki nilai tekanan -15 dan sisi cembungnya -20. Sedangkan sisi cekung *returning blade* (blade kiri) Y/D 1,23 memiliki nilai tekanan -25 dan sisi cembungnya -5. Meskipun kedua jarak tersebut menghasilkan torsi statis negatif, jarak Y/D 1,23 memiliki torsi statis yang lebih rendah.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Silinder yang diletakkan disamping *advancing blade* berpengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Ketika jarak terlalu dekat akan menurunkan performa turbin angin Savonius. Ketika jarak terlalu jauh, efek silinder tidak mempengaruhi performa turbin angin Savonius pada kecepatan 4 m/s dan menurunkan performa pada kecepatan 6 m/s.
2. Variasi kecepatan 6m/s memiliki koefisien momen dan koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan 4 m/s. Namun variasi 4 m/s memiliki peningkatan yang lebih tinggi dibandingkan variasi 6 m/s.
3. Performa terbaik terjadi pada Y/D 1,32 untuk masing-masing variasi kecepatan. Efek *nozzle* dan *attached flow* mempercepat aliran dan menurunkan tekanan pada sisi cembung *advancing blade*.
4. Penambahan silinder mempengaruhi tekanan sisi cembung returning dan *advancing blade*. Pada kecepatan 4 m/s mengurangi tekanan stagnasi dan memperbesar *base pressure*. Sedangkan pada kecepatan 6 m/s meningkatkan tekanan stagnasi, namun memperkecil *base pressure*. Namun, tekanan sisi cekung *advancing blade* pada kedua variasi kecepatan sama-sama meningkat.
5. Penambahan silinder disamping *advancing blade* meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin angin Savonius pada keseluruhan variasi kecepatan dan jarak Y/D.

5.2 Saran

1. Gunakan “moment” sebagai report file melainkan “coefficient moment”. Karena report file moment tidak dipengaruhi reference value. Untuk mendapatkan koefisien momen bisa dengan perhitungan manual. Report file “coefficient moment” sering kali menunjukkan hasil yang berbeda dengan koefisien momen yang didapat dari report file “moment”.
2. Untuk hasil simulasi yang lebih akurat, gunakan time step = $0,5^\circ$ pada revolusi yang dianggap telah stabil (Pada penelitian ini adalah putaran ke-10).

DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., & Atilgan, M. (2010). The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*, 35(4), 821–829. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.025>
- Aziz, E.-S., Chassapis, C., Dai, S., & Xu, S. (2008). *AC 2008-613: ONLINE WIND TUNNEL LABORATORY Online Wind Tunnel Laboratory. March 2015.*
- Casini, M. (2015). Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings. *Journal of Clean Energy Technologies*, 4(1), 56–65. <https://doi.org/10.7763/jocet.2016.v4.254>
- El-Askary, W. A., Nasef, M. H., AbdEL-hamid, A. A., & Gad, H. E. (2015). Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 139, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.003>
- Eshagh Nimvari, M., Fatahian, H., & Fatahian, E. (2020). Performance improvement of a Savonius vertical axis wind turbine using a porous deflector. *Energy Conversion and Management*, 220(March), 113062. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113062>
- Fatahian, E., Ismail, F., Hafifi Hafiz Ishak, M., & Shyang Chang, W. (2022). An innovative deflector system for drag-type Savonius turbine using a rotating cylinder for performance improvement. *Energy Conversion and Management*, 257(March), 115453. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115453>
- Greenpeace Indonesia. (2016). Kita, Batubara & Polusi Udara. *Greenpeace Indonesia, April*, 1–16. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-indonesia-stateless/2019/02/605d05ed-605d05ed-kita-batubara-dan-polusi-udara.pdf>
- Johari, M. K., Jalil, M. A. A., & Shariff, M. F. M. (2018). Comparison of horizontal axis wind turbine (HAWT) and vertical axis wind turbine (VAWT). *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(4), 74–80. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.13.21333>
- Libii, J. N. (2013). Comparing the calculated coefficients of performance of a class of wind turbines that produce power between 330 kw and 7,500 kw. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 11(1), 36–40.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>
- Pranta, M. H., Rabbi, M. S., & Roshid, M. M. (2021). A computational study on the aerodynamic performance of modified Savonius wind turbine. *Results in Engineering*, 10(February), 100237. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100237>
- Sai, S. J. V., & Rao, T. V. (2018). Design and Analysis of Vertical Axis Savonius Wind Turbine. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 8(5), 17468–17471.
- Sakti, G., Yuwono, T., & Widodo, W. A. (2019). *Paper Sakti 192005-4343-IJMME-IJENS. 05.*
- Setiawan, P. A., Yuwono, T., & Widodo, W. A. (2019). *Effect of a Circular Cylinder in Front*

of Advancing blade on the Savonius Water Turbine by Using Transient Simulation. 01.

- Yuwono, T., Sakti, G., Nur Aulia, F., & Chandra Wijaya, A. (2020). Improving the performance of Savonius wind turbine by installation of a circular cylinder upstream of returning turbine blade: Improving the Performance of Savonius Wind Turbine. *Alexandria Engineering Journal*, 59(6), 4923–4932.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.09.009>
- Zemamou, M., Aggour, M., & Toumi, A. (2017). Review of Savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia*, 141, 383–388.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.047>

LAMPIRAN

Tabel A. 1 Koefisien momen dan koefisien daya pada Y/D 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; dan 1,42 untuk kecepatan 4 m/s

TS R	Tanpa Silinder		Y/D 1,23		Y/D 1,27		Y/D 1,32		Y/D 1,42	
	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg
0,2	0,377	0,075	0,366	0,073	0,378	0,076	0,428	0,086	0,375	0,075
0,4	0,346	0,138	0,303	0,121	0,347	0,139	0,333	0,133	0,360	0,144
0,6	0,291	0,175	0,261	0,157	0,282	0,169	0,328	0,197	0,296	0,178
0,8	0,225	0,180	0,206	0,165	0,226	0,181	0,247	0,197	0,228	0,183
1	0,168	0,168	0,164	0,164	0,167	0,167	0,190	0,190	0,175	0,175
1,2	0,112	0,134	0,104	0,125	0,124	0,149	0,135	0,163	0,130	0,156

Tabel A. 2 Koefisien momen dan koefisien daya pada Y/D 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09 untuk kecepatan 4 m/s

TS R	Y/D 1,51		Y/D 1,66		Y/D 1,80		Y/D 1,95		Y/D 2,09	
	Cm avg	Cp avg								
0,2	0,386	0,077	0,332	0,066	0,335	0,067	0,347	0,069	0,356	0,071
0,4	0,362	0,145	0,344	0,138	0,356	0,143	0,360	0,144	0,340	0,136
0,6	0,269	0,161	0,284	0,170	0,302	0,181	0,301	0,181	0,297	0,178
0,8	0,219	0,175	0,225	0,180	0,220	0,176	0,217	0,173	0,214	0,171
1	0,174	0,174	0,172	0,172	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157
1,2	0,131	0,157	0,121	0,145	0,110	0,132	0,106	0,127	0,100	0,120

Tabel A. 3 Koefisien momen dan koefisien daya pada Y/D 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; dan 1,42 untuk kecepatan 6 m/s

TS R	Tanpa Silinder		Y/D 1,23		Y/D 1,27		Y/D 1,32		Y/D 1,42	
	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg	Cm avg	Cp avg
0,2	0,438	0,088	0,368	0,074	0,402	0,080	0,404	0,081	0,365	0,073
0,4	0,402	0,161	0,319	0,128	0,347	0,139	0,404	0,161	0,348	0,139
0,6	0,323	0,194	0,281	0,169	0,308	0,185	0,340	0,204	0,309	0,185
0,8	0,249	0,199	0,218	0,174	0,234	0,187	0,276	0,220	0,253	0,203
1	0,183	0,183	0,156	0,156	0,177	0,177	0,223	0,223	0,192	0,192
1,2	0,125	0,150	0,116	0,139	0,135	0,162	0,150	0,180	0,140	0,168

Tabel A. 4 Koefisien momen dan koefisien daya pada Y/D 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09 untuk kecepatan 6 m/s

TS R	Y/D 1,51		Y/D 1,66		Y/D 1,80		Y/D 1,95		Y/D 2,09	
	Cm avg	Cp avg								
0,2	0,364	0,073	0,379	0,076	0,382	0,076	0,388	0,078	0,396	0,079
0,4	0,392	0,157	0,350	0,140	0,360	0,144	0,389	0,156	0,349	0,140
0,6	0,312	0,187	0,308	0,185	0,306	0,184	0,308	0,185	0,299	0,180
0,8	0,235	0,188	0,243	0,195	0,230	0,184	0,229	0,183	0,223	0,178
1	0,164	0,164	0,175	0,175	0,165	0,165	0,166	0,166	0,156	0,156
1,2	0,111	0,133	0,118	0,142	0,114	0,136	0,107	0,128	0,113	0,135

Tabel A. 5 Koefisien torsi statis untuk Y/D 1,23 ; 1,27 ; 1,32 ; dan 1,42 untuk kecepatan 4 & 6 m/s

Sudut Rotor	Tanpa Silinder		YD 1.23		YD 1.27		YD 1.32		YD 1.42	
	4 m/s	6 m/s	4 m/s	6 m/s	4 m/s	6 m/s	4 m/s	6 m/s	4 m/s	6 m/s
0	0,127	0,156	0,116	0,139	0,118	0,141	0,129	0,152	0,150	0,173
10	0,306	0,323	0,323	0,347	0,327	0,350	0,335	0,359	0,353	0,373
20	0,396	0,420	0,397	0,440	0,399	0,444	0,404	0,445	0,399	0,428
30	0,403	0,425	0,420	0,442	0,423	0,446	0,425	0,448	0,425	0,449
40	0,380	0,397	0,390	0,410	0,415	0,431	0,395	0,415	0,395	0,415
50	0,361	0,375	0,365	0,379	0,414	0,432	0,366	0,379	0,367	0,380
60	0,319	0,334	0,326	0,339	0,325	0,339	0,325	0,339	0,329	0,342
70	0,279	0,294	0,285	0,305	0,278	0,298	0,275	0,289	0,285	0,298
80	0,230	0,244	0,255	0,267	0,234	0,253	0,239	0,258	0,241	0,256
90	0,173	0,185	0,223	0,234	0,207	0,219	0,196	0,204	0,193	0,203
100	0,105	0,114	0,133	0,143	0,130	0,139	0,132	0,141	0,131	0,140
110	0,035	0,040	0,069	0,074	0,068	0,073	0,067	0,071	0,064	0,069
120	-0,025	-0,022	0,004	0,006	0,004	0,005	0,002	0,004	0,000	0,001
130	-0,069	-0,063	-0,049	-0,046	-0,051	-0,048	-0,050	-0,047	-0,053	-0,072
140	-0,079	-0,068	-0,079	-0,071	-0,079	-0,071	-0,080	-0,072	-0,080	-0,049
150	-0,063	-0,046	-0,081	-0,067	-0,081	-0,067	-0,080	-0,066	-0,079	-0,065
160	-0,090	-0,063	-0,079	-0,061	-0,079	-0,061	-0,079	-0,060	-0,078	-0,059
170	-0,098	-0,078	-0,164	-0,144	-0,162	-0,141	-0,155	-0,134	-0,140	-0,118
180	0,126	0,155	0,116	0,138	0,119	0,134	0,128	0,152	0,151	0,173

Tabel A. 6 Koefisien torsi statis untuk Y/D 1,51 ; 1,66 ; 1,80 ; 1,95 ; 2,09 untuk kecepatan 4 & 6 m/s

Sudut Rotor	YD 1.51		YD 1.66		YD 1.80		YD 1.95		YD 2.09	
	4 m/s	6 m/s								
0	0,154	0,203	0,143	0,215	0,100	0,136	0,099	0,133	0,100	0,134
10	0,332	0,320	0,264	0,294	0,287	0,313	0,288	0,327	0,289	0,329
20	0,400	0,427	0,399	0,427	0,398	0,436	0,398	0,416	0,399	0,417
30	0,427	0,450	0,426	0,451	0,425	0,448	0,422	0,446	0,421	0,446
40	0,398	0,417	0,397	0,417	0,396	0,414	0,392	0,411	0,392	0,412
50	0,370	0,381	0,372	0,386	0,372	0,386	0,370	0,384	0,373	0,387
60	0,333	0,345	0,335	0,347	0,335	0,347	0,332	0,345	0,334	0,348
70	0,288	0,301	0,288	0,302	0,289	0,303	0,290	0,305	0,289	0,303
80	0,244	0,259	0,246	0,260	0,245	0,259	0,245	0,258	0,243	0,257
90	0,191	0,203	0,191	0,203	0,189	0,201	0,190	0,202	0,188	0,201
100	0,131	0,140	0,130	0,138	0,126	0,135	0,124	0,134	0,122	0,132
110	0,063	0,067	0,060	0,065	0,057	0,061	0,055	0,059	0,052	0,057
120	-0,002	0,000	-0,004	-0,003	-0,007	-0,006	-0,008	-0,007	-0,011	-0,009
130	-0,052	-0,050	-0,054	-0,051	-0,056	-0,053	-0,058	-0,054	-0,060	-0,056
140	-0,080	-0,072	-0,081	-0,073	-0,081	-0,073	-0,081	-0,073	-0,081	-0,073
150	-0,078	-0,062	-0,077	-0,061	-0,075	-0,059	-0,074	-0,057	-0,074	-0,058
160	-0,077	-0,057	-0,076	-0,056	-0,076	-0,054	-0,075	-0,054	-0,075	-0,053
170	-0,121	-0,089	-0,101	-0,077	-0,076	-0,047	-0,054	-0,031	-0,056	-0,025
180	0,158	0,202	0,141	0,213	0,099	0,133	0,098	0,132	0,099	0,132

BIODATA PENULIS



Hanif Agha Fadhila lahir di Yogyakarta, 30 Agustus 2000, merupakan anak ketiga dari 5 bersaudara dari pasangan Eddy Supriyanto, BE dan Kus Yuniarsih, SE. Penulis telah menempuh Pendidikan formal pertama di TK ABA Gedongkiwo, Yogyakarta. Kemudian dilanjutkan ke Pendidikan dasar di SD Muhammadiyah Kauman. Penulis menempuh Pendidikan menengah pertama di SMP Negeri 8 Yogyakarta dan Pendidikan menengah atas di SMA Negeri 1 Yogyakarta. Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 02111840000102.

Pada masa perkuliahan, penulis aktif dikegiatan akademik dan non akademik kampus. Penulis mendapat kesempatan untuk menjadi *Head of Finance, Design & Administration* Cakradewa ITS *Electric Vehicle Team* pada tahun 2019. Kemudian penulis lanjut menjadi Senat Mahasiswa Mesin dan berorganisasi di Badan Legislatif Mahasiswa ITS sebagai anggota komisi legislasi pada tahun 2020. Pada tahun 2021 penulis melanjutkan organisasi di Dewan Presidium Mesin sebagai anggota komisi kajian.

Di Departemen Teknik Mesin, penulis mendalami bidang studi Konversi Energi dan mengambil topik tugas akhir di Laboratorium Mekanika & Mesin-Mesin Fluida. Penulis mendapat banyak pengalaman akademik dan non-akademik dari kegiatan yang diikuti selama perkuliahan. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan banyak manfaat. Untuk informasi, saran, maupun pertanyaan terkait penelitian dapat menghubungi penulis melalui surat elektronik : hanifagha007@gmail.com