

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *CIRCULAR CYLINDER* DI SAMPING SUDU *ADVANCING* (Y/D) DAN DI DEPAN SUDU *RETURNING* (S/D) TERHADAP PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$; $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada Kecepatan Angin = 4 m/s ”

I GEDE ARTHA JUAN CHRISTIAN LIE

NRP 02111840000186

Dosen Pembimbing

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph. D.

NIP 198105292003122001

PROGRAM STUDI SARJANA

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN
CIRCULAR CYLINDER DI SAMPING SUDU *ADVANCING*
(Y/D) DAN DI DEPAN SUDU *RETURNING* (S/D)
TERHADAP PENINGKATAN PERFORMA TURBIN
ANGIN SAVONIUS**

**“Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$;
 $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada Kecepatan Angin = 4 m/s ”**

I GEDE ARTHA JUAN CHRISTIAN LIE

NRP 02111840000186

Dosen Pembimbing

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

NIP 198105292003122001

PROGRAM STUDI SARJANA

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING CIRCULAR CYLINDERS AT THE SIDE OF THE ADVANCING BLADE (Y/D) AND IN FRONT OF THE RETURNING BLADE (S/D) TO INCREASING THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Study Case $d/D = 0.5$, with distances $Y/D = 1.80$ and 1.90 , $S/D = 1.80$ and 1.90 at Wind Speed = 4 m/s ”

I GEDE ARTHA JUAN CHRISTIAN LIE

NRP. 02111840000186

Advisor

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

NIP. 198105292003122001

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *CIRCULAR CYLINDER* DI SAMPING SUDU *ADVANCING* (Y/D) DAN DI DEPAN SUDU *RETURNING* (S/D) TERHADAP PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$; $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada Kecepatan Angin = 4 m/s”

TUGAS AKHIR

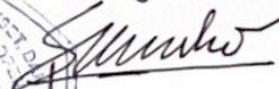
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **I GEDE ARTHA JUAN CHRISTIAN LIE**

NRP. 02111840000186

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

Pembimbing 
Penguji 
Penguji 
Penguji 


SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING CIRCULAR CYLINDERS AT THE SIDE OF THE ADVANCING BLADE (Y/D) AND IN FRONT OF THE RETURNING BLADE (S/D) TO INCREASING THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Study Case $d/D = 0.5$, with distances $Y/D = 1.80$ and 1.90 , $S/D = 1.80$ and 1.90 at Wind Speed = 4 m/s ”

FINAL PROJECT

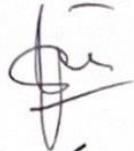
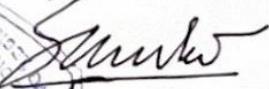
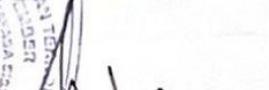
Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **I GEDE ARTHA JUAN CHRISTIAN LIE**

NRP. 02111840000186

Approved by Final Project Examiner Team :

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

Advisor 
Examiner 
Examiner 
Examiner 

SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama mahasiswa / NRP : I Gede Artha Juan Christian Lie / 02111840000186

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing/NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /
198105292003122001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul

**STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *CIRCULAR CYLINDER* DI
SAMPING SUDU *ADVANCING* (Y/D) DAN DI DEPAN SUDU *RETURNING* (S/D)
TERHADAP PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS**

"Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan Jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$; $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada
Kecepatan Angin = 4 m/s "

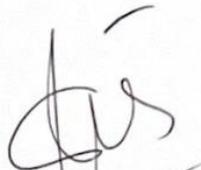
adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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, 20 Juli 2022

Mengetahui,

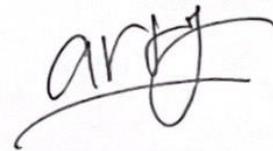
Dosen Pembimbing



(Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.)

NIP. 198105292003122001

Mahasiswa,



I Gede Artha Juan Christian Lie

NRP. 02111840000186

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below :

Name of student / NRP : I Gede Artha Juan Christian Lie / 02111840000186

Department : Mechanical Engineering

Advisor/NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.) /
198105292003122001

Hereby declare that the Final Project with the title of

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING CIRCULAR CYLINDERS AT
THE SIDE OF THE ADVANCING BLADE (Y/D) AND IN FRONT OF THE
RETURNING BLADE (S/D) TO INCREASING THE PERFORMANCE OF
SAVONIUS WIND TURBINE**

"Study Case $d/D = 0.5$, with distances $Y/D = 1.80$ and 1.90 , $S/D = 1.80$ and 1.90 at Wind
Speed = 4 m/s "

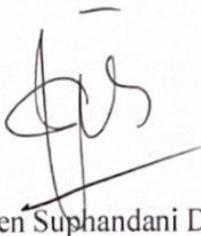
is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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, 20 July 2022

Acknowledged,

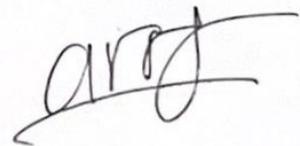
Advisor



(Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.)

NIP. 198105292003122001

Student,



I Gede Artha Juan Christian Lie

NRP. 02111840000186

STUDI NUMERIK PENGARUH PENAMBAHAN *CIRCULAR CYLINDER* DI SAMPING SUDU *ADVANCING* (Y/D) DAN DI DEPAN SUDU *RETURNING* (S/D) TERHADAP PENINGKATAN PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$; $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada Kecepatan Angin = 4 m/s ”

Nama Mahasiswa / NRP : I Gede Artha Juan Christian Lie / 02111840000186
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., PhD.

ABSTRAK

Energi adalah salah satu hal yang selalu dibutuhkan oleh manusia dalam keberlangsungan kehidupan sehari-hari guna memenuhi kebutuhannya. Dengan pertumbuhan populasi serta korelasi antara penduduk dan kebutuhan akan energi maka lambat laun, ketersediaan energi fosil akan semakin menipis. Selain ketersediaan, energi fosil yang digunakan terus-menerus akan membuat kerugian bagi lingkungan secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, dibutuhkan jalan keluar guna menghindari kehabisan ketersediaan energi fosil dan meminimalisir kerusakan lingkungan adalah hal yang wajib. Salah satu jalan keluar yang ada adalah dengan mengganti energi fosil menjadi sumber energi terbarukan, contohnya energi angin. Dikarenakan kecepatan angin di Indonesia berada pada rentang $3-7 \text{ m/s}$, maka salah satu alat yang dapat dimanfaatkan dengan baik dan sesuai adalah turbin angin Savonius, karena turbin ini mampu menghasilkan torsi yang tinggi di awal dengan kecepatan angin yang rendah dan dapat bekerja ke segala arah. Namun turbin angin Savonius memiliki kelemahan yaitu efisiensi yang tergolong rendah jika dibandingkan dengan turbin angin lainnya. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi turbin angin Savonius yaitu dengan cara menambah *circular cylinder* sebagai pengganggu dengan tujuan untuk mendefleksikan angin yang dapat membuat torsi akibat selisih gaya drag menjadi besar dan akan berdampak terhadap daya yang dihasilkan oleh turbin.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah simulasi numerik dengan dua dimensi yang menggunakan *software ANSYS FLUENT 2021 R2*. Penelitian ini memiliki tiga tahapan dalam proses pembuatannya diantaranya adalah *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Selain itu, penelitian ini menggunakan model berupa geometri dua dimensi dari turbin angin Savonius konvensional dengan modifikasi penambahan dua konfigurasi penambahan *circular cylinder* dengan variasi $Y/D = 1,80$; $1,90$, serta variasi $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$. Untuk *turbulence model* yang digunakan adalah *realizable k- ϵ* . Penelitian ini memiliki dua *domain* yaitu *static domain* dan *rotate domain*. *Boundary condition* yang digunakan adalah *inlet* menggunakan *velocity inlet*, *outlet* menggunakan *pressure-outlet*, sudu turbin menggunakan *wall*, *symmetry* menggunakan *symmetry*, dan *interface luar*, *interface dalam* yang menggunakan *interface*.

Pada simulasi ini diperoleh hasil bahwa pada konfigurasi turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) mampu memberikan peningkatan performa jika dibandingkan dengan turbin konvensional dengan kenaikan sebesar $1,18\%$ dan $1,15\%$ untuk variasi $Y/D = 1,80$; $1,90$. Sedangkan untuk konfigurasi turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) mengalami penurunan performa.

Kata kunci: Energi, turbin angin Savonius, simulasi numerik, *domain*, *boundary condition*, *circular cylinder*.

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF ADDING CIRCULAR CYLINDERS AT THE SIDE OF THE ADVANCING BLADE (Y/D) AND IN FRONT OF THE RETURNING BLADE (S/D) TO INCREASING THE PERFORMANCE OF SAVONIUS WIND TURBINE

“Study Case $d/D = 0.5$, with distances $Y/D = 1.80$ and 1.90 , $S/D = 1.80$ and 1.90 at Wind Speed = 4 m/s ”

Student Name / NRP : I Gede Artha Juan Christian Lie / 02111840000186
Department : Teknik Mesin FTIRS - ITS
Advisor : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., PhD.

ABSTRACT

Energy is one thing that is always needed by humans in the continuity of daily life to meet their needs. With the increase in population and the correlation between population and the need for energy, gradually, the availability of fossil energy will be depleted. In addition to availability, fossil energy that is used continuously will cause direct and indirect harm to the environment. Therefore, a solution is needed to avoid running out of fossil energy availability and minimizing environmental damage is mandatory. One way out is to replace fossil energy into renewable energy sources, for example wind energy. Due to the wind speed in Indonesia in the range of 3-7 m/s, one of the tools that can be used properly and appropriately is the Savonius wind turbine, because this turbine is able to produce high torque at the beginning with low wind speeds and can work up to all directions. However, the Savonius wind turbine has a weakness, namely the efficiency is relatively low when compared to other wind turbines. One way to increase the efficiency of the Savonius wind turbine is by adding a circular cylinder as a nuisance with the aim of deflecting the wind which can make the torque due to the difference in drag force to be large and will have an impact on the power generated by the turbine.

The method used in this study is a two dimensional numerical simulation using the ANSYS FLUENT 2021 R2 software. This research has three stages in the manufacturing process including pre-processing, processing, and post-processing. In addition, this study uses a model in the form of a two-dimensional geometry of a conventional Savonius wind turbine with the modification of adding two additional circular cylinder configurations with variations $Y/D = 1.80$; 1.90 , and the variation of $Y/D = 1.80$; $S/D = 1.80$ and $Y/D = 1.90$; $S/D = 1.90$. For turbulence the model used is realizable $k-\epsilon$. This research has two domains, namely static domain and rotate domain. Boundary conditions used are inlet using velocity inlet, outlet using pressure-outlet, turbine blade using wall, symmetry using symmetry, and outer interface, inner interface using interface.

In this simulation, the results show that the Savonius wind turbine configuration with the addition of a circular cylinder in addition to the advancing blades (Y/D) is able to provide increased performance when compared to conventional turbines with an increase of 1.18% and 1.15% for the Y/D variation. = 1.80; 1.90. Meanwhile, the Savonius wind turbine configuration with the addition of a circular cylinders beside the advancing blades (Y/D) and in front of the returning blades (S/D) has decreased performance.

Keywords: Energy, Savonius wind turbine, numerical simulation, domain, boundary condition, circular cylinder.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadapan Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat-Nya-lah, penulis dapat laporan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Numerik Pengaruh Penambahan *Circular Cylinder* di Samping Sudu *Advancing* (Y/D) dan di Depan Sudu *Returning* (S/D) Terhadap Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius” untuk “Studi Kasus $d/D = 0,5$; dengan Jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$; $S/D = 1,80$ dan $1,90$ pada Kecepatan Angin = 4 m/s”. Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan mencapai gelar Sarjana Teknik pada Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya.

Dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapat banyak bantuan baik berupa moral maupun material dari berbagai pihak. Untuk itu, dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, I Ketut Budiarta, S.E., S.ST., dan Marlin Niko serta kedua adik penulis, I Made Krisna Dwi Anantha dan Komang Cindy Anindya, yang tidak berhenti memberikan bantuan, dukungan, dan doa selama penulis menjalankan aktifitas studi di kampus ITS.
2. Ibu Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. atas bimbingan dan didikannya selama penulis berkuliah, terutama dalam membimbing penyusunan Tugas Akhir penulis.
3. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko, Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., atas bimbingan, didikan, serta masukan dan saran sebagai Dosen Penguji penulis.
4. Seluruh dosen, staf dan tenaga pendidikan di lingkungan Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS.
5. Teman-teman simulasi turbin angin Savonius, Agha, Fauzan, Ghani, Tiya serta seluruh teman-teman Mekanika dan Mesin-mesin Fluida Teknik Mesin ITS yang selalu menemani, mendukung dan membantu penulis.
6. Seluruh teman-teman M61 yang telah menemani dan mendukung penulis selama empat tahun perkuliahan.
7. Teman-teman dan sahabat penulis yang telah senantiasa selalu menemani dan memberikan dukungan bagi penulis saat senang maupun susah
8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah membantu penyusunan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa apa yang tersaji dalam laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan kemampuan yang penulis miliki. Untuk itu demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini, penulis mengharapkan segala kritik maupun saran yang sifatnya membangun dari berbagai pihak. Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan berguna bagi kita semua khususnya bagi pengembangan dunia pendidikan.

Surabaya, 20 Juli 2022

I Gede Artha Juan Christian Lie

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
APPROVAL SHEET.....	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Turbin Angin.....	6
2.2 Turbin Angin Savonius	7
2.3 Gaya Drag.....	7
2.4 <i>Coefficient of Power (CP)</i>	9
2.5 <i>Coefficient of Moment (Cm)</i>	9
2.6 <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	9
2.7 Hukum Betz	10
2.8 <i>Momentum Angular</i>	10
2.9 Penelitian Terdahulu	11
2.9.1 Penelitian dengan judul “ <i>Improving the Performance of Savonius Wind Turbine by Installation of a Circular Cylinder Upstream of Returning Turbine Blade</i> ”	11
2.9.2 Penelitian dengan judul “ <i>Drag reduction of a circular cylinder in air stream</i> ”	14
2.9.3 Penelitian dengan Judul “ <i>Experimental and Numerical Investigation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance</i> ”	17
2.9.4 Penelitian dengan Judul “ <i>An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining</i> ”	21

2.9.5	Penelitian dengan Judul “ <i>Flow Analysis of a Circular Cylinder on the Savonius Hydrokinetic Turbine Performance Placed the Side of Advancing Blade</i> ”	23
2.9.6	Penelitian dengan Judul “Studi Eksperimen Pengaruh Jarak Antara Silinder Pengganggu Sirkular dengan <i>Returning Blade</i> Turbin Angin Tipe Savonius Terhadap Performa Turbin”	27
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		30
3.1	Variasi dan Domain Simulasi	30
3.1.1	Variasi Simulasi	30
3.1.2	<i>Domain</i> Simulasi	30
3.2	Tahap <i>Pre-Processing</i>	31
3.2.1	Pembuatan Geometri dan <i>Meshing</i>	31
3.2.2	<i>Boundary Condition</i>	35
3.3	<i>Solver</i>	36
3.3.1	<i>General</i>	36
3.3.2	<i>Models</i>	36
3.3.3	<i>Materials</i>	36
3.3.4	<i>Cell Zone Condition</i>	36
3.3.5	<i>Boundary Condition</i>	36
3.3.6	<i>Solution</i>	36
3.3.7	<i>Residual</i>	36
3.3.8	<i>Initialize</i>	36
3.3.9	<i>Run Calculation</i>	36
3.4	Tahap <i>Processing</i>	36
3.5	Tahap <i>Post-Processing</i>	37
3.5.1	Perhitungan Bilangan <i>Reynolds</i>	37
3.6	<i>Grid Independency Test</i>	38
3.7	Diagram Alir	39
BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI		44
4.1	Komparasi Hasil Simulasi	44
4.2	Hasil Simulasi	45
4.2.1	<i>Coefficient of Moment (Cm)</i> berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	45
4.2.2	<i>Coefficient of Moment (Cm)</i> berdasarkan fungsi <i>Azimuth Angle</i> ($^{\circ}$)	47
4.2.3	<i>Coefficient of Power (CP)</i> berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	50
4.2.4	Distribusi Koefisien Tekanan (C_p)	52
4.2.5	Kontur Kecepatan	54
4.2.6	Kontur Koefisien Tekanan	59
4.3	Diskusi	65

4.3.1	Analisa <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>Azimuth Angle</i> (°).....	65
4.3.2	Analisa Kontur Kecepatan dan Koefisien Tekanan	66
BAB V KESIMPULAN		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
DAFTAR PUSTAKA.....		70
LAMPIRAN		72
BIODATA PENULIS.....		77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (HAWT), (b) <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (VAWT) (Mathew & Philip, 2012)	6
Gambar 2.2 Konstruksi Turbin angin Savonius : (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas (Mahmoud et al., 2012)	7
Gambar 2.3 Gaya-gaya yang terjadi disekeliling fluida pada penampang benda 2 dimensi. (a) <i>Pressure Force</i> ; (b) <i>Viscous Force</i> ; (c) <i>Resultant Force</i> (Munson et al., 2013).....	8
Gambar 2.4 Konfigurasi turbin angin Savonius (Yuwono et al., 2020)	11
Gambar 2.5 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CP) sebagai fungsi TSR (λ) untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8 (Yuwono et al., 2020)	11
Gambar 2.6 Grafik <i>Coefficient of Power</i> (CP) sebagai fungsi TSR (λ) untuk jarak (S/D) = 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020)	12
Gambar 2.7 Grafik koefisien daya maksimum turbin angin Savonius (Yuwono et al., 2020)	12
Gambar 2.8 Grafik <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) sebagai fungsi TSR (λ) untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020)	13
Gambar 2.9 Grafik torsi statis untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8.....	13
Gambar 2.10 Grafik torsi statis untuk jarak (S/D) = 1,4, 1,6, 1,8, 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020).....	14
Gambar 2.11 Geometri percobaan (Tsutsui & Igarashi, 2002)	14
Gambar 2.12 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkular, (a) dengan Re ; (b) dengan (d/D) (Tsutsui & Igarashi, 2002)	15
Gambar 2.13 Grafik tekanan didepan titik stagnasi dan tekanan dasar (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	15
Gambar 2.14 Grafik distribusi tekanan yang berfluktuasi di sekitar silinder sirkular (Tsutsui & Igarashi, 2002)	16
Gambar 2.15 Grafik koefisien <i>drag</i> (CD) (Tsutsui & Igarashi, 2002).....	16
Gambar 2.16 Konfigurasi turbin angin Savonius (Sakti et al., 2019).....	17
Gambar 2.17 Geometri simulasi (Sakti et al., 2019)	17
Gambar 2.18 Konfigurasi <i>mesh</i> untuk simulasi CFD (a) Tampilan <i>isometric</i> untuk <i>wake zone</i> dan <i>fixed zone</i> ; (b) Posisi letak silinder sirkular tipe I-65° pada sumbu Y (Sakti et al., 2019)	18
Gambar 2.19 Perbandingan <i>Coefficient of Power</i> secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular Tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan (S/D) = 1,4 (Sakti et al., 2019) ..	18
Gambar 2.20 Perbandingan <i>Coefficient of Moment</i> secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan (S/D) = 1,4 (Sakti et al., 2019) ...	19
Gambar 2.21 Grafik Torsi Statis (Ncm) sebagai fungsi dari <i>blade angle</i> (θ) secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan (S/D) = 1,4 (Sakti et al., 2019)	19
Gambar 2.22 Perbandingan kontur kecepatan antara turbin konvensional dan sesudah diberi silinder sirkular tipe I-65° pada TSR =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 sirkular tipe I-65°, (c) Turbin pada sudut bilah 90°, (d) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder sirkular tipe I-65°, (e) Turbin pada sudut bilah 150°, (f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder sirkular tipe I-65° (Sakti et al., 2019)	20
Gambar 2.23 Geometri turbin angin Savonius dengan penambahan tirai (<i>curtain</i>) (Deda Altan et al., 2008).....	21

Gambar 2.24 Grafik efek panjang tirai (<i>curtain</i>) dengan koefisien daya maksimum rotor (Deda Altan et al., 2008)	22
Gambar 2.25 (a) Grafik pengaruh kecepatan rotasi terhadap sudut tirai (<i>curtain</i>) pada <i>curtain</i> 1; (b) Grafik pengaruh panjang tirai (<i>curtain</i>) pada torsi dengan kecepatan rotasi $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Deda Altan et al., 2008).....	22
Gambar 2.26 Grafik pengaruh panjang tirai (<i>curtain</i>) pada koefisien daya dengan TSR (λ) di sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Deda Altan et al., 2008)	23
Gambar 2.27 Geometri yang digunakan (Setiawan et al., 2019).....	23
Gambar 2.28 (a) Grafik koefisien torsi (C_m) terhadap fungsi TSR, (b) Grafik koefisien daya (C_p) terhadap fungsi TSR (λ) (Setiawan et al., 2019).....	24
Gambar 2.29 Koefisien torsi dinamis pada TSR (λ) = 0,9 (Setiawan et al., 2019)	24
Gambar 2.30 <i>Velocity pathline structure</i> untuk TSR (λ) 0,9 dan sudut bilah $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019).....	25
Gambar 2.31 Kontur tekanan (<i>pressure contour</i>) untuk TSR (λ) 0,9 dan $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019).....	26
Gambar 2.32 Distribusi tekanan (<i>pressure distribution</i>) pada permukaan bilah untuk variasi diameter (d_s/D) = 0,5 di TSR (λ) = 0,9 dan $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019).....	26
Gambar 2.33 Skema penelitian (Maghfira, 2016)	27
Gambar 2.34 Grafik nilai torsi statis yang dihasilkan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi jarak S/D pada nilai <i>Reynolds</i> (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016).....	27
Gambar 2.35 Grafik nilai torsi statis dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T_0) sebagai fungsi jarak S/D pada nilai <i>Reynolds</i> (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)	28
Gambar 2.36 Grafik nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) yang dihasilkan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi jarak S/D pada nilai <i>Reynolds</i> (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)	29
Gambar 2.37 Grafik nilai <i>Coefficient of Power</i> (CoP) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak S/D pada nilai <i>Reynolds</i> (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016).....	29
Gambar 3.1 Geometri turbin angin Savonius konfigurasi A dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$	31
Gambar 3.2 Geometri turbin angin Savonius konfigurasi B dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$	32
Gambar 3.3 Tampilan tampak <i>meshing</i> secara keseluruhan turbin angin Savonius konvensional	32
Gambar 3.4 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor	32
Gambar 3.5 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius konvensional di sekitar sudu.....	33
Gambar 3.6 Tampilan tampak <i>meshing</i> secara keseluruhan turbin angin Savonius dengan variasi Y/D	33
Gambar 3.7 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor	33
Gambar 3.8 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius variasi Y/D di sekitar <i>circular cylinder</i>	34
Gambar 3.9 Tampilan tampak <i>meshing</i> secara keseluruhan turbin angin Savonius dengan variasi Y/D ; S/D	34
Gambar 3.10 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor	34

Gambar 3.11 Tampilan gambar <i>meshing</i> turbin angin Savonius variasi Y/D; S/D di sekitar <i>circular cylinder</i>	35
Gambar 3.12 <i>Boundary condition</i> penelitian	35
Gambar 3.13 Grafik <i>grid independency test</i>	38
Gambar 3.14 <i>Flowchart</i> simulasi turbin konvensional	39
Gambar 3.15 <i>Flowchart</i> simulasi turbin konvensional	40
Gambar 3.16 <i>Flowchart</i> simulasi turbin angin dengan variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) = 1,80 dan 1,90.	40
Gambar 3.17 <i>Flowchart</i> simulasi turbin angin dengan variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) = 1,80 dan 1,90.	41
Gambar 3.18 <i>Flowchart</i> simulasi turbin angin dengan variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 serta Y/D = 1,90; S/D = 1,90.	42
Gambar 3.19 <i>Flowchart</i> simulasi turbin angin dengan variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 serta Y/D = 1,90; S/D = 1,90.	43
Gambar 4.1 Grafik komparasi hasil simulasi perbandingan nilai <i>Coefficient of Power</i> (CP) hasil penelitian Sakti et al., 2019 dan penelitian saat ini	44
Gambar 4.2 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada variasi Y/D	45
Gambar 4.3 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada variasi Y/D; S/D	46
Gambar 4.4 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada semua variasi	47
Gambar 4.5 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>azimuth angle</i> ($^{\circ}$) dengan variasi Y/D di TSR 0.6	48
Gambar 4.6 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>azimuth angle</i> ($^{\circ}$) dengan variasi Y/D; S/D di TSR 0.7	49
Gambar 4.7 Grafik perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> (CP) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D)	50
Gambar 4.8 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Power</i> (CP) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada variasi Y/D = 1,80 dan 1,90. Serta variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90	51
Gambar 4.9 Grafik perbandingan nilai <i>Coefficient of Power</i> (CP) berdasarkan fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> (λ) pada semua variasi	51
Gambar 4.10 Grafik perbandingan nilai Distribusi Koefisien Tekanan (Cp) berdasarkan fungsi x/s untuk variasi Y/D pada TSR 0.6 pada posisi <i>azimuth angle</i> 30°	52
Gambar 4.11 Grafik perbandingan nilai Distribusi Koefisien Tekanan (Cp) berdasarkan fungsi x/s untuk variasi Y/D dan S/D pada TSR 0.7 di posisi <i>azimuth angle</i> 30°	53
Gambar 4.12 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) pada <i>azimuth angle</i> = 0° , 15° , 30° dan 60°	55
Gambar 4.13 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) pada <i>azimuth angle</i> = 90° , 135° dan 150°	56
Gambar 4.14 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) pada <i>azimuth angle</i> = 0° , 15° dan 30°	57

Gambar 4.15 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) pada <i>azimuth angle</i> = 60°, 90°, 135° dan 150°	58
Gambar 4.16 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) pada <i>azimuth angle</i> = 0°	59
Gambar 4.17 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) pada <i>azimuth angle</i> = 15°, 30°, 60° dan 90°	60
Gambar 4.18 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) pada <i>azimuth angle</i> = 135° dan 150°	61
Gambar 4.19 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) pada <i>azimuth angle</i> = 0°, 15° dan 30°	62
Gambar 4.20 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan <i>circular cylinder</i> di samping sudu <i>advancing</i> (Y/D) dan di depan sudu <i>returning</i> (S/D) pada <i>azimuth angle</i> = 90°, 135° dan 150°	63
Gambar 4.21 Grafik perbandingan nilai <i>coefficient of moment</i> (Cm) berdasarkan fungsi <i>azimuth angle</i> (°) pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0	65
Gambar 4.22 Kontur kecepatan pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0 pada <i>azimuth angle</i> = 15° dan 120°	66
Gambar 4.23 Kontur koefisien tekanan pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0 pada <i>azimuth angle</i> = 15° dan 120°	67
Gambar 4.24 Kontur kecepatan relatif pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai <i>Coefficient drag</i> . (a) 2 Dimensi, (b) 3 Dimensi (Munson et al., 2013)	8
Tabel 2.2 Dimensi ukuran tirai (<i>curtain</i>) (Deda Altan et al., 2008)	21
Tabel 3.1 Variasi simulasi yang digunakan untuk Penelitian	30
Tabel 3.2 Ukuran Geometri turbin angin Savonius	31
Tabel 3.3 Parameter yang digunakan pada tahap <i>Processing</i>	37
Tabel 3.4 Parameter <i>Tip Speed Ratio</i> , Kecepatan Angular dan <i>Time Step Size</i>	37
Tabel 3.5 <i>Grid Independency Test</i> turbin angin Savonius Konvensional	38

DAFTAR SIMBOL

F_D	= Gaya <i>drag</i> (N)
C_D	= <i>Coefficient of drag</i>
CP	= <i>Coefficient of Power</i>
P	= Daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius (watt)
T	= Torsi turbin angin Savonius (N.m)
ω	= Kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)
ρ	= Massa jenis fluida (kg/m ³)
A	= Luas <i>frontal area</i> (m ²)
V	= Kecepatan fluida (m/s)
C_T	= Koefisien Torsi
λ	= <i>Tip Speed Ratio</i>
C_m	= <i>Coefficient of Moment</i>
T_d	= Torsi dinamis (N.m)
R	= Jari-jari turbin angin Savonius (m)
\vec{T}_{shaft}	= Torsi <i>shaft</i> (N.m)
η	= Hukum Betz
a	= <i>Interference factor</i>
Re	= Bilangan Reynolds
L	= Diameter turbin (m)
μ	= Viskositas fluida (kg/m.s)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi adalah salah satu hal yang selalu dibutuhkan oleh manusia dalam keberlangsungan kehidupan sehari-hari guna memenuhi kebutuhannya. Jika melihat jumlah penduduk Indonesia, berdasarkan hasil perhitungan proyeksi penduduk, maka jumlah penduduk Indonesia di tahun 2015 adalah 255,6 juta penduduk, yang akan bertambah di tahun 2025 sebanyak 282,4 juta penduduk dan akan terus bertambah hingga 318,9 juta penduduk di tahun 2045 (**BPS Statistics Indonesia, 2018**). Dengan penambahan populasi penduduk maka akan berdampak terhadap tingkat kebutuhan atau komposisi dari permintaan terhadap energi (**Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019**). Hal ini dibutuhkan dari data permintaan listrik pada tahun 2025 dimana akan tumbuh sebesar 11-12% (**Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019**).

Dari korelasi kebutuhan dan keberlangsungan manusia yang makin lama makin banyak dan bersifat terus-menerus, maka lambat laun ketersediaan energi fosil seperti minyak bumi, batubara maupun gas alam akan menipis bahkan bisa hingga ke titik kehabisan/punah. Salah satu buktinya adalah produksi minyak bumi selama 10 tahun terakhir menunjukkan kecenderungan menurun, dari 346 juta barel pada tahun 2009 menjadi sekitar 283 juta barel di tahun 2018. Penurunan produksi ini disebabkan oleh sumur-sumur yang berfungsi sebagai produksi utama minyak bumi sudah memiliki usia yang tua, sedangkan pembuatan sumbur yang baru masih sangat jarang dan relatif masih terbatas (**Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019**). Selain ketersediaan, energi fosil yang digunakan terus-menerus akan membuat kerugian bagi lingkungan secara langsung maupun tidak langsung. Salah satu contohnya adalah, terjadi pencemaran udara, emisi rumah kaca dan pemanasan global yang keduanya bisa berdampak terhadap kerusakan lingkungan itu sendiri. Oleh karena itu, dibutuhkan jalan keluar guna menghindari kehabisan ketersediaan energi fosil dan meminimalisir kerusakan lingkungan adalah hal yang wajib. Salah satu jalan keluar yang ada adalah dengan mengganti energi fosil menjadi sumber energi terbarukan. Contohnya adalah energi angin, sebagai sumber energi yang dapat terbarukan, maka angin merupakan energi yang cocok karena bisa didapatkan dengan ketersediaan yang ada dimana-mana walaupun terdapat perbedaan kecepatan yang berbeda-beda (**Prasetyo et al., 2018**).

Karena di Indonesia memiliki rentang potensi kecepatan angin di darat rata-rata sebesar 3 m/s hingga 7 m/s atau dikategorikan rendah, maka salah satu alat yang dapat dimanfaatkan dengan baik dan sesuai dengan kondisi angin di wilayah Indonesia adalah turbin angin poros vertikal (**Prasetyo et al., 2018**). Contoh turbin angin poros vertikal atau *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yang paling banyak digunakan adalah turbin angin Savonius, karena turbin ini mampu menghasilkan torsi yang tinggi di awal dengan kecepatan angin yang rendah dan dapat bekerja ke segala arah (**Abdelaziz et al., 2021**). Desain dari turbin angin Savonius ini adalah sebuah plat tabung yang dibelah dua dengan dua bilah semi silinder lurus yang berbentuk huruf S. Turbin angin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag* yang timbul pada sudu *advancing* dan sudu *returning* yang nanti akan menghasilkan torsi dan akan memutar poros turbin. Walaupun turbin angin Savonius mudah digunakan dan mampu dalam menghasilkan torsi yang tinggi, turbin angin Savonius memiliki kelemahan yaitu efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan jenis turbin angin lainnya. Berangkat dari kelemahan tersebut, terdapat beberapa penelitian yang sudah dilakukan guna mampu meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius.

Beberapa penelitian mengenai turbin angin Savonius untuk meningkatkan tingkat efisiensi turbin diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh (**Yuwono et al., 2020**)

bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan silinder sirkular pada sudu *returning* terhadap kinerja turbin angin Savonius dengan metode eksperimen. Percobaan dilakukan dengan nilai $Re = 99.000$, ukuran silinder sirkular terhadap diameter sudu ($d/D = 0,54$) dan dipasang dengan variasi ($S/D = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0$ dan $2,2$) dengan kecepatan fluida ($V = 5$ m/s). Hasil yang didapat dalam penelitian ini menunjukkan untuk silinder sirkular yang dipasang dengan variasi ($S/D < 1,8$) dapat meningkatkan koefisien daya dari turbin angin Savonius, dengan koefisien daya maksimum terjadi pada variasi ($S/D = 1,4$) dimana memiliki kenaikan koefisien daya (CP) sekitar 12,2% pada TSR (λ) sebesar 0,65 jika dibandingkan dengan turbin konvensional. Namun, untuk variasi penempatan silinder sirkular pada ($S/D > 1,8$) tidak terjadi perubahan koefisien atau sama dengan turbin konvensional. Hal ini membuktikan bahwasannya peran penggunaan silinder sirkular untuk meningkatkan koefisien daya terbukti hanya pada variasi ($S/D < 1,8$), karena pada variasi itu silinder sirkular mampu berperan sebagai pengontrol pasif aliran.

Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh (Tsutsui & Igarashi, 2002) yang berfokus tentang aliran fluida yang melalui sebuah silinder dengan pengganggu berupa silinder lain yang berdiameter lebih kecil. Tujuannya adalah meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius dengan memperbesar selisih gaya *drag* dengan cara mengurangi gaya *drag* yang ada di sudu *returning*. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan variasi diameter silinder sirkular ($D = 40$ mm, diameter batang ($d = 1$ mm hingga 10 mm, jarak longitudinal antara sumbu silinder sirkular dan batang ($L = 50$ mm hingga 120 mm, kecepatan fluida ($V = 4$ m/s – 24 m/s, intensitas turbulen sekitar 0,4%, dan bilangan *Reynolds* berdasarkan D berkisar antara $1,5104$ hingga $6,2104$). Salah satu hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah kondisi optimal dari pengurangan koefisien hambatan tekanan C_D dan total koefisien hambatan tekanan C_{DT} adalah ($d/D = 0,25$, ($L/D = 2,0$ untuk $Re < 4.1 \times 10^4$ dan ($L/D = 1,75$ untuk $Re \geq 4.1 \times 10^4$, masing-masing. Nilai C_D dan C_{DT} masing-masing menurun sebesar 73% dan 63% dibandingkan dengan silinder tunggal. Selain itu, ketika bilangan *Reynolds* naik diatas 3×10^4 , akan terbentuk gelembung pemisahan yang akan membentuk titik pemisahan bergerak dengan cepat, serta lebar lapisan geser akan terpisah menurun secara bersamaan, dan mengakibatkan angka *Strouhal* meningkat.

Penelitian berikutnya dilakukan oleh (Sakti et al., 2019) dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh silinder sirkular tipe I-65° terhadap performa turbin angin Savonius secara studi eksperimen maupun simulasi numerik. Pada penelitian ini, silinder dipotong 65° pada kedua sisi ditempatkan sejajar dengan baling-baling turbin. Silinder yg digunakan adalah silinder tipe I-65° dengan tujuan perancangan adalah menurunkan gaya seret pada sudu *returning*. Variasi yang digunakan adalah nilai *Reynolds* $Re = 9,9 \times 10^4$, kecepatan fluida ($V = 5$ m/s, diameter sudu turbin ($D = 165,2$ mm, ($d = 88,5$ mm, diameter end plate ($D_o = 333,7$ mm, tinggi ($H = 294,4$ mm, diameter poros ($b = 19$ mm, rasio diameter silinder sirkular terhadap diameter turbin ($d/D = 0,54$, rasio posisi jarak silinder sirkular terhadap diameter turbin ($S/D = 1,4$). Untuk metode simulasi numerik, disimulasikan menggunakan *software* CFD *ANSYS Fluent 19.1*. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa pemberian silinder sirkular tipe 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 TSR = 0,8, menjadi 21,8% dan 21,7 %. Begitu juga dengan nilai torsi statis turbin yang mengalami kenaikan setelah diberikan silinder sirkular tipe I-65°. Dimana nilai torsi statis tertinggi pada sudut bilah turbin 30. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150. Hasil ini juga didukung oleh studi hasil simulasi numerik dimana posisi sudut bilah 30° merupakan sudut dimana nilai torsi statis mencapai titik puncaknya untuk konfigurasi turbin Savonius konvensional maupun dengan silinder sirkular Tipe I-65°.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh (Deda Altan et al., 2008) bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan tirai (*curtaining*) pada turbin angin Savonius tanpa mengubah struktur awal rotor turbin angin Savonius. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan 3 variasi *curtain* dengan memiliki jarak (*distance*) yang berbeda-beda. Penelitian ini dilakukan di terowongan angin tipe *open circuit* dengan kapasitas daya 5,7 kW dan memiliki ukuran *circular exit* sebesar 50 cm. Untuk penempatan rotor angin, ditempatkan di 5 meter dari pintu keluar terowongan angin. Kecepatan angin yang digunakan adalah 7 m/s dengan $Re = 1,5 \times 10^5$. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah pengaturan tirai (*curtain*) yang paling optimal adalah pada sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dan koefisien daya tertinggi yang diperoleh adalah tirai (*curtain*) 1 yang meningkat sebesar 0,385 atau 38,5%.

Penelitian berikutnya dilakukan oleh (Setiawan et al., 2019) yang bertujuan untuk mengetahui efek diameter *circular cylinder* yang dipasang disamping sudu *advancing* turbin air Savonius. Penelitian ini dilakukan secara metode numerik dengan menggunakan aplikasi Gambit dan Fluent Ansys 17.0 untuk simulasi 2D. Untuk variasi rasio diameter yang digunakan adalah $(ds/D) = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ dan $0,9$ dengan variasi jarak $(X/D) = 0,5$ dan $(Y/D) = 0,7$. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah variasi diameter (ds/D) yang paling maksimal adalah $(ds/D) = 0,7$ dimana mendapatkan koefisien daya (C_p) tertinggi pada TSR (λ) = 0,7 dengan tingkat peningkatan sebesar 28%.

Dan penelitian lainnya dilakukan oleh (Maghfira, 2016) bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak antar silinder pengganggu dengan sudu *returning* turbin angin Savonius. Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu (D) = 60 mm, tinggi (H) = 80 mm, lebar *overlap* = 14 mm, dan diameter turbin = 106 mm. Silinder sirkular pengganggu memiliki diameter (d) = 30 mm yang diletakkan pada sudu *returning* turbin angin Savonius dengan rasio $(D/d) = 0,5$. Variasi jarak silinder pengganggu $(S/D) = 1,35; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0$ dan $2,1$. Untuk variasi kecepatan angin dihitung berdasarkan nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Hasil yang didapatkan adalah didapatkan nilai torsi statis terbesar dengan nilai *Reynolds number* $Re = 7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 mengalami kenaikan torsi statis sebesar 175%. *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) tertinggi dicapai oleh *Reynolds number* (Re) = 6×10^4 sebesar 600%.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan, masih diperlukan adanya penelitian lebih lanjut guna mampu meningkatkan performa efisiensi dari turbin angin Savonius. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk meningkatkan performa dari turbin angin Savonius dengan menambahkan *circular cylinder* pada dua konfigurasi secara studi simulasi numerik ANSYS FLUENT 2021 R2. Untuk konfigurasi pertama dilakukan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$. Sedangkan konfigurasi kedua adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$. Kedua konfigurasi diberi variasi kecepatan angin sebesar 4 m/s dan rasio diameter *circular cylinder* dengan diameter sudu turbin Savonius (d/D) sebesar 0,5.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis turbin angin *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin angin Savonius memiliki dua bilah semi silinder yang berbentuk huruf S, diantaranya adalah sudu *advancing* dan sudu *returning*. Dengan bentuk seperti ini, mampu membuat turbin angin Savonius menerima aliran udara dari segala arah. Cara kerjanya adalah memanfaatkan perbedaan gaya *drag* yang ada pada sudu *advancing* dan sudu *returning* yang nantinya akan menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Namun, walaupun turbin angin Savonius mudah untuk digunakan dan mampu menghasilkan torsi yang tinggi, turbin angin Savonius memiliki kelemahan efisiensi yang rendah jika dibandingkan dengan jenis

turbin angin lainnya. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan penambahan *circular cylinder* di depan *returning* serta di samping sudu *advancing* untuk membantu meningkatkan performa dari turbin angin Savonius. Hipotesa awal pada penelitian ini yaitu :

1. Penambahan *circular cylinder* di bagian samping sudu *advancing* diduga akan menyebabkan efek *nozzle* disekitar sudu *advancing*. Efek *nozzle* ini akan mengakibatkan kecepatan aliran di samping sudu *advancing* meningkat dan menyebabkan tekanan menurun. Hal ini dapat memperbesar pengaruh *attached flow* yang akan menurunkan tekanan di bagian belakang sudu *advancing*, sehingga *pressure drag* yang dihasilkan oleh selisih tekanan bagian depan dan belakang sudu *advancing* meningkat. Hal ini akan membuat gaya *drag* yang ada menjadi naik dan mengakibatkan kenaikan torsi menjadi positif. Sehingga, dengan kenaikan nilai torsi ini akan membuat daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius semakin besar.
2. Penambahan *circular cylinder* di bagian depan sudu *returning* akan membentuk *wake* di belakang *circular cylinder*. *Shear layer* yang terlepas dari *circular cylinder* akan jatuh mengenai permukaan sudu *returning*. Hal ini akan menyebabkan terjadinya percepatan transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen pada permukaan sudu *returning* dan penyempitan *wake* di belakang sudu *returning*. Hal ini akan menyebabkan terjadinya gaya *drag* dan torsi pada sudu *returning* akan menurun sehingga selisih gaya *drag* pada sudu *returning* dan sudu *advancing* semakin membesar. Dengan meningkatnya selisih gaya akan menyebabkan selisih torsi turbin meningkat dan daya yang dihasilkan juga semakin membesar. Selain itu, penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* menurunkan tekanan didepan sudu *returning* dan meningkatkan tekanan pada bagian belakang sudu *returning*. Hal ini akan menyebabkan terjadinya *pressure drag*. Namun *pressure drag* yang dihasilkan memiliki nilai yang kecil. Dengan nilai *pressure drag* yang kecil maka gaya *drag* pada sudu *returning* juga kecil dan menyebabkan torsi yang dihasilkan kecil. Dengan nilai torsi yang kecil pada sudu *returning* maka selisih dari sudu *advancing* dan sudu *returning* akan semakin berbeda jauh dan menyebabkan daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius akan semakin besar.

Hipotesa ini dapat dibuktikan dengan melakukan penelitian studi numerik turbin angin Savonius dengan konfigurasi pertama adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$. Sedangkan konfigurasi kedua adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$. Kemudian kedua konfigurasi menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm serta silinder pengganti dengan perbandingan d/D sebesar 0,5 dan kecepatan angin sebesar 4 m/s.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Simulasi 2D
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *unsteady flow* dan *incompressible flow*
3. Analisa dilakukan pada dua konfigurasi turbin angin Savonius yang berbeda, untuk konfigurasi pertama adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$. Sedangkan konfigurasi kedua adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$

4. Kedua konfigurasi menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm serta *circular cylinder* dengan perbandingan d/D sebesar 0,5 maka didapatkan diameternya adalah 82,6 mm
5. Variasi kecepatan angin konstan sebesar 4 m/s
6. Aliran udara diasumsikan satu arah melalui *inlet*
7. Rotor di analisa dalam keadaan dinamis atau berputar

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui kontur aliran dari turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$ untuk konfigurasi pertama, dan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$ untuk konfigurasi kedua.
2. Menghitung dan membandingkan nilai *Coefficient of Power* (CP), *Coefficient of Moment* (Cm), dan Distribusi Tekanan (Cp) dari turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$ untuk konfigurasi pertama, dan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$ untuk konfigurasi kedua.

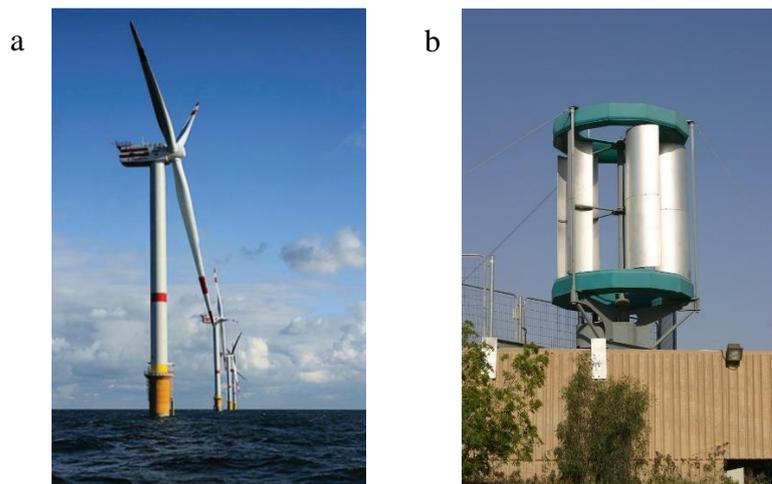
1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa kontribusi referensi teori serta referensi data mengenai perancangan turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Dengan meningkatnya angka kebutuhan energi secara global yang disertai dengan pertumbuhan emisi gas berbahaya oleh sumber daya bahan bakar fosil membuat kebutuhan akan produksi ataupun penggunaan energi terbarukan sangat diperlukan guna menyeimbangkan energi. Hal ini juga terjadi di Indonesia, disebabkan berkurangnya tingkat produksi dari energi fosil serta bentuk komitmen global dalam pengurangan emisi gas berbahaya, membuat pemerintah Indonesia membentuk PP No.79 tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional, yang berisi mengenai target dari energi terbarukan di tahun 2025 hingga tahun 2050 yang diperkirakan paling sedikit meningkat sebanyak 31% (**Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019**) Salah satunya adalah energi angin. Energi angin ini akan diubah menjadi energi listrik guna memenuhi kebutuhan energi listrik yang ada dengan cara pemanfaatan turbin angin. Secara umum, turbin angin yang ada di saat ini terbagi menjadi dua berdasarkan arah sumbunya, diantaranya *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).



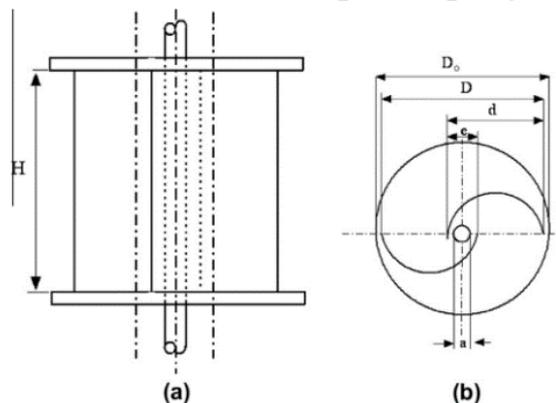
Gambar 2.1 (a) *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT), (b) *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (**Mathew & Philip, 2012**)

Horizontal Axis Wind Turbine atau HAWT merupakan jenis turbin angin yang arah poros utamanya sejajar dengan arah aliran angin atau poros utamanya searah dengan arah horizontal. Pada turbin jenis ini, prinsip kerjanya adalah dengan cara memanfaatkan gaya *lift*. Keuntungan dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) yaitu memiliki efisiensi yang lebih baik, paling banyak digunakan di pasaran, mampu digunakan untuk angin yang memiliki kecepatan tinggi. Sedangkan kekurangan dari *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) adalah memerlukan penggerak, membutuhkan menara yang lebih tinggi untuk proses pemasangan dan berdampak terhadap perawatan yang dibutuhkan. (**Johari et al., 2018; Mathew & Philip, 2012**). Sedangkan *Vertical Axis Wind Turbine* atau VAWT merupakan jenis turbin angin yang memiliki arah poros utamanya tegak lurus dengan arah aliran angin. Pada jenis turbin VAWT ini ada yang memanfaatkan prinsip kerja gaya *drag* atau lift ataupun keduanya. Adapun keuntungan dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah lebih cocok apabila memiliki kondisi angin yang berkecepatan rendah, harga yang lebih murah, perawatan yang lebih mudah dan penyusunan *gearbox* dan generator yang dapat diposisikan kedekat permukaan tanah akan

memudahkan dalam penyusunan struktural menara. Dan kekurangan dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) adalah efisiensi yang buruk, membutuhkan elevasi yang lebih tinggi. (Johari et al., 2018; Mathew & Philip, 2012).

2.2 Turbin Angin Savonius

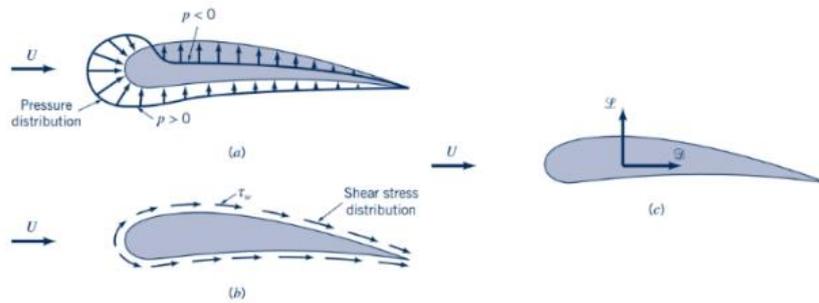
Turbin angin savonius adalah salah satu contoh dari turbin angin bertipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin angin ini diciptakan oleh Sigurd Johannes Savonius, insinyur asal Finlandia di tahun 1922. Turbin angin Savonius memiliki 2 sudu dengan sumbu vertikal, dimana sudu-sudu tersebut berbentuk seperti setengah silinder dan disatukan sehingga membentuk seperti huruf 'S'. Salah satu sudunya disebut *advancing blade*, dan sudu lainnya disebut *returning blade*. Turbin angin Savonius memiliki prinsip kerja memanfaatkan gaya *drag* yang terjadi di sudu ketika dialiri oleh aliran angin. Namun besarnya gaya *drag* dari kedua sudu tersebut berbeda karena adanya perbedaan bentuk permukaan kedua sudu tersebut terhadap aliran angin. Sudu *advancing* dengan permukaan yang cekung memiliki koefisien *drag* yang lebih besar daripada sudu *returning* dengan permukaan yang cembung. Adanya perbedaan gaya *drag* akan menimbulkan torsi, dimana torsi dikalikan dengan kecepatan putarannya menghasilkan daya. Apabila selisih dari gaya *drag* besar daya yang dihasilkan akan besar pula. Turbin Savonius memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan turbin lainnya yaitu memiliki biaya murah dalam proses pembuatannya, dan merupakan turbin yang dapat digunakan pada kecepatan angin yang rendah (Mahmoud et al., 2012), dengan kata lain turbin ini cocok jikalau dipakai di Indonesia dengan kecepatan angin rata-rata 3 m/s hingga 7 m/s (Prasetyo et al., 2018). Namun, hingga saat ini jikalau turbin angin Savonius dibandingkan dengan turbin jenis lain, turbin ini memiliki kekurangan dibagian performa ataupun efisiennya.



Gambar 2.2 Konstruksi Turbin angin Savonius : (a) Tampak Depan; (b) Tampak Atas (Mahmoud et al., 2012)

2.3 Gaya Drag

Gaya *drag* adalah gaya yang disebabkan oleh tegangan geser di sebuah permukaan benda yang nantinya akan dialiri fluida. Gaya ini biasanya berada pada medan aliran *viscous* dan memiliki arah sejajar dengan arah aliran. Gaya *drag* juga biasanya terjadi pada setiap benda yang bergerak, sebab tiap benda yang bergerak akan melewati fluida yang nantinya terjadi interaksi antar benda dengan fluida. Dari interaksi ini dapat dilihat dalam bentuk gaya, dimana ada 2 buah gaya yaitu gaya gesek (akibat efek *viscous*) dan gaya normal (akibat tekanan). Kedua gaya ini akan diproyeksi ke sumbu horizontal dan vertikal. Resultan dari kedua sumbu yang sejajar dengan arah kecepatan disebut gaya *drag* (Munson et al., 2013).



Gambar 2.3 Gaya-gaya yang terjadi disekeliling fluida pada penampang benda 2 dimensi. (a) *Pressure Force* ; (b) *Viscous Force* ; (c) *Resultant Force* (Munson et al., 2013)

Namun, gaya *drag* juga bergantung pada ukuran, bentuk, kecepatan *upstream*, massa jenis dan faktor lain yang berhubungan dengan benda padat atau *solid*. Persamaan gaya hambat atau *drag* digunakan untuk menentukan berapa besar gaya *drag* yang dialami oleh benda yang terpengaruh oleh pergerakan fluida. Berikut persamaan dari gaya *drag* :

$$F_D = C_D \times A \times \frac{\rho V^2}{2} \tag{2.1}$$

Dimana :

- F_D = Gaya drag (N)
- C_D = Coefficient of drag
- A = Luas frontal area (m²)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
- V = Kecepatan fluida (m/s)

Untuk nilai dari koefisien *drag* atau C_D bergantung pada jenis permukaan benda yang melewati oleh fluida. Dan nilai ini dapat dilihat pada tabel 2.1.

a	Shape	Reference area A ($b = \text{length}$)	Drag coefficient $C_D = \frac{q}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$	Reynolds number $Re = \rho U D / \mu$
	Square rod with rounded corners	$A = bD$	$\frac{RD}{D}$ C_D 0 2.2 0.02 2.0 0.17 1.2 0.33 1.0	$Re = 10^5$
	Rounded equilateral triangle	$A = bD$	$\frac{RD}{D}$ C_D 0 1.4 2.1 0.02 1.2 2.0 0.08 1.3 1.9 0.25 1.1 1.3	$Re = 10^5$
	Semicircular shell	$A = bD$	\Rightarrow 2.3 \Leftarrow 1.1	$Re = 2 \times 10^4$
	Semicircular cylinder	$A = bD$	\Rightarrow 2.15 \Leftarrow 1.15	$Re > 10^4$
	T-beam	$A = bD$	\Rightarrow 1.80 \Leftarrow 1.65	$Re > 10^4$
	I-beam	$A = bD$	2.05	$Re > 10^4$
	Angle	$A = bD$	\Rightarrow 1.98 \Leftarrow 1.82	$Re > 10^4$
	Hexagon	$A = bD$	1.0	$Re > 10^4$
	Rectangle	$A = bD$	$\frac{\ell D}{D}$ C_D ≤ 0.1 1.9 0.5 2.5 0.65 2.9 1.0 2.2 2.0 1.6 3.0 1.3	$Re = 10^5$
b	Shape	Reference area A	Drag coefficient C_D	Reynolds number $Re = \rho U D / \mu$
	Solid hemisphere	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	\Rightarrow 1.17 \Leftarrow 0.42	$Re > 10^4$
	Hollow hemisphere	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	\Rightarrow 1.42 \Leftarrow 0.38	$Re > 10^4$
	Thin disk	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	1.1	$Re > 10^3$
	Circular rod parallel to flow	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	$\frac{\ell D}{D}$ C_D 0.5 1.1 1.0 0.93 2.0 0.83 4.0 0.85	$Re > 10^5$
	Cone	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	θ , degrees C_D 10 0.30 30 0.55 60 0.80 90 1.15	$Re > 10^4$
	Cube	$A = D^2$	1.05	$Re > 10^4$
	Cube	$A = D^2$	0.80	$Re > 10^4$
	Streamlined body	$A = \frac{\pi}{4} D^2$	0.04	$Re > 10^5$

Tabel 2.1 Nilai *Coefficient drag*. (a) 2 Dimensi, (b) 3 Dimensi (Munson et al., 2013)

2.4 Coefficient of Power (CP)

Coefficient of Power (CP) adalah sebuah perhitungan yang berguna untuk mengukur performa dari turbin angin Savonius yaitu menentukan tingkat efisiensi dari turbin angin Savonius dimana ketika nilai dari *Coefficient of Power (CP)* semakin besar maka nilai efisiensi dari turbin angin Savonius. Berikut persamaan dalam penentuan *Coefficient of Power (CP)* :

$$CP = \frac{\text{Electricity produced by wind turbine}}{\text{Total Energy available in the wind}}$$
$$CP = \frac{P}{P_{\text{available}}}$$
$$CP = \frac{T \times \omega}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3} = C_T \times \lambda \quad (2.2)$$

Dimana :

- CP = *Coefficient of Power*
- P = Daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius (watt)
- T = Torsi turbin angin Savonius (N.m)
- ω = Kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
- A = Luas *frontal area* (m^2)
- V = Kecepatan fluida (m/s)
- C_T = Koefisien Torsi
- λ = *Tip Speed Ratio*

2.5 Coefficient of Moment (Cm)

Coefficient of Moment (Cm) merupakan nilai yang menunjukkan perbandingan antara torsi dinamis dari turbin angin dengan torsi teoritis dari aliran angin pada sebuah turbin terhadap parameter geometri sebuah turbin angin. Adapun pada penelitian ini, turbin angin yang digunakan adalah turbin angin Savonius, sehingga parameter geometri yang digunakan adalah geometri dari turbin angin Savonius. Nilai dari *Coefficient of Moment (Cm)* juga dapat diperoleh dengan menggunakan perbandingan dari nilai *Coefficient of Power (CP)* dengan *Tip Speed Ratio* (λ) dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Cm = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A \times R} \quad (2.3)$$

Dimana :

- Cm = *Coefficient of Moment*
- T_d = Torsi dinamis (N.m)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)
- V = Kecepatan fluida (m/s)
- A = Luas *frontal area* (m^2)
- R = Jari-jari turbin angin Savonius (m)

2.6 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio atau TSR adalah sebuah nilai dari perbandingan antara kecepatan tangensial dari ujung *blade* turbin dengan kecepatan aliran dari angin. *Tip Speed Ratio* (TSR)

berhubungan dengan efisiensi turbin dimana mengatur untuk sistem konfigurasi dari *blade* turbin yang optimal. Untuk rumusnya, dapat ditulis sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{\omega \times R}{V} \quad (2.4)$$

Dimana :

- λ = *Tip Speed Ratio*
- ω = Kecepatan angular turbin angin Savonius (rad/s)
- R = Jari-jari turbin angin Savonius (m)
- V = Kecepatan fluida (m/s)

2.7 Hukum Betz

Hukum Betz atau *Betz Limits* adalah batas efisiensi maksimum dari turbin angin konvensional yang nilainya tak hanya dipengaruhi oleh cacat desain. Nilai maksimum turbin angin konvensional adalah 0,59. Dengan rumus sebagai berikut :

$$\eta = 4a (1 - a)^2 \quad (2.5)$$

Dimana :

- η = Hukum Betz
- a = *Interference factor*

Alasan dibalik fenomena nilai batas efisiensi ini tidak hanya disebabkan oleh kelemahan dalam desain teknologi, karena ini juga terjadi akibat tidak bisanya turbin angin mengambil seluruh energi yang ada pada aliran hulu turbin dan dalam mengekstrak energi dari angin, turbin membutuhkan adanya perubahan tekanan yang dapat mengubah pola aliran. Namun hingga kini, masih banyak dibutuhkan penelitian secara komprehensif untuk mengetahui penyebab fenomena ekspansi aliran ini yang akan menyebabkan pengaruh nilai batas efisiensi.

2.8 Momentum Angular

Momentum angular digunakan untuk menyatakan laju perpindahan dari *momentum angular* setara dengan nilai total torsi yang bekerja di sebuah sistem, hal ini dikatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$\vec{T} = \left(\frac{d \vec{H}}{dt} \right)_{system}$$

$$\vec{H}_{system} = \int_{M(system)} \vec{r} \times \vec{V} dm = \int_{CV} \vec{r} \times \vec{V} \rho dV \quad (2.6)$$

Dikarenakan torsi bisa timbul akibat gaya, permukaan serta poros, maka saat *momentum angular* ini diaplikasikan pada *finite control volume*, maka persamaan yang didapatkan ialah :

$$\vec{r} \times \vec{F}_s + \int_{CV} \vec{r} \times \vec{g} \rho V + \vec{T}_{shaft} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{CV} \vec{r} \times \vec{V} \rho dV + \int_{CS} \vec{r} \times \vec{V} \rho \vec{V} d\vec{A}$$

$$\vec{T}_{shaft} = \int_{CS} \vec{r} \times \vec{V} \rho \vec{V} d\vec{A} \quad (2.7)$$

Dimana :

- \vec{T}_{shaft} = Torsi shaft (N.m)
- \vec{r} = Panjang lengan dari pusat gaya menuju posisi shaft (m)

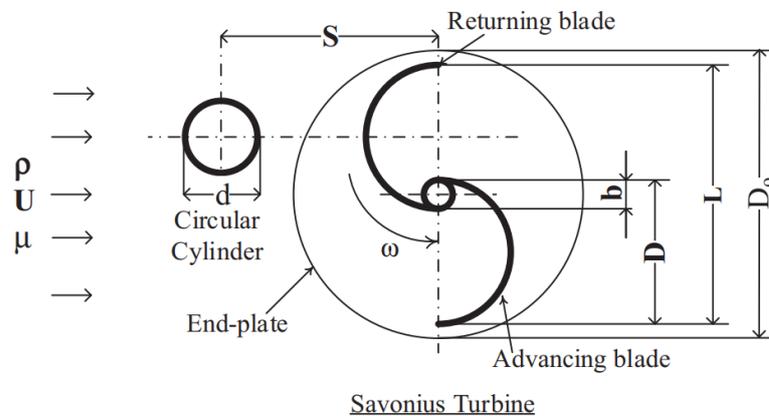
- \vec{V} = Kecepatan fluida (m/s)
 ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
 \vec{A} = Luas *frontal area* (m²)

2.9 Penelitian Terdahulu

Didalam pembuatan serta pelaksanaan penelitian ini, terdapat beberapa referensi dari penelitian terdahulu yang pernah dilakukan dan berkaitan untuk dapat membantu serta menunjang penelitian ini. Berikut adalah penelitian yang digunakan :

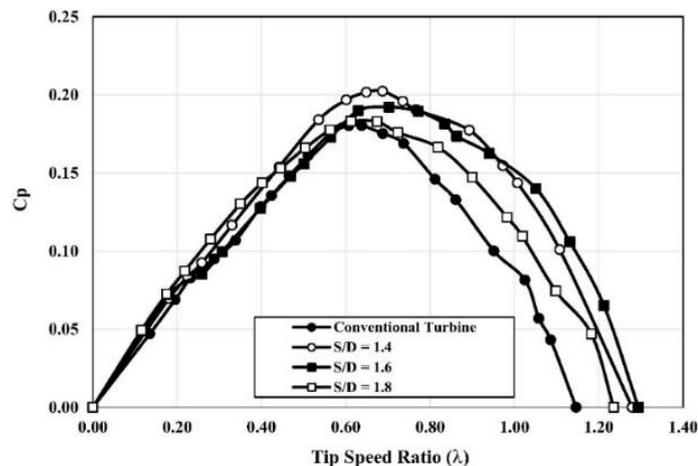
2.9.1 Penelitian dengan judul “Improving the Performance of Savonius Wind Turbine by Installation of a Circular Cylinder Upstream of Returning Turbine Blade”

Penelitian ini dilakukan oleh (Yuwono et al., 2020) bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemasangan silinder sirkular di depan sudu *returning* terhadap kinerja turbin angin Savonius dengan metode eksperimen.

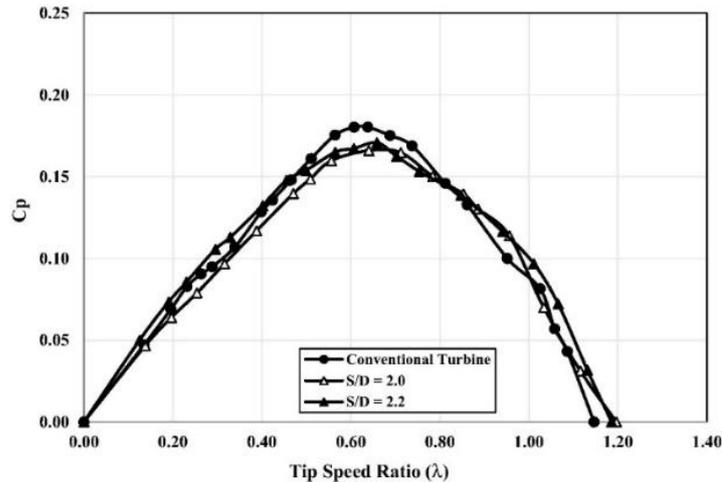


Gambar 2.4 Konfigurasi turbin angin Savonius (Yuwono et al., 2020)

Jika melihat gambar 2.4, spesifikasi dari turbin angin Savonius diameter (D) = 165,2 mm, tinggi (H) = 500 mm, dan diameter poros (b) = 19 mm. Untuk silinder sirkular memiliki tinggi (h) = 500 mm, diameter (d) = 88,5 mm, dan rasio (d/D) = 0,54. Percobaan ini dilakukan dengan nilai Re sebesar 99.000, dengan ukuran silinder sirkular terhadap diameter sudu (d/D) adalah 0,54 dan dipasang dengan variasi (S/D) 1,4, 1,6, 1,8, 2,0, dan 2,2 dengan kecepatan fluida (V) sebesar 5 m/s.

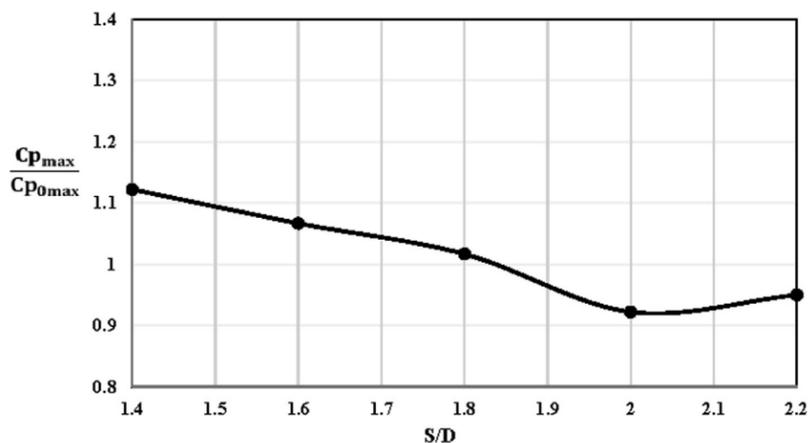


Gambar 2.5 Grafik *Coefficient of Power* (C_p) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8 (Yuwono et al., 2020)



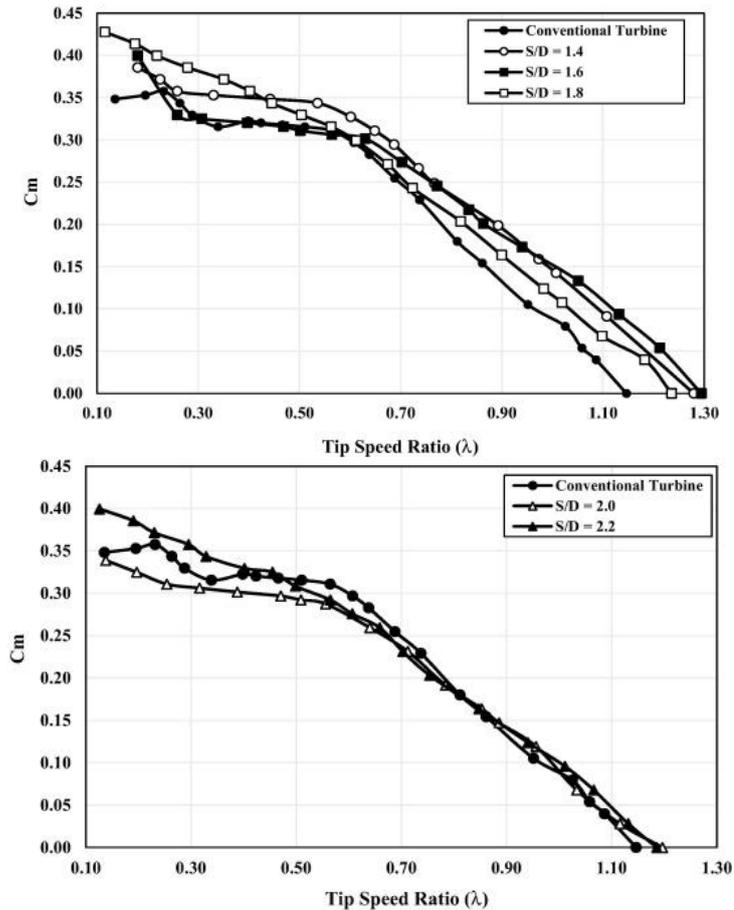
Gambar 2.6 Grafik *Coefficient of Power* (CP) sebagai fungsi TSR (λ) untuk jarak (S/D) = 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020)

Dapat dilihat pada gambar 2.5 dan 2.6, bahwa ketika ada pemasangan silinder pada S/D = 1,4; 1,6 dan 1,8 didepan sudu *returning* terjadi peningkatan *Coefficient of Power* (CP). Dimana *Coefficient of Power* (CP) maksimum terjadi pada sekitar 0,65, 0,70 dan 0,67 dimana meningkat masing-masing sekitar 12,2%, 6,7% dan 1,7% untuk (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8. Untuk pemasangan *stationary* silinder sirkular akan membentuk rongga yang mempengaruhi penurunan gaya *drag* pada silinder utama di belakang. Silinder sirkular yg dipasang di depan berfungsi sebagai kontrol pasif aliran, dimana lapisan geser yg berasal dari silinder sirkular akan berinteraksi dengan silinder di belakang yg berakibat distribusi aliran di sekitar sudu *returning* terganggu dan membuat proses separasi tertunda secara drastis. Jadi, gaya hambat yang bekerja pada sudu *returning* berkurang. Namun apabila posisi dari silinder sirkular dijauhkan dari sudu *returning* yaitu (S/D) > 1,8 maka nilai *Coefficient of Power* (CP) bisa sama atau bahkan lebih rendah dari nilai yang ada di turbin konvensional. Hal ini disebabkan karena tidak efektifnya peran silinder sirkular sebagai pengontrol pasif aliran.



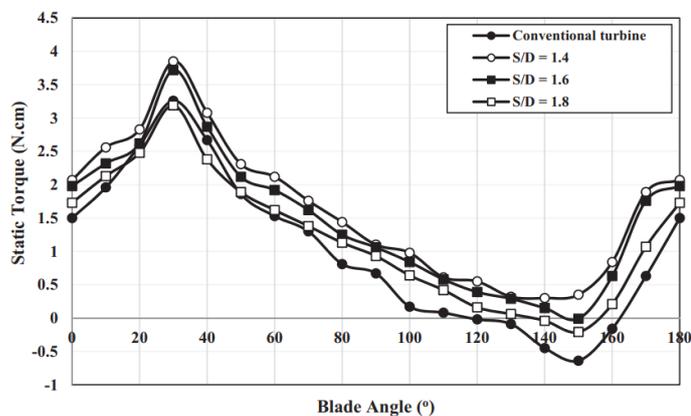
Gambar 2.7 Grafik koefisien daya maksimum turbin angin Savonius (Yuwono et al., 2020)

Gambar diatas menunjukkan koefisien daya maksimum untuk (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8 adalah 1,122; 1,067; dan 1,017 kali koefisien daya maksimum turbin konvensional atau sekitar 12,2 %, 6,7%, dan 1,7%. Pada (S/D) > 1,8 didapatkan nilainya dibawah 1. Hal ini menunjukkan bahwa silinder sirkular di depan sudu *returning* pada (S/D) > 1,8 sebagai pengendali pasif aliran tidak efektif.

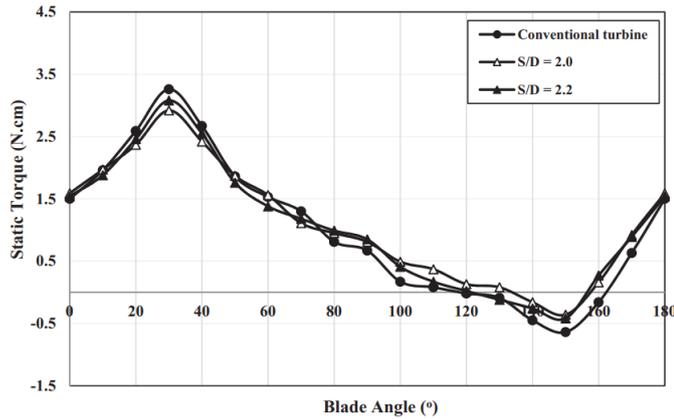


Gambar 2.8 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) sebagai fungsi TSR (λ) untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020)

Dapat dilihat pada gambar 2.8 bahwa ketika dipasang silinder sirkular pada jarak (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8 didepan sudu *returning* dapat memberikan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) yang tinggi. Peningkatan *Coefficient of Moment* (C_m) ini menunjukkan bahwa penambahan silinder sirkular memberikan peningkatan kinerja pada turbin. Namun sebaliknya, ketika silinder sirkular dijauhkan dari sudu *returning* pada (S/D) > 1,8 hasil perbandingannya cukup rumit, dimana untuk $\lambda < 0.44$ nilai *Coefficient of Moment* (C_m) turbin konvensional lebih rendah dibandingkan saat didepan sudu *returning* yang dipasang silinder sirkular pada (S/D) = 2,2 namun lebih tinggi pada $S/D = 2,0$.



Gambar 2.9 Grafik torsi statis untuk jarak (S/D) = 1,4; 1,6 dan 1,8

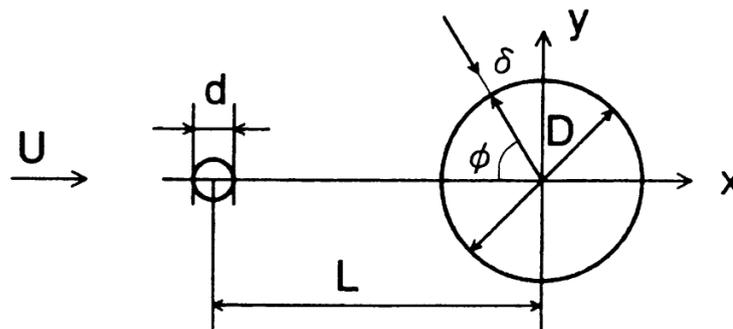


Gambar 2.10 Grafik torsi statis untuk jarak (S/D) = 1,4, 1,6, 1,8, 2,0 dan 2,2 (Yuwono et al., 2020)

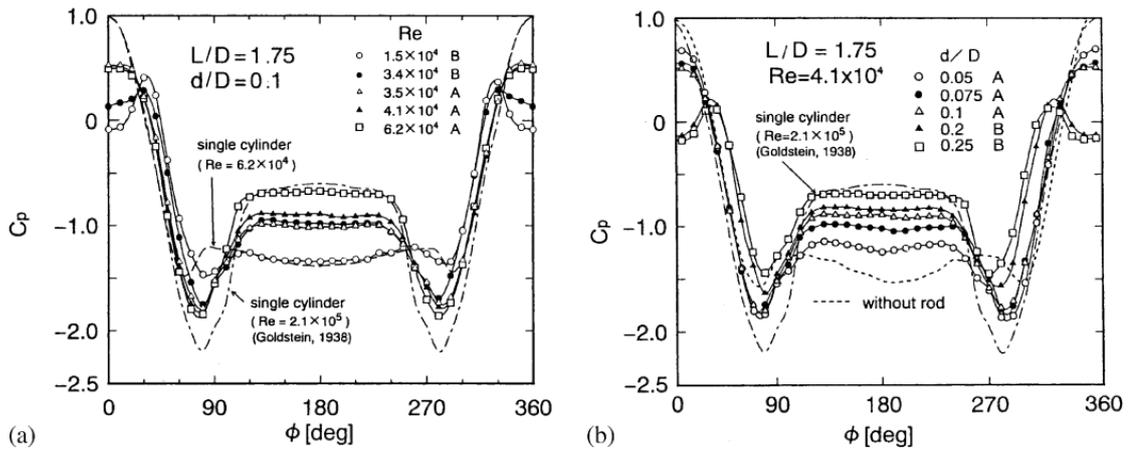
Gambar 2.9 dan 2.10 juga menunjukkan adanya peningkatan nilai torsi statis di setiap posisi sudut sudu, terutama pada (S/D) = 1,4 dan 1,6. Peningkatan ini disebabkan oleh turunnya tekanan *drag* pada sudu *returning* akibat silinder sirkular. Namun untuk jarak (S/D) = 2,0 dan 2,2 didapatkan nilai torsi statis yang sama dengan turbin konvensional. Selain itu, terdapat nilai torsi statis negatif, yang diperoleh dalam kisaran sudut sudu antara 130° dan 160° . Nilai negatif berarti pada kisaran sudut sudu ini, turbin konvensional tidak memiliki kemampuan untuk memulai sendiri. Dengan adanya silinder sirkular di bagian depan sudu *returning* pada jarak S/D = 1,4 dan 1,6 ternyata meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin. Hal ini ditunjukkan oleh nilai positif dari torsi statis untuk semua posisi sudut sudu, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Ketika jarak (S/D) meningkat lebih jauh dari 1,6, keberadaan silinder sirkular di bagian hulu dari sudu *returning* tidak dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* dari turbin sudu. Kondisi tersebut kembali menegaskan bahwa keberadaan silinder sirkular di depan sudu *returning* pada $S/D > 1,8$ sudah tidak efektif lagi untuk meningkatkan kinerja turbin.

2.9.2 Penelitian dengan judul “*Drag reduction of a circular cylinder in air stream*”

Penelitian ini dilakukan oleh (Tsutsui & Igarashi, 2002), dengan fokus tentang aliran fluida yang melalui sebuah silinder dengan pengganggu berupa silinder lain yang berdiameter lebih kecil. Percobaan dilakukan di terowongan angin berkecepatan rendah dengan dimensi tinggi = 400 mm, lebar = 150 mm dan panjang = 800 mm. Diameter silinder sirkular, (D) adalah 40 mm, dan diameter batang, (d) berkisar antara 1 hingga 10 mm. Jarak longitudinal antara sumbu silinder sirkular dan batang, (L) sebesar dari 50 mm hingga 120 mm. Kecepatan fluida, (V) bervariasi dari 4 m/s hingga 24 m/s dan intensitas turbulen sekitar 0,4% dalam kisaran ini. Nilai *Reynolds* berdasarkan D adalah dari $1,5 \times 10^4$ hingga $6,2 \times 10^4$. Aliran di sekitar silinder sirkular divisualisasikan dengan menggunakan terowongan asap. Hal ini digambarkan pada gambar 2.11.

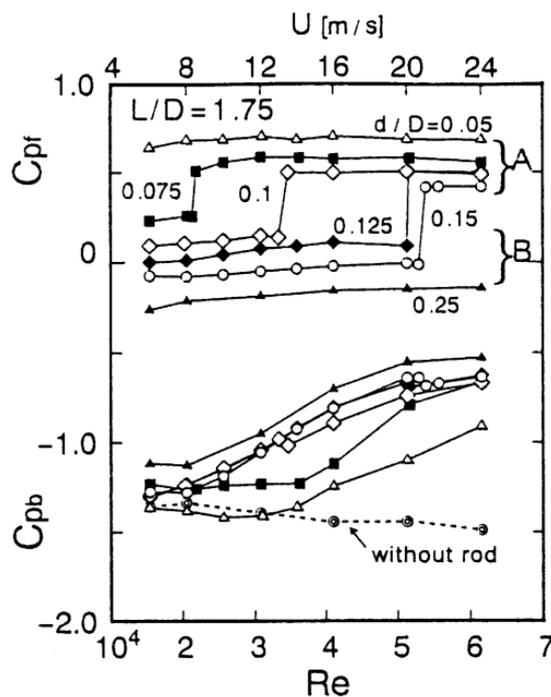


Gambar 2.11 Geometri percobaan (Tsutsui & Igarashi, 2002)



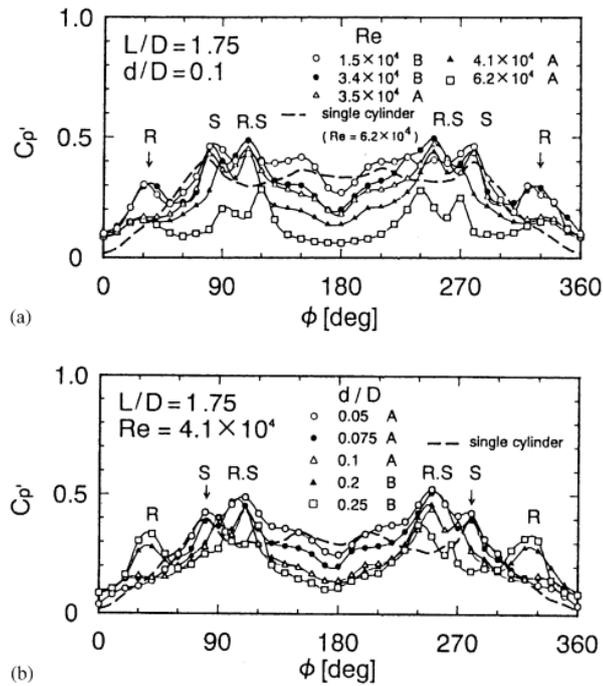
Gambar 2.12 Grafik distribusi tekanan pada silinder sirkular, (a) dengan Re ; (b) dengan (d/D) (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Gambar 2.12 adalah gambar distribusi tekanan di sekitar silinder sirkular. Gambar a menunjukkan variasi distribusi tekanan dengan nilai *Reynolds* di $(L/D) = 1,75$, $(d/D) = 0,1$. Pola aliran berubah dari B ke A pada $Re = (3.4 - 3.5) \times 10^4$. Jika melihat di gambar, ada perbedaan antara pola A dengan pola B didepan silinder sirkular, dimana pola A memiliki nilai koefisien tekanan (C_p) menurun hingga 0,5 yang disebabkan penurunan kecepatan saat mendekati silinder sirkular. Sedangkan untuk pola B, nilai C_p pada area depan memiliki nilai negatif dikarenakan *quasi-static vortex* yang terbentuk di batang dan silinder sirkular. Nilai C_p pada pola B diangka maksimum 0,2 hingga 0,5. Nilai minimum C_p didapat pada $\phi = 70^\circ - 90^\circ$ atau $(270^\circ - 290^\circ)$ dan posisi bergerak dengan kenaikan nilai dan posisi bergerak dengan kenaikan nilai *Reynolds*. Nilai C_{pb} atau *base pressure coefficient* meningkat sesuai dengan kenaikan nilai *Reynolds*. Dan untuk gambar b menunjukkan bahwa pada pola aliran a di $(d/D) \leq 0,05$ dan b di $(d/D) \geq 0,075$, nilai C_{pb} meningkat sesuai dengan kenaikan nilai (d/D) .



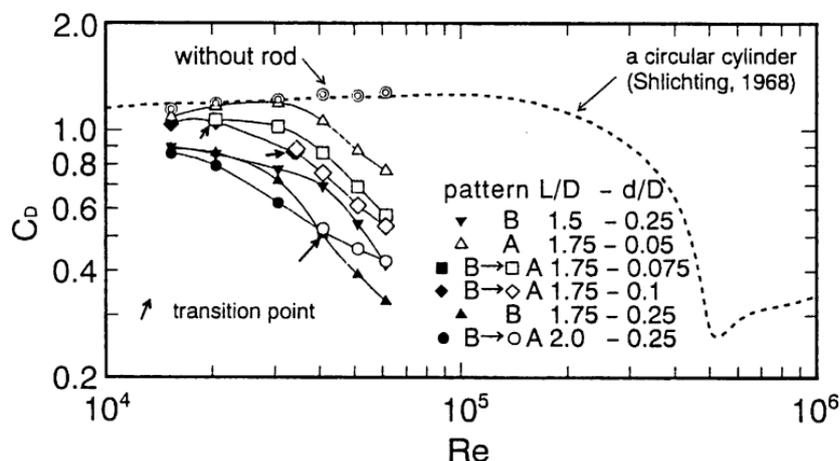
Gambar 2.13 Grafik tekanan didepan titik stagnasi dan tekanan dasar (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Gambar 2.13 adalah koefisien tekanan pada titik stagnasi depan (C_{pt}), dimana $\varphi = 0^\circ$ dan koefisien tekanan dasar (C_{pb}), $\varphi = 180^\circ$ untuk $(L/D) = 1,75$, $(d/D) = 0,05$ dan $0,25$. Untuk nilai C_{pf} adalah konstan dan tidak bergantung pada nilai *Reynolds*, dikarenakan pola aliran yang tetap dipertahankan untuk pola a dan b. Namun untuk jarak $(d/D) = 0,075 - 0,15$, nilai C_{pf} berubah sesuai dengan nilai *Reynolds* yang ditentukan dan hal ini membuat pola aliran berubah dari b ke a. Dan nilai *Reynolds* meningkat sesuai dengan membesarnya diameter batang. Begitupula dengan C_{pb} meningkat dengan kenaikan nilai *Reynolds* dan diameter batang.



Gambar 2.14 Grafik distribusi tekanan yang berfluktuasi di sekitar silinder sirkular (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Gambar diatas adalah grafik distribusi tekanan yang berfluktuasi di sekitar silinder sirkular. Untuk gambar a menunjukkan variasi C'_p menurun ketika jumlah nilai *Reynolds* bertambah. Pola aliran juga berubah dari b ke a pada $Re = (3.4 - 3.5) \times 10^4$. Dan gambar b menunjukkan variasi C'_p menurun ketika nilai (d/D) meningkat.

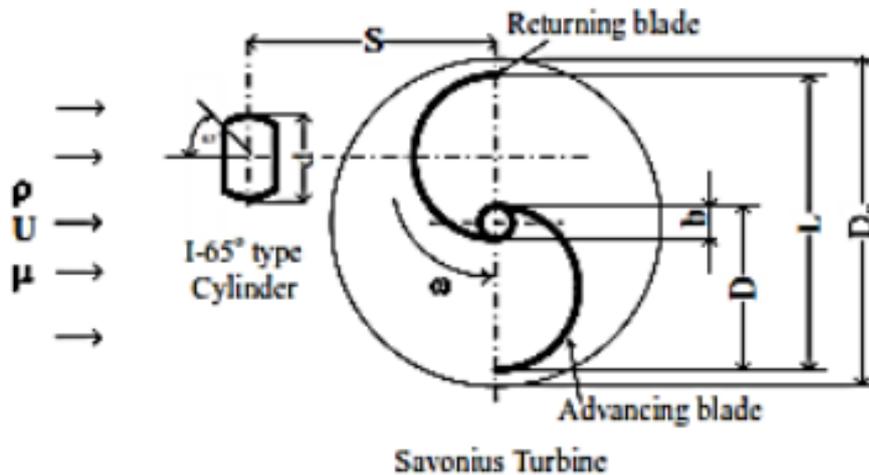


Gambar 2.15 Grafik koefisien drag (C_D) (Tsutsui & Igarashi, 2002)

Melalui gambar 2.15, didapatkan bahwa penurunan nilai koefisien *drag* (CD) disebabkan oleh peningkatan nilai *Reynolds* dan peningkatan (d/D) serta penurunan nilai dari (L/D). Pada saat nilai *Reynolds* mengalami peningkatan diatas 3×10^4 , maka titik separasi akan bergeser semakin cepat, daerah *wake* menyempit (koefisien *drag* menurun).

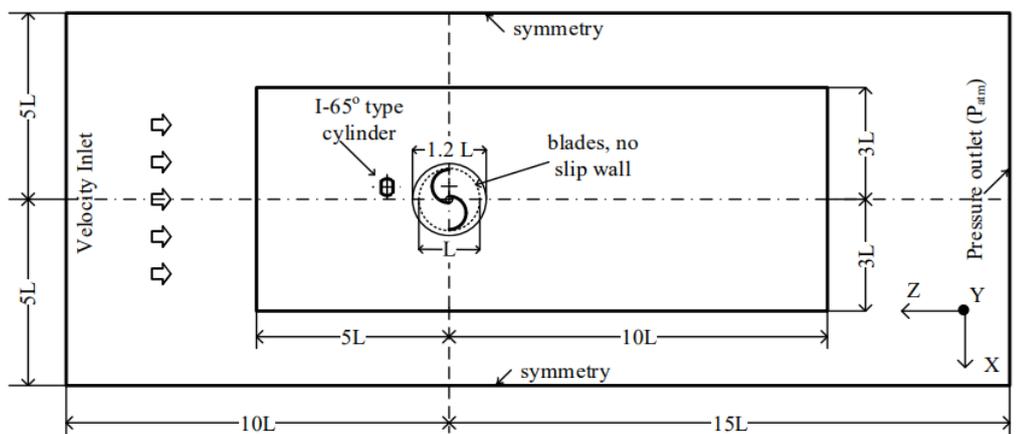
2.9.3 Penelitian dengan Judul “*Experimental and Numerical Investigation of I-65° Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance*”

Penelitian ini dilakukan oleh (Sakti et al., 2019) dimana menguji secara studi eksperimen maupun simulasi numerik tentang pengaruh silinder sirkular tipe I-65° terhadap performa turbin angin Savonius. Dalam penelitian ini, silinder dipotong 65° pada kedua sisi ditempatkan didepan sudu *returning* turbin angin Savonius. Silinder yg digunakan adalah silinder tipe I-65° dengan tujuan perancangan adalah menurunkan gaya *drag* pada *returning* blade. Penelitian ini dilakukan dengan eksperimental dan numerik, dengan dan tanpa pemasangan silinder tipe I-65° yang sejajar dengan sumbu horizontal sudu *returning*.

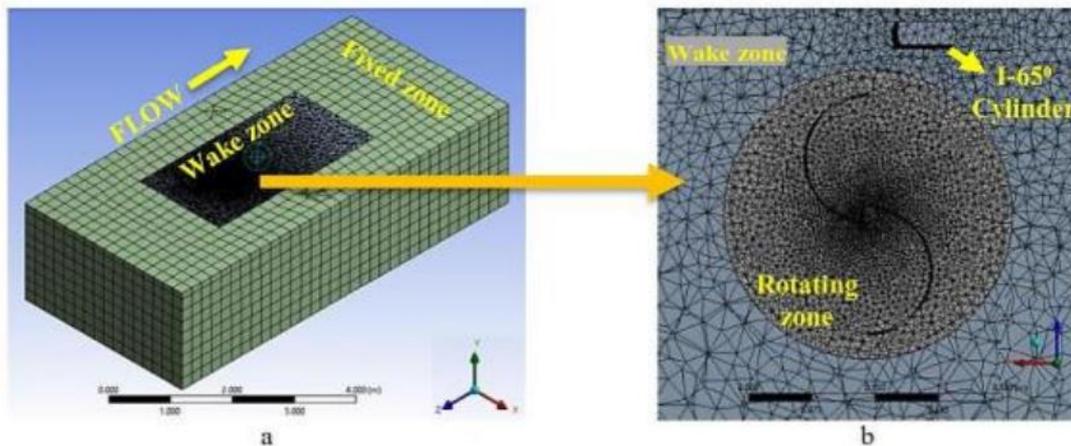


Gambar 2.16 Konfigurasi turbin angin Savonius (Sakti et al., 2019)

Untuk gambar 2.16 menggambarkan konfigurasi turbin angin Savonius dengan nilai *Reynolds* (Re) = $9,9 \times 10^4$, kecepatan fluida (V) = 5 m/s, diameter sudu turbin (D) = 165,2 mm, (d) = 88,5 mm, diameter *end plate* (D_o) = 333,7 mm, tinggi (H) = 294,4 mm, diameter poros (b) = 19 mm, rasio diameter silinder sirkular terhadap diameter turbin (d/D) = 0.54, rasio posisi jarak silinder sirkular terhadap diameter turbin (S/D) = 1,4.

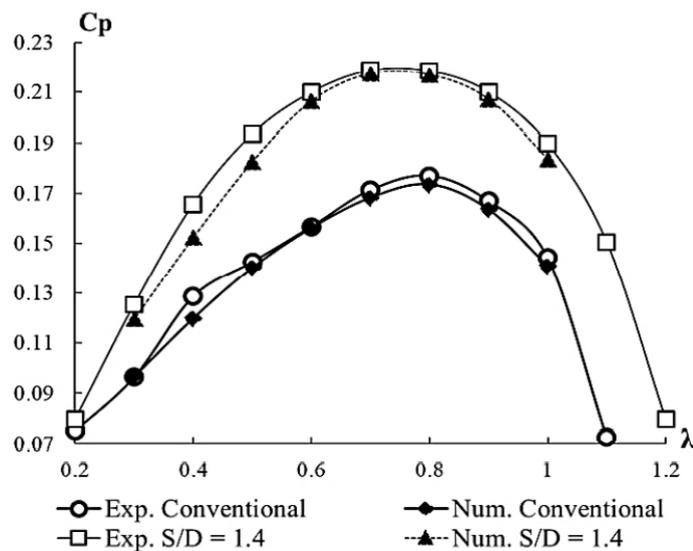


Gambar 2.17 Geometri simulasi (Sakti et al., 2019)



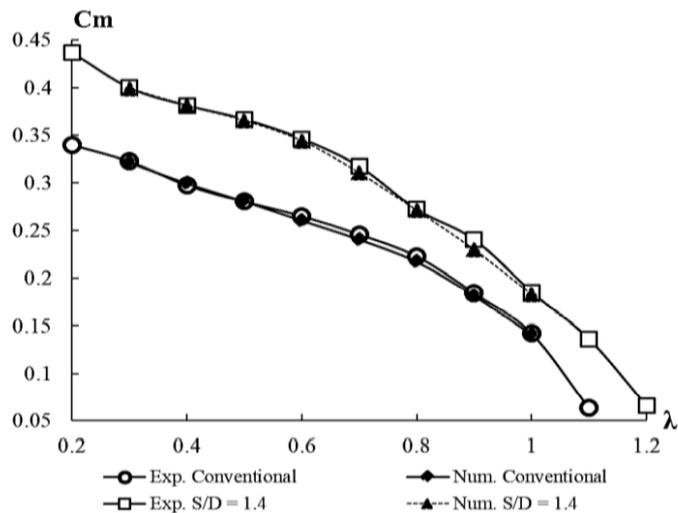
Gambar 2.18 Konfigurasi *mesh* untuk simulasi CFD (a) Tampilan *isometric* untuk *wake zone* dan *fixed zone*; (b) Posisi letak silinder sirkular tipe I-65° pada sumbu Y (Sakti et al., 2019)

Pada penelitian ini juga dilakukan dengan metode simulasi numerik, diawali dengan pembuatan geometri 3D dari turbin Savonius yang kemudian disimulasikan menggunakan software CFD ANSYS Fluent 19.1.



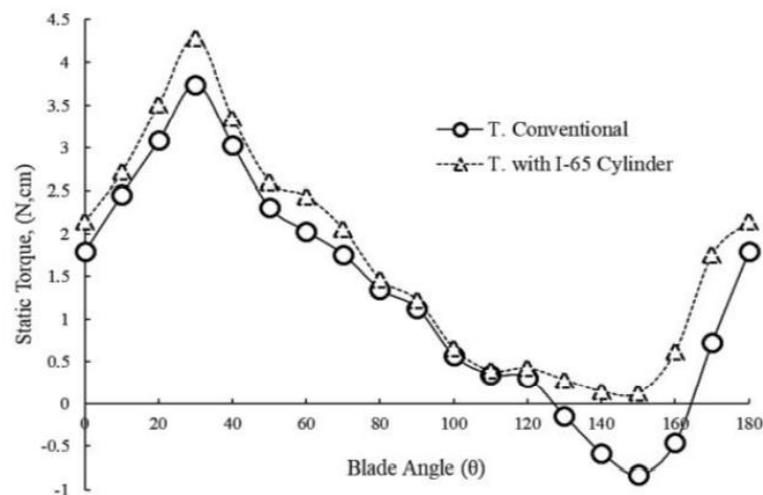
Gambar 2.19 Perbandingan *Coefficient of Power* secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular Tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan $(S/D) = 1,4$ (Sakti et al., 2019)

Jika dibandingkan dengan turbin konvensional, penempatan silinder tipe I-65° hulu cembung dari turbin angin Savonius berguna untuk meningkatkan daya turbin. TSR maksimum eksperimen antara turbin konvensional dan turbin dengan silinder I-65° masing-masing mencapai 1,1 dan 1,25. TSR (λ) maksimum yang berbeda untuk kedua konfigurasi turbin ini memberikan indikasi awal bahwa pemasangan silinder I-65° memberikan peningkatan kinerja. Selanjutnya, $C_{p_{max}}$ eksperimen untuk kedua konfigurasi turbin mencapai nilai masing-masing 0,177 dan 0,218. Dimana pada kondisi ini, turbin $C_{p_{max}}$ dengan silinder I-65° pada TSR sebesar 0,8 telah meningkat hingga 23,61% lebih tinggi dari turbin konvensional. $C_{p_{max}}$ numerik untuk turbin konvensional dan turbin dengan silinder I-65° masing-masing mencapai nilai 0,173 dan 0,217. Ini berarti bahwa hulu silinder I-65° meningkatkan $C_{p_{max}}$ 25,32% lebih tinggi dari yang konvensional.



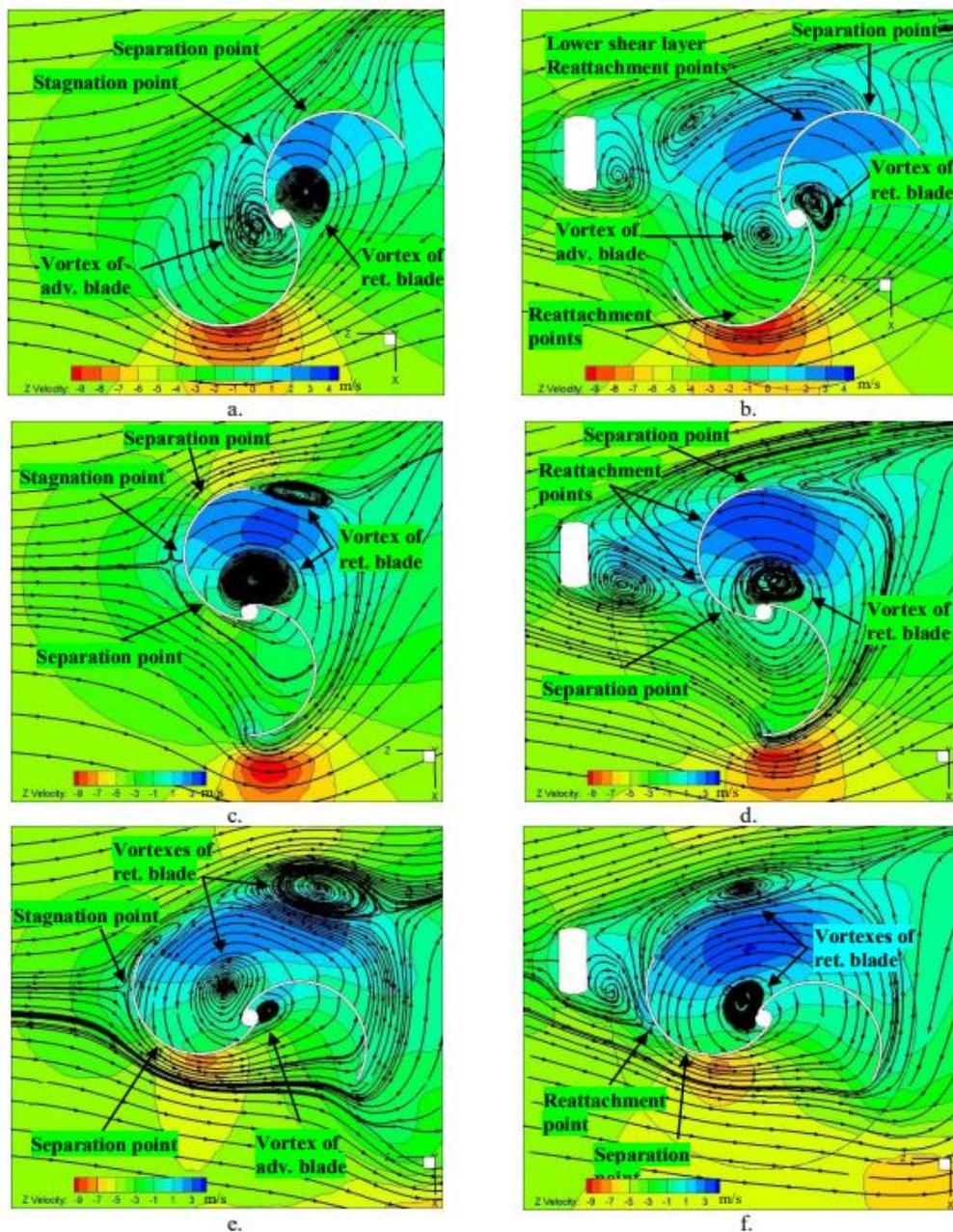
Gambar 2.20 Perbandingan *Coefficient of Moment* secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan $(S/D) = 1,4$ (Sakti et al., 2019)

Gambar 2.20 menunjukkan Coefficient of Moment untuk turbin konvensional dan turbin dengan silinder I-65° berbanding terbalik dengan TSR dan hasil simulasi numerik divalidasi satu sama lain dengan data eksperimental. Kesenjangan maksimum antara hasil numerik dan eksperimental diperoleh pada TSR (λ) = 0,8 untuk turbin konvensional dan TSR (λ) = 0,9 untuk turbin dengan tipe silinder I-65°.



Gambar 2.21 Grafik Torsi Statis (Ncm) sebagai fungsi dari *blade angle* (θ) secara eksperimen dan numerik dengan dan tanpa silinder sirkular tipe I-65° untuk $Re = 9,9 \times 10^4$ dan $(S/D) = 1,4$ (Sakti et al., 2019)

Gambar 2.21 menunjukkan bahwa dengan sebuah turbin angin Savonius diberikan silinder sirkular akan 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 sirkular. Torsi terendah terjadi pada sudut bilah turbin 150°, dari -0,8 Ncm tanpa pengganggu menjadi 0,13 Ncm setelah diberi silinder sirkular. Dari gambar 2.21 juga menunjukkan bahwa pemberian silinder sirkular akan membuat nilai torsi statis yang dihasilkan bernilai positif pada semua sudut bilah. Dan ini membuktikan dengan pemberian silinder sirkular akan membuat sebuah turbin angin Savonius memiliki kemampuan untuk melakukan *self-starting*.



Gambar 2.22 Perbandingan kontur kecepatan antara turbin konvensional dan sesudah diberi silinder sirkular tipe I-65° pada TSR =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 sirkular tipe I-65°, (c) Turbin pada sudut bilah 90°, (d) Turbin pada sudut bilah 30° dengan silinder sirkular tipe I-65°, (e) Turbin pada sudut bilah 150°, (f) Turbin pada sudut bilah 150° dengan silinder sirkular tipe I-65° (Sakti et al., 2019)

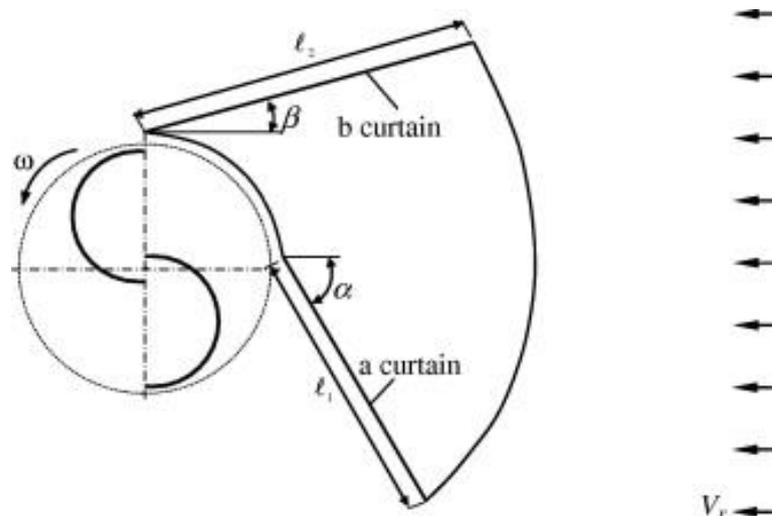
Gambar 2.22(a) menggambarkan bahwa titik stagnasi terjadi pada titik tertentu pada permukaan bilah cembung yang kembali. Gambar 2.22(b) menunjukkan silinder I-65° menciptakan lapisan geser atas dan bawah. Lapisan geser bawah dipasang kembali pada titik tertentu dari pisau cembung yang kembali, dan relatif bergeser keluar daripada titik stagnasi turbin konvensional. Gambar 2.22(c) menunjukkan karakteristik aliran turbin pada $\theta = 90^\circ$, di mana titik stagnasi diidentifikasi hampir di pusat bilah cembung yang kembali. Gambar 2.22(d) menunjukkan bahwa lapisan geser bawah dipasang kembali dan dipisahkan pada bilah cembung

yang kembali lebih dekat ke poros turbin. Dan untuk gambar 2.22(e) dan 2.22(f) menunjukkan sudut posisi turbin $\theta = 150^\circ$, perilaku aliran udara tidak terlalu jauh dari deskripsi sebelumnya. Di mana silinder I-65° menghasilkan dua lapisan geser, lapisan geser bawah dipasang kembali pada pisau cembung yang kembali dan menunda titik pemisahan.

2.9.4 Penelitian dengan Judul “An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining”

Penelitian ini dilakukan oleh (Deda Altan et al., 2008) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan tirai (*curtain*) atau plat pengganggu pada turbin angin Savonius tanpa mengubah struktur awal rotor turbin angin Savonius. Tirai (*curtain*) ini ditaruh didepan rotor untuk mencegah torsi negatif yang berlawanan dengan putaran rotor. Konstruksi plat pembelok ini terbuat dari plat lembaran datar dengan penambahan sensor untuk mengubah penaturan tirai (*curtain*) ke arah angin.

Pada penelitian ini, turbin angin Savonius adalah dua sudu dengan diameter (D) serta tinggi turbin (H) sebesar 32 cm. Kecepatan angin yang digunakan adalah 7 m/s dan bilangan *Reynolds* sebesar 1.5×10^4 . Plat pengganggu dan plat pengarah memiliki panjang tertentu dan diletakkan di depan turbin dengan besar sudut α dan β terhadap arah datangnya angin seperti yang terlihat pada gambar 2.21. Variasi yang dilakukan adalah variasi panjang plat (ℓ_1 dan ℓ_2) yang ditampilkan pada tabel 2.2 serta variasi besar sudut plat (α dan β). Sudut α yang digunakan adalah $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ dan sudut β yang digunakan adalah $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$.

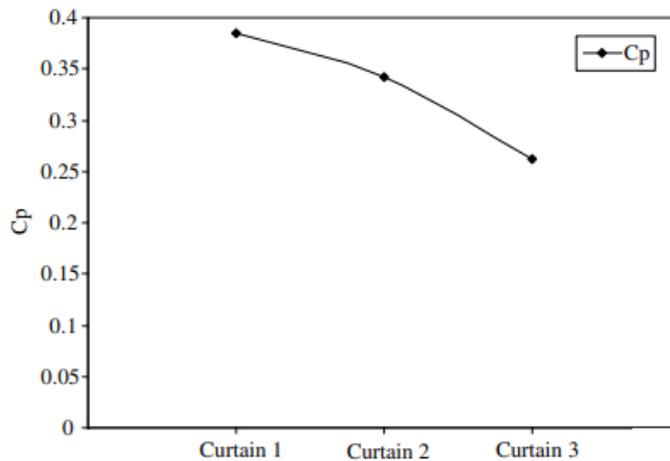


Gambar 2.23 Geometri turbin angin Savonius dengan penambahan tirai (*curtain*) (Deda Altan et al., 2008)

Table 1
Dimensions of curtain arrangements

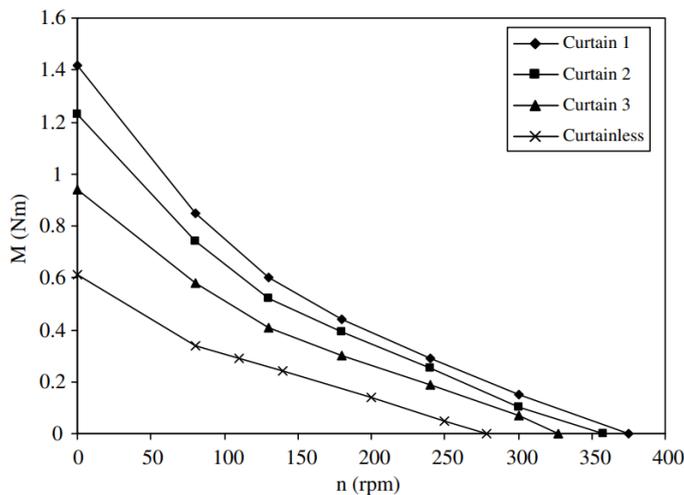
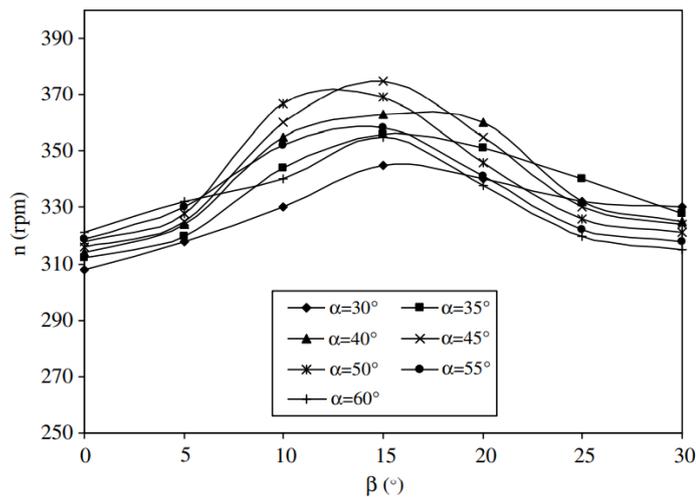
Type of curtain arrangement	Distance ℓ_1 (cm)	Distance ℓ_2 (cm)
Curtain 1	45	52
Curtain 2	34	39
Curtain 3	22	26

Tabel 2.2 Dimensi ukuran tirai (*curtain*) (Deda Altan et al., 2008)

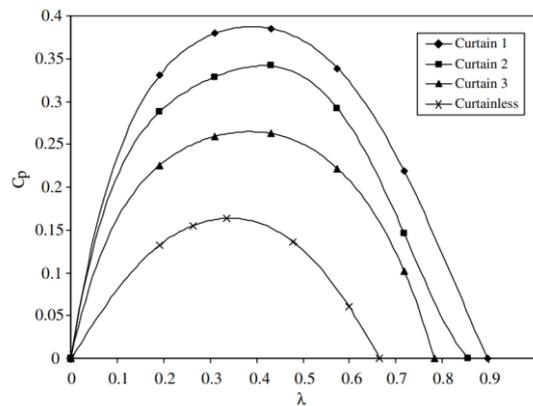


Gambar 2.24 Grafik efek panjang tirai (*curtain*) dengan koefisien daya maksimum rotor (Deda Altan et al., 2008)

Dari grafik diatas didapatkan nilai untuk tirai (*curtain*) 1 adalah 0,38533, tirai (*curtain*) 2 adalah 0,34154, dan tirai (*curtain*) 3 adalah 0,26273.



Gambar 2.25 (a) Grafik pengaruh kecepatan rotasi terhadap sudut tirai (*curtain*) pada *curtain* 1; (b) Grafik pengaruh panjang tirai (*curtain*) pada torsi dengan kecepatan rotasi $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Deda Altan et al., 2008)

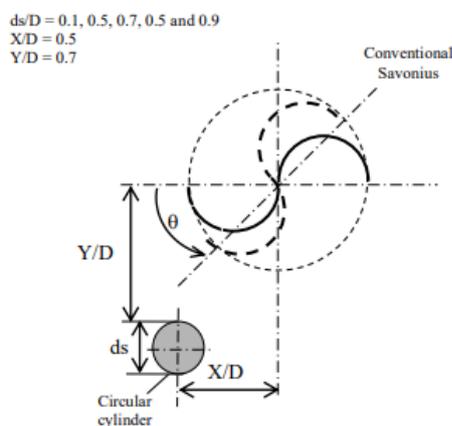


Gambar 2.26 Grafik pengaruh panjang tirai (*curtain*) pada koefisien daya dengan TSR (λ) di sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$ (Deda Altan et al., 2008)

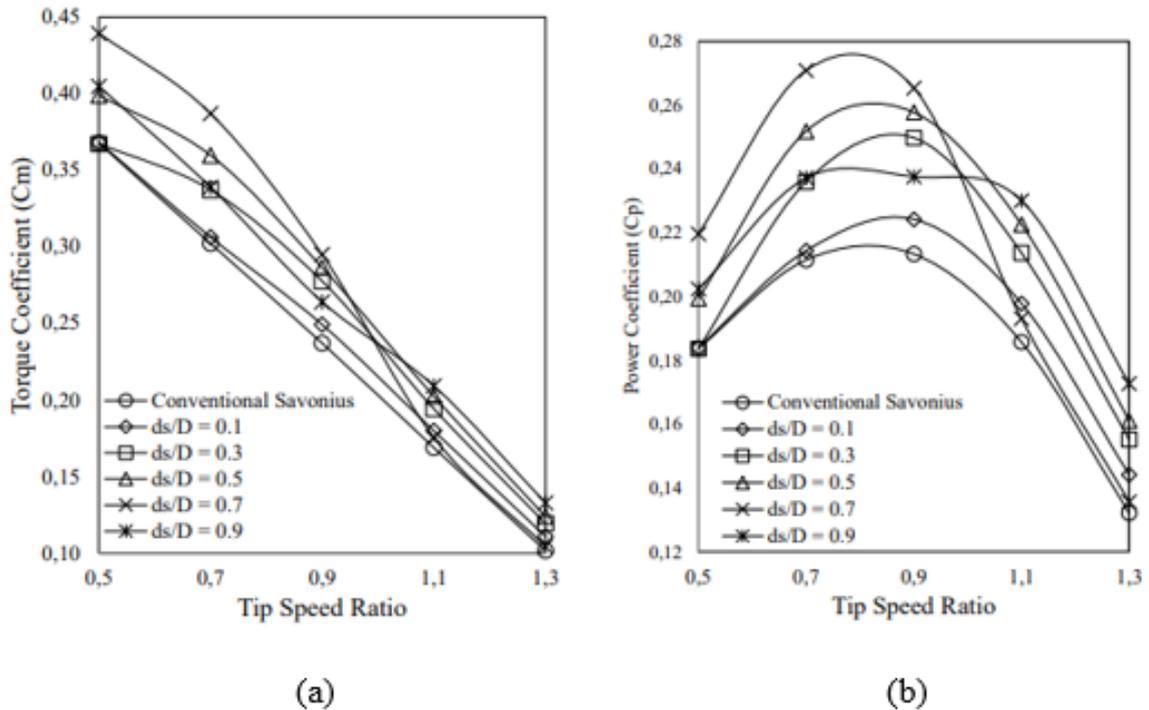
Grafik 2.23 diatas dibuat untuk menganalisis pengaruh sudut tirai (*curtain*) di sudut antara 30° hingga 60° . Untuk gambar 2.24 menggambarkan grafik efek panjang tirai (*curtain*) pada torsi dengan kecepatan rotasi $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Dan gambar 2.25 menggambarkan panjang tirai (*curtain*) pada koefisien daya dengan TSR yang dibandingkan dengan penelitian studi literatur acuan dan menemukan nilai koefisien daya dimana ditemukan diantara 0,16 dan 0,17. Diketahui juga bahwa koefisien daya maksimum terjadi pada tirai (*curtain*) 1 yang meningkat sebesar 0,385 untuk sudut $\alpha = 45^\circ$ dan $\beta = 15^\circ$. Alasan kenapa penambahan tirai (*curtain*) 1 lebih besar dibandingkan dengan penambahan tirai (*curtain*) 2 dan 3 adalah karena luasan sapuan dari tirai (*curtain*) yang lebih besar, selain itu juga susunan yang ada membuat tirai (*curtain*) 1 mampu membelokkan dan mengumpulkan lebih banyak aliran angin yang dapat ditransfer ke rotor. Namun, koefisien daya penambahan penambahan tirai (*curtain*) 2 dan 3 lebih besar jika dibandingkan tanpa penambahan tirai (*curtain*).

2.9.5 Penelitian dengan Judul “Flow Analysis of a Circular Cylinder on the Savonius Hydrokinetic Turbine Performance Placed the Side of Advancing Blade”

Penelitian ini dilakukan oleh (Setiawan et al., 2019) untuk mengetahui efek diameter silinder sirkular yang dipasang disamping sudu *advancing* turbin air Savonius. Penelitian ini dilakukan secara metode numerik dengan menggunakan aplikasi *Gambit* dan *Fluent Ansys 17.0* untuk simulasi 2D. Untuk variasi rasio diameter yang digunakan adalah $(ds/D) = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ dan $0,9$ dengan variasi jarak $(X/D) = 0,5$ dan $(Y/D) = 0,7$ seperti gambar 2.27.

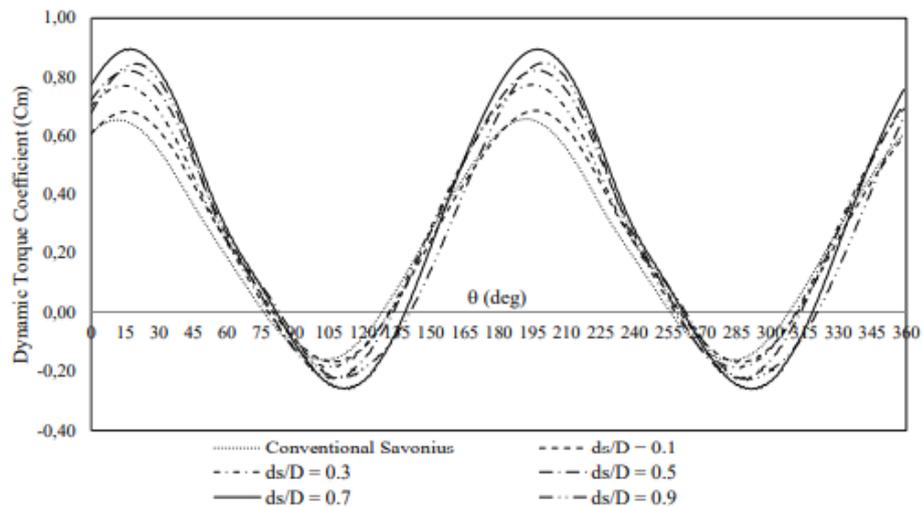


Gambar 2.27 Geometri yang digunakan (Setiawan et al., 2019)



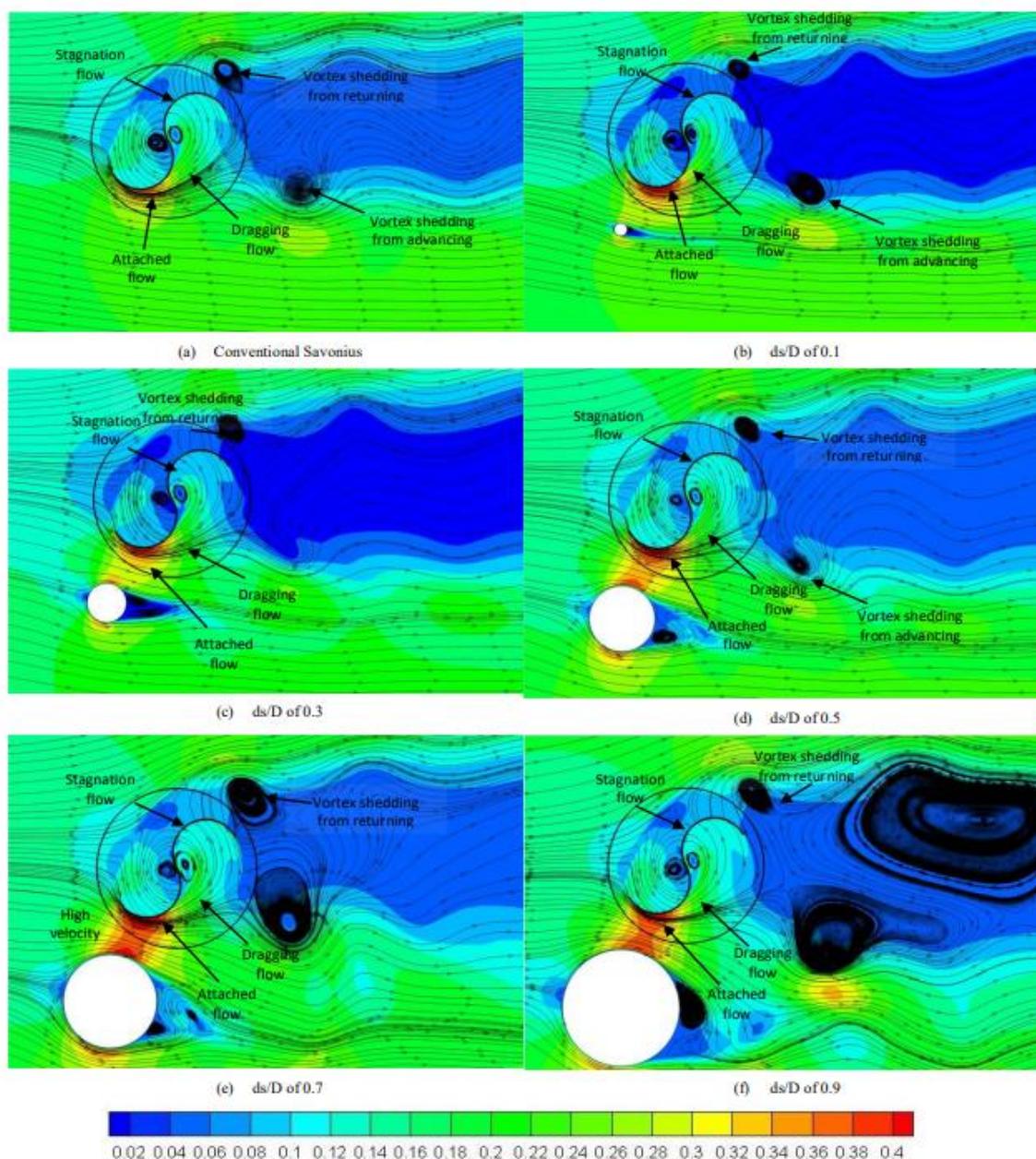
Gambar 2.28 (a) Grafik koefisien torsi (C_m) terhadap fungsi TSR, (b) Grafik koefisien daya (C_p) terhadap fungsi TSR (λ) (Setiawan et al., 2019)

Pada gambar 2.28 ditunjukkan grafik C_m dengan variasi rasio diameter (d_s/D) 0,1, 0,3, 0,5, 0,7, dan 0,9 memiliki dampak positif pada koefisien torsi. Nilai maksimum koefisien torsi terjadi pada variasi (d_s/D) = 0,7. Selain itu nilai maksimum koefisien daya (C_p) juga diperoleh pada variasi (d_s/D) = 0,7.



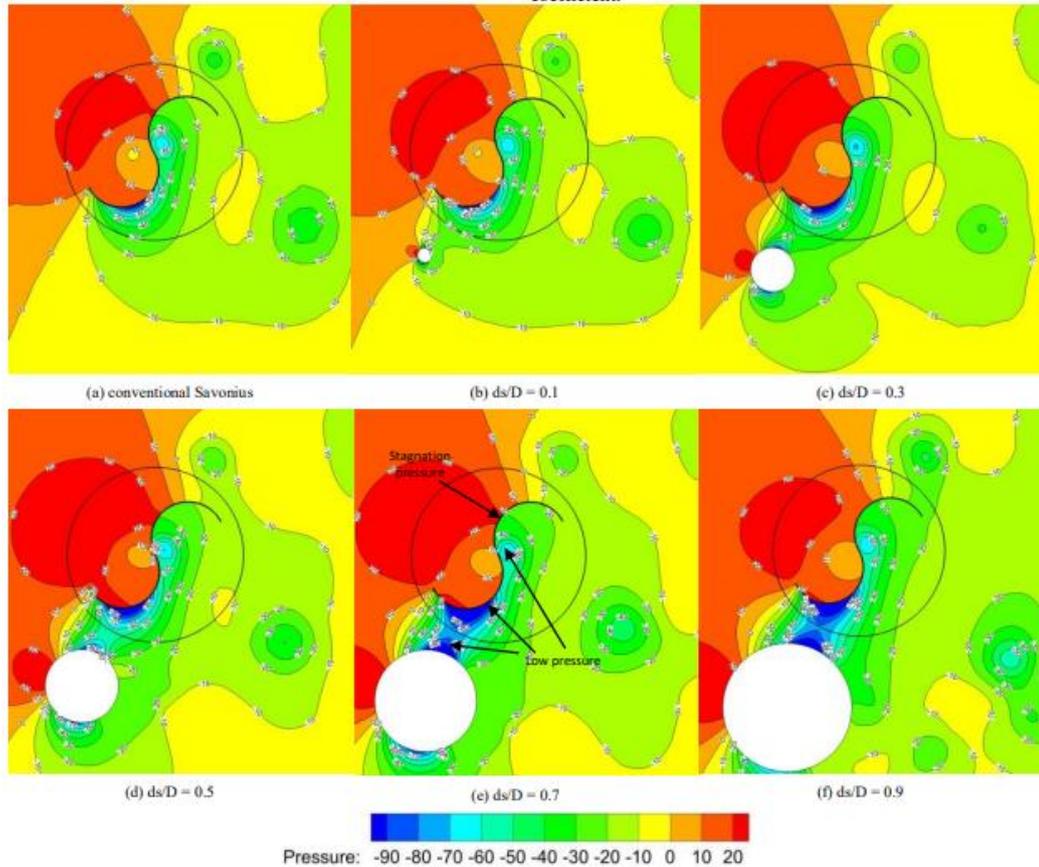
Gambar 2.29 Koefisien torsi dinamis pada TSR (λ) = 0,9 (Setiawan et al., 2019)

Pada gambar 2.29 menunjukkan bahwa dalam kisaran 0° hingga 30° , koefisien torsi ndinamis menunjukkan peningkatan koefisien torsi untuk semua variasi diameter. Dalam kisaran 30° hingga 120° , peningkatan terbaik diperoleh oleh variasi diameter (d_s/D) = 0,7 dan 0,9. Untuk 120° hingga 195° , koefisien dinamis maksimum terjadi pada variasi (d_s/D) = 0,7.



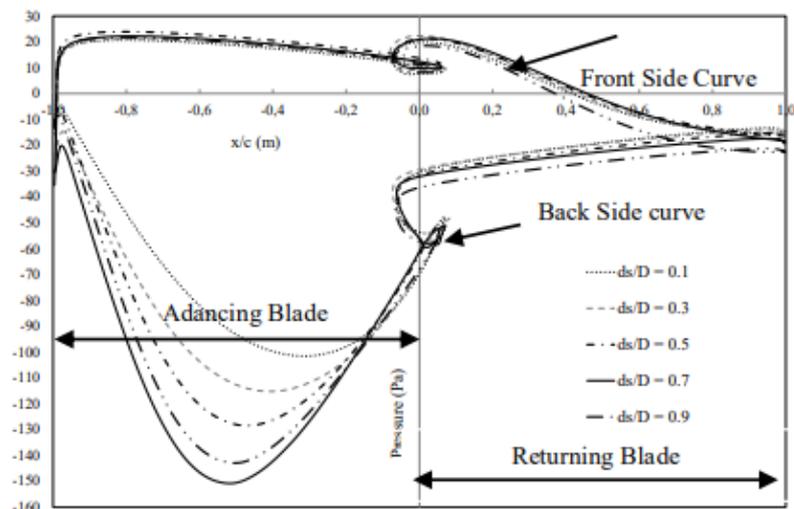
Gambar 2.30 *Velocity pathline structure* untuk TSR (λ) 0,9 dan sudut bilah $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Gambar 2.30 menunjukkan *velocity pathline structure* untuk variasi rasio diameter (ds/D) = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 dan 0,9. Terlihat bahwa pembentukan titik stagnasi diatas lingkaran tunggal terjadi didepan silinder sirkular. Posisi titik stagnasi akan berubah ketika terjadi penambahan silinder sirkular di turbin angin Savonius. Selain itu, berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa distribusi tekanan pada bagian depan sudu *advancing* untuk diameter silinder pengganggu yang berbeda memiliki nilai yang hampir sama. Namun, untuk distribusi tekanan di bagian belakang sudu *returning* yang paling tinggi dicapai disaat variasi $ds/D = 0,7$. Kemudian untuk distribusi tekanan di bagian belakang sudu *advancing*, dengan $ds/D = 0,7$ memiliki nilai tekanan yang paling negatif dibandingkan variasi yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan silinder di samping sudu *advancing* maka dapat meningkatkan kecepatan di bagian belakang sudu *advancing* dan tekanannya akan turun.



Gambar 2.31 Kontur tekanan (*pressure contour*) untuk TSR (λ) 0,9 dan $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Gambar 2.31 menunjukkan perubahan tekanan dimana hal ini menunjukkan silinder sirkular dapat menyebabkan tekanan menurun pada sisi cembung sudu *advancing*. Dan tekanan negatif yang terjadi ini akan meningkatkan torsi positif dan koefisien daya.



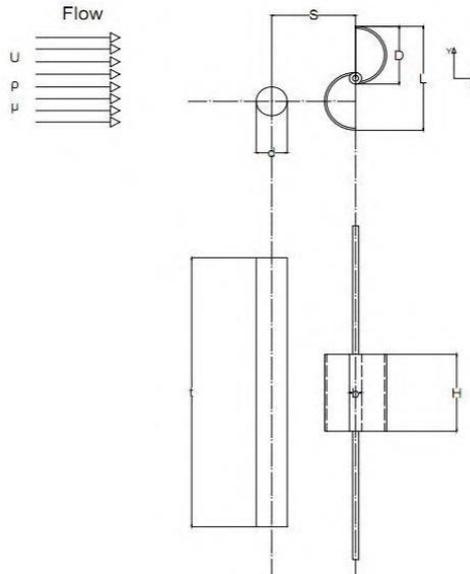
Gambar 2.32 Distribusi tekanan (*pressure distribution*) pada permukaan bilah untuk variasi diameter (ds/D) = 0,5 di TSR (λ) = 0,9 dan $\theta = 30^\circ$ (Setiawan et al., 2019)

Gambar 2.32 menunjukkan dua rezim yaitu distribusi tekanan dari sudu *advancing* dan sudu *returning*. Analisis ini dilakukan dengan menghubungkan kontur tekanan dengan

kecepatan. Terlihat bahwa distribusi tekanan di sisi depan mirip dengan semua variasi sudut *advancing*, dan distribusi tekanan di sisi belakang didapatkan hasil yang maksimal pada variasi diameter (d_s/D) = 0,7 untuk sudut *returning*.

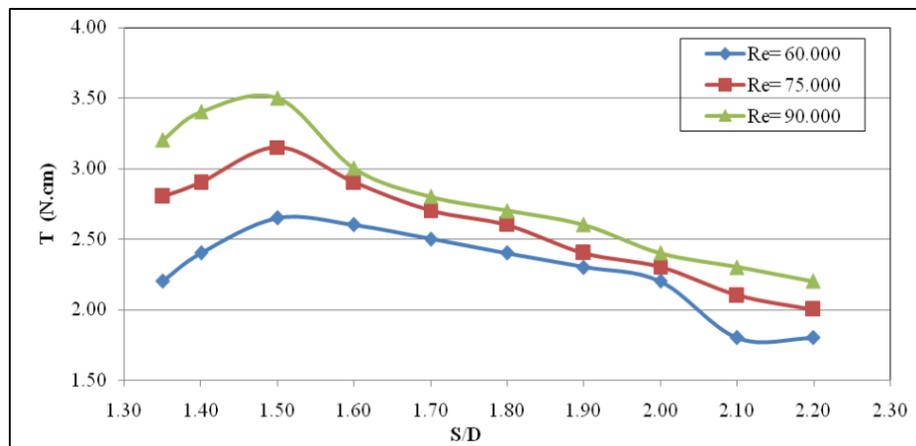
2.9.6 Penelitian dengan Judul “Studi Eksperimen Pengaruh Jarak Antara Silinder Pengganggu Sirkular dengan *Returning Blade* Turbin Angin Tipe Savonius Terhadap Performa Turbin”

Penelitian ini dilakukan oleh (Maghfira, 2016) untuk mengetahui pengaruh jarak antar silinder pengganggu dengan sudut *returning* turbin angin Savonius.



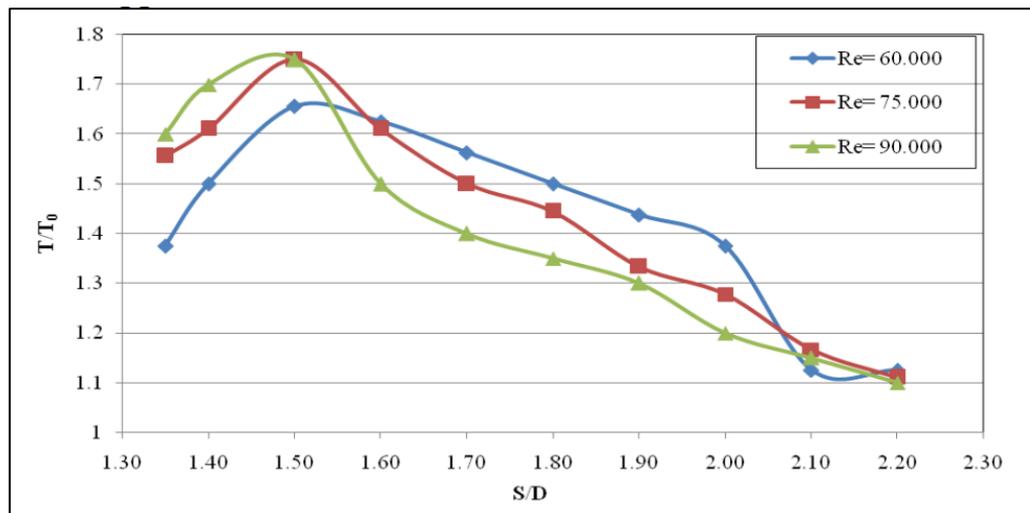
Gambar 2.33 Skema penelitian (Maghfira, 2016)

Penelitian ini menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu (D) = 60 mm, tinggi (H) = 80 mm, lebar *overlap* = 14 mm, dan diameter turbin = 106 mm. Silinder sirkular pengganggu memiliki diameter (d) = 30 mm yang diletakkan pada sudu *returning* turbin angin Savonius dengan rasio (D/d) = 0,5. Variasi jarak silinder pengganggu (S/D) = 1,35; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0 dan 2,1. Untuk variasi kecepatan angin dihitung berdasarkan nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 .



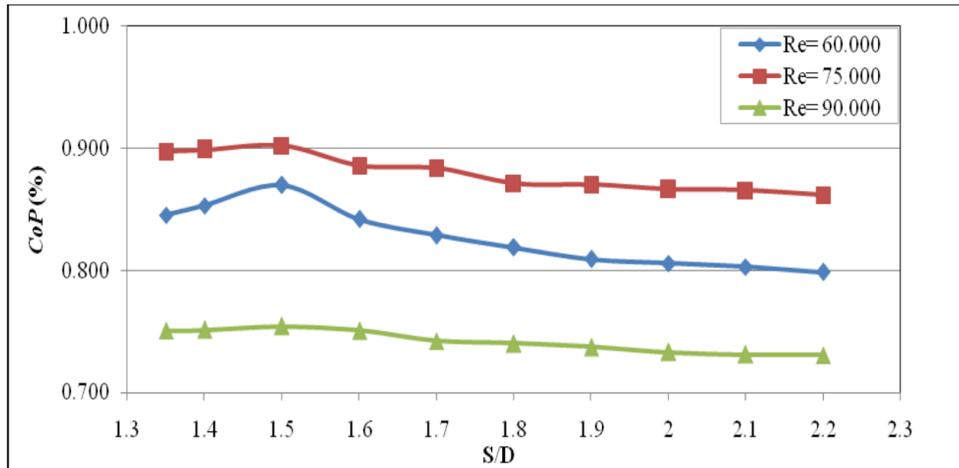
Gambar 2.34 Grafik nilai torsi statis yang dihasilkan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi jarak S/D pada nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)

Gambar 2.34 menunjukkan *trendline* grafik torsi statis (T) sebagai fungsi jarak $S/D = 1,35; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 1,9; 2,0$ dan $2,1$ pada *Reynolds number* (Re) = 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 . Pada gambar terlihat bahwa torsi statis tertinggi dicapai oleh *Reynolds number* (Re) = 9×10^4 , dan torsi statis terendah dicapai oleh *Reynolds number* (Re) = 6×10^4 . Dan torsi statis tertinggi yang dihasilkan pada seluruh *Reynolds number* diperoleh pada jarak $S/D = 1,5$ dengan nilai sebesar $2,65$ Ncm pada (Re) = 6×10^4 , $3,15$ Ncm pada (Re) = $7,5 \times 10^4$, dan $3,5$ Ncm pada (Re) = 9×10^4 . Pada gambar diatas juga menunjukkan *trendline* grafik meningkat pada $S/D = 1,35$ hingga $1,5$ namun menurun hingga jarak $S/D = 2,2$. Ini diakibatkan karena pada variasi jarak $S/D = 1,35$ hingga $1,5$ penambahan silinder pengganggu di depan sudu *returning* mengakibatkan pengurangan gaya *drag* yang terjadi di sudu *returning*. Penambahan ini menyebabkan *free shear layer* yang terlepas dari silinder pengganggu mengenai bagian depan sudu *returning* dan menyebabkan perubahan *boundary layer* dari laminar menjadi turbulen lebih cepat. Hal ini akan mempengaruhi menundanya titik separasi yang terjadi dan membentuk *wake* dibelakang sudu *returning* menjadi menyempit dan gaya *drag* menurun. Dengan berkurangnya gaya *drag* yang terjadi pada sudu *returning*, maka selisih gaya *drag* antara sudu *returning* dan sudu *advancing* akan semakin besar. Dengan perubahan dan meningkatnya selisih gaya *drag* yang terjadi, maka torsi yang dihasilkan oleh turbin akan semakin besar.



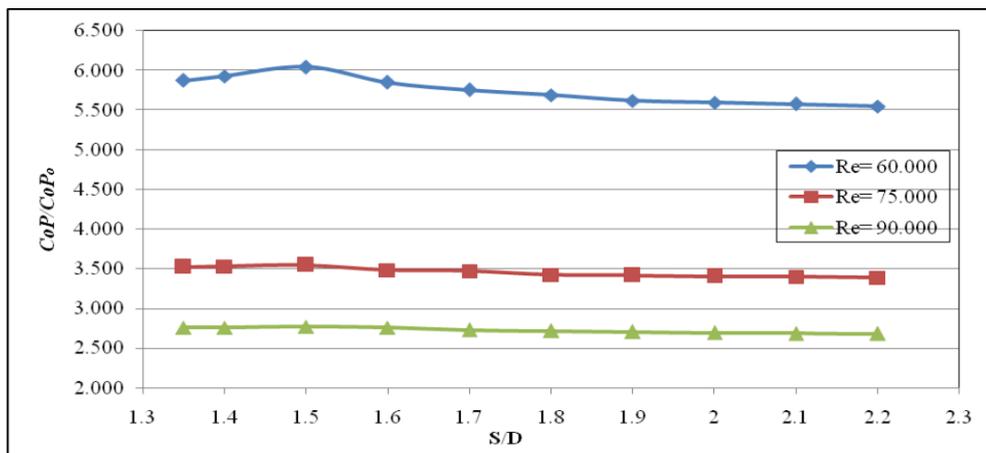
Gambar 2.35 Grafik nilai torsi statis dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (T/T_0) sebagai fungsi jarak S/D pada nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , $7,5 \times 10^4$, dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)

Pada gambar 2.35 menunjukkan bahwa penambahan silinder pengganggu di depan sudu *returning* turbin Savonius menyebabkan peningkatan nilai torsi statis jika dibandingkan dengan tanpa silinder pengganggu. Hal ini ditunjukkan dari nilai perbandingan (T/T_0) yang lebih besar dari satu di setiap nilai *Reynolds*. Pada $Re = 6 \times 10^4$ dengan silinder pengganggu pada jarak optimum $S/D = 1,5$, torsi statis mengalami kenaikan sebesar 165% dari turbin tanpa silinder pengganggu. Kemudian untuk $Re = 7,5 \times 10^4$ dan 9×10^4 mengalami kenaikan torsi statis sebesar 175%.



Gambar 2.36 Grafik nilai *Coefficient of Power* (CoP) yang dihasilkan dengan silinder pengganggu sebagai fungsi jarak S/D pada nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)

Pada gambar 2.36 menunjukkan *trendline* grafik meningkat pada S/D 1,35 hingga 1,5 kemudian menurun hingga jarak S/D 2,2. Nilai *Coefficient of Power* tertinggi didapatkan pada jarak S/D 1,5 dimana *Coefficient of Power* tertinggi terjadi pada nilai *Reynolds* (Re) = $7,5 \times 10^4$ sebesar 0,95% dan *Coefficient of Power* terendah terjadi pada nilai *Reynolds* (Re) = 9×10^4 sebesar 0,75%.



Gambar 2.37 Grafik nilai *Coefficient of Power* (CoP) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) sebagai fungsi jarak S/D pada nilai *Reynolds* (Re) = 6×10^4 , 7.5×10^4 , dan 9×10^4 (Maghfira, 2016)

Pada gambar 2.37 menunjukkan grafik perbandingan *Coefficient of Power* (CoP) dengan silinder pengganggu dan tanpa silinder pengganggu (CoP/CoP_0) dimana nilai *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) tertinggi dicapai oleh *Reynolds number* (Re) = 6×10^4 sebesar 600% jika dibandingkan tanpa silinder pengganggu dan nilai *Coefficient of Power* (CoP/CoP_0) terendah dicapai oleh *Reynolds number* (Re) = 9×10^4 sebesar 270% jika dibandingkan tanpa silinder pengganggu.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Variasi dan Domain Simulasi

3.1.1 Variasi Simulasi

Penelitian ini dilakukan dengan metode studi simulasi numerik dengan menggunakan *software ANSYS FLUENT 2021 R2*. Penelitian dengan metode studi simulasi numerik ini memiliki tiga tahapan dalam penggarapannya, dimana dimulai dari tahap *pre-processing*, kemudian tahapan *processing* dan terakhir *post-processing*. Penelitian ini dilakukan di kampus Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS. Penelitian ini menggunakan model berupa geometri dua dimensi dari turbin angin Savonius konvensional dengan modifikasi penambahan dua konfigurasi penambahan *circular cylinder*. Parameter dan variasi lengkap yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1 dibawah, sebagai berikut :

Tabel 3.1 Variasi simulasi yang digunakan untuk Penelitian

Parameter	Nilai
Jenis Turbin dan variasi yang digunakan	Turbin Angin Savonius dengan variasi parameter tetap (d/D) sebesar 0,5 untuk konfigurasi A dengan variasi jarak Y/D sebesar 1,80 dan 1,90, konfigurasi B dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90
Kecepatan Angin	4 m/s
Metode	2 Dimensi
<i>Solver type</i>	<i>Pressure based</i>
<i>Viscous Model</i>	<i>Realizable k-ε</i>
<i>Pressure-velocity Coupling Scheme</i>	<i>Coupled</i>
<i>Gradient</i>	<i>Least square cell based</i>
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
Momentum	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
Kriteria Konvergensi	10 ⁻⁵

3.1.2 Domain Simulasi

Pada penelitian ini memiliki dua *domain* yang digunakan yaitu *static domain* dan *rotate domain*. *Static domain* adalah *domain* yang dilewati oleh fluida, namun tidak bergerak dan ditunjukkan dengan bentuk persegi panjang. Sedangkan *rotate domain* adalah *domain* yang dilewati oleh fluida yang bergerak dan ditunjukkan dengan bentuk lingkaran yang mengelilingi geometri turbin angin Savonius yang diteliti pada penelitian ini.

3.2 Tahap *Pre-Processing*

3.2.1 Pembuatan Geometri dan *Meshing*

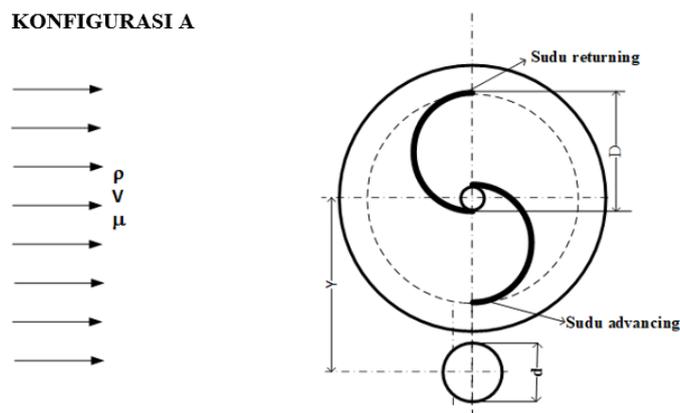
Tahap *pre-processing* merupakan tahap pembuatan model dari turbin angin Savonius yang akan digunakan dalam analisa numerik. Geometri yang dibuat meliputi pembuatan *domain* di sekitar model tersebut. Gambar model turbin angin Savonius dan ukuran geometri yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan berikut ini.

Tabel 3.2 Ukuran Geometri turbin angin Savonius

Konfigurasi	A		B	
	Diameter Turbin L (mm)	311,4	311,4	311,4
Diameter Sudu Turbin D (mm)	165,2	165,2	165,2	165,2
Diameter Silinder (d/D)	0,5	0,5	0,5	0,5
Diameter Poros D (mm)	19	19	19	19
Panjang Silinder dari Pusat Poros (Y/D)	1,80	1,90	1,80	1,90
Panjang Silinder dari Pusat Poros (S/D)	-		1,80	1,90
Diameter <i>end plate</i> atau <i>interface</i> (mm)	321	321	321	321

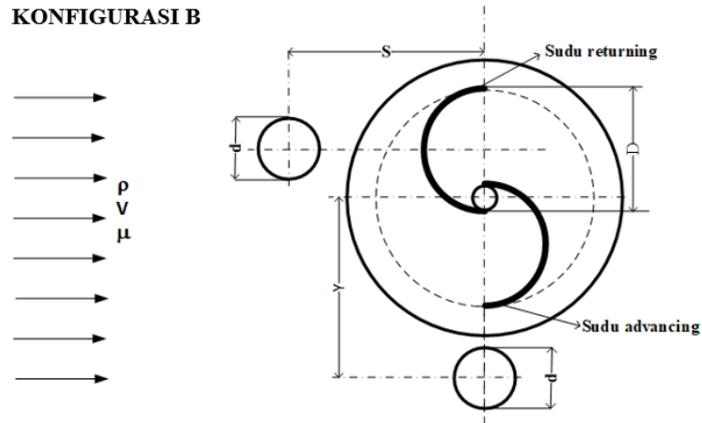
Berikut gambar konfigurasi geometri yang digunakan dalam penelitian ini :

KONFIGURASI A



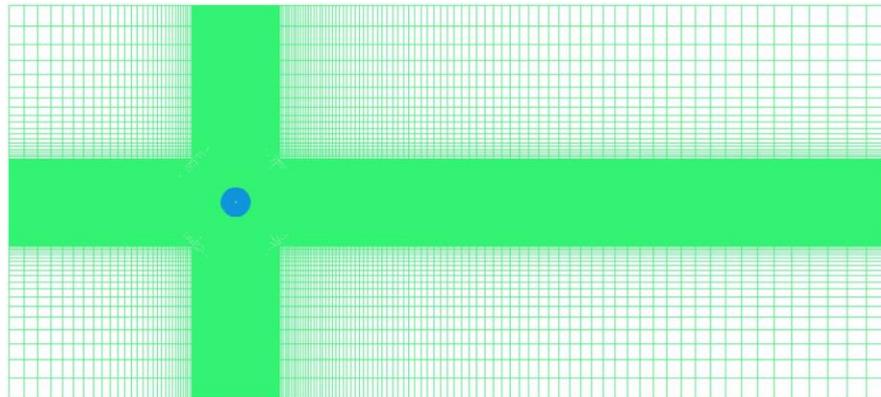
Gambar 3.1 Geometri turbin angin Savonius konfigurasi A dengan variasi jarak Y/D = 1,80 dan 1,90

KONFIGURASI B

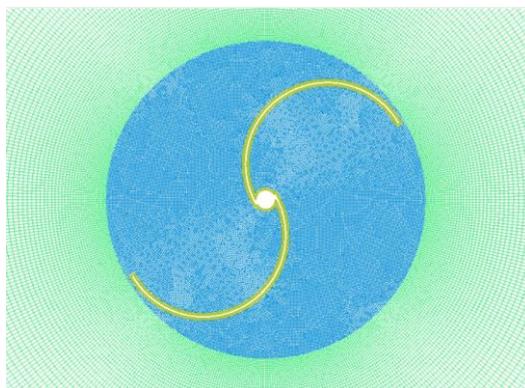


Gambar 3.2 Geometri turbin angin Savonius konfigurasi B dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$

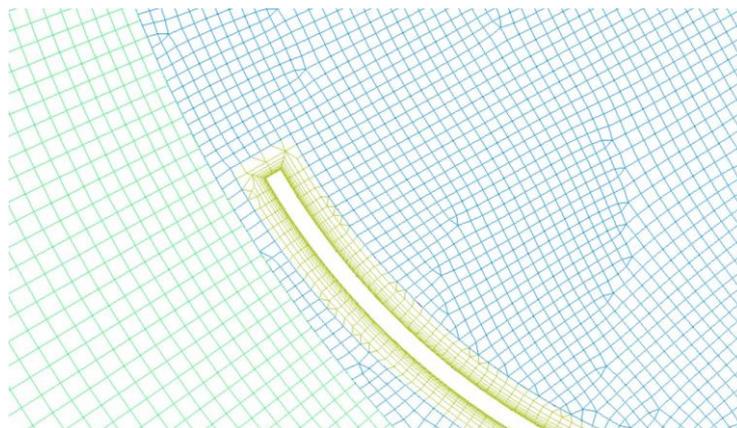
Pembuatan *meshing* merupakan pembagian geometri yang telah dibuat menjadi elemen-elemen kecil sehingga parameter yang sudah ditentukan dapat dimasukkan ke setiap elemen kecil ini. Elemen yang ada ini akan berisi persamaan dan nanti akan terselesaikan secara numerik. Proses *meshing* dilakukan dari mulai *meshing* garis kemudian *face* dan lanjut ke *volume*. Jumlah *meshing* akan menentukan waktu yang dibutuhkan dan hasil yang didapatkan. Proses *meshing* ini dibuat dengan *software* ICEM CFD 2021 R2. Berikut adalah hasil *meshing* yang sudah dilakukan :



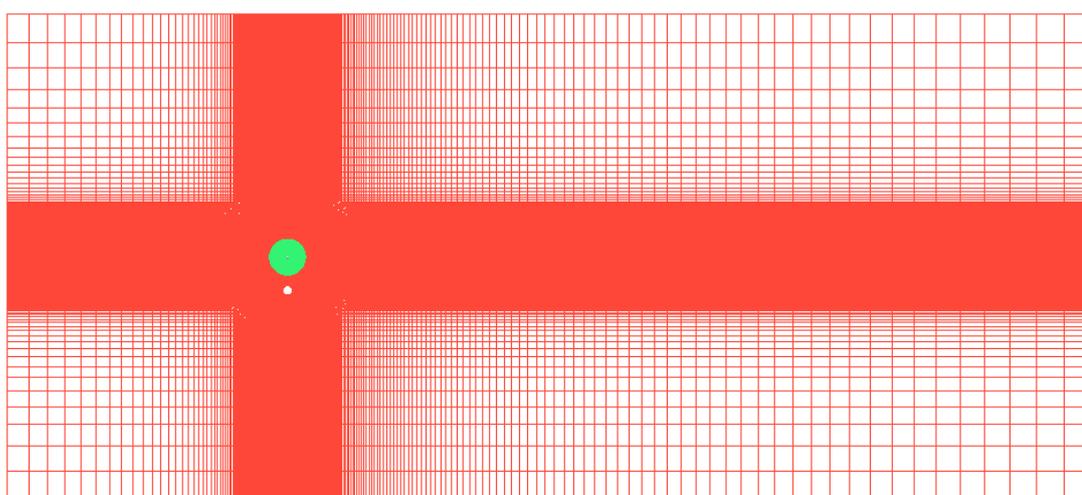
Gambar 3.3 Tampilan tampak *meshing* secara keseluruhan turbin angin Savonius konvensional



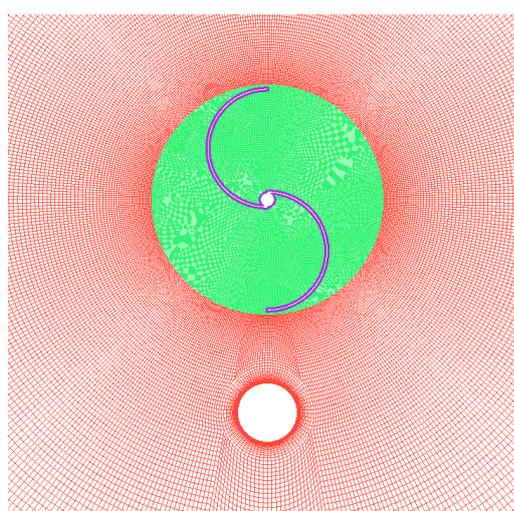
Gambar 3.4 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor



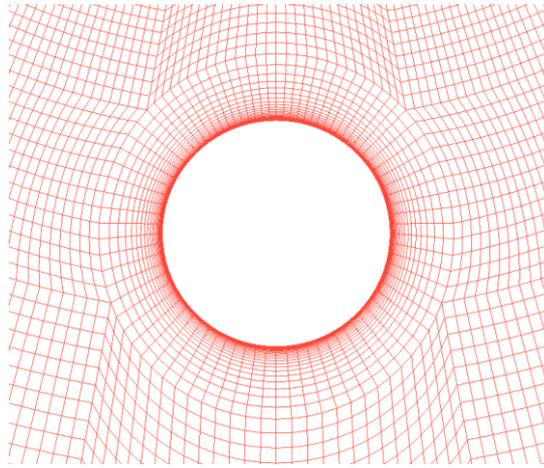
Gambar 3.5 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius konvensional di sekitar sudu



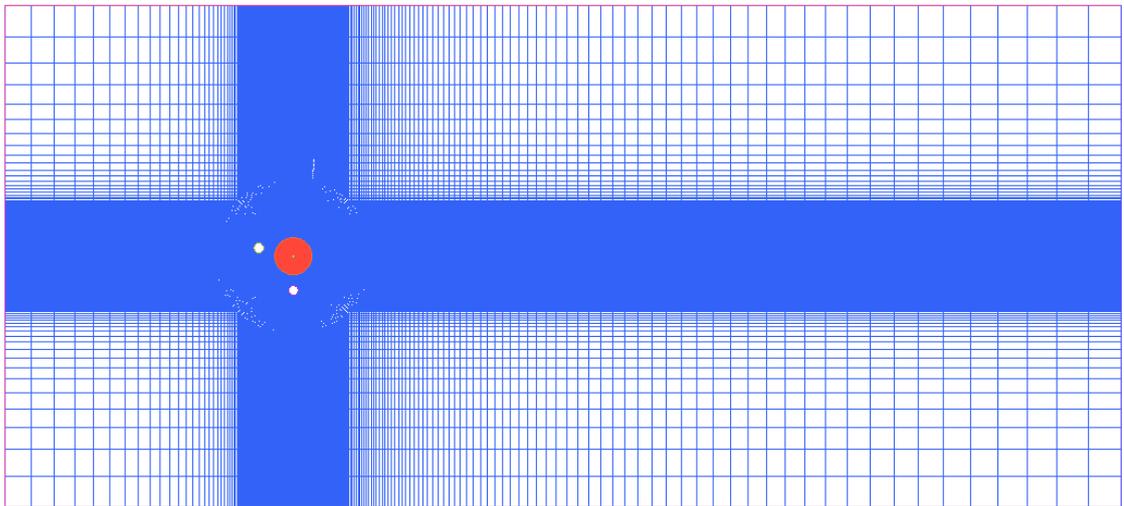
Gambar 3.6 Tampilan tampak *meshing* secara keseluruhan turbin angin Savonius dengan variasi Y/D



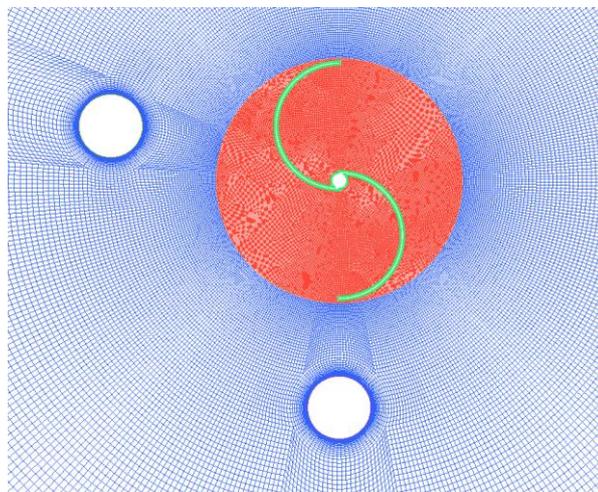
Gambar 3.7 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor



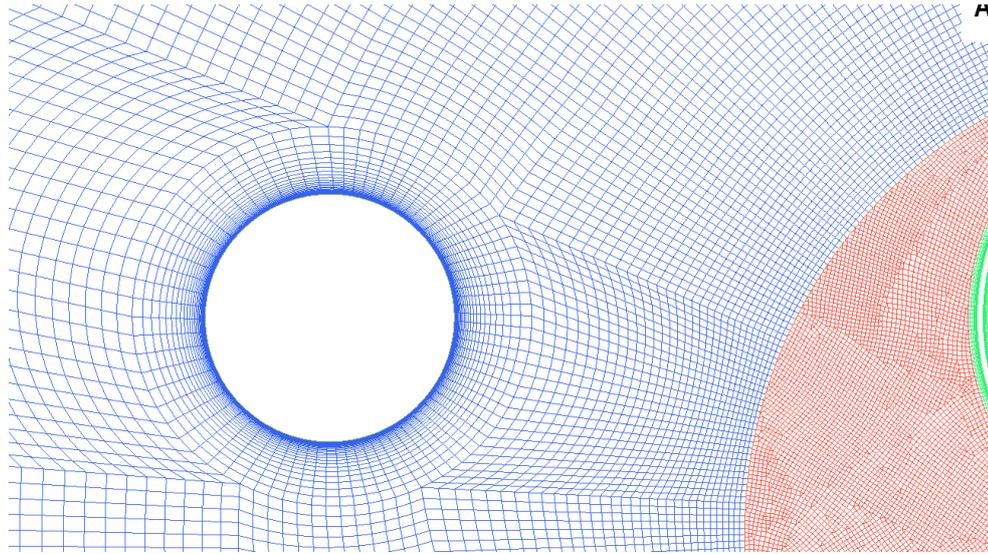
Gambar 3.8 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius variasi Y/D di sekitar *circular cylinder*



Gambar 3.9 Tampilan tampak *meshing* secara keseluruhan turbin angin Savonius dengan variasi Y/D; S/D



Gambar 3.10 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius konvensional pada sekitar rotor

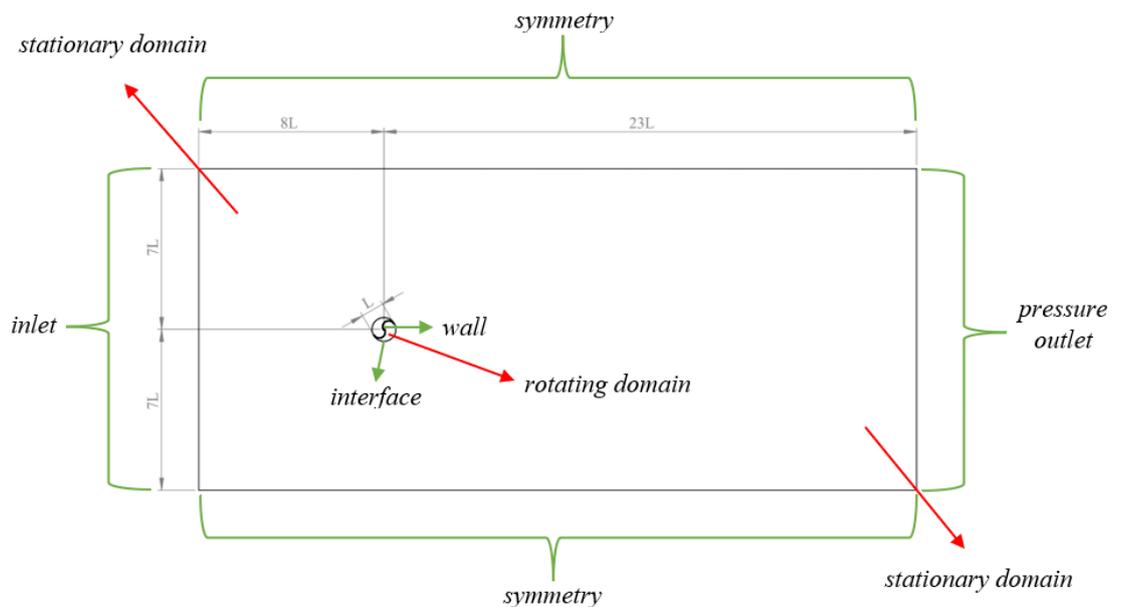


(b)

Gambar 3.11 Tampilan gambar *meshing* turbin angin Savonius variasi Y/D; S/D di sekitar *circular cylinder*

3.2.2 *Boundary Condition*

Boundary condition adalah suatu penentuan parameter pada batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji. Di penelitian ini terdapat *boundary condition* atau batasan-batasan yang digunakan diantaranya adalah *inlet*, *outlet*, *symmetry*, *wall*, dan *interface*. Untuk *boundary condition* yang digunakan untuk sudu turbin adalah *wall*, sedangkan *inlet* adalah *velocity inlet*, *outlet* menggunakan *pressure-outlet*, *symmetry* menggunakan *symmetry* dan *interface* luar dan *interface* dalam menggunakan *interface* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.9. Pada penelitian ini menggunakan nilai *turbulent intensity* sebesar 1% dan *turbulent length scale* sebesar 0,03 (Syarifah, 2022).



Gambar 3.12 *Boundary condition* penelitian

3.3 Solver

Tujuan dari *solver* ialah mengeksport hasil *domain* ke *software ANSYS FLUENT 2021 R2* yang selanjutnya dilakukan ke tahap *solver*, diantaranya yaitu :

3.3.1 General

Pada penelitian ini menggunakan pilihan *solver* yaitu *Pressure Based* dan *Transient* pada pilihan *time* dikarenakan simulasi yang digunakan adalah *transient*.

3.3.2 Models

Pada penelitian ini, langkah yang dilakukan adalah permodelan dengan pemilihan *solver* dan *turbulence model* dimana menggunakan *turbulence model viscous Realizable k-ε* (Sakti et al., 2019).

3.3.3 Materials

Pada penelitian ini menggunakan udara (*air*) sebagai fluida kerja dengan densitas (ρ) sebesar $1,17 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas (μ) sebesar $1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ (Malyana Dewi, 2021).

3.3.4 Cell Zone Condition

Pada penelitian ini *cell zone condition* dibagi menjadi *Rotating Zone* dan *Stationary Zone*. Untuk *Rotating Zone* berputar dengan metode *Mesh Motion* yang digunakan untuk variasi kecepatan sudut yang sebanding dengan variasi *TSR (Tip Speed Ratio)* sebesar 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 dan 1,2.

3.3.5 Boundary Condition

Pada penelitian ini digunakan kecepatan aliran pada sisi inlet dengan mengatur *Velocity Magnitude* sebesar 4 m/s, *Turbulence Specification Method* menggunakan *Intensity and Length Scale* dengan *Turbulence Intensity* sebesar 1% dan *Turbulence Length Scale* sebesar 0,03 (Syarifah, 2022). Untuk mengatur pergerakan dari Wall dipilih *motion Rotational* untuk pengaturan *moving wall*.

3.3.6 Solution

Pada penelitian ini menggunakan metode *Coupled* dan solusi *Second Order* untuk parameter *Pressure, Momentum, Turbulent Kinetic Energy*, dan *Turbulent Dissipation Rate*.

3.3.7 Residual

Pada penelitian ini digunakan nilai tetap sebesar 1×10^{-5} untuk semua parameter.

3.3.8 Initialize

Pada penelitian ini digunakan *initialize* untuk menentukan titik acuan sebagai permulaan perhitungan iterasi. Proses ini merupakan perhitungan awal untuk memudahkan mencapai hasil yang konvergen. Nilai dari *initialize* dihitung dari *Velocity Inlet*.

3.3.9 Run Calculation

Pada penelitian ini dilakukan pengaturan berupa *Time Step Size, Number of Time Step* sebesar 3600 *Time Step*, dan *Max Iteration per Time Step* sebesar 70 iterasi.

3.4 Tahap Processing

Tahap *processing* merupakan tahap perhitungan parameter-parameter yang telah ditetapkan pada tahap *pre-processing* dengan jumlah iterasi yang telah ditentukan sehingga dapat mencapai kriteria konvergensi sebesar 10^{-5} . Tahap ini juga akan menentukan apakah *meshing* yang telah dibuat sudah sesuai dan memenuhi atau tidak, dan menentukan apakah bisa

melanjutkan ke tahap berikutnya (tahap *post-processing*) atau mengulang dari tahap pembuatan *meshing*.

Tabel 3.3 Parameter yang digunakan pada tahap *Processing*

Parameter	Y/D = 1,80 dan 1,90	Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90
<i>Cell Zone Condition</i> (domain rotasi)	<i>Mesh Motion</i>	
<i>Turbulent Intensity</i>	1%	
<i>Turbulent Length Scale</i>	0,03 m	
Posisi Rotor	1°	
<i>Number of Time Step</i>	3600	
<i>Max Iteration per Time Step</i>	70	

Tabel 3.4 Parameter *Tip Speed Ratio*, Kecepatan Angular dan *Time Step Size*

V (m/s)	<i>Tip Speed Ratio</i> (λ)	Kecepatan Angular (rad/s)	<i>Time Step Size</i> (s)
4	0,4	10,2894	0,001696242054
	0,6	15,4341	0,001130828036
	0,8	20,5788	0,000848121027
	1,0	25,7235	0,000678496822
	1,2	30,8682	0,000565414018

3.5 Tahap *Post-Processing*

Data yang diperoleh pada tahap sebelumnya dianalisa di tahap ini. Data-data yang dianalisa diantaranya adalah kontur kecepatan, kontur tekanan, *coefficient of power*, *coefficient of moment*, dan distribusi tekanan.

3.5.1 Perhitungan Bilangan *Reynolds*

Bilangan *Reynolds* merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang menganalisa gaya inersia fluida. Rumus dari bilangan *Reynolds* ialah :

$$Re_L = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (3.1)$$

Dimana :

Re_L = Bilangan *Reynolds* berdasarkan L

ρ = Massa jenis fluida ($1,17 \text{ kg/m}^3$)

V = Kecepatan fluida (4 m/s)

L = Diameter turbin (m)

μ = Viskositas fluida ($1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$)

Bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian untuk turbin Savonius dengan kecepatan angin 4 m/s yaitu :

$$Re_L = \frac{\rho V d}{\mu} = \frac{(1,17 \text{ kg/m}^3) \times (4 \text{ m/s}) \times 0,3114 \text{ m}}{1,86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}} = 78352$$

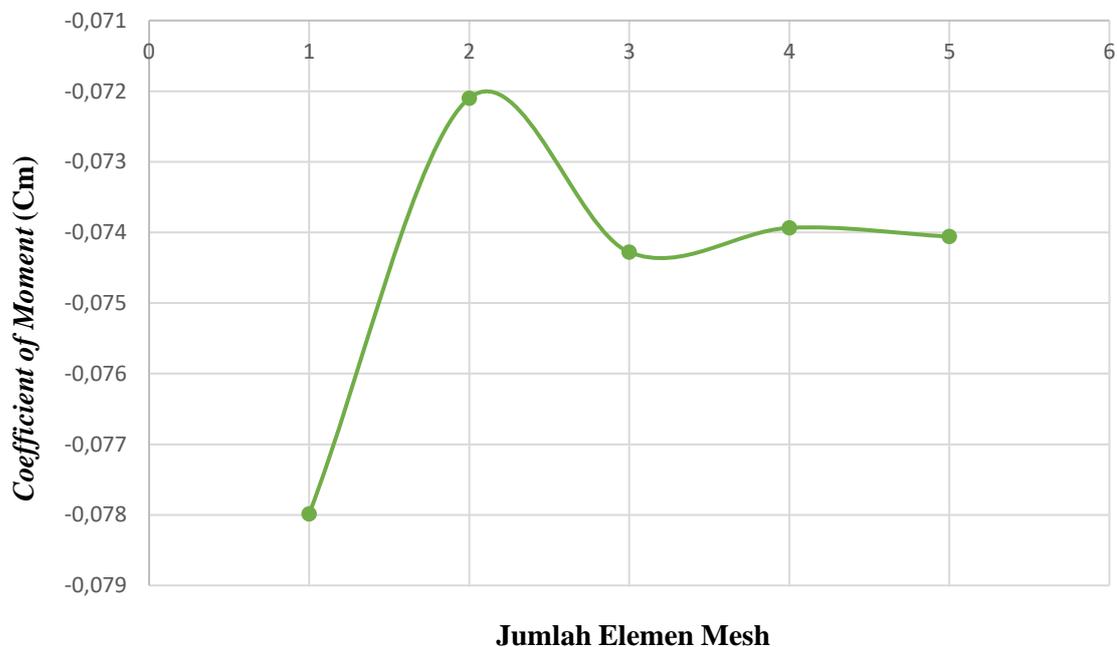
Jadi, nilai bilangan *Reynolds* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 78352.

3.6 Grid Independency Test

Grid Independency Test adalah tahapan yang dilakukan untuk menentukan *grid* paling maksimal atau optimal guna memperoleh hasil yang akurat dengan salah satu konfigurasi yang dijadikan acuan. Cara pembuatan *grid independency test* adalah dengan membuat *meshing* sebanyak-banyaknya dengan jumlah *cell* yang berbeda-beda. Data hasil simulasi ini nantinya akan dibandingkan dengan konfigurasi acuan untuk memperoleh hasil yang dinyatakan dalam persentase *error* dalam sebuah tabel. Penentuan *meshing* yang baik untuk dilanjutkan ke tahap berikutnya dari *grid independency test* ini adalah *meshing* yang memiliki nilai *error* dibawah 4%.

Tabel 3.5 *Grid Independency Test* turbin angin Savonius Konvensional

No	Elements	Y+ Max	Cm Peak Minimum	Error (%)
1	46558	0,77042	-0,0779	
2	90110	0,77231	-0,0721	8,16
3	110206	0,76757	-0,0742	2,93
4	141317	0,76762	-0,0739	0,47
5	191227	0,76734	-0,0741	0,17



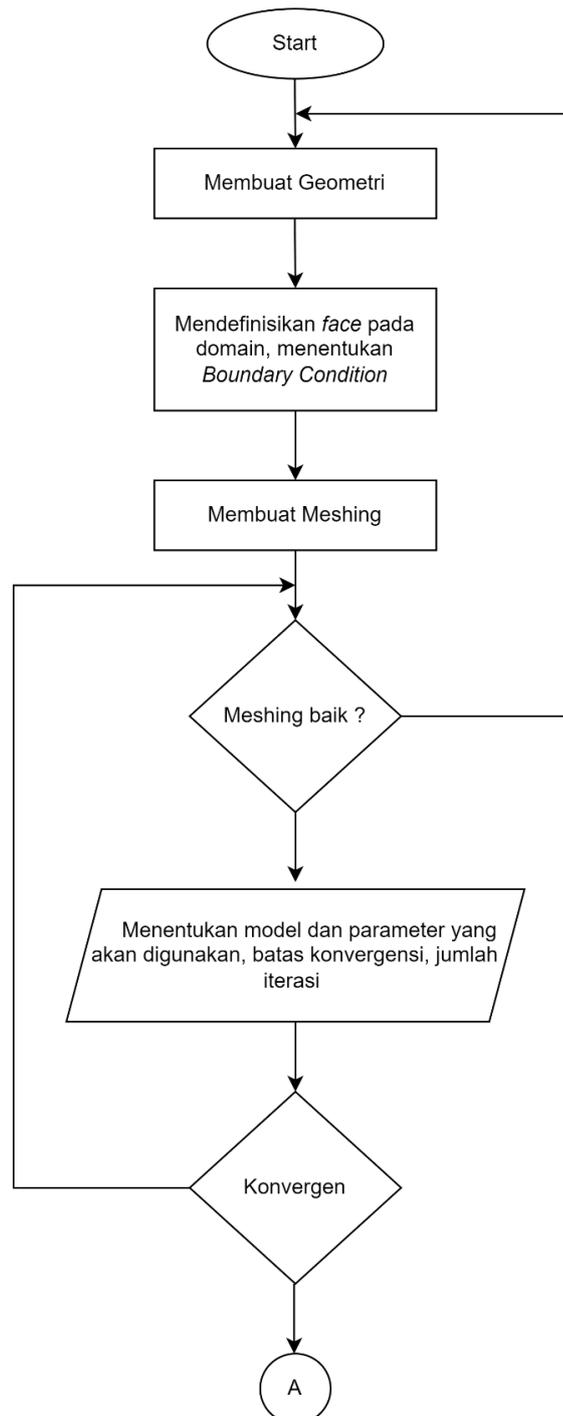
Gambar 3.13 Grafik *grid independency test*

Berdasarkan tabel 3.5 dan gambar 3.10, *mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *mesh* dengan jumlah elements sebesar 110206, pemilihan ini dikarenakan nilai *coefficient of moment* sudah stabil atau variasi *mesh* diatas jumlah elements diatas 110206 tidak

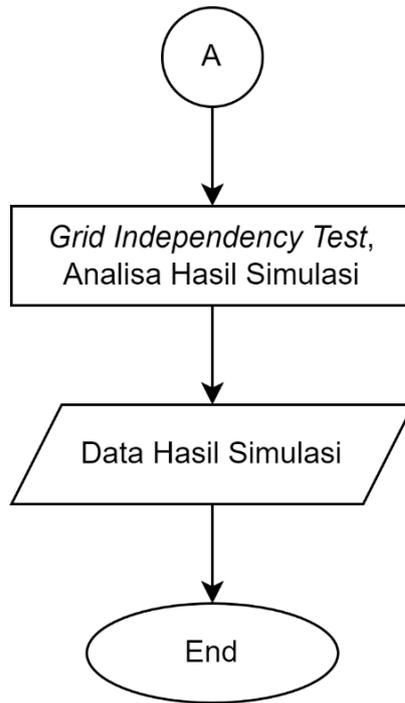
menghasilkan perbedaan *coefficient of moment* yang besar dan nilai *error* yang tidak berbeda jauh. Oleh karena itu dipilih *mesh* dengan jumlah elements sebesar 110206 dikarenakan menghemat waktu yang dibutuhkan dalam proses *running* dan lebih ekonomis.

3.7 Diagram Alir

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa tahapan agar tujuan yang diharapkan dapat tercapai. Tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir dibawah. Untuk gambar 3.11 dan 3.12 menunjukkan tahapan yang dilakukan ketika pengambilan data untuk turbin angin konvensional.

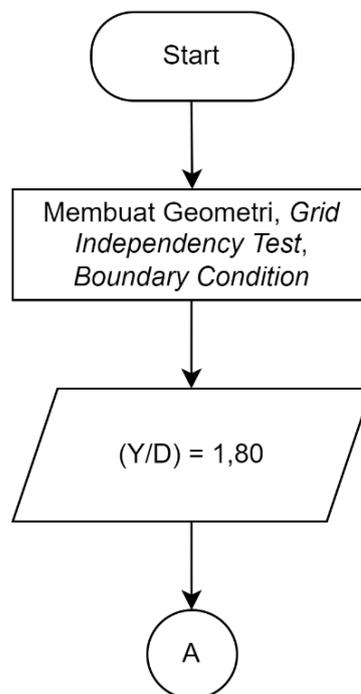


Gambar 3.14 Flowchart simulasi turbin konvensional

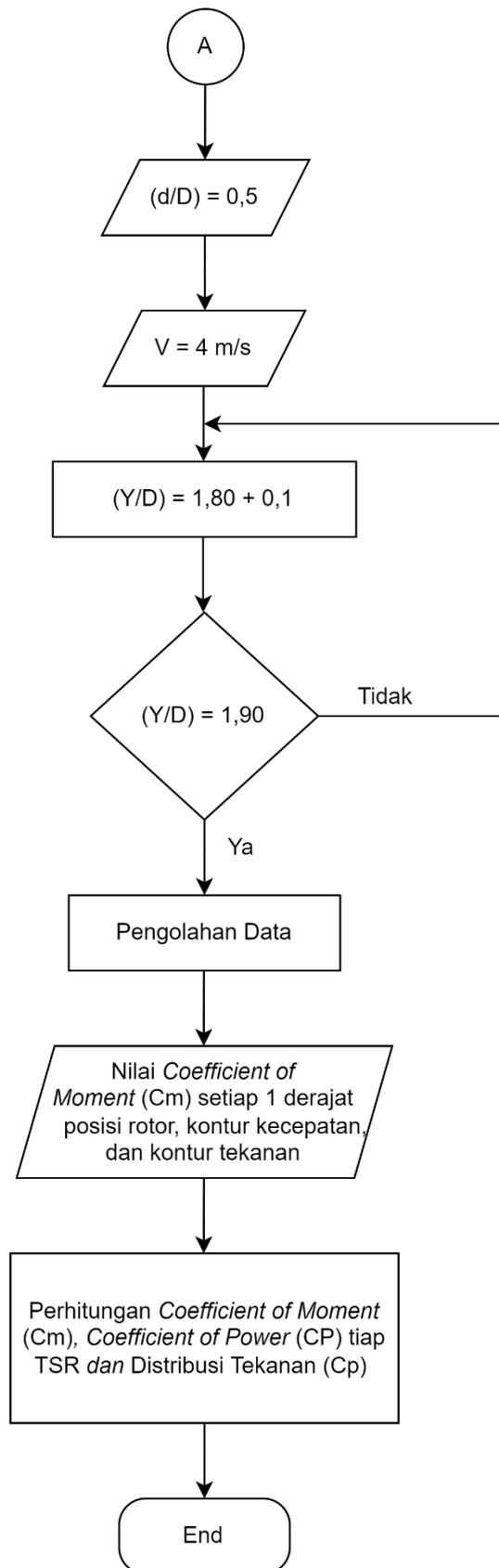


Gambar 3.15 *Flowchart* simulasi turbin konvensional

Untuk gambar 3.13 dan 3.14 menunjukkan tahapan yang dilakukan ketika pengambilan data untuk turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,80 dan 1,90.

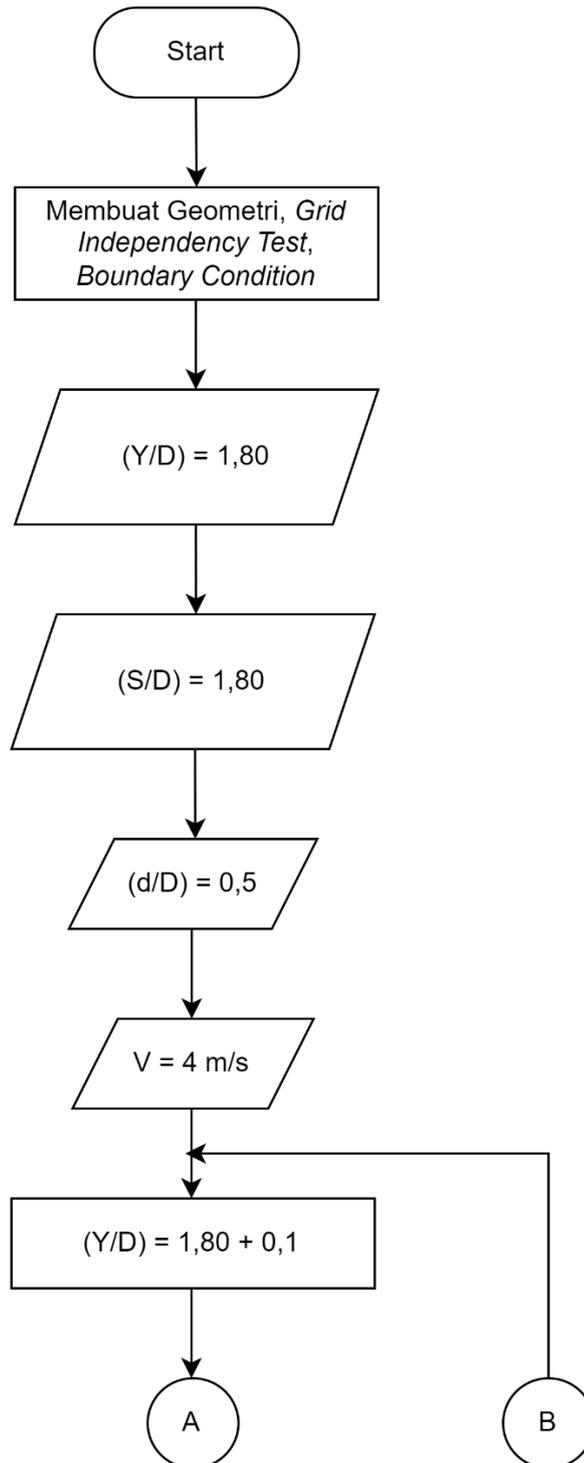


Gambar 3.16 *Flowchart* simulasi turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,80 dan 1,90.

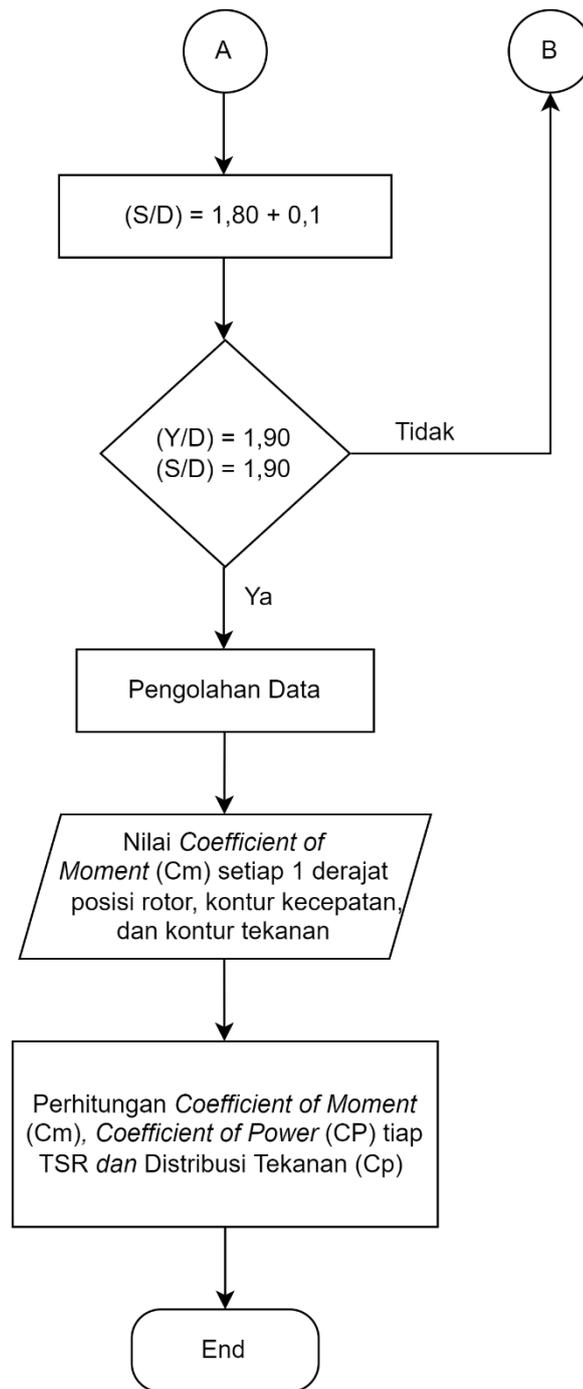


Gambar 3.17 Flowchart simulasi turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* $(Y/D) = 1,80$ dan $1,90$.

Untuk gambar 3.15 dan 3.16 menunjukkan tahapan yang dilakukan ketika pengambilan data untuk turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 serta Y/D = 1,90; S/D = 1,90.



Gambar 3.18 Flowchart simulasi turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* (S/D) dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 serta Y/D = 1,90; S/D = 1,90.



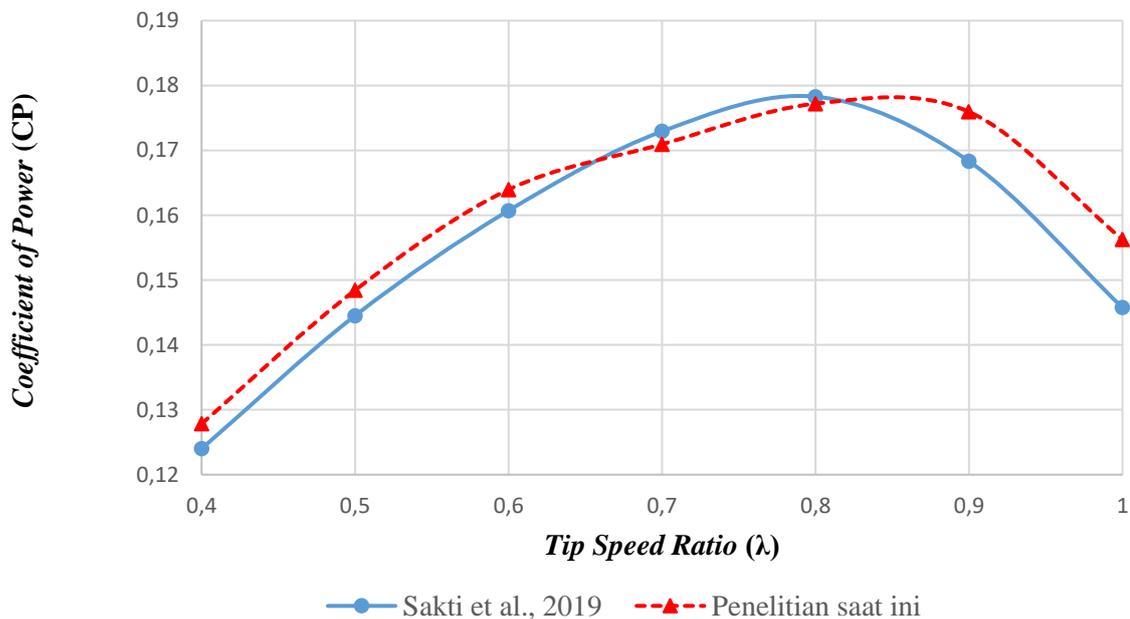
Gambar 3.19 Flowchart simulasi turbin angin dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* (S/D) dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 serta Y/D = 1,90; S/D = 1,90.

BAB IV ANALISIS DAN DISKUSI

Bab ini berisi mengenai hasil analisa dan diskusi dari analisa numerik turbin angin savonius dengan konfigurasi pertama adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$ dan $1,90$. Sedangkan konfigurasi kedua adalah penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$. terhadap peningkatan performa turbin angin savonius. Hasil yang akan ditunjukkan pada bab ini antara lain hasil kuantitatif dan hasil kualitatif. Hasil kuantitatif yang akan ditampilkan yaitu grafik *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap sudut putar, grafik *Coefficient of Power* (CP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), dan grafik distribusi koefisien tekanan di sepanjang permukaan turbin. Sedangkan hasil kualitatif yang akan ditampilkan yaitu kontur tekanan dan kontur kecepatan.

4.1 Komparasi Hasil Simulasi

Sebuah penelitian dengan metode numerik dibutuhkan proses komparasi untuk mengetahui hasil yang dilakukan apakah sudah menghasilkan data yang sesuai atau tidak. Penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan pada komparasi hasil simulasi ini adalah penelitian yang dilakukan oleh (Sakti et al., 2019). Data yang akan dibandingkan untuk proses komparasi adalah nilai *Coefficient of Power* (CP).



Gambar 4.1 Grafik komparasi hasil simulasi perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) hasil penelitian **Sakti et al., 2019** dan penelitian saat ini

Gambar 4.1 memperlihatkan perbandingan hasil simulasi nilai *Coefficient of Power* (CP) hasil penelitian yang dilakukan (Sakti et al., 2019) dengan penelitian saat ini. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Sakti et al., 2019) geometri yang digunakan pada sambungan antara poros dan sudu lebih *smooth* jika dibandingkan dengan penelitian yang digunakan saat ini, namun perbedaan yang ada tidak terlalu banyak dan dapat dilihat pada grafik dimana sudah memiliki tren yang sama. Di lain sisi, simulasi sudah dilakukan dengan parameter simulasi yang sama dengan milik (Sakti et al., 2019) yaitu menggunakan variasi kecepatan konstan ($V = 5$

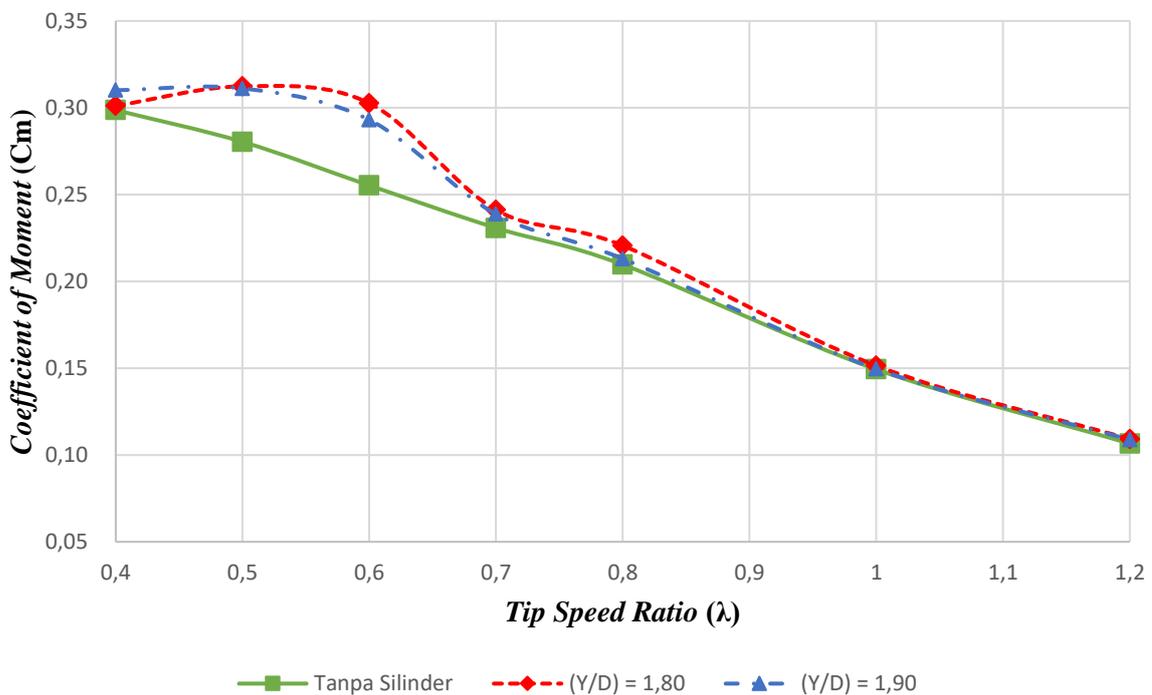
m/s dan dilakukan di *Tip Speed Ratio* (λ) sebesar 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0. Dengan parameter yang sama terlihat bahwa nilai *Coefficient of Power* (CP) dari keduanya memiliki tren yang sama namun nilai yang didapatkan oleh penelitian saat ini memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penelitian oleh (Sakti et al., 2019). Penelitian (Sakti et al., 2019) memiliki nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata sebesar 0,151 sedangkan penelitian saat ini memiliki nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata sebesar 0,155. Untuk nilai *Coefficient of Power* (CP) tertinggi sama-sama terjadi pada TSR (λ) 0.8 dimana penelitian (Sakti et al., 2019) memiliki nilai *Coefficient of Power* (CP) sebesar 0,173 dan penelitian saat ini sebesar 0,172.

4.2 Hasil Simulasi

Pada sub bab ini akan dijelaskan bagaimana perbedaan kontur kecepatan, kontur tekanan, grafik *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap sudut putar, grafik *Coefficient of Power* (CP) terhadap *Tip Speed Ratio* (λ), dan grafik distribusi koefisien tekanan di sepanjang permukaan turbin dengan penggunaan variasi yang digunakan untuk penelitian saat ini.

4.2.1 *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ)

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) dari semua variasi variasi yang dilakukan yaitu variasi Y/D = 1,80; Y/D = 1,90 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90. Dari simulasi tersebut, didapatkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada masing-masing variasi.

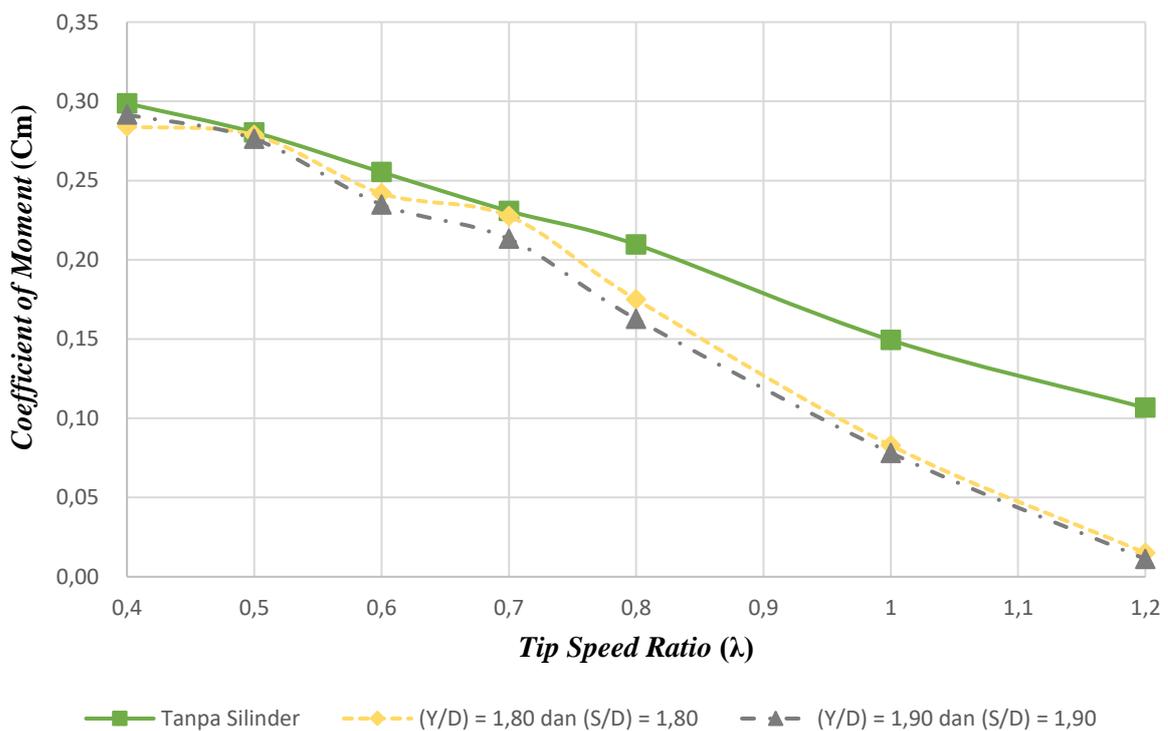


Gambar 4.2 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D

Pada gambar 4.2 menunjukkan grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) rata-rata berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) sebesar 1,80 dan 1,90. Jika dilihat pada gambar diatas, dapat

disimpulkan bahwa nilai *Coefficient of Moment* (C_m) tertinggi didapatkan pada TSR 0.5, dimana nilai untuk variasi $Y/D = 1,80$ adalah 0,312 dan variasi $Y/D = 1,90$ adalah 0,311 atau mengalami peningkatan sekitar 1,11% dan 1,10% jika dibandingkan dengan turbin konvensional.

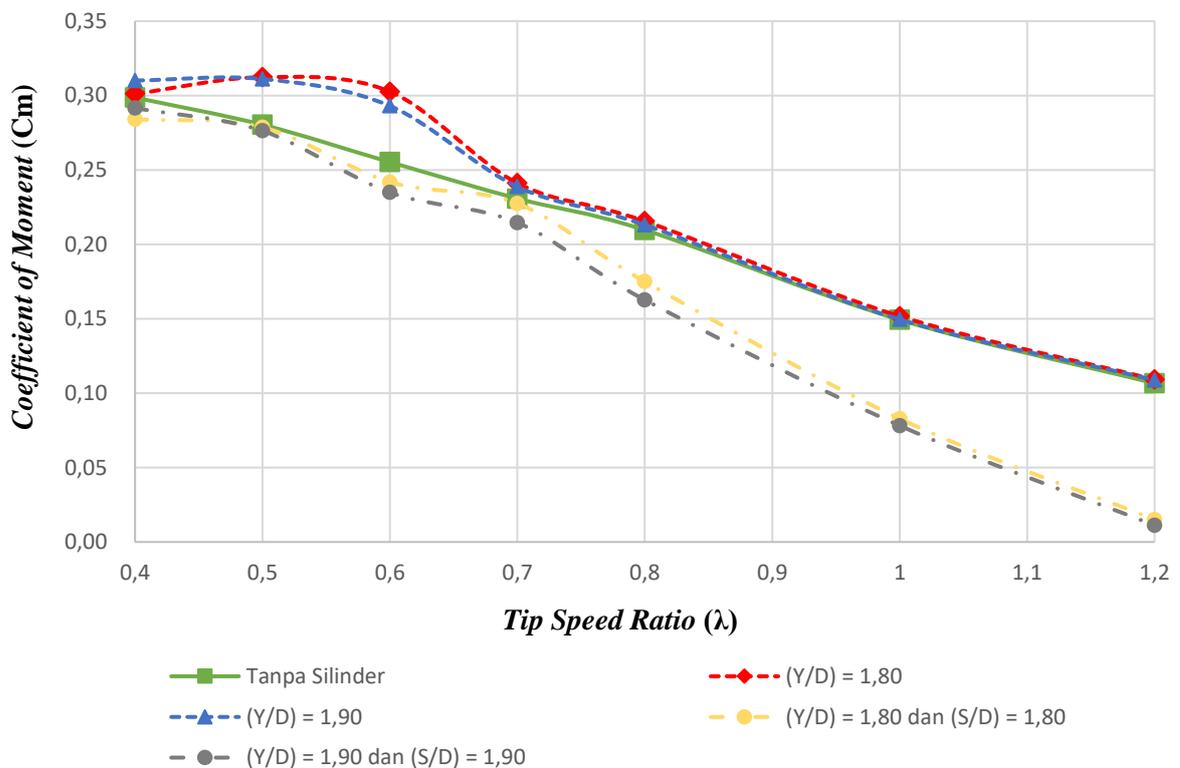
Hal ini membuktikan bahwa dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* akan menyebabkan efek *nozzle* yang meningkatkan kecepatan atau menurunkan tekanan pada sisi cembung sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan daerah *attach flow* semakin besar sehingga kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan meningkatnya kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* atau menurunkan tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* akan menyebabkan selisih gaya *drag* dari sudu *advancing* meningkat. Selisih ini akan membuat torsi positif yang dihasilkan semakin besar dan daya turbin meningkat. Namun, untuk perbandingan antara variasi $Y/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$, nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dari variasi $Y/D = 1,80$ memiliki nilai yang lebih tinggi. Hal ini terjadi dikarenakan pada variasi $Y/D = 1,90$ memiliki jarak yang lebih jauh jika dibandingkan $Y/D = 1,80$ sehingga peran dari *circular cylinder* untuk turbin angin Savonius tidak berfungsi dengan baik. Selain itu, nilai *Coefficient of Moment* (C_m) mengalami penurunan secara drastis pada TSR 0.7 keatas dikarenakan pada TSR ini pemanfaatan aliran pada turbin tidak dapat dimanfaatkan dengan optimal.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D ; S/D

Pada gambar 4.3 menunjukkan grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) rata-rata berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) sebesar 1,80 dan 1,90 dan variasi penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* (S/D) sebesar 1,80 dan 1,90. Jika dilihat pada gambar, dapat disimpulkan bahwa nilai *Coefficient of Moment* (C_m) rata-rata tertinggi didapatkan pada TSR 0.4 dimana nilai untuk variasi $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ adalah 0,284 dan variasi $Y/D = 1,90$;

$S/D = 1,90$ adalah $0,291$. Untuk variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan *circular cylinder* di depan sudu *returning* (S/D) menyebabkan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) rata-rata menurun pada semua konfigurasi di tiap fungsi *Tip Speed Ratio* (λ). Penurunan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) pada konfigurasi variasi jarak $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$ disebabkan karena peletakan *circular cylinder* di depan sudu *returning* mengakibatkan *wake* dibelakang sisi cekung *returning* mengecil sehingga tekanan menurun. Selain itu, efek *circular cylinder* di depan sudu *returning* juga membuat tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat dikarenakan aliran dari atas sudu *returning* mengalami *attached* di sisi cembung sudu *advancing* yang melawan torsi positif dari sudu *advancing*. Hal ini membuat perbedaan torsi positif antara sudu *advancing* dan sudu *returning* berkurang sehingga daya turbin menjadi turun.

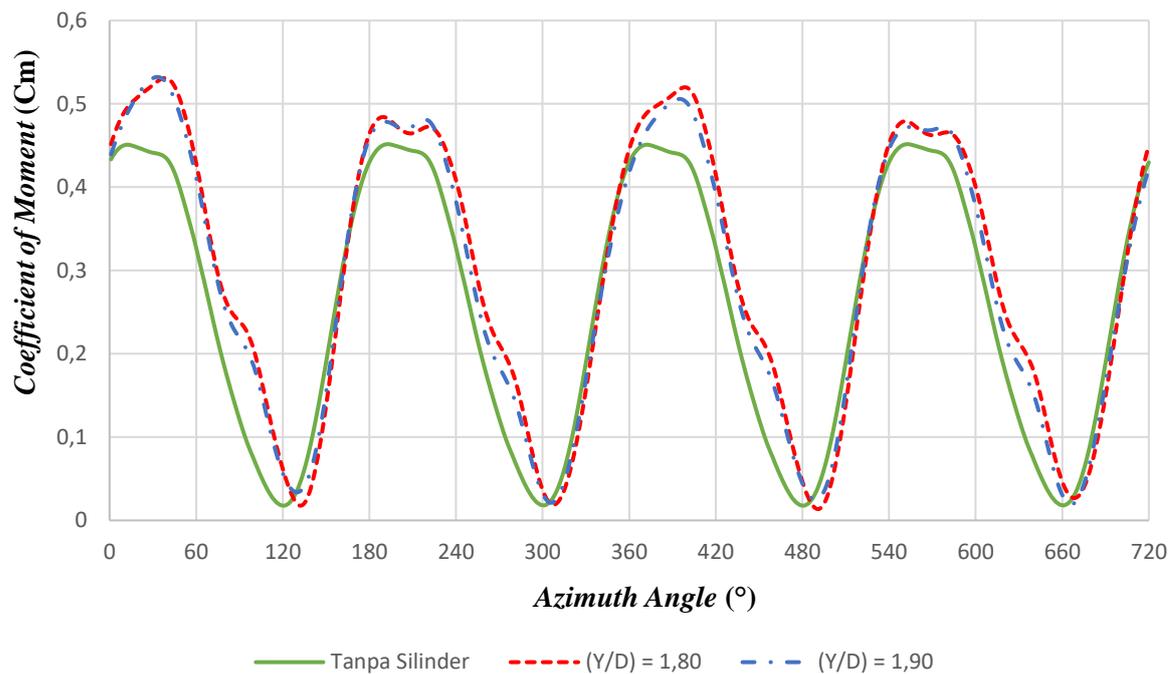


Gambar 4.4 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada semua variasi

Gambar 4.4 menggambarkan perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan variasi. Hasil yang didapatkan ialah variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) memiliki nilai *Coefficient of Moment* (C_m) yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin konvensional dan daripada variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Ini dapat dilihat dari nilai C_m tertinggi didapatkan pada variasi jarak $Y/D = 1,80$ dengan nilai C_m sebesar $0,312$ di TSR $0,5$.

4.2.2 *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *Azimuth Angle* ($^\circ$)

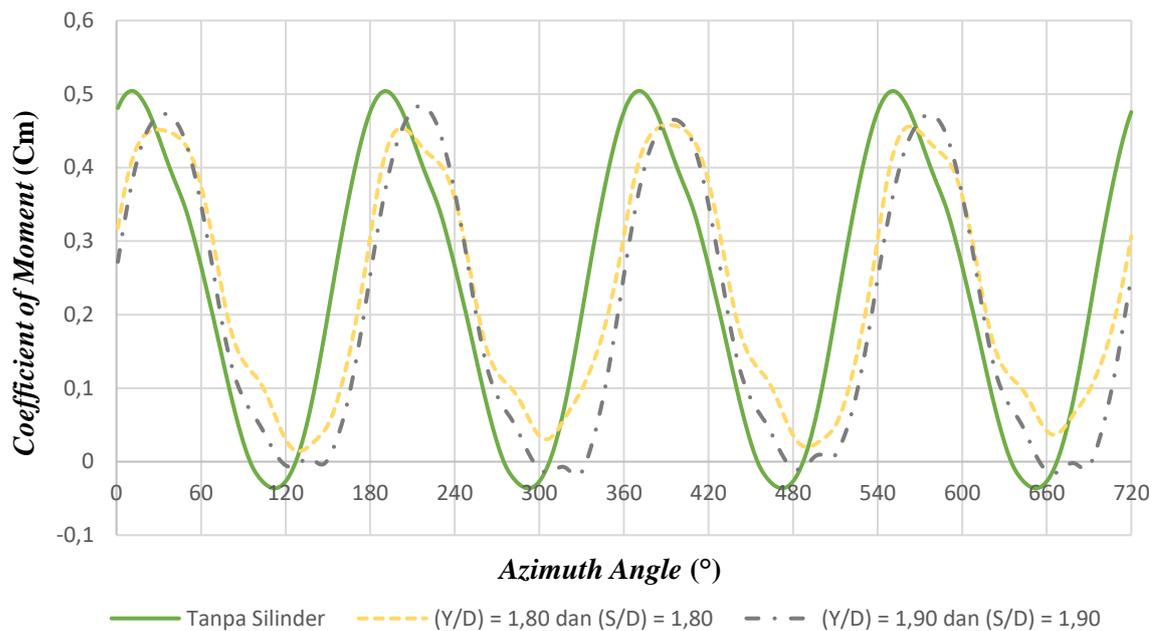
Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* dari variasi $Y/D = 1,80$; $Y/D = 1,90$; serta $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$.



Gambar 4.5 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *azimuth angle* (°) dengan variasi Y/D di TSR 0.6

Pada gambar 4.5 menunjukkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *azimuth angle* (°) untuk satu putaran penuh rotor turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D). Analisa ini dilakukan pada TSR optimum ketika nilai *Coefficient of Moment* (Cm) mengalami nilai tertinggi yaitu di TSR 0.6. Pada turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan jarak (Y/D) = 1,80, Cm maksimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 30° dengan nilai sebesar 0,56 dan Cm minimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 135° sebesar 0,01. Sedangkan pada turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan jarak (Y/D) = 1,90 Cm maksimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 30° dengan nilai sebesar 0,55 dan Cm minimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 135° sebesar 0,02. Dari hasil yang didapatkan maka dapat dilihat bahwa nilai Cm maksimum didapat saat posisi *azimuth angle* = 30°, dimana menurut kontur kecepatan yang akan dijelaskan berikutnya, pada posisi ini, turbin hampir searah dengan aliran udara yang akan menyebabkan efek *nozzle* pada sisi cembung sudu *advancing* sehingga daerah *attached flow* yang berkecepatan tinggi berdampak terhadap kenaikan kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* dan ini membuat Cm memiliki nilai yang besar. Sedangkan nilai Cm minimum didapat saat posisi *azimuth angle* = 135° atau hampir tegak lurus terhadap aliran udara. Pada sudut ini membuat efek pengaruh *circular cylinder* tidak berdampak besar dikarenakan efek *nozzle* yang dihasilkan tidak optimal dikarenakan tidak mempengaruhi kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* turbin.

Dapat disimpulkan bahwa penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) menyebabkan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) meningkat walaupun Cm minimum mengalami penurunan nilai tetapi Cm maksimum yang diperoleh oleh variasi Y/D mengalami peningkatan yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin konvensional sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius lebih besar.



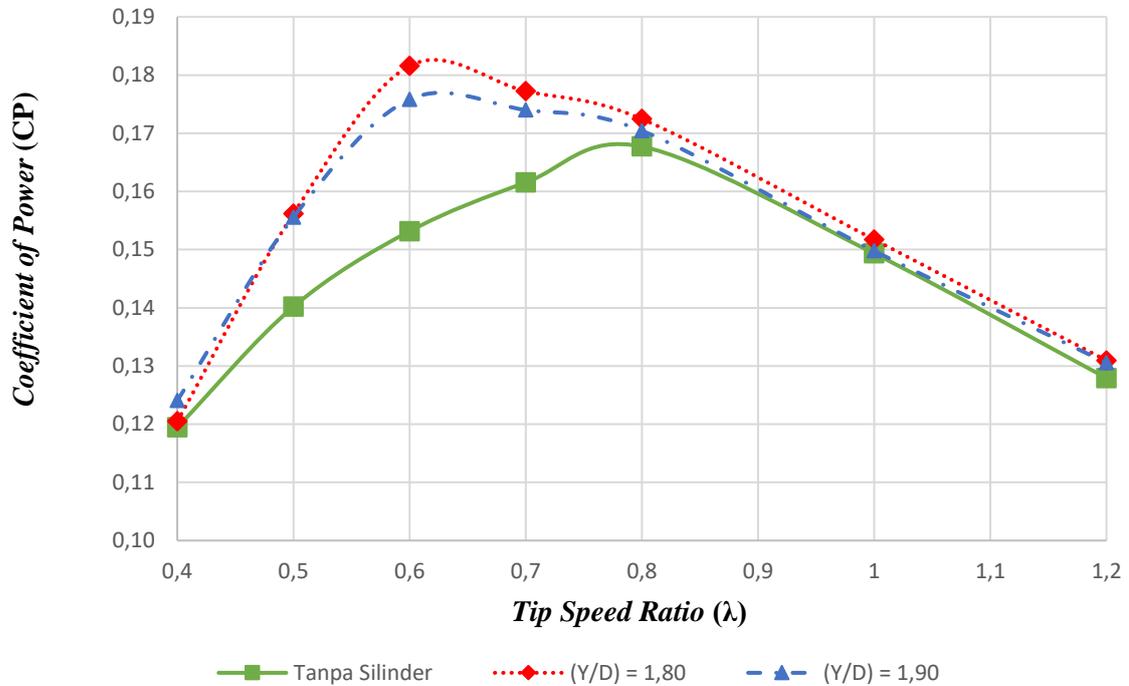
Gambar 4.6 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* ($^\circ$) dengan variasi Y/D ; S/D di TSR 0.7

Pada gambar 4.6 menunjukkan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) terhadap *azimuth angle* ($^\circ$) untuk satu putaran penuh rotor turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan variasi penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* (S/D). Analisa ini dilakukan pada TSR optimum ketika nilai *Coefficient of Moment* (C_m) mengalami nilai tertinggi yaitu di TSR 0.7. Pada turbin angin Savonius dengan variasi (Y/D) = 1,80; (S/D) = 1,80, C_m maksimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 30° dengan nilai sebesar 0,45 dan C_m minimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 135° sebesar 0,018. Sedangkan pada turbin angin Savonius dengan variasi Y/D = 1,90; S/D = 1,90 C_m maksimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 30° dengan nilai sebesar 0,45 dan C_m minimum didapatkan pada saat posisi *azimuth angle* = 135° sebesar 0,01. Selain itu nilai *Coefficient of Moment* (C_m) bernilai negatif berada pada posisi *azimuth angle* = 299° hingga 333° .

Dari hasil yang didapatkan maka dapat dilihat bahwa nilai C_m maksimum didapat saat posisi *azimuth angle* = 30° , dimana menurut kontur kecepatan yang akan dijelaskan berikutnya, pada posisi ini, turbin hampir searah dengan aliran udara yang akan menyebabkan efek *nozzle* pada sisi cembung sudu *advancing* sehingga daerah *attached flow* yang berkecepatan tinggi berdampak terhadap kenaikan kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* dan ini membuat C_m memiliki nilai yang besar. Namun, dikarenakan pengaruh penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* akan membuat *wake* dibelakang sisi cekung *returning* mengecil sehingga tekanan menurun. Selain itu, efek *circular cylinder* di depan sudu *returning* juga membuat tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat dikarenakan aliran dari atas sudu *returning* mengalami *attached* di sisi cembung sudu *advancing*. Hal ini membuat perbedaan torsi positif antara sudu *advancing* dan sudu *returning* berkurang sehingga daya turbin menjadi turun atau C_m menjadi menurun. Sedangkan nilai C_m minimum didapat saat posisi *azimuth angle* = 135° atau hampir tegak lurus terhadap aliran udara sehingga *wake region* yang terbentuk pada sudut ini tidak mempengaruhi turbin sehingga nilai C_m minimum yang didapatkan bisa lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin konvensional.

4.2.3 Coefficient of Power (CP) berdasarkan fungsi Tip Speed Ratio (λ)

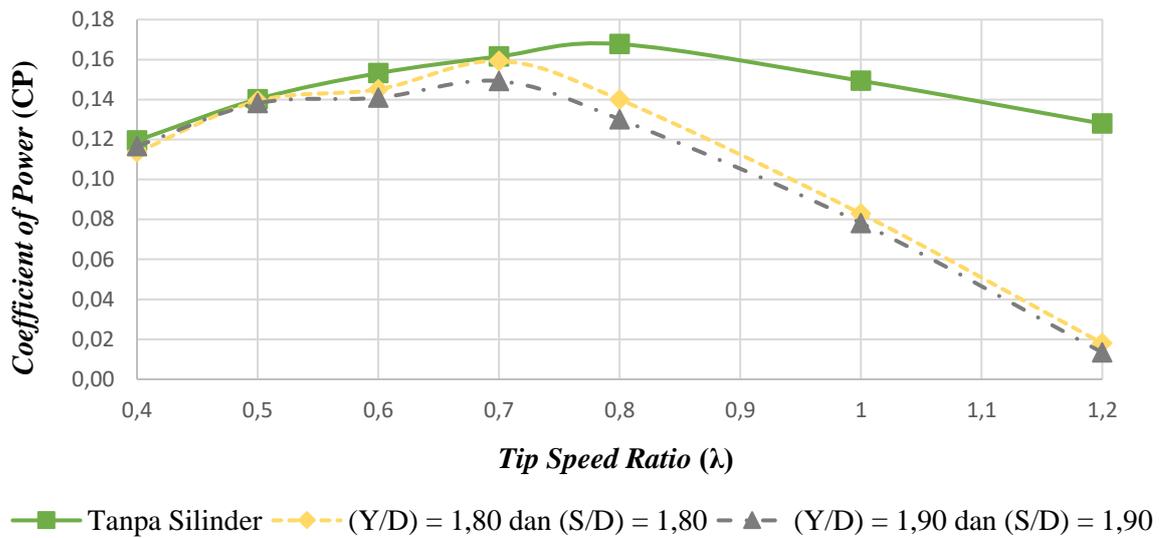
Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) dari semua variasi yang dilakukan yaitu variasi $Y/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$. Serta variasi $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$. Dari simulasi tersebut, didapatkan nilai *Coefficient of Power* (CP) sebagai fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada masing-masing variasi.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan Nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D)

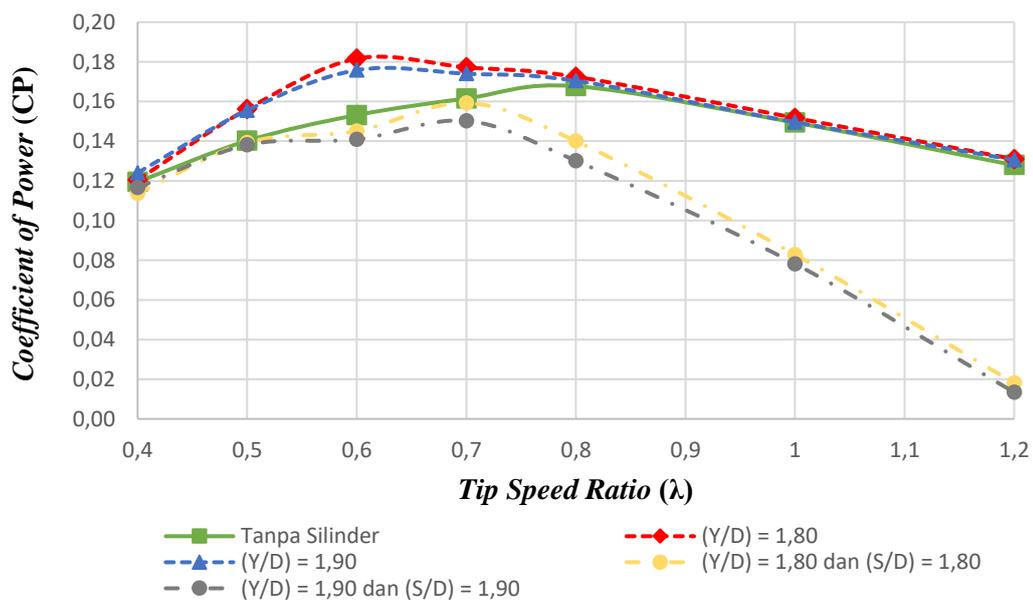
Pada gambar 4.7 menunjukkan grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk variasi jarak antara pusat sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan pusat *circular cylinder* (Y/D) sebesar 1,80 dan 1,90. Jika dilihat pada gambar, dapat disimpulkan bahwa nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata tertinggi didapatkan pada TSR 0.6, dimana nilai untuk variasi (Y/D) = 1,80 adalah 0,182 dan variasi (Y/D) = 1,90 adalah 0,176 atau sekitar 1,18% dan 1,15%.

Pada TSR 0.6 terlihat bahwa turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* variasi jarak antara pusat sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan pusat *circular cylinder* (Y/D) = 1,80 memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi (Y/D) = 1,90. Hal ini terjadi dikarenakan ketika penempatan *circular cylinder* pada jarak $Y/D = 1,90$ menyebabkan jarak antara turbin dan *circular cylinder* terlalu jauh maka fungsi *circular cylinder* menjadi tidak efektif dikarenakan seperti objek yang berdiri sendiri-sendiri. Selain itu, terjadi penurunan nilai di TSR tinggi disebabkan oleh kecepatan tangensial dari sudu turbin yang sudah melebihi kecepatan udara mengalir sehingga pemanfaatan aliran menjadi kurang optimal.



Gambar 4.8 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D = 1,80 dan 1,90. Serta variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90

Pada gambar 4.8 menunjukkan grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) untuk variasi jarak antara pusat sudu *advancing* turbin angin Savonius dengan pusat *circular cylinder* (Y/D) sebesar 1,80 dan 1,90 dan variasi jarak antara pusat sudu *returning* turbin angin Savonius dengan pusat *circular cylinder* (S/D) sebesar 1,80 dan 1,90. Jika dilihat pada gambar, dapat disimpulkan bahwa nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata tertinggi didapatkan pada TSR 0,7, dimana nilai untuk variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 adalah 0,16 dan variasi Y/D = 1,90; S/D = 1,90 adalah 0,15. Untuk variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan *circular cylinder* di depan sudu *returning* (S/D) menyebabkan nilai *Coefficient of Power* (CP) rata-rata menurun pada semua konfigurasi di tiap fungsi *Tip Speed Ratio* (λ).

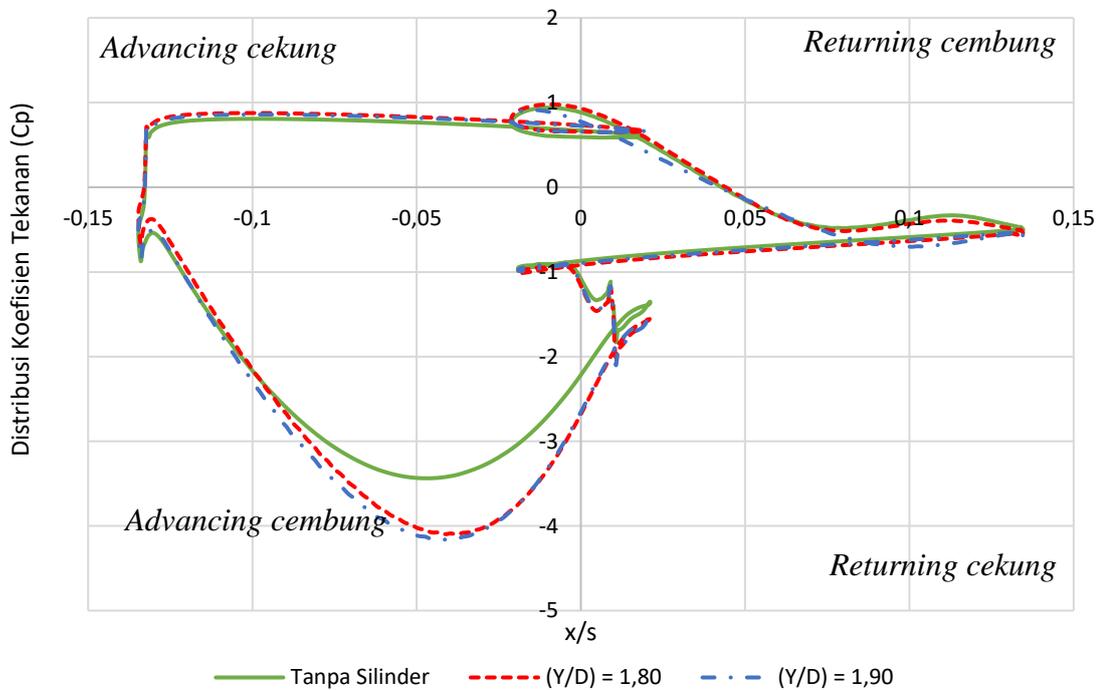


Gambar 4.9 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada semua variasi

Pada gambar 4.9 terlihat grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan variasi. Hasil yang didapatkan ialah variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) memiliki nilai *Coefficient of Power* (CP) yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin konvensional dan daripada variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Ini dapat dilihat dari nilai CP tertinggi didapatkan pada variasi jarak Y/D = 1,80 dengan nilai CP sebesar 0,182 di TSR 0.7.

4.2.4 Distribusi Koefisien Tekanan (Cp)

Pada sub bab ini akan dibahas tentang bagaimana distribusi koefisien tekanan (Cp) di sepanjang permukaan sudu *advancing* dan sudu *returning* dari (Y/D) = 1,80 dan (Y/D) = 1,90. Serta variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90. Data yang digunakan untuk nilai distribusi tekanan diambil pada *Tip Speed Ratio* (TSR) optimum dan pada posisi sudut dengan nilai *coefficient of power* tertinggi. Sumbu x pada grafik menunjukkan posisi pada permukaan (X) relatif terhadap panjang busur sudu (S).

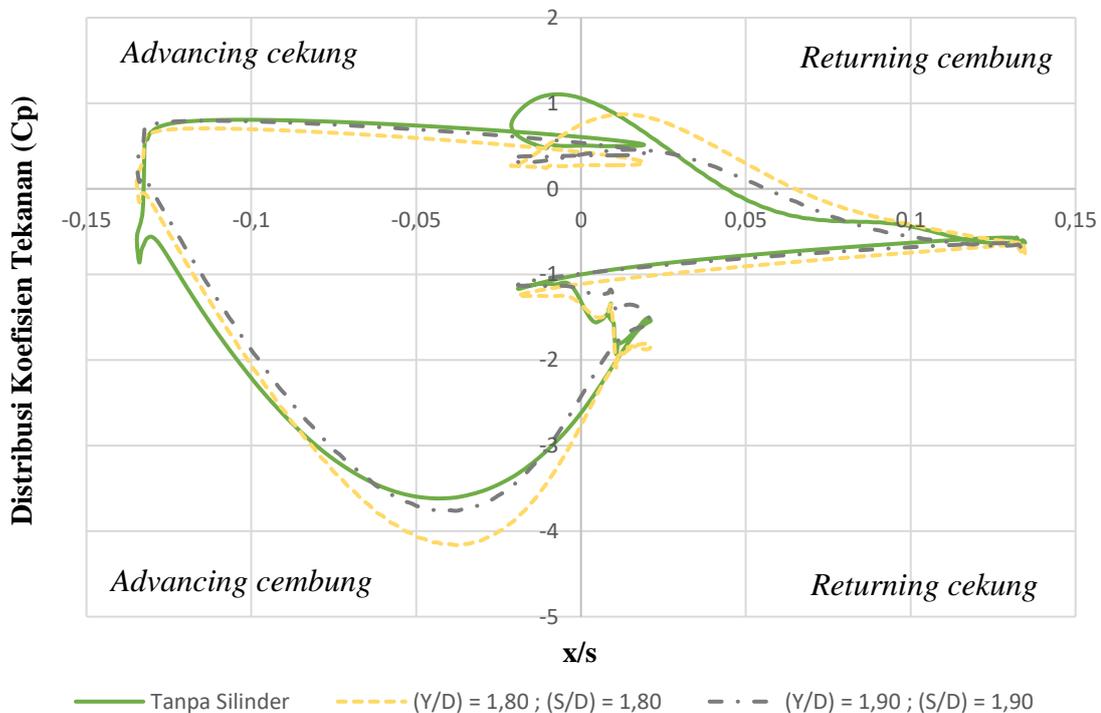


Gambar 4.10 Grafik perbandingan nilai Distribusi Koefisien Tekanan (Cp) berdasarkan fungsi x/s untuk variasi Y/D pada TSR 0.6 pada posisi *azimuth angle* 30°

Pada gambar 4.10 menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan berdasarkan fungsi x/s untuk turbin angin Savonius tanpa silinder dengan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D). Distribusi koefisien tekanan ini didapatkan dengan mengambil nilai koefisien tekanan turbin pada *Tip Speed Ratio* (TSR) optimal dengan posisi *azimuth angle* yang optimal dan nilai *Coefficient of Power* (CP) yang paling tinggi, yaitu di TSR 0.6 dengan posisi *azimuth angle* 30° . Berdasarkan grafik, posisi x/s nilai negatif menggambarkan sudu *advancing* dan x/s nilai positif menggambarkan sudu *returning* dari turbin. Untuk hasil koefisien distribusi yang diinginkan adalah meningkatnya gaya *drag* pada sudu *advancing* dan menurunnya gaya *drag* pada sudu *returning*.

Hasil yang didapatkan untuk turbin tanpa silinder pada sisi cembung sudu *advancing* memiliki nilai koefisien tekanan (C_p) yang mencapai nilai minimum C_p sebesar -3,43 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -0,50. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 0,94 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,81. Sedangkan hasil yang didapat untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,80 didapatkan nilai C_p pada sisi sisi cembung sudu *advancing* sebesar -4,1 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -1,01. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 0,98 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,88. Dan untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,90 didapatkan nilai C_p pada sisi sisi cembung sudu *advancing* sebesar -4,16 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -0,99. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 0,91 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,86.

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien tekanan (C_p) pada sisi cembung sudu *advancing* dan sisi cekung sudu *returning* memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan sisi sebaliknya. Dengan selisih perbedaan nilai ini membuat terjadi perbedaan nilai gaya *drag*, dimana ketika selisih ini semakin besar maka turbin akan meningkatkan torsi positif yang semakin banyak dan daya yang dihasilkan akan meningkat. Pada analisa grafik juga terlihat bawa variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dengan jarak Y/D = 1,80 dan 1,90 sama-sama membuat koefisien tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami penurunan nilai yang cukup besar. Hal ini membuat perbedaan tekanan antara sisi cembung dengan sisi cekung sudu *advancing* semakin besar sehingga torsi positif meningkat dan daya turbin yang dihasilkan semakin besar.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan nilai Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) berdasarkan fungsi x/s untuk variasi Y/D dan S/D pada TSR 0.7 di posisi *azimuth angle* 30°

Pada gambar 4.11 menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan berdasarkan fungsi x/s untuk turbin angin Savonius tanpa silinder dengan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Distribusi koefisien tekanan ini didapatkan dengan mengambil nilai koefisien tekanan turbin pada *Tip Speed Ratio* (TSR) optimal dengan posisi *azimuth angle* yang optimal dan nilai *Coefficient of Power* (CP) yang paling tinggi, yaitu pada TSR 0.7 dengan posisi *azimuth angle* = 30°.

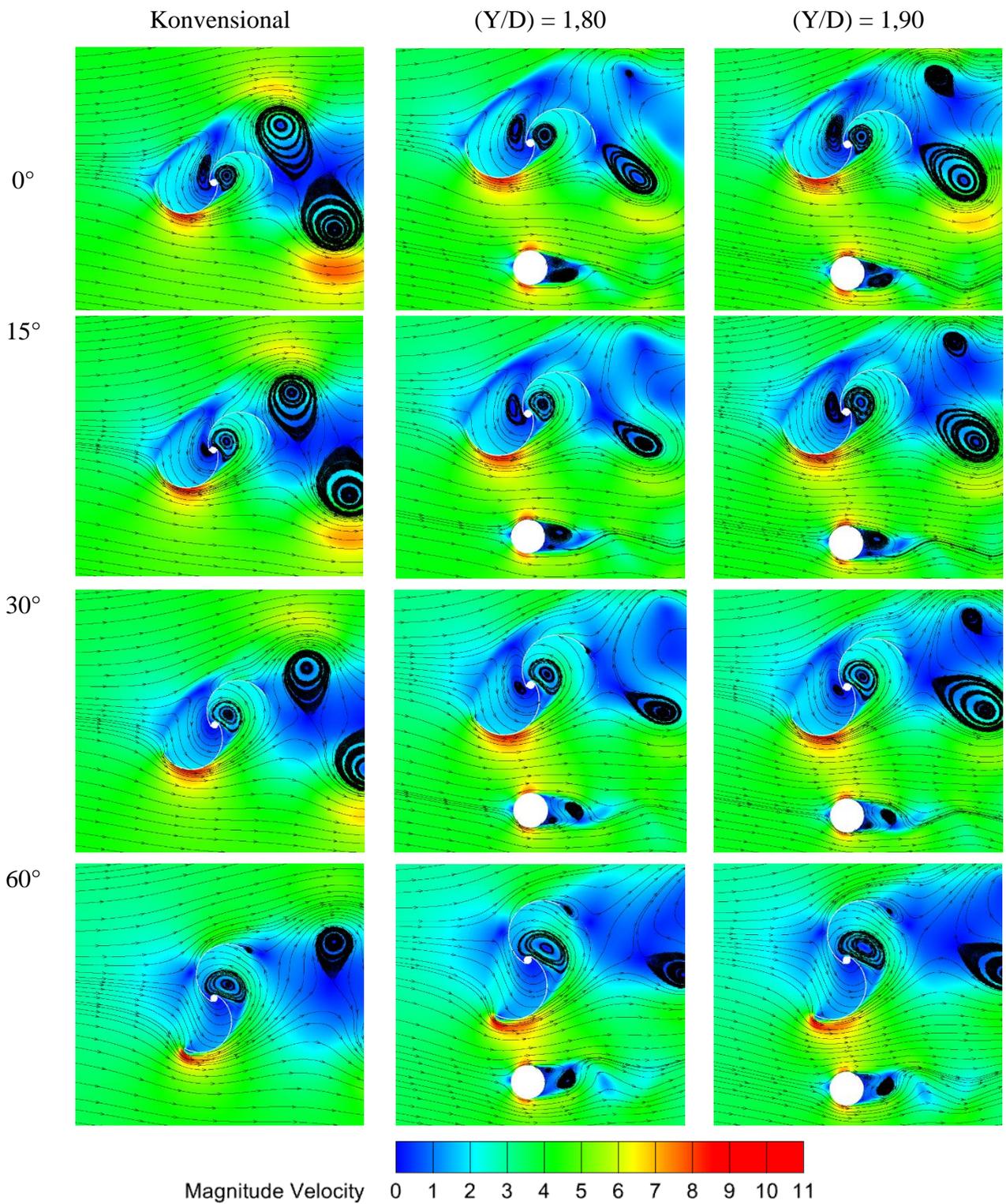
Berdasarkan grafik, posisi x/s negatif menggambarkan sudu *advancing* dan x/s positif menggambarkan sudu *returning* dari turbin. Untuk hasil koefisien distribusi yang diinginkan adalah meningkatnya gaya *drag* pada sudu *advancing* dan menurunnya gaya *drag* pada sudu *returning*. Hasil yang didapat untuk turbin tanpa silinder pada sisi cembung sudu *advancing* memiliki nilai koefisien tekanan (C_p) yang mencapai nilai minimum C_p sebesar -3,62 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -1,17. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 1,1 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,81.

Sedangkan hasil yang didapat untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,80 ; (S/D) = 1,80 didapatkan nilai C_p pada sisi sisi cembung sudu *advancing* sebesar -4,2 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -1,25. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 0,87 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,71. Dan untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) = 1,90 ; (S/D) = 1,90 didapatkan nilai C_p pada sisi sisi cembung sudu *advancing* sebesar -3,766 dan mengalami kenaikan nilai pada sisi cekung sudu *returning* dengan nilai C_p yang masih negatif sebesar -1,13. Pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan (C_p) mengalami kenaikan dengan C_p maksimum sebesar 0,45 dan kemudian pada sisi cekung sudu *advancing* didapatkan nilai C_p sebesar 0,795.

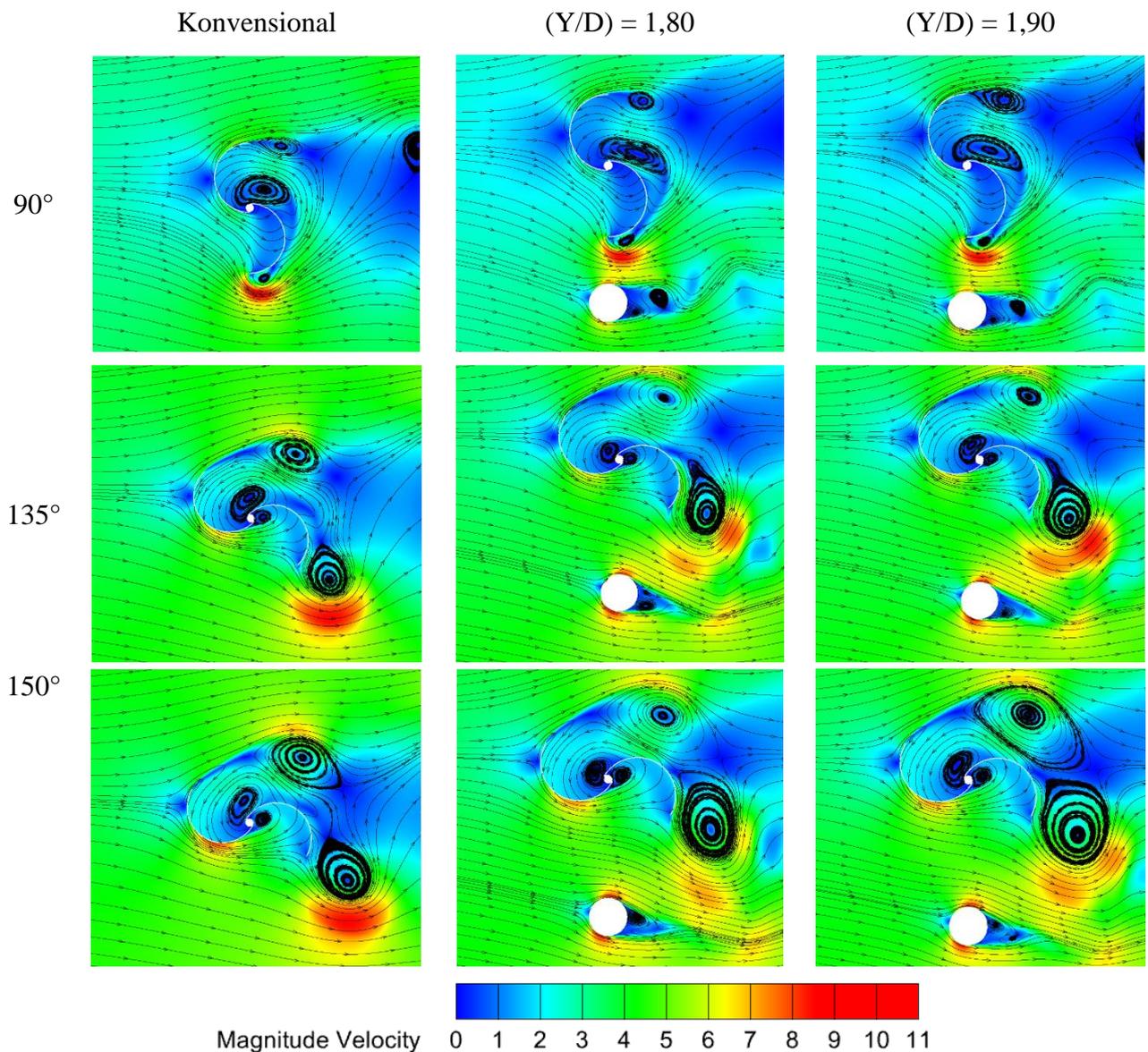
Pada analisa grafik juga terlihat bawa variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* dan di depan sudu *returning* dengan jarak Y/D; S/D memiliki koefisien tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* yang semakin turun sedangkan koefisien tekanan pada sisi cekung sudu *advancing* mengalami penurunan nilai tekanan. Ini menyebabkan gaya *drag* yang dihasilkan oleh sudu *advancing* semakin kecil dan torsi positif juga kecil. Selain itu, pengaruh penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* membuat nilai koefisien tekanan pada sisi cembung sudu *returning* dan sisi cekung sudu *advancing* mengalami penurunan nilai tekanan. Dari hal ini akan membuat selisih perbedaan torsi antara sudu *advancing* dan sudu *returning* semakin kecil dan daya yang dihasilkan oleh turbin akan menurun.

4.2.5 Kontur Kecepatan

Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan kontur kecepatan dari semua variasi yang dilakukan yaitu variasi Y/D = 1,80 dan Y/D = 1,90. Serta variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan Y/D = 1,90; S/D = 1,90. Data yang digunakan untuk kontur kecepatan diambil pada *Tip Speed Ratio* (TSR) optimum.



Gambar 4.12 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudut *advancing* (Y/D) pada *azimuth angle* = 0°, 15°, 30° dan 60°



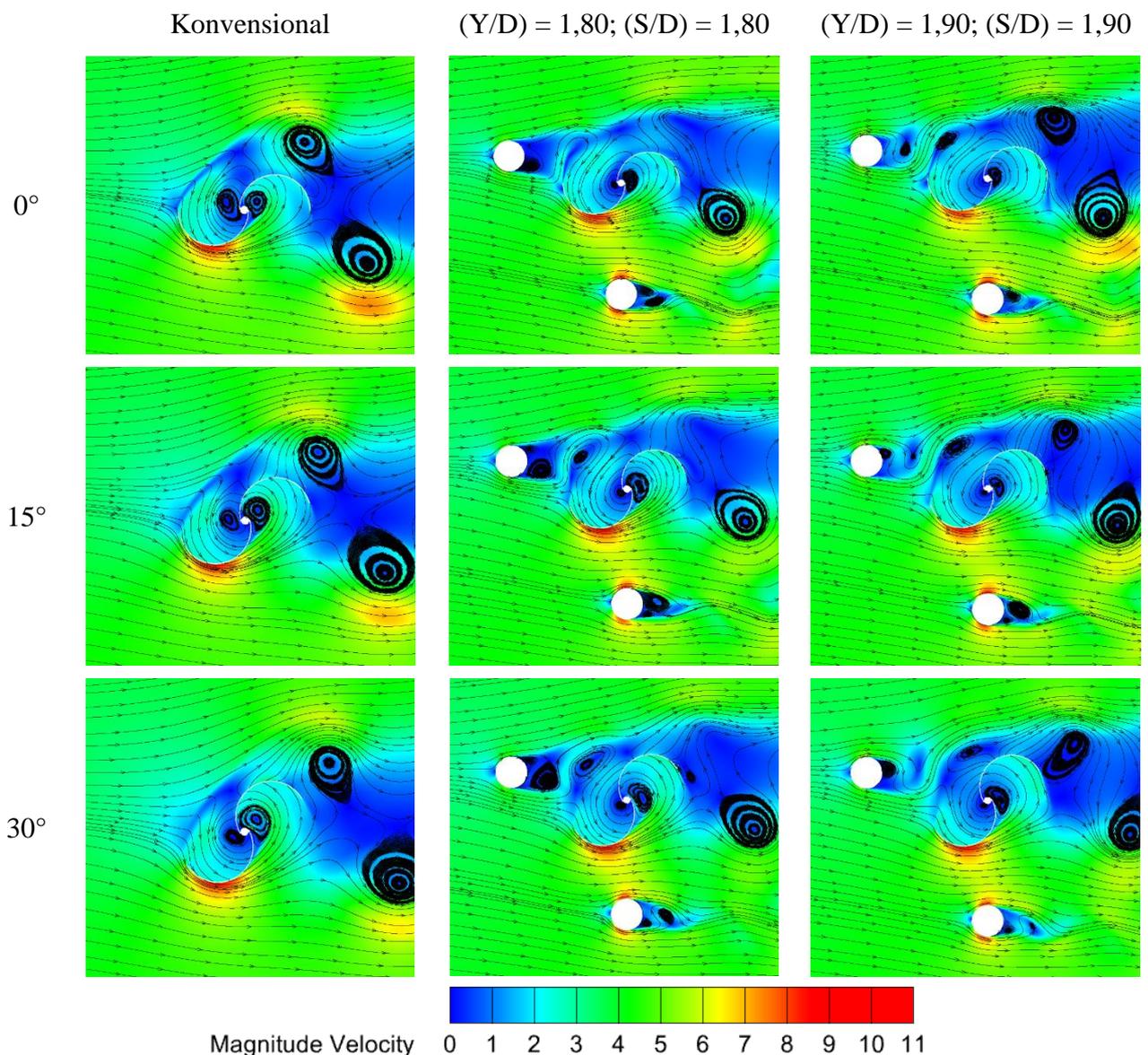
Gambar 4.13 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) pada *azimuth angle* = 90°, 135° dan 150°

Pada gambar 4.12 dan 4.13 menunjukkan perbandingan kontur kecepatan antara turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D). Pada turbin angin Savonius konvensional pada posisi *azimuth angle* = 0°, 15°, 135°, 150° pada gambar terlihat terbentuk sebuah pusaran aliran atau *vortex* di bagian sisi cembung sudu *advancing*, sisi cembung sudu *returning*, bagian atas dan bawah *wake*. Pada posisi *azimuth angle* = 30°, 60°, 90° pusaran aliran atau *vortex* di bagian sisi cembung sudu *returning* tidak terbentuk.

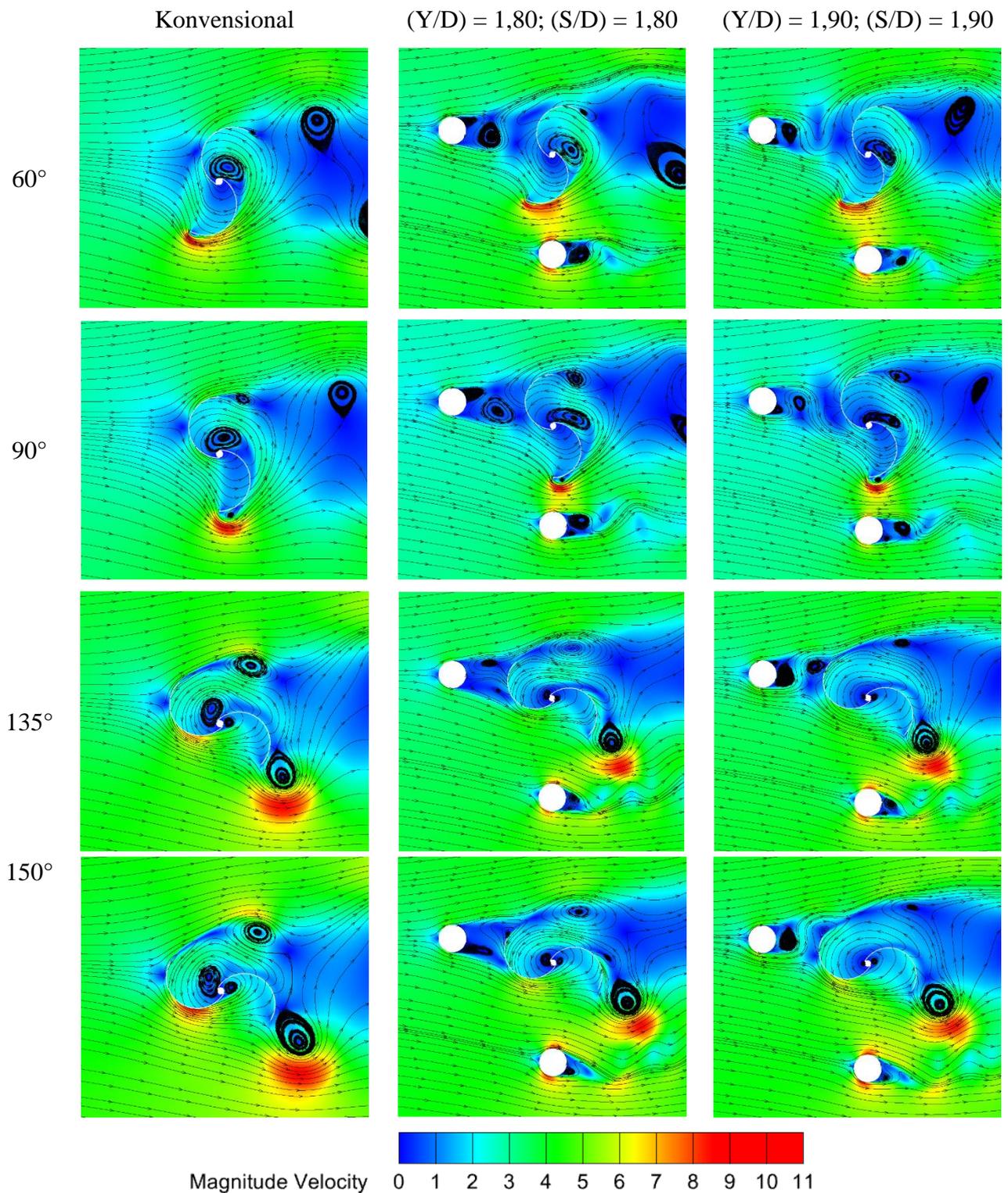
Untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dengan jarak 1,80 dan 1,90, terlihat bahwa ketika posisi *azimuth angle* = 60° dan 90° pada sudu *advancing* mengalami fenomena penyempitan aliran seperti efek *nozzle*. Efek *nozzle* ini kemudian menyebabkan kecepatan aliran udara meningkat dan daerah luasan *attached flow* semakin banyak. Hal ini dapat membuat kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan kecepatan yang meningkat akan membuat tekanan menjadi turun dan hal ini mengakibatkan torsi positif meningkat dan daya yang dihasilkan akan

meningkat juga. Selain itu, ketika posisi *azimuth angle* = 135° dan 150°, daerah laluan antara turbin dengan *circular cylinder* semakin besar sehingga kecepatan aliran udara di daerah tersebut tidak mengalami kenaikan secara signifikan dimana dibuktikan dengan kecepatan pada posisi *azimuth angle* = 90° adalah 11 m/s dan pada posisi *azimuth angle* = 135°, 150° adalah 8 m/s dan 7 m/s.

Jika membandingkan perbedaan kontur kecepatan antara turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dengan jarak 1,80 dan (Y/D) jarak 1,90 maka dapat dilihat bahwa variasi jarak Y/D = 1,80 lebih menghasilkan performa yang lebih baik sedikit jika dibandingkan dengan variasi jarak Y/D = 1,90. Hal ini disebabkan ketika penempatan *circular cylinder* dengan variasi Y/D = 1,80, maka jarak antara turbin dengan *circular cylinder* tidak sejauh dengan variasi Y/D = 1,90 yang akan menyebabkan luasan daerah *attached flow* lebih luas dan hal ini membuat kecepatan yang ada semakin tinggi. Dengan kecepatan yang tinggi akan membuat perbedaan gaya *drag* yang akan dihasilkan dan berdampak pada kenaikan torsi positif serta daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.



Gambar 4.14 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) pada *azimuth angle* = 0°, 15° dan 30°



Gambar 4.15 Kontur kecepatan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) pada azimuth angle = 60°, 90°, 135° dan 150°

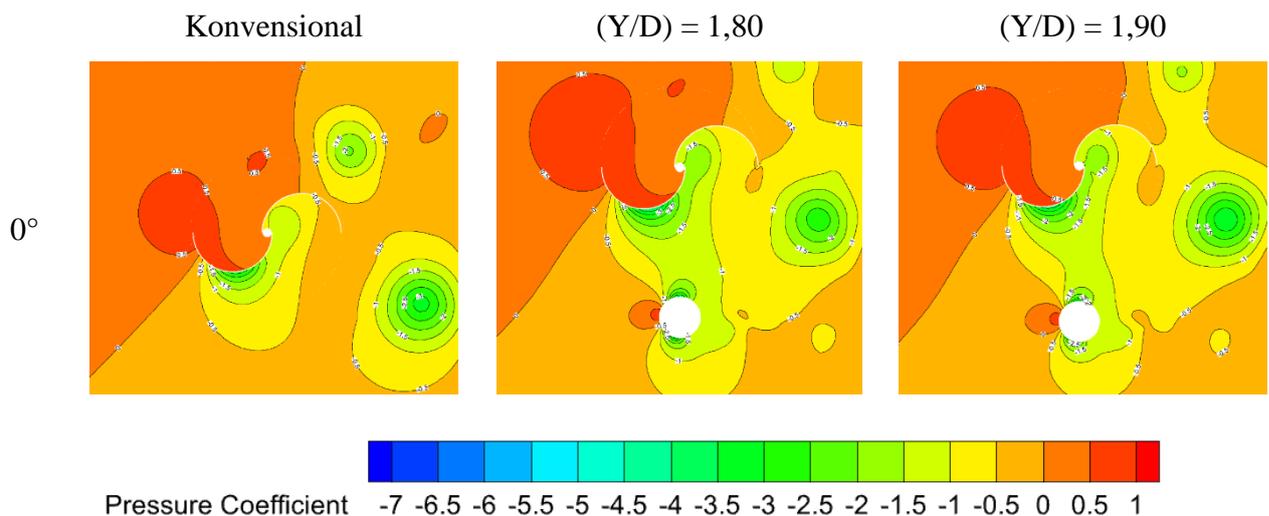
Pada gambar 4.14 dan 4.15 menunjukkan perbandingan kontur kecepatan antara turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Pada turbin angin Savonius konvensional pada posisi azimuth angle = 0°, 15°, 30°, 135°, 150° pada gambar

terlihat terbentuk sebuah pusaran aliran atau *vortex* di bagian sisi cembung sudu *advancing*, sisi cembung sudu *returning*, bagian *atas* dan bawah *wake*. Pada posisi *azimuth angle* = 60° 90° pusaran aliran atau *vortex* di bagian sisi cembung sudu *returning* tidak terbentuk.

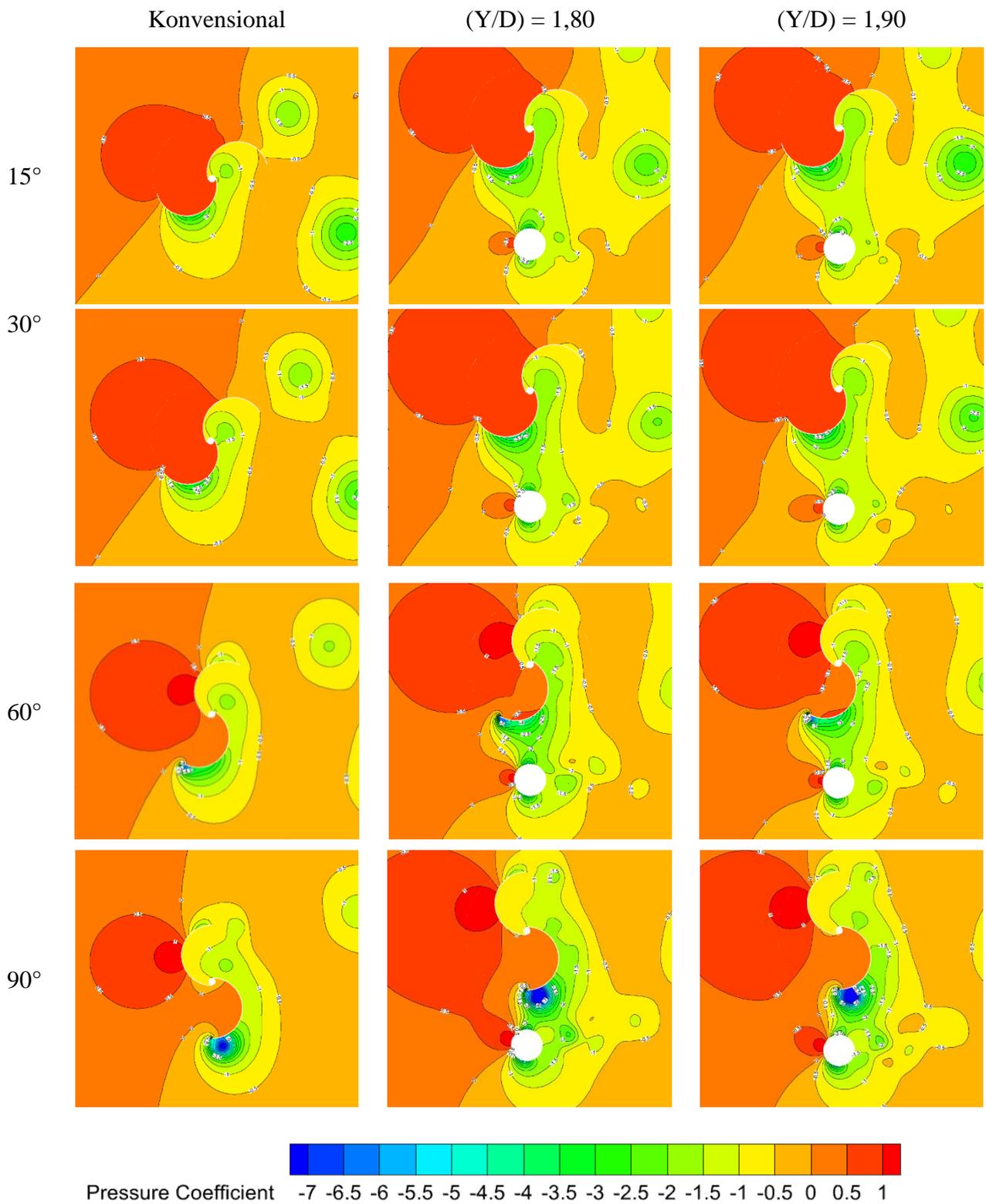
Untuk turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) dengan jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan YD = 1,90; S/D = 1,90, pengaruh penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* menyebabkan fenomena penyempitan aliran seperti efek *nozzle* yang terlihat pada posisi *azimuth angle* = 30° , 60° dan 90° . Efek *nozzle* ini kemudian menyebabkan kecepatan aliran udara di daerah *attached flow* meningkat. Hal ini dapat membuat kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan kecepatan yang meningkat akan membuat tekanan menjadi turun dan hal ini mengakibatkan torsi positif meningkat dan daya yang dihasilkan akan meningkat juga. Selain itu, ketika posisi *azimuth angle* = 135° dan 150° , daerah laluan antara turbin dengan *circular cylinder* semakin besar sehingga kecepatan aliran udara di daerah tersebut tidak mengalami kenaikan secara signifikan. Sedangkan pengaruh penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* mengakibatkan *wake* dibelakang sisi cekung *returning* mengecil dan menyebabkan aliran dari atas sudu *returning* mengalami *attached* ke sisi cembung sudu *advancing*. Hal ini juga menjelaskan bahwa penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* menyebabkan kecepatan pada sisi cekung sudu *returning* dan sisi cembung *advancing* menurun sehingga dengan adanya penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* akan membuat perbedaan gaya *drag* pada sudu *advancing* menurun dan selisih antara sudu *advancing* dan sudu *returning* berkurang yang membuat daya turbin akan berkurang.

4.2.6 Kontur Koefisien Tekanan

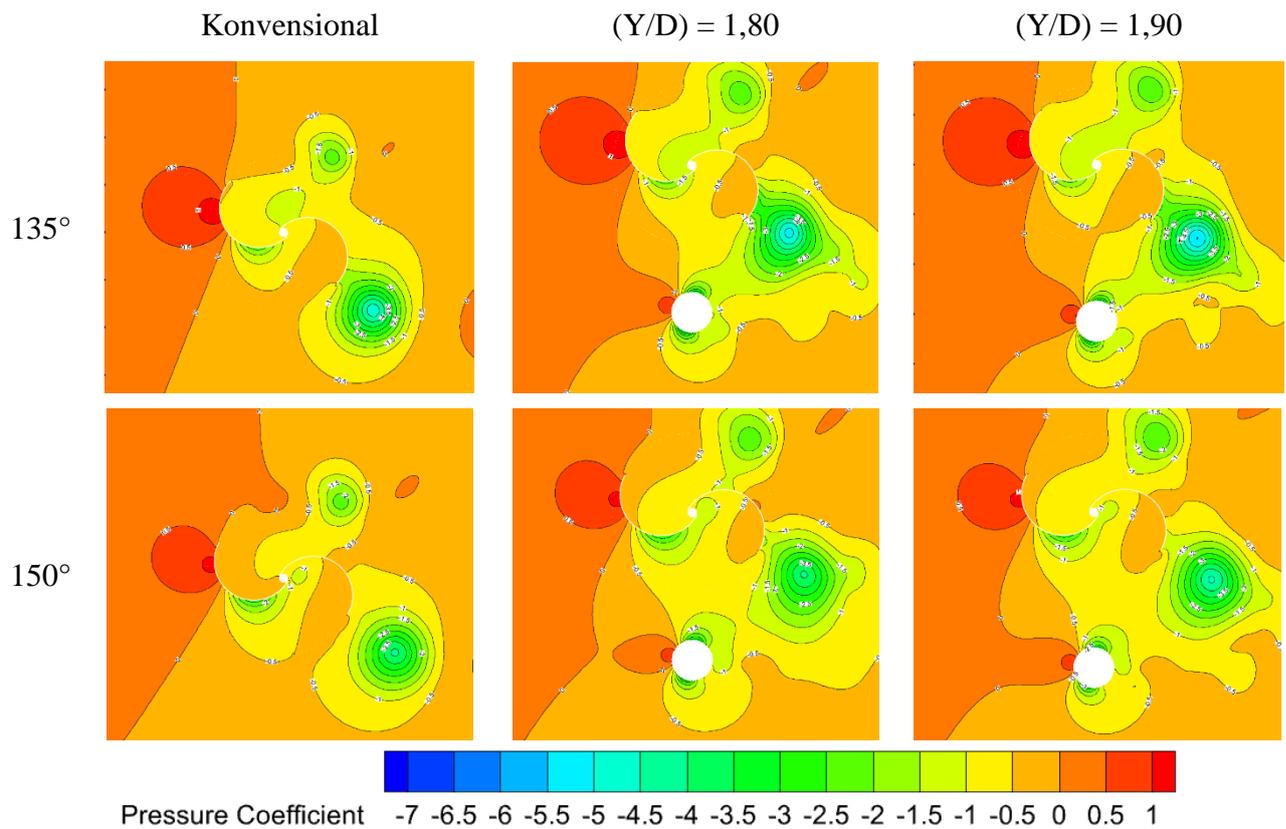
Pada sub bab ini akan dibahas mengenai perbandingan kontur tekanan dari semua variasi yang dilakukan yaitu variasi (Y/D) = 1,80 dan (Y/D) = 1,90 serta variasi (Y/D) = 1,80; (S/D) = 1,80 dan (Y/D) = 1,90; (S/D) = 1,90. Data yang digunakan untuk kontur koefisien tekanan diambil pada *Tip Speed Ratio* (TSR) optimum.



Gambar 4.16 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) pada *azimuth angle* = 0°



Gambar 4.17 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) pada *azimuth angle* = 15°, 30°, 60° dan 90°

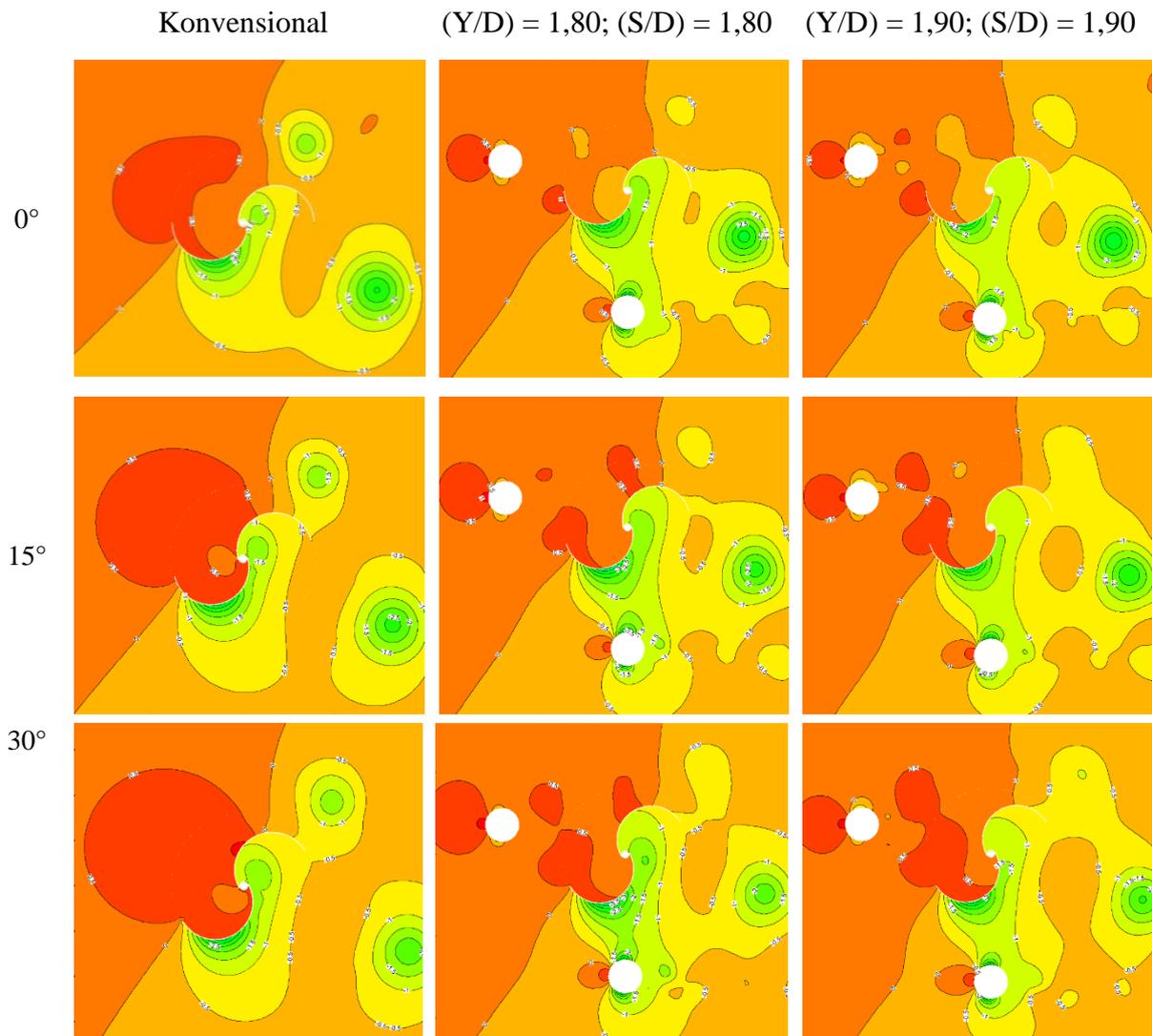


Gambar 4.18 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) pada *azimuth angle* = 135° dan 150°

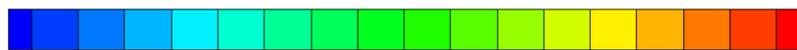
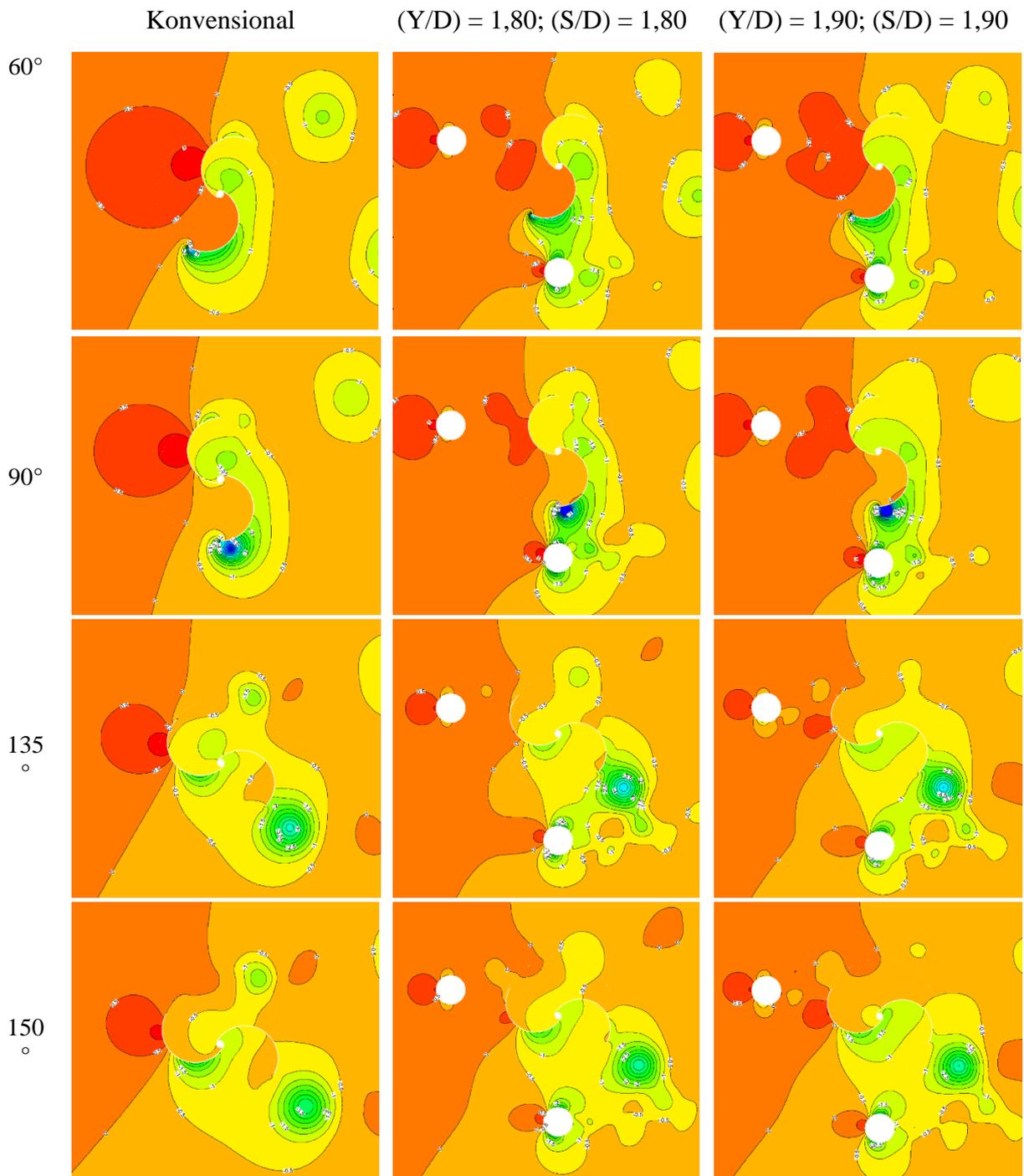
Gambar 4.16, 4.17 dan 4.18 menunjukkan perbandingan kontur koefisien tekanan antara turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D). Pada turbin angin Savonius konvensional terlihat pada gambar posisi *azimuth angle* = 0° terlihat nilai kontur koefisien tekanan memiliki nilai koefisien tekanan maksimal pada sisi cekung sudu *advancing* dengan nilai 0,5 dan ditandai dengan warna merah dan nilai koefisien tekanan minimum pada sisi cembung sudu *advancing* sebesar -1,5 dengan warna hijau. Pada posisi *azimuth angle* = 15° dan 30° terlihat nilai koefisien tekanan maksimal memiliki area yang lebih luas jika dibandingkan dengan posisi *azimuth angle* = 0° dan nilai minimum koefisien tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* berubah dari -1,5 menjadi -2 untuk posisi 15° dan -2,5 untuk posisi *azimuth angle* = 30°. Sedangkan pada posisi *azimuth angle* = 60° dan 90° nilai koefisien tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* semakin mengalami penurunan nilai ditandai dengan area berwarna biru dimana nilai koefisien terendah untuk posisi 60° adalah -4,5 dan posisi 90° sebesar -5. Posisi *azimuth angle* = 135° dan 150° terjadi penurunan nilai koefisien tekanan di sisi cekung sudu *advancing* dengan nilai -0,5. Pemasangan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* terlihat bahwa pada posisi *azimuth angle* = 0°, efek *circular cylinder* sudah terlihat dimana area nilai koefisien tekanan minimum pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami area yang melebar dengan nilai minimum terbesar adalah -3. Untuk posisi *azimuth angle* = 15° dan 30°, nilai koefisien tekanan maksimal pada sisi cekung sudu *advancing* memiliki nilai yang lebih luas apabila dibandingkan dengan turbin angin Savonius konvensional. Posisi *azimuth angle* = 60° dan 90° memperlihatkan bahwa nilai koefisien minimum pada sisi cembung sudu *advancing* lebih terlihat jelas dikarenakan penurunan yang lebih signifikan jika diberikan *circular cylinder*. Sedangkan untuk posisi *azimuth angle* = 135° dan 150° area pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami

kenaikan nilai dan area tekanan dengan nilai $-0,5$ memiliki area yang lebih luas dibandingkan dengan turbin angin Savonius konvensional. Hal ini membuat selisih nilai koefisien tekanan antara sisi cekung dan sisi cembung sudu *returning* berkurang sehingga menyebabkan torsi positif menurun sehingga nilai C_m menjadi negatif.

Dapat diambil kesimpulan bahwa nilai C_m maksimum variasi Y/D terjadi pada posisi *azimuth angle* = 30° dikarenakan pada posisi ini terjadi penyempitan daerah antara sudu *advancing* sehingga terjadi efek *nozzle* yang menyebabkan kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Hal ini menyebabkan daerah *attach flow* semakin besar sehingga kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan kecepatan yang meningkat maka tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* akan menurun ditandai dengan nilai $-3,5$ sampai -4 (label berwarna hijau). Selain itu, jika dibandingkan dengan sudut lainnya seperti posisi *azimuth angle* = 60° dan 90° , posisi 30° memiliki area tekanan dengan nilai tinggi pada sisi cekung sudu *advancing* yang lebih luas. Dengan hal ini posisi 30° memiliki selisih antara sisi cekung dan sisi cembung sudu *advancing* yang lebih besar dan menyebabkan gaya *drag* semakin meningkat dan torsi positif juga meningkat. Sehingga daya turbin angin Savonius akan semakin besar.



Gambar 4.19 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) pada *azimuth angle* = 0° , 15° dan 30°



Pressure Coefficient -7 -6.5 -6 -5.5 -5 -4.5 -4 -3.5 -3 -2.5 -2 -1.5 -1 -0.5 0 0.5 1

Gambar 4.20 Kontur tekanan pada turbin angin Savonius variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) pada azimuth angle = 60°, 90°, 135° dan 150°

Pada gambar 4.19 dan 4.20 menunjukkan perbandingan kontur koefisien tekanan antara turbin angin Savonius konvensional dan turbin angin Savonius dengan penambahan *circular*

cylinder di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Pada posisi *azimuth angle* = 0°, terlihat bahwa nilai kontur koefisien tekanan tertinggi di sisi cekung sudu *advancing* serta sisi cembung sudu *returning* pada turbin angin Savonius konvensional adalah 0,5 dan variasi (Y/D); (S/D) sebesar 0. Untuk posisi *azimuth angle* = 15°, 30° terlihat area koefisien tekanan tinggi di sisi cekung sudu *advancing* serta sisi cembung sudu *returning* sama-sama mengalami pembesaran area untuk semua variasi namun lebar area koefisien tekanan tinggi pada turbin konvensional memiliki area yang lebih besar jika dibandingkan dengan variasi penambahan *circular cylinder* yaitu dengan area bernilai koefisien tekanan sebesar 0,5 berbanding koefisien tekanan sebesar 0. Sedangkan pada sisi cembung sudu *advancing* dan sisi cekung sudu *returning* mengalami penurunan nilai tekanan dan area dengan nilai koefisien tekanan sebesar -0,5 semakin luas yang diakibatkan oleh penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning*.

Pada posisi sudut *azimuth angle* = 60° dan 90° tekanan pada sisi cembung sudu *returning* mengalami penurunan dilihat dengan label merah dengan nilai 1 yang mulai sedikit. Pada sudut ini juga sudah terlihat penurunan tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* dimana penurunan tekanan paling terendah terlihat di sudut *azimuth angle* = 90° yaitu dengan nilai -7. Namun pada sudut *azimuth angle* = 90° nilai koefisien tekanan pada sisi cekung sudu *advancing* mengalami penurunan dari 0 ke 0,5. Sedangkan pada sisi cekung sudu *returning* area berkoefisien tekanan dengan nilai -1 mengalami pelebaran area pada variasi Y/D; S/D dan pada sisi cembung sudu *returning* mengalami penurunan tekanan jika dibandingkan dengan turbin konvensional. Untuk posisi sudut *azimuth angle* = 135° dan 150° terlihat bahwa pada sisi cembung sudu *returning* nilai koefisien tekanan mengalami penurunan dari 1 ke 0. Sedangkan area yang menyelimuti sisi cekung sudu *returning* dengan nilai koefisien tekanan sebesar -1 pada turbin konvensional mengalami peningkatan tekanan untuk variasi Y/D; S/D menjadi sebesar 0,5. Selain itu, dapat terlihat pada gambar bahwa pada sudut *azimuth angle* = 135° dan 150° area koefisien tekanan rendah pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami perluasan area. Pada sudut ini, efek dari *circular cylinder* sudah tidak optimal sehingga menyebabkan nilai C_m semakin turun.

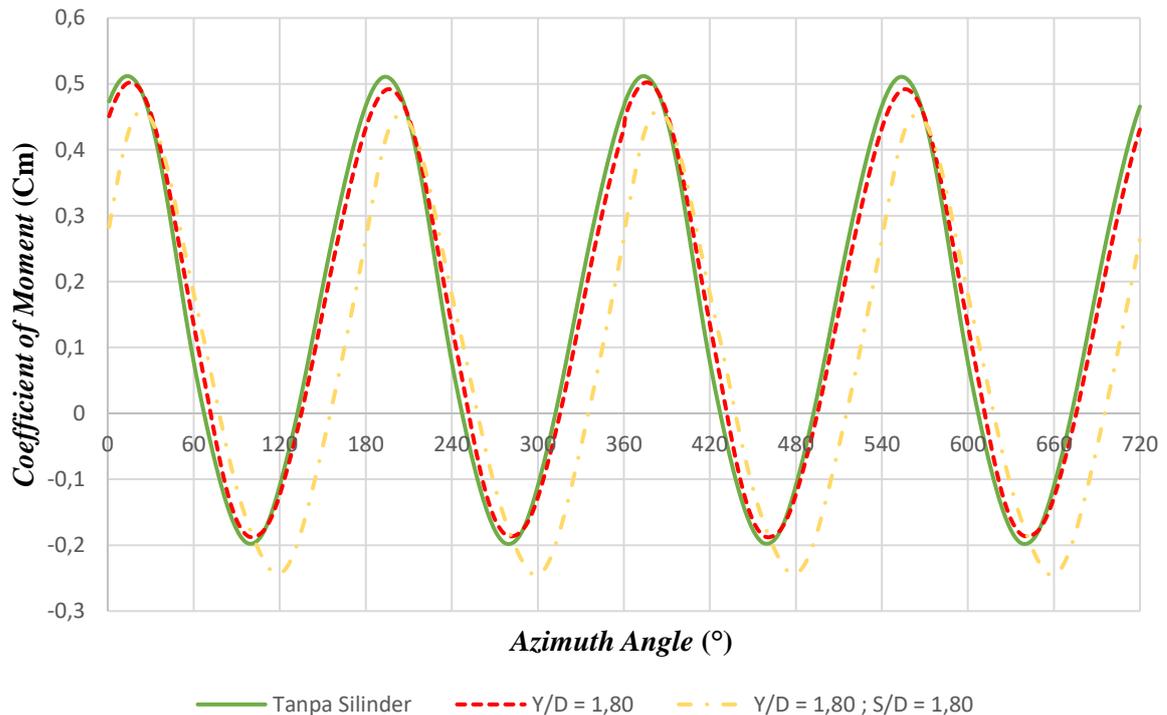
Dapat disimpulkan bahwa dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* akan menyebabkan efek *nozzle* yang meningkatkan kecepatan atau menurunkan tekanan pada sisi cembung sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan daerah *attach flow* semakin besar sehingga kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan meningkatnya kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* atau menurunnya tekanan pada sisi cembung sudu *advancing* akan menyebabkan selisih gaya *drag* dari sudu *advancing* meningkat. Selisih ini akan membuat torsi positif yang dihasilkan semakin besar dan daya turbin meningkat. Namun dengan penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* menyebabkan tekanan pada sisi cekung sudu *returning* menurun serta daerah koefisien tekanan tinggi dengan nilai 0,5 pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami kenaikan tekanan. Ini dapat dikatakan bahwa dengan adanya penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* akan membuat perbedaan gaya *drag* pada sudu *advancing* dan sudu *returning* berkurang daya turbin yang dihasilkan menjadi turun.

Jika membandingkan perbedaan kontur koefisien tekanan antara turbin angin Savonius konvensional dengan turbin angin Savonius variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 dan variasi Y/D = 1,90; S/D = 1,90 maka dapat dilihat bahwa variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 lebih baik dikarenakan memiliki jarak yang lebih dekat dibandingkan dengan variasi Y/D = 1,90; S/D = 1,90. Hal ini disebabkan karena dengan variasi jarak Y/D = 1,80; S/D = 1,80 lebih mampu melakukan pemanfaatan aliran yang lewat sehingga hasilnya bisa sedikit lebih optimal.

4.3 Diskusi

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai apa yang menyebabkan fenomena penurunan performa secara drastis turbin angin Savonius dengan variasi penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D). Penurunan performa ini juga terjadi pada TSR tinggi yaitu 1.0 dan 1.2, namun yang akan diambil dalam penjelasan pengaruh yang terjadi akan digunakan TSR 1.0.

4.3.1 Analisa *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *Azimuth Angle* (°)



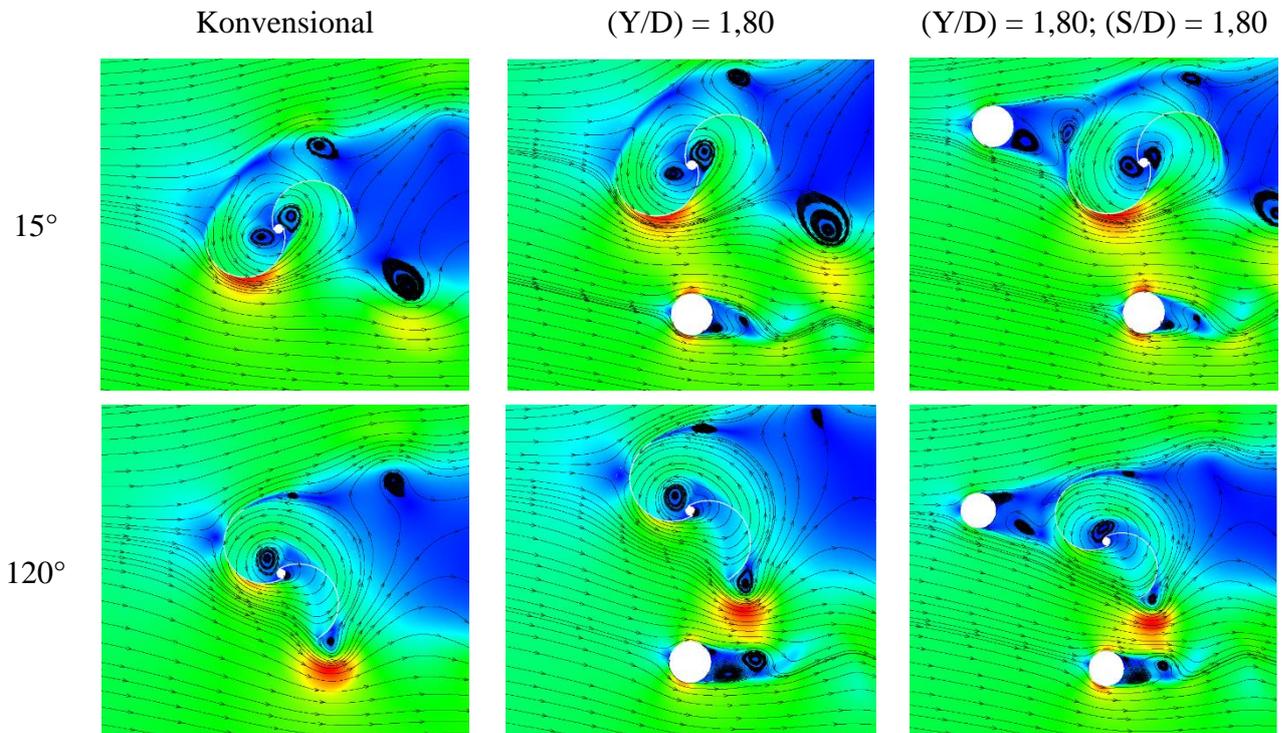
Gambar 4.21 Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (Cm) berdasarkan fungsi *azimuth angle* (°) pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0

Pada gambar 4.21 menunjukkan perbandingan nilai *coefficient of moment* (Cm) berdasarkan fungsi *azimuth angle* (°) pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D = 1,80 serta Y/D = 1,80; S/D = 1,80 di TSR 1.0. Nilai Cm maksimum untuk turbin konvensional didapatkan pada *azimuth angle* = 15° dengan nilai sebesar 0,51 dan nilai Cm minimum sebesar -0,19 di posisi *azimuth angle* = 105°. Sedangkan untuk turbin dengan variasi Y/D = 1,80 didapatkan nilai Cm maksimum dan Cm minimum dengan nilai sebesar 0,5 serta -0,18 di posisi *azimuth angle* = 15° dan 105° berturut-turut. Untuk turbin dengan variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 nilai Cm maksimum untuk turbin konvensional didapatkan pada posisi *azimuth angle* = 30° dengan nilai sebesar 0,44 dan nilai Cm minimum sebesar -0,24 di posisi *azimuth angle* = 120°. Jika dilihat pada variasi Y/D = 1,80; S/D = 1,80 terjadi pergeseran posisi *azimuth angle* ke 30°, hal ini juga menyebabkan nilai dari Cm maksimum mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena ketika pemasangan *circular cylinder* di depan sudu *returning* pada posisi *azimuth angle* = 30°, akan membuat aliran terdefleksikan menuju sisi cekung sudu *advancing* dan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* juga berpengaruh terhadap peningkatan kecepatan di sisi cembung sudu *advancing* sehingga aliran yang masuk lebih dapat dimanfaatkan secara maksimal. Namun, nilai Cm yang didapatkan oleh variasi Y/D = 1,80; S/D

= 1,80 mengalami penurunan yang sangat jauh dikarenakan ketika turbin berputar di TSR 1.0 maka aliran angin yang terdefleksikan dari *circular cylinder* tidak bisa dimanfaatkan dengan baik.

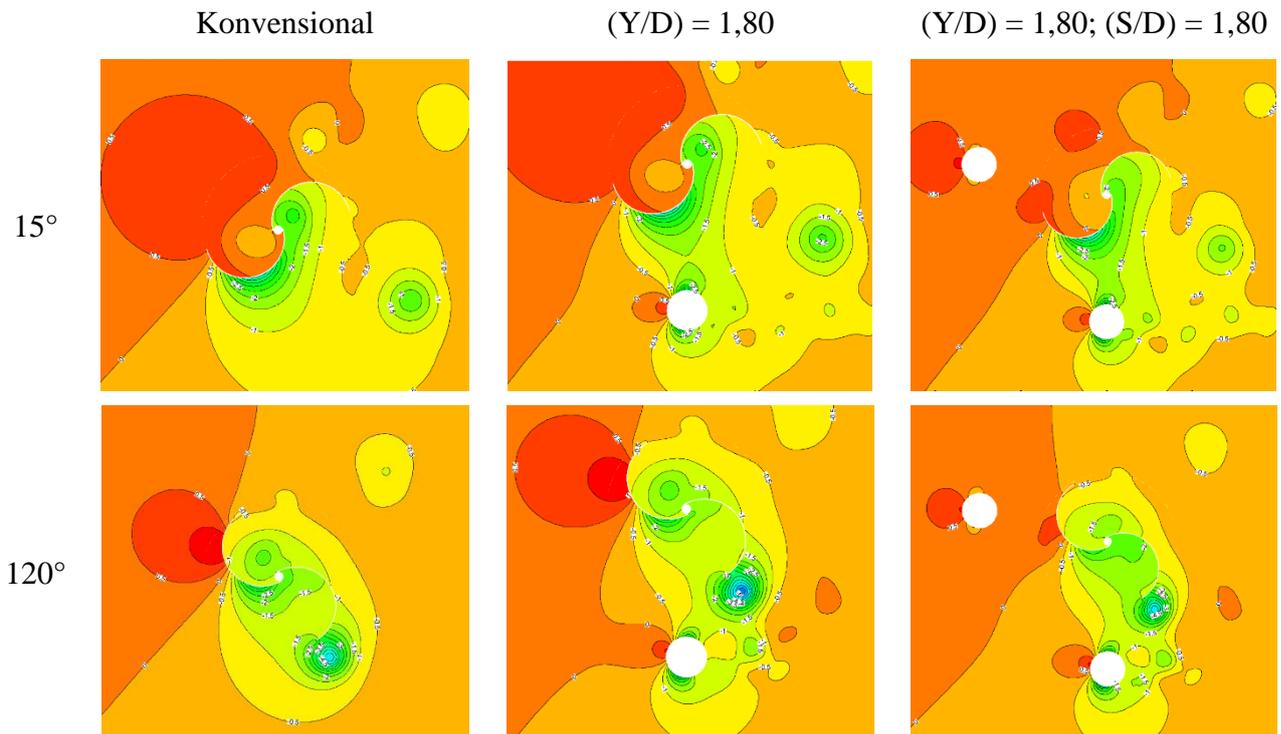
4.3.2 Analisa Kontur Kecepatan dan Koefisien Tekanan

Pada sub bab ini akan dijelaskan kontur kecepatan dan kontur tekanan yang terjadi pada TSR 1.0



Gambar 4.22 Kontur kecepatan pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi $Y/D = 1,80$ serta $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$ di TSR 1.0 pada *azimuth angle* = 15° dan 120°

Pada gambar 4.22 terlihat pada posisi *azimuth angle* = 15° terjadi penurunan peforma pada kedua variasi. Pada posisi *azimuth angle* = 15° , variasi Y/D dan Y/D ; S/D tidak mengalami aliran yang *attach* sebanyak turbin konvensional sehingga daerah aliran *attached flow* yang berkecepatan tinggi mengecil. Hal ini dikarenakan ketika turbin berputar pada TSR 1.0 atau dengan kecepatan yang sangat tinggi akan mempengaruhi efek penyempitan daerah akibat penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* tidak maksimal dan akan menyebabkan nilai C_m menurun secara drastis. Sedangkan pada posisi *azimuth angle* = 120° , menyebabkan posisi antara sudu turbin dengan *circular cylinder* menjadi lebih dekat dan pemasangan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* menyebabkan terdapat *attach flow* yang meningkat kecepatannya di sisi cembung sudu *advancing* dikarenakan adanya vortex dari aliran silinder yang menahan agar aliran *reattached* mengenai turbin sehingga kecepatan di belakang sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Namun dikarenakan turbin berputar pada TSR 1.0, maka pemanfaatan aliran akibat penyempitan daerah tidak bisa dimanfaatkan dengan baik. Selain itu penambahan pemasangan *circular cylinder* di depan sudu *returning* mengakibatkan *wake* dibelakang sisi cekung *returning* mengecil sehingga kecepatan meningkat. Selain itu, efek *circular cylinder* di depan sudu *returning* juga membuat kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* turun dikarenakan aliran dari atas sudu *returning* mengalami *attached* di sisi cembung sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan perbedaan torsi positif antara sudu *advancing* dan sudu *returning* berkurang sehingga daya turbin menjadi turun.

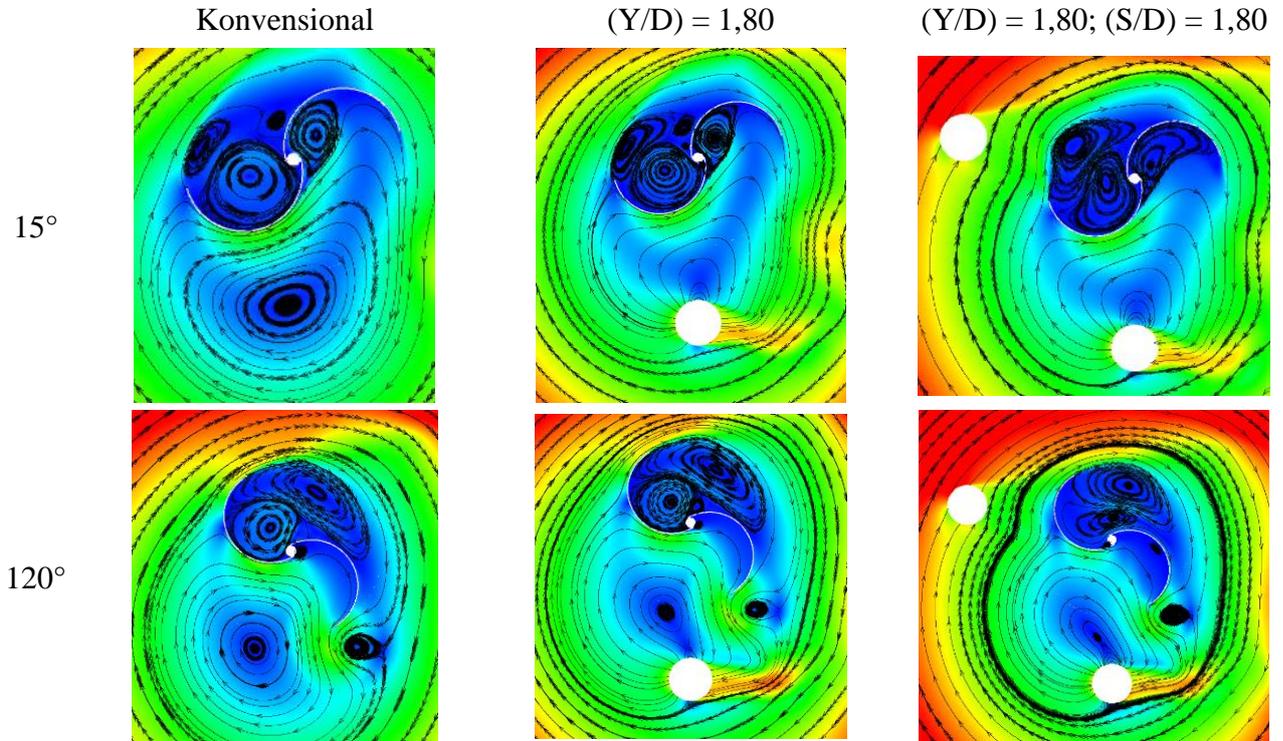


Gambar 4.23 Kontur koefisien tekanan pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi $Y/D = 1,80$ serta $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ di TSR 1.0 pada $azimuth\ angle = 15^\circ$ dan 120°

Pada gambar 4.23 terlihat bahwa pada posisi $azimuth\ angle = 15^\circ$ turbin angin Savonius dengan variasi $Y/D = 1,80$ daerah koefisien tekanan rendah dengan nilai $-2,5$ mengalami perluasan area pada sisi cembung sudu *advancing* serta terdapat sedikit warna biru pada daerah sisi cembung sudu *advancing*. Selain itu, pada variasi $Y/D = 1,80$ daerah koefisien tekanan dengan nilai $0,5$ mengalami perluasan jika dibandingkan dengan turbin konvensional. Sedangkan untuk variasi $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ terlihat bahwa area koefisien tekanan rendah pada sisi cembung sudu *advancing* mengalami perluasan akibat penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing*. Namun ketika diberi *circular cylinder* di depan sudu *returning* area bertekanan tinggi dengan nilai $0,5$ pada sisi cekung sudu *advancing* mengalami penyempitan area yang menandakan bahwa tekanan sisi cekung sudu *advancing* mengalami penurunan. Hal ini membuktikan bahwa ketika penambahan *circular cylinder* di depan sudu *returning* akan membuat selisih tekanan pada sudu *advancing* dan sudu *returning* semakin kecil sehingga daya yang dihasilkan tidak optimal.

Untuk posisi $azimuth\ angle = 120^\circ$ variasi $Y/D = 1,80$ memiliki daerah dengan koefisien tekanan terendah pada sisi cembung sudu *advancing* jika dibandingkan dengan 2 konfigurasi lainnya yang terlihat pada label biru dengan nilai -6 . Sedangkan pada variasi $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ nilai koefisien tekanan terendah pada sisi cembung mengalami kenaikan nilai jika dibandingkan dengan variasi $Y/D = 1,80$ yaitu $-4,5$. Selain itu wilayah koefisien tekanan $-1,5$ yang menyelimuti sisi cekung sudu *advancing* dan sisi cembung sudu *returning* mengalami perluasan daerah. Pada daerah sisi cekung sudu *returning* mengalami penurunan nilai tekanan yang terlihat dari kurangnya area dengan label berwarna merah atau dengan nilai $0,5$ dan 1 . Ini menandakan bahwa sudu *returning* menyebabkan selisih gaya *drag* sudu *advancing* semakin kecil dan membuat perbedaan nilai gaya *drag* sudu *advancing* dan sudu *returning* semakin sedikit sehingga daya turbin yang dihasilkan menurun. Selain itu, ketika turbin berputar di TSR

1.0 atau dengan kecepatan yang tinggi menyebabkan pengaruh dari penambahan *circular cylinder* tidak berfungsi dengan optimal dikarenakan pemanfaatan aliran udara yang melewati turbin tidak dapat dimanfaatkan dengan baik.



Gambar 4.24 Kontur kecepatan relatif pada turbin angin konvensional dan turbin dengan variasi $Y/D = 1,80$ serta $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ di TSR 1.0

Pada gambar 4.24 terlihat bahwa pada posisi *azimuth angle* = 15° menunjukkan aliran udara yang terjadi di turbin konvensional dan turbin dengan variasi Y/D mengalami *attached* ke sisi cekung sudu *advancing*. Selain itu, pada kedua konfigurasi ini memiliki daerah *wake* pada sisi cekung sudu *advancing* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan konfigurasi $Y/D; S/D$ sehingga ini akan menyebabkan variasi $Y/D; S/D$ memiliki nilai tekanan yang lebih kecil pada sisi cekung sudu *advancing* dan menyebabkan torsi positif dari sudu *advancing* semakin berkurang.

Sedangkan ketika posisi *azimuth angle* = 120° pada variasi Y/D terlihat bahwa titik *attached* ke radius sudu *advancing* memiliki jarak yang lebih jauh sehingga aliran yang terjadi di sisi cembung sudu *advancing* masuk ke dalam *wake region* dan menyebabkan torsi positif semakin besar. Dengan membesarnya torsi positif maka daya turbin yang dihasilkan akan meningkat. Namun, pada variasi $Y/D; S/D$ terlihat bahwa penambahan *circular cylinder* di di depan sudu *returning* menyebabkan aliran yang melewati sudu *returning* mengalami *attached* ke sisi cembung sudu *advancing*. Ini menyebabkan torsi positif pada sudu *advancing* semakin berkurang dan daya turbin yang dihasilkan semakin kecil. Selain itu, pada variasi $Y/D; S/D$ memiliki titik *attached* ke radius *advancing* yang lebih dekat menyebabkan area tekanan tinggi pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat dan selisih torsi positif akan berkurang.

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian studi numerik turbin angin Savonius dengan variasi $Y/D = 1,80; 1,90$, $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90; S/D = 1,90$ didapatkan hasil kesimpulan bahwa :

1. Konfigurasi turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) mampu memberikan peningkatan performa jika dibandingkan dengan turbin konvensional. Dimana untuk variasi $Y/D = 1,80$ terjadi kenaikan nilai sebesar 0,182 atau sekitar 1,18% dan variasi $Y/D = 1,90$ sebesar 0,176 atau sekitar 1,15% pada TSR 0.6. Untuk konfigurasi turbin angin Savonius dengan penambahan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) dan di depan sudu *returning* (S/D) tidak mengalami peningkatan performa melainkan terjadi penurunan jika dibandingkan dengan turbin angin Savonius konvensional.
2. Nilai tertinggi *Coefficient of Moment* (C_m) pada variasi $Y/D = 1,80$ dan $1,90$ terjadi pada TSR 0.5. Sedangkan variasi $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90; S/D = 1,90$ terjadi di TSR 0.4 Dan untuk nilai tertinggi *Coefficient of Power* (CP) pada variasi $Y/D = 1,80$ dan $1,90$ terjadi pada TSR 0.6. Di lain hal variasi $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90; S/D = 1,90$ mengalami nilai tertinggi *Coefficient of Power* (CP) pada TSR 0.7
3. Pada distribusi tekanan (C_p) didapatkan bahwa pada variasi Y/D dan $Y/D; S/D$ sama-sama mendapatkan nilai C_m maksimum pada posisi *azimuth angle* = 30° dan nilai C_m minimum pada posisi *azimuth angle* = 135°
4. Berdasarkan kontur kecepatan dan kontur tekanan yang ada, dengan menambahkan *circular cylinder* di samping sudu *advancing* (Y/D) akan menyebabkan penyempitan daerah antara sudu turbin dengan *circular cylinder* yang membentuk efek *nozzle*. *Nozzle* sendiri akan menyebabkan peningkatan kecepatan di samping sudu *advancing*. Hal ini akan memperbesar pengaruh *attached flow* yang terbentuk di sisi cembung sudu *advancing* dan menyebabkan kecepatan pada sisi cembung sudu *advancing* meningkat. Dengan kecepatan yang meningkat maka tekanan akan turun, sehingga gaya *drag* pada sudu *advancing* meningkat dan akan menyebabkan torsi positif menjadi meningkat dan daya yang dihasilkan ikut meningkat. Sedangkan pengaruh menambahkan *circular cylinder* di depan sudu *returning* mengakibatkan *wake* dibelakang sisi cekung *returning* mengecil sehingga tekanan menurun dan menyebabkan aliran dari atas sudu *returning* mengalami *attached* ke sisi cembung sudu *advancing* sehingga melawan torsi positif pada sudu *advancing*. Hal ini menyebabkan gaya *drag* sudu *advancing* menurun dan selisih gaya *drag* pada sudu *advancing* dengan sudu *returning* berkurang sehingga daya yang dihasilkan oleh turbin menurun.

5.2 Saran

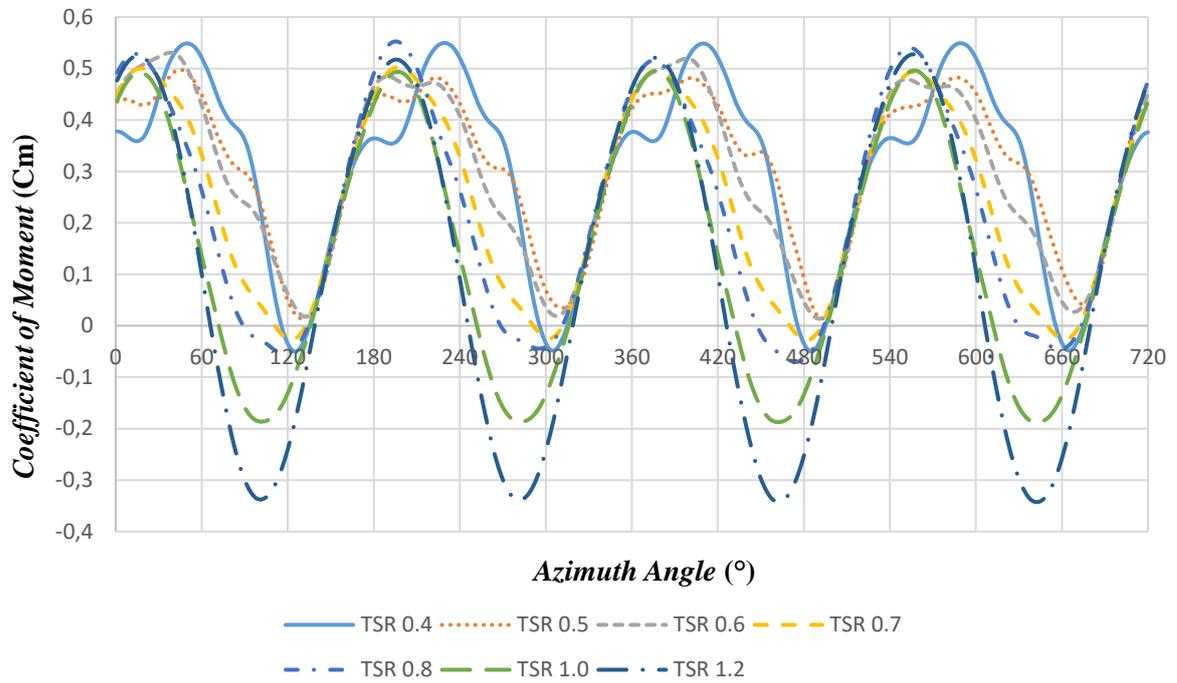
Adapun saran yang diberikan untuk perkembangan dari penelitian ini adalah variasi dengan jarak $Y/D = 1,80; S/D = 1,80$ dan $Y/D = 1,90; S/D = 1,90$ memberikan hasil yang tidak optimal sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui konfigurasi yang tepat dalam upaya peningkatan performa turbin angin Savonius.

DAFTAR PUSTAKA

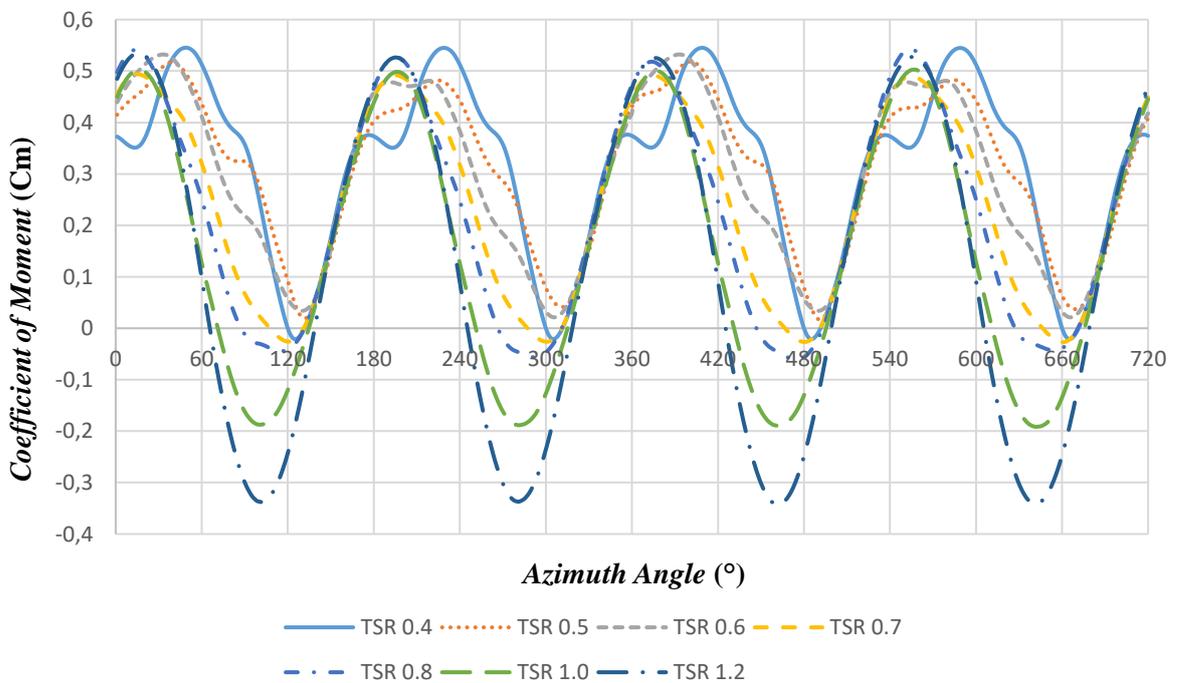
- Abdelaziz, K. R., Nawar, M. A. A., Ramadan, A., Attai, Y. A., & Mohamed, M. H. (2021). Performance improvement of a Savonius turbine by using auxiliary blades. *Energy*, *xxxx*, 122575. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122575>
- BPS Statistics Indonesia. (2018). *Proyeksi Penduduk Indonesia (Indonesia Population Projection) 2015-2045* (K. P. Direktorat Statistik Kependudukan dan Ketenagakerjaan, BPS dan Direktorat Perencanaan Kependudukan dan Perlindungan Sosial (ed.)). BPS RI.
- Deda Altan, B., Atilgan, M., & Ozdamar, A. (2008). *An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining*. *32*, 1673–1678. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.06.006>
- 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>
- Maghfira, R. (2016). *EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF DISTURBANCE CYLINDER POSITION IN FRONT OF RETURNING BLADE OF SAVONIUS WIND TURBINE TO THE TURBINE PERFORMANCE “Case study for ratio of the disturbance cylinder diameter relative to the diameter of turbine (d/D) = 0.5.”* Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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>
- Malyana Dewi, R. (2021). *Studi Eksperimen Peningkatan Kinerja Turbin Angin Savonius Dengan Penempatan Silinder Sirkular Sebagai Penganggu Di Depan Returning Blade Turbin*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Mathew, S., & Philip, G. S. (2012). Wind turbines. Evolution, basic principles, and classifications. In *Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 2, pp. 93–111). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00205-5>
- Munson, B. R., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W., Rothmayer, & P, A. (2013). Fundamentals of Fluid Mechanics Seventh Edition. In *Instrumentation, Measurements, and Experiments in Fluids*.
- Prasetyo, A., Notosudjono, D., & Soebagja, H. (2018). *Pembangkit Listrik Tenaga Angin Dalam Penyusunan Tugas Akhir Ini Maksud Dan Tujuannya Adalah : A. Mengkaji Sistem Penerapan Dan Pengembangan PLT Angin Di Indonesia Sebagai Negara Berkembang. B. Mengkaji Potensi Angin Dan Teknologi Pada PLT Angin Sistem*. 1–12.
- Sakti, G., Yuwono, T., & Widodo, W. A. (2019). Experimental and Numerical Investigation of I- 65⁰ Type Cylinder Effect on the Savonius Wind Turbine Performance. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:19 No:05*, *19*(05).
- Setiawan, P. A., Yuwono, T., & Widodo, W. A. (2019). Flow Analysis of a Circular Cylinder on the Savonius Hydrokinetic Turbine Performance Placed the Side of Advancing Blade. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, *19*(06), 41–48.
- Syarifah, L. (2022). *Studi Numerik Turbin Angin Savonius Tipe Bach Dengan Variasi Overlap Dan Panjang Plat Yang Bertumpuk*. Insitut Teknologi Sepuluh November.
- Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). Indonesia Energy Out Look 2019. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

- Tsutsui, T., & Igarashi, T. (2002). Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod. *Wind Engin*, 76(1), 83–101. <https://doi.org/10.1007/s10494-005-9008-0>
- 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>

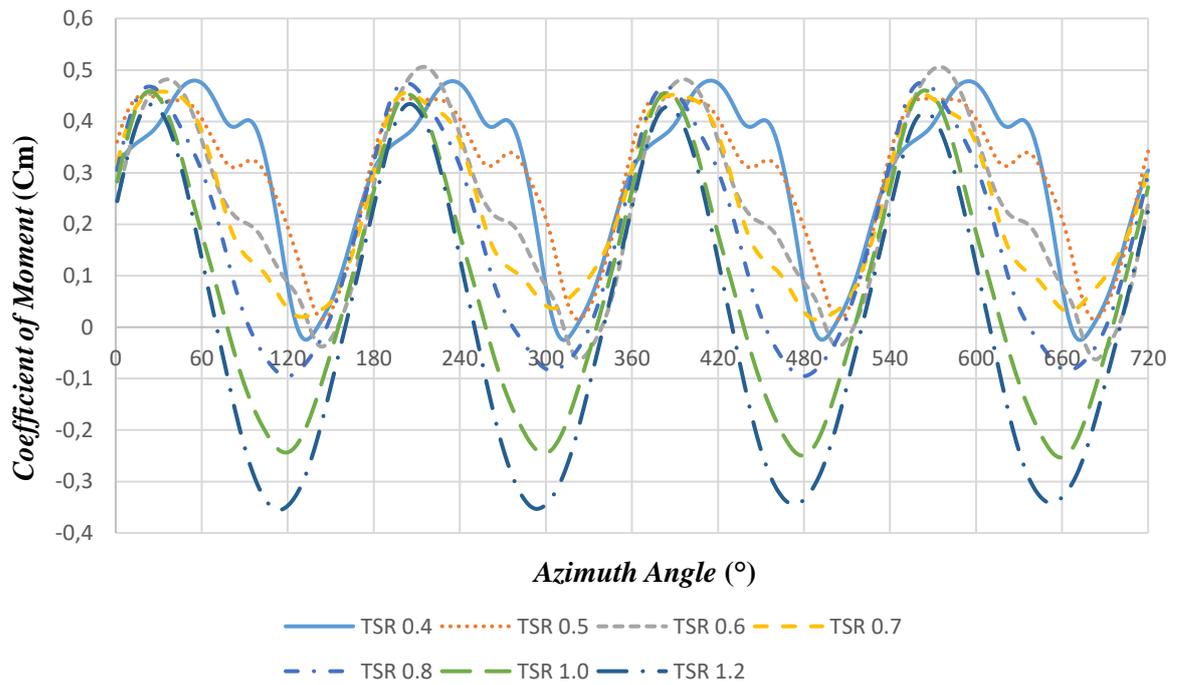
LAMPIRAN



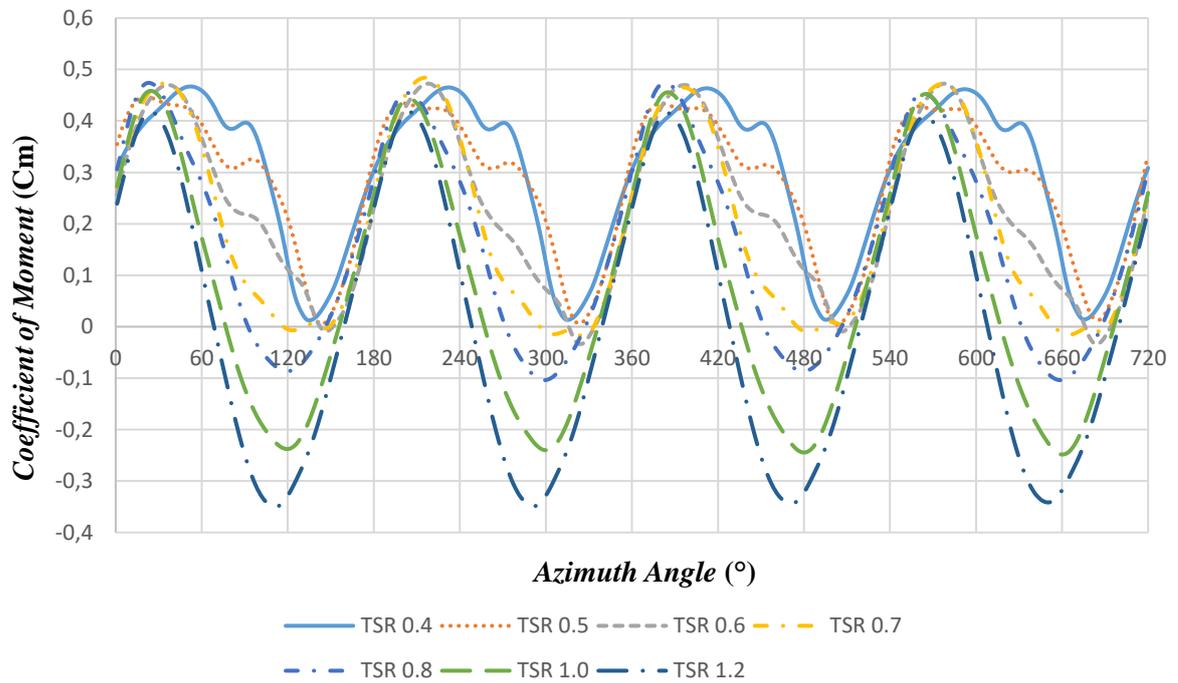
Gambar 1 Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* ($^\circ$) pada turbin dengan variasi $Y/D = 1,80$



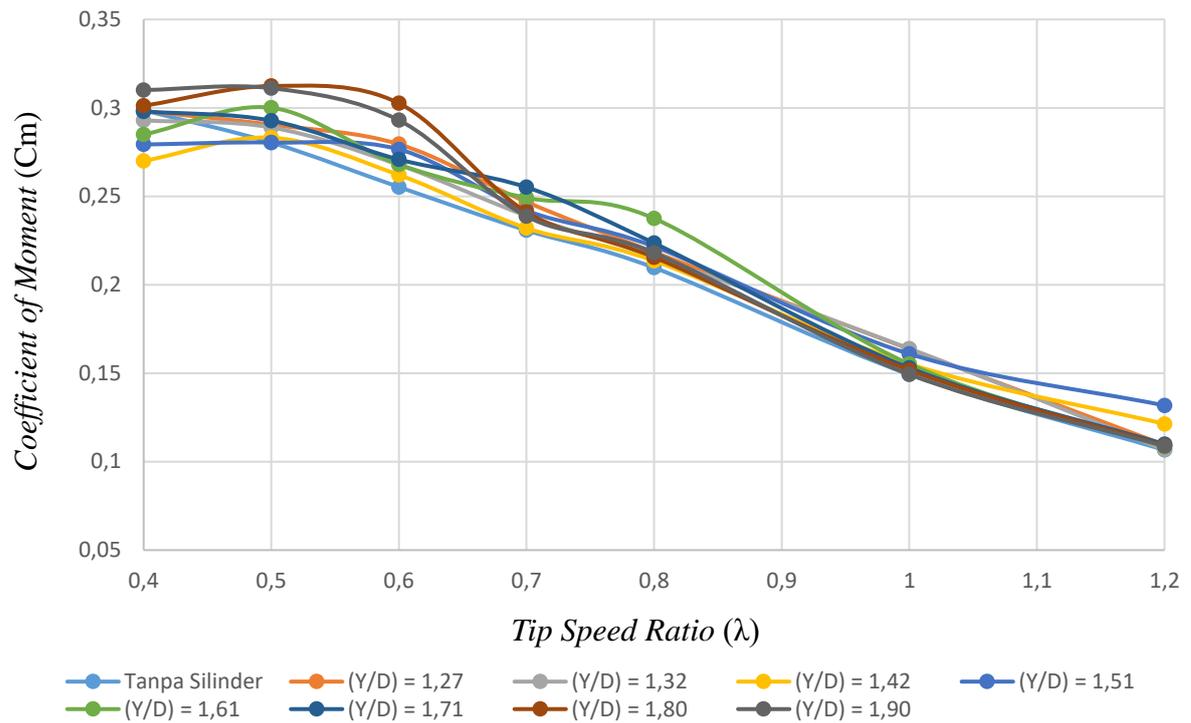
Gambar 2 Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* ($^\circ$) pada turbin dengan variasi $Y/D = 1,90$



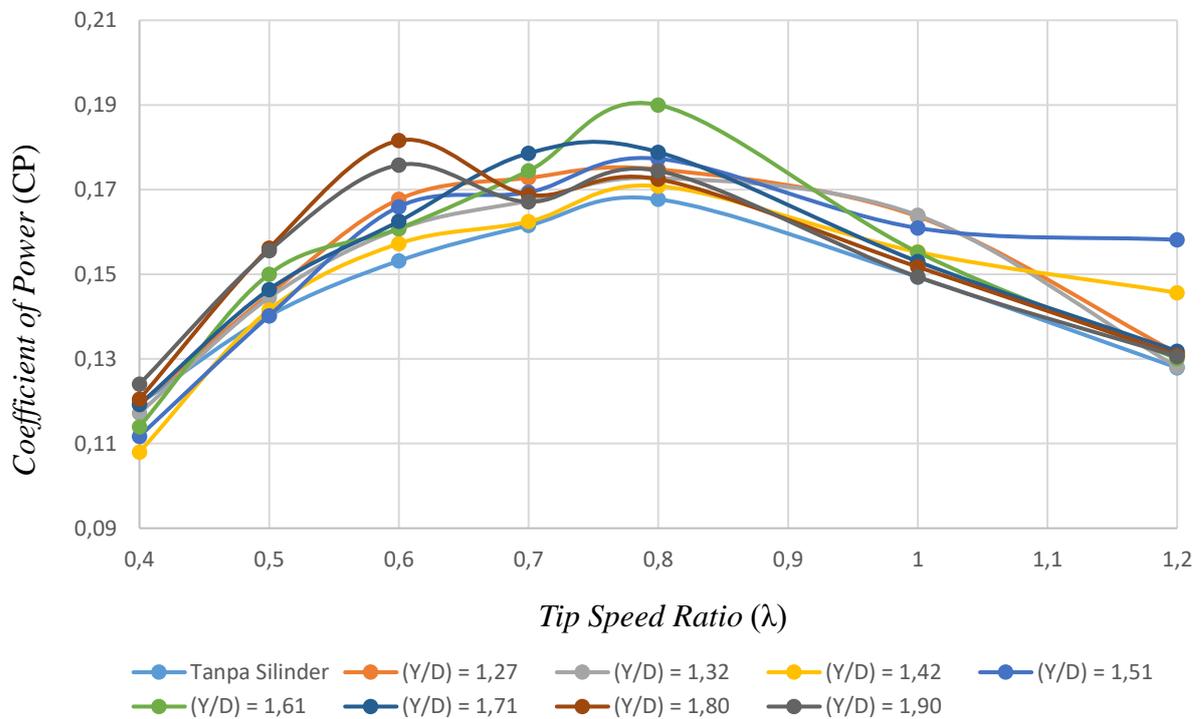
Gambar 3 Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* ($^\circ$) pada turbin dengan variasi $Y/D = 1,80$; $S/D = 1,80$



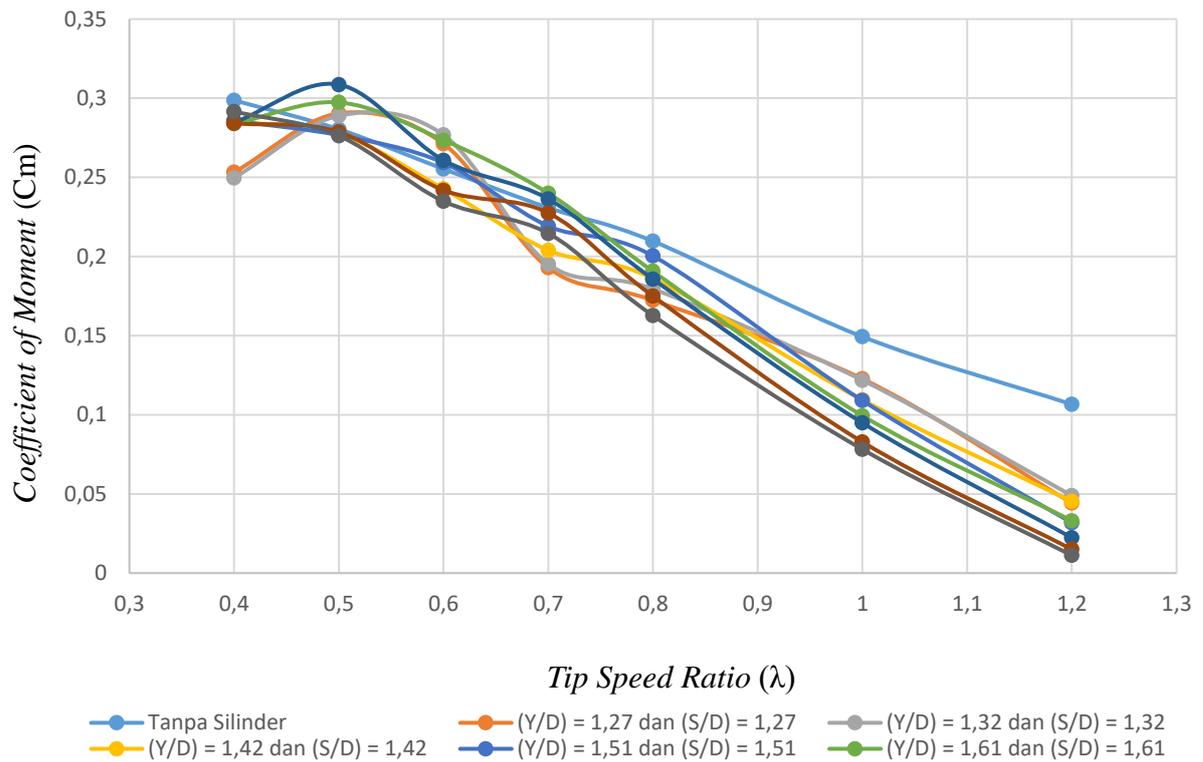
Gambar 4 Grafik perbandingan nilai *coefficient of moment* (C_m) berdasarkan fungsi *azimuth angle* ($^\circ$) pada turbin dengan variasi $Y/D = 1,90$; $S/D = 1,90$



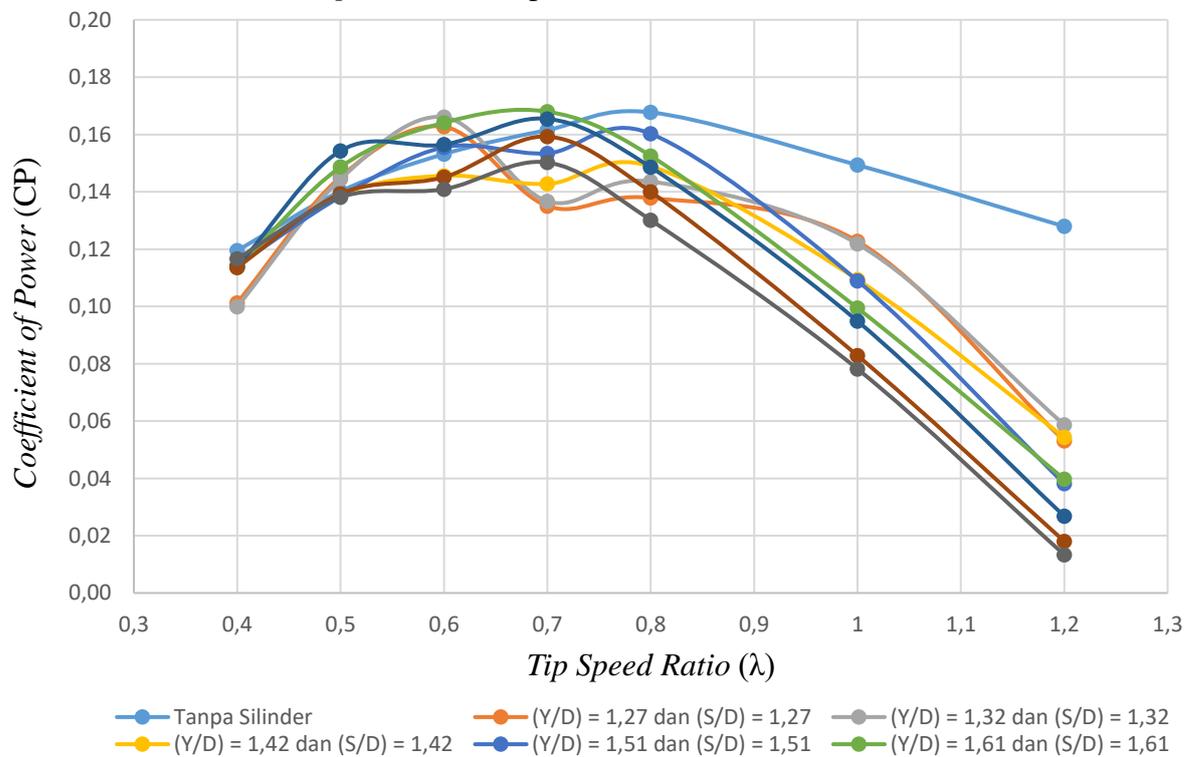
Gambar 5 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D



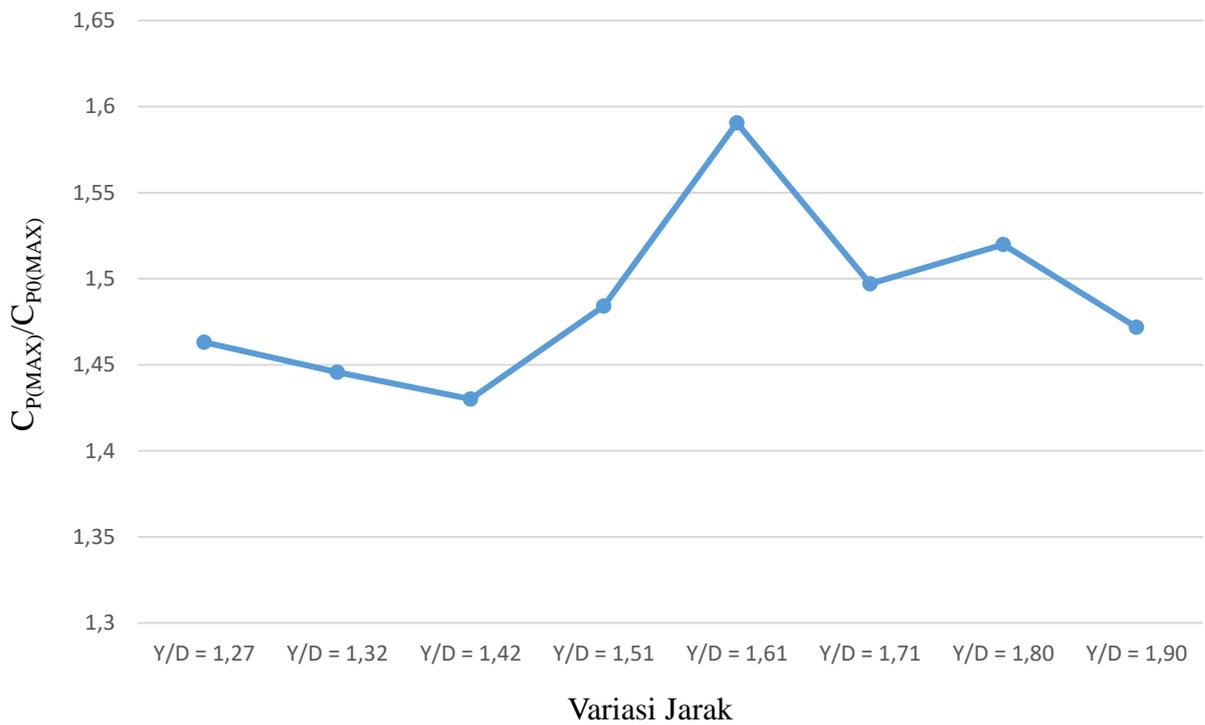
Gambar 6 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D



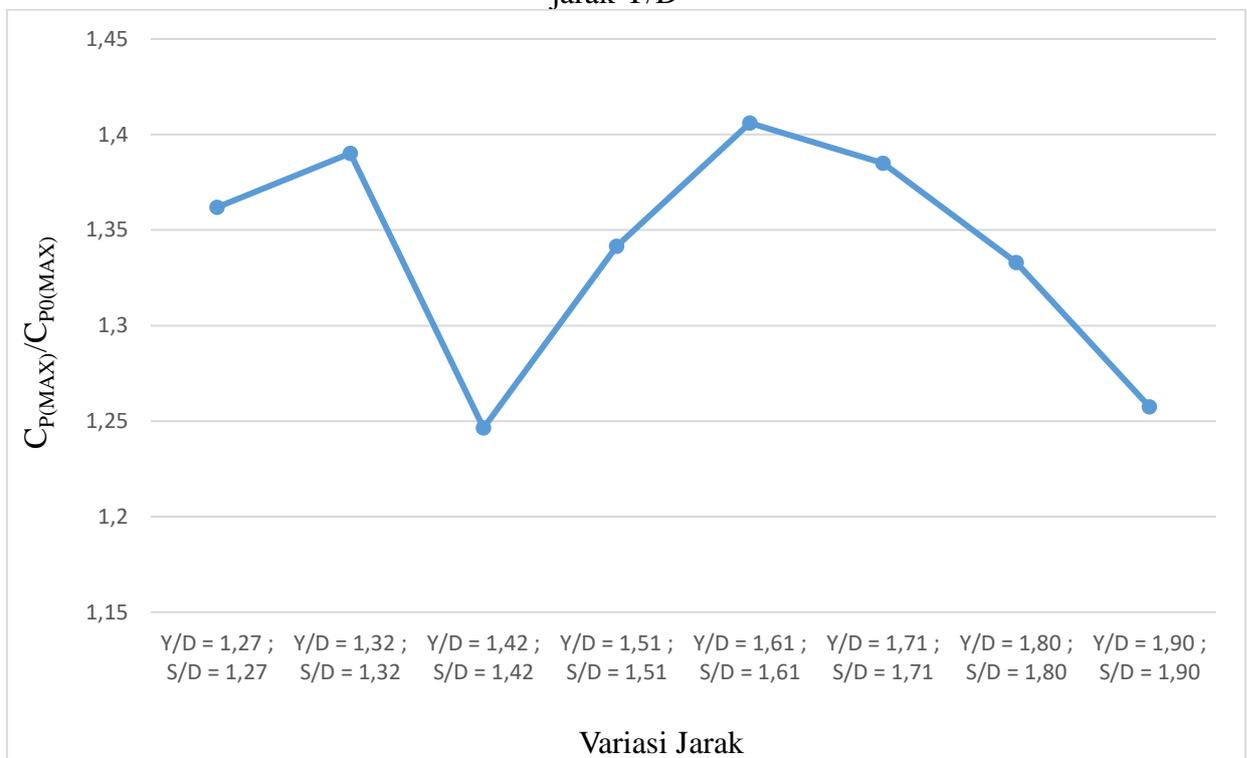
Gambar 7 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D dan S/D



Gambar 8 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) berdasarkan fungsi *Tip Speed Ratio* (λ) pada variasi Y/D dan S/D



Gambar 9 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) pada turbin dengan variasi Y/D terhadap nilai *Coefficient of Power* (CP₀) pada turbin konvensional sebagai fungsi variasi jarak Y/D



Gambar 10 Grafik perbandingan nilai *Coefficient of Power* (CP) pada turbin dengan variasi Y/D terhadap nilai *Coefficient of Power* (CP₀) pada turbin konvensional sebagai fungsi variasi jarak Y/D dan S/D

BIODATA PENULIS



Penulis bernama I Gede Artha Juan Christian Lie, lahir di Waingapu pada tanggal 18 Juli 2000 yang merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan suami istri Bapak I Ketut Budiarta S.E., S.ST., dan Ibu Marlin Niko. Penulis telah menempuh Pendidikan dasar yaitu di SDN 3 Banjar Jawa Singaraja pada tahun 2006-2012, kemudian melanjutkan ke Pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Denpasar pada tahun 2012-2014 dan Pendidikan menengah atas di SMAN 1 Denpasar pada tahun 2014-2017. Penulis mengikuti proses jalur Mandiri dan diterima di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 02111840000186

Pada masa perkuliahan, penulis aktif di beberapa organisasi dan kegiatan kampus. Penulis mendapatkan kesempatan untuk dapat mengembangkan *softskill*-nya dengan mengikuti organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HMM), Tim Pembina Kerohanian Hindu (TPKH ITS), menjadi staf serta ketua divisi kepanitiaan baik dalam lingkup jurusan, fakultas, dan institut. Selain itu, penulis juga tak luput mendapatkan ilmu diluar aktivitas pembelajaran kuliah seperti mengikuti seminar dan menjadi Asisten Praktikum pada lab Mekanika Mesin-Mesin Fluida. Di tahun 2022, penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Penambahan *Circular Cylinder* di Samping Sudu *Advancing* (Y/D) dan di Depan Sudu *Returning* (S/D) Terhadap Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius”. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak. Untuk informasi, saran, maupun pertanyaan terkait penelitian dapat menghubungi penulis melalui surat elektronik: arthajuan1@gmail.com