

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS DAN DARRIEUS TIPE H-ROTOR DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)* DAN STUDI EKSPERIMENTAL

WILLIAM MIKHAEL PARLINDUNGAN

NRP 02111840000050

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

NIP 196604021989031002

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS DAN DARRIEUS TIPE H-ROTOR DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD) DAN STUDI EKSPERIMENTAL

WILLIAM MIKHAEL PARLINDUNGAN

NRP 02111840000050

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

NIP 196604021989031002

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]



FINAL PROJECT - TM184835

**AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SAVONIUS
WIND TURBINE AND DARRIEUS TYPE H-ROTORS WITH
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) APPROACH
AND EXPERIMENTAL STUDIES**

WILLIAM MIKHAEL PARLINDUNGAN
NRP 02111840000050

Advisor

Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP 196604021989031002

Mechanical Engineering Undergraduate Study Program
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS DAN DARRIEUS TIPE H-ROTOR DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)* DAN STUDI EKSPERIMENTAL

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

William Mikhael Parlindungan

NRP. 0211184000050

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- 1 Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc......(Pembimbing)
NIP 196604021989031002
- 2 Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc......(Penguji I)
NIP 199007252020122017
- 3 Dr. Is Bunyamin Survo, S.T., M.Sc......(Penguji II)
NIP 198208192012121003
- 4 Ary Bachtiar Krishna Putra, S.T., M.T., Ph.D.....(Penguji III)
NIP 197105241997021001

SURABAYA

Juli, 2022

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

APPROVAL SHEET

AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SAVONIUS WIND TURBINE AND DARRIEUS TYPE H-ROTORS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) APPROACH AND EXPERIMENTAL STUDIES

FINAL PROJECT

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

By:

William Mikhael Parlindungan

NRP.0211184000050

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc...... (Advisor)
NIP 196604021989031002
2. Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc...... (Examiner I)
NIP 199007252020122017
3. Dr. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc...... (Examiner II)
NIP 198208192012121003
4. Ary Bachtiar Krishna Putra, S.T., M.T., Ph.D...... (Examiner III)
NIP 197105241997021001

SURABAYA
July, 2022

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : William Mikhael Parlindungan / 0211184000050

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc / 196604021989031002

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS DAN DARRIEUS TIPE H-ROTOR DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD) DAN STUDI EKSPERIMENTAL** 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, 9 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



The image shows a circular official stamp of Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) with a handwritten signature in black ink over it. The signature is written in a cursive style.

(Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc)
NIP. 196604021989031002

Mahasiswa,



The image shows a handwritten signature in black ink, written in a cursive style.

(William Mikhael Parlindungan)
NRP.0211184000050

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP: William Mikhael Parlindungan / 0211184000050

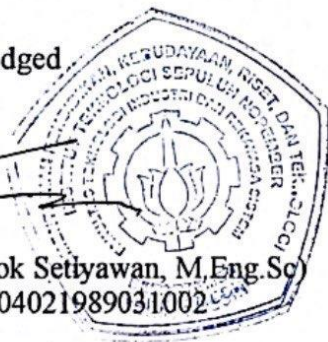

Department : Mechanical Engineering

Advisor / NIP : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc/196604021989031002

hereby declare that the Final Project with the title of **“AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SAVONIUS WIND TURBINE AND DARRIEUS TYPE H ROTORS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) AND EXPERIMENTAL STUDY APPROACH”** 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 discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.


Acknowledged
Advisor



(Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc)
NIP. 196604021989031002

Surabaya, 9 Juli 2022

Student



(William Mikhael Parlindungan)
NRP.0211184000050

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS DAN DARRIEUS TIPE H-ROTOR DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD) DAN STUDI EKSPERIMENTAL

Nama Mahasiswa/NRP : William Mikhael Parlindungan/0211184000050
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

Abstrak

Kebutuhan energi listrik yang semakin meningkat khususnya di Indonesia mengakibatkan dampak yang buruk terhadap lingkungan dikarenakan di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil. Penggunaan bahan bakar fosil yang terus meningkat dapat mengakibatkan meningkatnya pemanasan global. Selaras dengan hal tersebut maka dibutuhkan pembangkit listrik terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil. Salah satu energi terbarukan yang dapat digunakan adalah energi angin. Energi angin dapat diubah menjadi energi listrik melalui turbin atau kincir angin. Hal tersebut dapat dilakukan dengan membangun PLTA dengan menggunakan Turbin gabungan yaitu *Savonius* dan *Darrieus*. Turbin angin *Savonius* dan *Darrieus* merupakan jenis turbin dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Dengan memanfaatkan gaya *drag* dan *lift* yang dihasilkan oleh angin dapat menyebabkan turbin berputar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui torsi, C_p , C_m , dan daya yang dihasilkan oleh turbin dengan variasi kecepatan angin serta membandingkan kinerja turbin antara simulasi dengan eksperimen.. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap yaitu studi numerik dan studi eksperimen.

Penelitian ini menggunakan *software* ANSYS *Workbench* 18.1 sebagai metode untuk analisa numerik dimana *software ini* bertujuan menganalisa kinerja dari turbin. Studi numerik dibagi menjadi tiga tahap yaitu, *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*. Pada bagian *pre-processing* dilakukan pembuatan geometri turbin angin *Savonius* dan *Darrieus* pada ANSYS *design modeler*. Selain itu dilakukan juga penamaan *boundary conditions* dan proses *meshing*. Setelah itu *solving* dan *post-processing* digunakan untuk mendapatkan data. Penelitian secara eksperimen dilakukan menggunakan kecepatan angin aktual dimana dalam prosesnya kecepatan angin, kecepatan poros turbin, dan torsi diukur menggunakan alat ukur pada studi eksperimen.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah performa turbin dengan penambahan sudu *darrieus* menyebabkan kenaikan daya dan torsi tetapi tidak dengan koefisien power dengan bertambahnya kecepatan angin. Nilai torsi dan daya maksimum secara simulasi lebih besar dibandingkan dengan penelitian secara eksperimen. Torsi dan daya maksimum yang didapatkan secara simulasi adalah sebesar 1.25 Nm dan 90.97 watt dengan koefisien daya sebesar 0.227. Nilai maksimum torsi dan daya yang didapatkan secara eksperimen adalah sebesar 0.1133 Nm dan 1.54 watt dengan koefisien daya sebesar 0.0225. Dari hasil analisa data didapatkan performa turbin hasil studi eksperimen lebih buruk dibandingkan dengan studi numerik. Hal tersebut dikarenakan adanya gesekan pada *bearing*, *misalignment* pada poros turbin, dan getaran dari turbin yang menyebabkan banyak energi yang terbuang.

Kata kunci: Bahan Bakar Fosil, C_m , C_p , *Darrieus*, *Savonius*, Torsi.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SAVONIUS WIND TURBINE AND DARRIEUS TYPE H-ROTORS WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) APPROACH AND EXPERIMENTAL STUDIES.

Student Name/NRP : William Mikhael Parlindungan/0211184000050
Departement : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Advisor : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

Abstract

The increasing demand for electrical energy, especially in Indonesia, has a negative impact on the environment because Indonesia still uses fossil fuels. The increasing use of fossil fuels can lead to increased global warming. In line with this, renewable power plants are needed that can replace fossil fuels. One of the renewable energies that can be used is wind energy. Wind energy can be converted into electrical energy through turbines or windmills. This can be done by building a power plant using a combined turbine, Savonius and Darrieus. The Savonius and Darrieus wind turbines are a type of turbine from the Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Utilizing the drag and lift forces generated by the wind can cause the turbine to rotate. This study aims to determine the torque, cp, cm, and power produced by turbines with variations in wind speed and compare the performance between simulation and experiment. Numerical and experimental studies were conducted in this research.

ANSYS Workbench 18.1 software is used as a method for numerical analysis where this software aims to analyze the performance of the turbine. The numerical study is divided into three stages, pre-processing, solving, and post-processing. In the pre-processing section, the geometry of the Savonius and Darrieus on the ANSYS design modeler is made. In addition, the naming of boundary conditions and the meshing process was also carried out. After that, solving and post-processing are used to get the data. Experimental research was conducted by actual wind speed. In the process wind speed, turbine shaft speed, and torque are measured using measuring instruments in experimental studies.

The results obtained from this study are the turbine performance with the addition of a darrieus blade causes an increase in power and torque but not with the power coefficient with increasing wind speed. The maximum torque and power values in simulation are greater than experimental studies. The maximum torque and power obtained by simulation are 1.25 Nm and 90.97 watt with a power coefficient of 0.227. The maximum value of torque and power obtained experimentally is 0.1133 Nm and 1.54 watt with a power coefficient of 0.0225. From the results of data analysis, it was found that the turbine performance from the experimental study was worse than the numerical study. This is due to friction in the bearings, misalignment of the turbine shaft, and vibration from the turbine which causes a lot of energy loss.

Keywords: Cm, Cm, Cp, Darrieus, Fossil fuel, Savonius, Torque.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Tuhan Yang Maha Esa. Karena atas berkah dan rahmat-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Bantuan dan dukungan yang diberikan oleh berbagai pihak ini yang membuat penulis terus berusaha untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moral maupun material dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Kedua orang tua yang telah mendoakan, menasehati, membesarkan serta tidak pernah lelah memberikan kasih sayang kepada penulis demi kelancaran kuliah, tugas akhir dan setiap hal yang dilalui penulis.
2. Pak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M. Eng.Sc selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan ilmu, saran dan motivasi yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terimakasih atas kesabarannya dan didikannya yang luar biasa dalam membimbing penulis.
3. Ibu Tri Vicca Kusumadewi, S.T., M.Sc., Bapak Dr. Is Bunyamin Suryo, S.T., M.Sc dan Bapak Ary Bachtiar Krishna Putra, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas kritik dan saran yang telah diberikan.
4. Valentine Senda Yurika Samosir dan keluarga yang selalu sabar mendukung, mendoakan dan mendorong penulis untuk menyelesaikan tugas akhir. Terimakasih atas motivasinya dan telah menunggu sampai penulis menyelesaikan tugas akhir.
5. Semua warga Laboratorium Kompok yang telah banyak membantu, menemani dan berjuang bersama penulis.
6. Teman-teman Sapuagin yang telah menemani dan menjadi wadah penulis dalam berdiskusi serta memberi saran
7. Teman-teman LBMM yang telah memberi support serta tempat untuk bercanda dan tempat untuk mengambil ilmu selain ilmu dari perkuliahan.
8. Seluruh SMRM yang telah membantu perkembangan positif akademik dan moral penulis.
9. Pak Faisal sebagai pembimbing dalam mengerjakan penelitian secara eksperimen, mulai dari pemilihan material, dimensi, serta desain turbin yang akan digunakan.
10. Departemen Teknik Mesin yang sudah mendukung dan memberikan fasilitasnya untuk dapat mengerjakan tugas akhir ini dengan baik.
11. Seluruh dosen dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan yang dimiliki dalam menyusun tugas akhir, oleh karena itu saran dari semua pihak sangat bermanfaat dan penulis berharap dapat diberikan kepada penulis. Penulis juga berharap semoga tugas akhir ini dapat menjadi manfaat bagi semua orang yang menggunakannya.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	vi
APPROVAL SHEET	viii
PERNYATAAN ORISINALITAS	x
STATEMENT OF ORIGINALITY	xii
Abstrak	xiv
Abstract	xvi
KATA PENGANTAR	xviii
DAFTAR ISI	xx
DAFTAR GAMBAR	xxiv
DAFTAR TABEL	xxvi
BAB I PENDAHULUAN	2
1.1. Latar Belakang.....	2
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat.....	4
BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Dasar Teori	6
2.1.1. Energi Angin	6
2.1.2. Teori Betz Limit	7
2.1.3. Turbin Angin	7
2.1.4. Aspek Aerodinamik	11
2.1.5. Computational Fluid Dynamic (CFD).....	14
2.2. Tinjauan Pustaka	14
2.2.1. Yanuarshyah (2017)	14
2.2.2. Ghosh et. al. (2015)	16
2.2.3. Fridayana (2018)	18
2.2.4. Wakui et. al. (2014).....	20
2.2.5. Morshed.et.al (2013)	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24
3.1. Variasi dan <i>Domain</i> Simulasi	24
3.1.1. Variasi.....	24
3.1.2. <i>Domain</i> Simulasi	24
3.2. Pelaksanaan Simulasi Ansys	25
3.2.1. Persiapan Simulasi.....	25

3.3.	Alat dan Bahan Eksperimen	37
3.3.1.	Turbin Savonius.....	37
3.3.2.	Turbin Darrieus	37
3.3.3.	Poros Turbin	38
3.3.4.	Dudukan Turbin.....	38
3.3.5.	<i>Tapered Bearing</i>	39
3.3.6.	<i>Ball Bearing</i>	39
3.3.7.	Rubber Coupling	40
3.3.8.	Generator	40
3.3.9.	Rangkaian Lampu.....	40
3.3.10.	<i>Tower Turbin</i>	41
3.3.11.	Anemometer	41
3.3.12.	Multimeter	42
3.3.13.	Tachometer	43
3.3.14.	Bor	43
3.3.15.	Gerinda	43
3.3.16.	<i>Masking Tape</i>	44
3.3.17.	Glass Fiber.....	44
3.3.18.	Resin <i>Epoxy</i>	44
3.3.19.	Dempul	45
3.3.20.	Dextone.....	45
3.3.21.	Lem G	45
3.3.22.	Lubricant.....	46
3.3.23.	Amplas.....	46
3.4.	Data Eksperimen.....	47
3.5.	Skema Penelitian Eksperimen	47
3.6.	Contoh Perhitungan	48
3.6.1.	Perhitungan Simulasi	48
3.6.2.	Perhitungan Eksperimen.....	50
3.7.	Diagram Alir (Flowchart).....	51
	BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	54
4.1.	Data Permodelan.....	54
4.2.	Perbandingan Hasil Penelitian Eksperimen Dengan Simulasi	55
4.2.1.	Perbandingan Torsi Simulasi dengan Eksperimen	55

4.2.2.	Perbandingan Koefisien Daya Simulasi dengan Eksperimen	56
4.2.3.	Perbandingan Koefisien Momen Simulasi dengan Eksperimen	57
4.2.4.	Perbandingan Daya Aktual Simulasi dengan Eksperimen	58
4.3.	Perbandingan Hasil Penelitian Terhadap Turbin Savonius Setelah Penambahan Turbin Darrieus.	59
4.3.1.	Perbandingan Torsi Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus.....	59
4.3.2.	Perbandingan Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus.....	60
4.3.3.	Perbandingan Koefisien Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus	61
4.3.4.	Perbandingan Koefisien Momen Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus	62
BAB V KESIMPULAN & SARAN		64
5.1.	Kesimpulan.....	64
5.2.	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA		66
LAMPIRAN		68
BIODATA PENULIS		82

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Pertumbuhan Kapasitas Energi Terbarukan (IREN, 2021).....	6
Gambar 2. 2	Grafik Daya yang dapat diserap dengan teori betz limit.....	7
Gambar 2. 3	Jenis Turbin Angin (a) HAWT, (b) VAWT Tipe Darrieus, (c) VAWT Tipe Savonius (Nur Fridayana et al., 2018).....	8
Gambar 2. 4	(a) Overlap ratio pada turbin angin Savonius, e. (b) Variasi stage Savonius(Saha et al., 2008).....	9
Gambar 2. 5	Gambar Airfoil (Nur Fridayana et al., 2018)	11
Gambar 2. 6	Kerja Aerodinamis pada Airfoil (Nur Fridayana et al., 2018)	12
Gambar 2. 7	Contoh Ukuran Dimensi dari VAWT Darrieus tipe H-Rotor; R: radius turbin, H: tinggi sudu, c: lebar chord (Nur Fridayana et al., 2018).....	13
Gambar 2. 8	Vektor gaya dan kecepatan pada VAWT Darrieus (Nur Fridayana et al., 2018)	13
Gambar 2. 9	Layout Turbin Angin Darrieus Savonius(Yanuarshyah 2017)	15
Gambar 2. 10	Grafik hubungan antara torsi turbin angin terhadap sudut azimuth pada turbin Savonius dan Darrieus dengan Konfigurasi A dan B	15
Gambar 2. 11	Hasil torsi total untuk satu putaran turbin A dan B.....	16
Gambar 2. 12	Grafik hubungan antara Cp turbin angin terhadap Tip Speed Ratio Yanuarshyah (2017)	16
Gambar 2. 13	Geometri turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).	17
Gambar 2. 14	Domain dan boundary conditions turbin angin.....	17
Gambar 2. 15	Meshing untuk simulasi permodelan. (b) Meshing di sekitar turbin angin untuk simulasi permodelan. (Ghosh et. al. 2015).	17
Gambar 2. 16	Grafik perbandingan Cp dengan TSR untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi overlap ratio 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).	18
Gambar 2. 17	Grafik perbandingan Cp hasil studi numerik dengan Cp hasil studi eksperimen untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi overlap ratio 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).....	18
Gambar 2. 18	Layout Model Uji VAWT Darrieus Tipe H-Rotor [18].....	19
Gambar 2. 19	Kurva Cm vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-5	19
Gambar 2. 20	Kurva Cm vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-6	20
Gambar 2. 21	(a) Turbin angin tipe A. (b) Turbin angin tipe B. (Wakui T et. al. 2014).	20
Gambar 2. 22	Grafik perbandingan koefisien torsi terhadap tip speed ratio. (Wakui T et. al. 2014).....	21
Gambar 2. 23	Grafik perbandingan koefisien daya terhadap tip speed ratio. (Wakui T et. al. 2014).....	21
Gambar 2. 24	Bentuk desain 3d dan asli dari turbin savonius.....	22
Gambar 2. 25	Koefisien Torsi terhadap sudut azimuth	22
Gambar 2. 26	Koefisien Power terhadap Sudut Azimuth.....	23
Gambar 3. 1	Skema domain pada simulasi turbin savonius dan darrieus.....	24
Gambar 3. 2	Koordinat Airfoil dari Website Resmi NASA	25
Gambar 3. 3	Skema model dari gabungan turbine savonius dan darrieus	26
Gambar 3. 4	Geometri Turbine Savonius & Darrieus	26

Gambar 3. 5 Hasil meshing keseluruhan domain	27
Gambar 3. 6 Penamaan setiap section yang ada pada simulasi	28
Gambar 3. 7 Monitoring Residual	36
Gambar 3. 8 <i>Turbin Angin Savonius</i>	37
Gambar 3. 9 <i>Turbin Angin Darrieus</i>	38
Gambar 3. 10 <i>Poros Turbin</i>	38
Gambar 3. 11 <i>Dudukan Turbin</i>	39
Gambar 3. 12 <i>Tapered Bearing FAG 32305</i>	39
Gambar 3. 13 <i>Ball Bearing SKF 6305/C3</i>	39
Gambar 3. 14 Rubber Coupling	40
Gambar 3. 15 Generator	40
Gambar 3. 16 Rangkaian Lampu	41
Gambar 3. 17 <i>Tower Turbin</i>	41
Gambar 3. 18 Anemometer	42
Gambar 3. 19	42
Gambar 3. 20	43
Gambar 3. 21 Bor	43
Gambar 3. 22 Gerinda	44
Gambar 3. 23 <i>Masking Tape</i>	44
Gambar 3. 24 <i>Glass Fiber</i>	44
Gambar 3. 25 Resin <i>Epoxy</i>	45
Gambar 3. 26 Dempul	45
Gambar 3. 27 Dextone	45
Gambar 3. 28 Lem G	46
Gambar 3. 29 Lubricant Rexco	46
Gambar 3. 30 Amplas	46
Gambar 3. 31 Skema Penelitian Eksperimen	47
Gambar 3. 32 Diagram alir penelitian secara umum	51
Gambar 3. 33 Diagram alir penelitian secara numerik	52
Gambar 3. 34 Diagram Alir Studi Eksperimen	53
Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Torsi Simulasi dengan Eksperimen	55
Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Koefisien Daya Saat Simulasi dan Eksperimen	56
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Koefisien Momen pada Simulasi dan Eksperimen	57
Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Daya Aktual Antara Simulasi Dengan Eksperimen	58
Gambar 4. 5 Perbandingan Torsi Savonius dan Savonius-Darrieus	59
Gambar 4. 6 Perbandingan Daya Savonius dan Savonius-Darrieus	60
Gambar 4. 7 Perbandingan Koefisien Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus	61
Gambar 4. 8 Perbandingan Koefisien Momen Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik pada Turbin Savonius dan Darrieus (Nur Fridayana et al., 2018)	9
Tabel 2. 2 Dimensi dari model turbin	19
Tabel 2. 3 Data Konfigurasi Turbin Angin (Wakui T et. al. 2014).	20
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian	24
Tabel 3. 2 Tabel General dan Models	29
Tabel 3. 3 Properti Udara	29
Tabel 3. 4 Data Konfigurasi Cell Zone	30
Tabel 3. 5 Data Inlet Boundary Conditions	30
Tabel 3. 6 Data Outlet Boundary Conditions	31
Tabel 3. 7 Data ArmDarrieus Bondary Conditions	31
Tabel 3. 8 Data Arm Savonius Boundary Conditions	32
Tabel 3. 9 Data AtasBawahRot Boundary Conditions	32
Tabel 3. 10 Data BladeDarrieus1 Boundary Conditions	32
Tabel 3. 11 Data BladeDarrieus2 Boundary Conditions	33
Tabel 3. 12 Data BladeDarrieus3 Boundary Conditions	33
Tabel 3. 13 Data BladeSavonius1 Boundary Conditions.....	33
Tabel 3. 14 Data Blade Savonius2 Boundary Conditions.....	34
Tabel 3. 15 Data Solution Methods	34
Tabel 3. 16 Kriteria Konvergen	35
Tabel 3. 17 Data Solutions Initialization	35
Tabel 3. 18 <i>Krisbow KW06-564 Anemometer</i>	42
Tabel 3. 19 Spesifikasi Multimeter	42
Tabel 3. 20 <i>DT6236 Digital Tachometer</i>	43
Tabel 3. 21 Contoh Perhitungan Torsi Statis Savonius	49
Tabel 3. 22 Contoh Perhitungan Torsi Statis Darrieus	49
Tabel 4. 1 Model Simulasi	54
Tabel 4. 2 Model Eksperimen	54

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kemajuan teknologi yang ada di negara zaman sekarang semakin berkembang pesat, seiring dengan peradaban manusia yang juga semakin berkembang. Dengan kemajuan teknologi, negara yang sejahtera adalah negara yang memperhatikan pembangunan infrastrukturnya (Direktorat Analisis dan Pengembangan Statistik, 2015). Dalam proses pembangunan infrastruktur untuk mensejahterakan rakyat harus didukung dengan kebutuhan energi terutama energi listrik yang baik. Dengan usia bumi yang sudah cukup tua, pembangkit listrik konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil yang berasal dari sumber daya alam tidak terbarukan mulai pelan-pelan ditinggalkan. Hal tersebut dapat menyebabkan dampak buruk bagi lingkungan karena dapat meningkatkan pemanasan global. Laju pertumbuhan penduduk pasalnya juga memberikan dampak karena kebutuhan listrik yang meningkat. Dengan Laju pertumbuhan penduduk Indonesia sebesar 1.25 persen (BPS, 2020) dan laju pertumbuhan penduduk Jawa Timur sebesar 0.79 persen periode 2010-2020 (BPS, 2020). Dengan permintaan dan kebutuhan listrik semakin meningkat sedangkan ketersediaan sumber daya alam tidak terbarukan semakin berkurang. Untuk menanggulangi masalah tersebut, penelitian dan pengembangan terus di dorong oleh pemerintah.

Dengan menggunakan generator diesel konvensional untuk memperoleh listrik dibutuhkan biaya yang besar untuk transportasi (Kracht P et al., 2012). Oleh sebab itu Energi Baru Terbarukan (EBT) dapat menjadi alternatif pilihan yang dapat menyelesaikan masalah ini. Pemerintah meningkatkan kemampuan penyediaan EBT pada tahun 2025 sebesar 23% dan 31% pada tahun 2030 (Menteri ESDM, 2022). Dengan disahkannya Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 39 Tahun 2017 tentang Pelaksanaan Kegiatan Fisik Pemanfaatan Energi Baru dan Energi Terbarukan serta Konservasi (Peraturan Menteri, 2017), pada pasal 5 peraturan menteri ini menyebutkan bahwa peningkatan pembangunan fasilitas EBT salah satunya bertujuan untuk mendorong pertumbuhan dan pemerataan pembangunan infrastruktur energi di wilayah terpencil, tertinggal, perbatasan, kepulauan kecil dan terluar. Penyediaan fasilitas EBT disebutkan pada Pasal 4 diantaranya berupa Pembangkit Listrik Tenaga Bayu/Angin (PLTB). Pengembangan potensi PLTB sebesar 2.500 MW juga tertuang dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. PLN Tahun 2016-2025 (Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016)

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi angin yang cukup besar, kecepatan rata-rata angin yang ada di Indonesia mencapai 5 m/s (Badan Layanan Umum P3tek KEBTKE, 2020). Dengan teknologi yang akan berkembang, potensi alam yang dimiliki Indonesia dapat digunakan secara maksimal. Oleh karena itu harus diperhatikan cara untuk mengolah potensi tersebut, mulai dari biaya investasi untuk pembangunan sebuah pembangkit listrik. Hal tersebut memerlukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui jenis-jenis pembangkit listrik tenaga angin terbaik yang akan dibangun sehingga biaya investasi dapat digunakan secara maksimal. *Vertical Axis Wind Turbin* merupakan salah satu jenis pembangkit listrik tenaga angin yang sedang populer untuk dikembangkan lebih lanjut. Jenis VAWT yang sering digunakan adalah Savonius dan Darrieus. Dengan kelebihan dan kekurangan yang dimiliki masing-masing, dalam beberapa kasus kedua jenis tersebut dapat digabungkan untuk memaksimalkan kinerja dari *wind turbin*.

Keunggulan yang dimiliki oleh turbin yang bergerak secara vertikal dibandingkan dengan jenis lainnya adalah kemampuan dalam melakukan ekstraksi energi untuk menerima aliran angin dari arah manapun sehingga sering disebut *Omnidirectional* (Teja, Dananta Putra. 2017).

Pembangunan dan penggunaan VAWT sangat sesuai bila dilakukan instalasi pada tempat yang luasnya terbatas namun memiliki potensi untuk mendapatkan energi sangat besar. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya pengaruh dari angin lokal yang begitu besar sehingga energi yang diekstrak dapat dimanfaatkan seperti menghidupkan lampu jalan. Pada dasarnya tipe turbin Darrieus memiliki kemungkinan yang sangat kecil untuk dapat berputar dengan sendirinya. Hal ini dikarenakan torsi awal yang dimiliki oleh turbin Darrieus sangat kecil. Berdasarkan penelitian M. Bhutta et al. (2011), yang me-review turbin Darrieus merupakan tipe rotor turbin yang memiliki efisiensi paling tinggi diantara jenis VAWT yang lainnya. Hal tersebut dikarenakan ukuran dari turbin yang sangat besar perbandingannya dengan energi yang dihasilkan sehingga dengan menggabungkan turbin Darrieus dengan Savonius adalah hal yang tepat untuk meningkatkan performa. Dengan mengkombinasikan kedua jenis turbin ini, maka cara kerja turbin adalah turbin Savonius dapat berfungsi sebagai penggerak utama dan rotor Darrieus sebagai penggerak tambahan.

Pada penelitian kali ini, penulis akan melakukan perancangan turbin angin sumbu vertikal untuk meminimalisir kekurangan turbin dengan cara mengevaluasi rancang bangun yang telah direncanakan dengan simulasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dapat digunakan untuk menganalisa gaya-gaya dan medan aliran disekitar airfoil dari sudu-sudu yang beroperasi pada *Reynolds number* yang rendah untuk memahami fenomena fisik yang terjadi. *Software* berbasis CFD yaitu ANSYS Fluent 18.1 digunakan untuk mensimulasikan variasi pada beberapa variabel desain untuk mengetahui kinerja aerodinamik turbin sumbu vertikal. (Fridayana, Elyas Nur. 2018). Penggabungan kedua jenis turbin angin savonius dan darrieus dilakukan untuk meningkatkan daya dan efisiensi dari turbin angin. Untuk konfigurasi dan susunan turbin penelitian kali ini dilakukan dengan variasi sudu Darrieus yang digunakan adalah tipe Darrieus H *single stage* dengan 3 sudu. Setelah itu turbin ini akan dikombinasikan dengan turbin Savonius 2 sudu tipe *single stage*. Penggabungan kedua jenis turbin angin savonius dan darrieus dilakukan untuk meningkatkan daya dan efisiensi dari turbin angin.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah pengaruh koefisien daya yang dihasilkan terhadap variasi kecepatan?
2. Bagaimanakah pengaruh torsi yang dihasilkan terhadap variasi kecepatan?
3. Bagaimana hasil perbandingan daya dan torsi pada simulasi dan studi eksperimen?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui koefisien daya yang dihasilkan dari variasi kecepatan pada turbin angin Savonius-Darrieus
2. Mengetahui torsi yang dihasilkan dari variasi kecepatan pada turbin angin Savonius-Darrieus
3. Mengetahui dan membandingkan daya dan torsi yang dihasilkan pada simulasi dan studi eksperimen.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhatikan yaitu:

1. Turbin yang digunakan adalah Turbin Savonius single stage memiliki 2 buah sudu dan Turbin Darrieus memiliki 3 buah sudu.
2. Studi numerik pada penampang tiga dimensi dilakukan unsteady
3. Asumsi aliran fluida pada inlet konstan dan incompressible

4. Software yang digunakan adalah Ansys
5. Putaran turbin saat simulasi sebagai rotating motion yang kecepatan putarnya dapat diatur
6. Data kecepatan angin yang digunakan diasumsikan hanya satu arah yaitu dari arah inlet
7. Studi numerik tidak mengikutsertakan analisis bahan yang dipakai pada instalasi turbin angin
8. Getaran pada instalasi turbin angin tidak diikutsertakan pada studi numerik.

1.5. Manfaat

Manfaat yang didapat dari penelitian ini yaitu dapat dijadikan referensi untuk penelitian dan pengembangan wind turbin di masa yang akan mendatang serta terbentuknya rancang bangun alat untuk praktikum Mesin Konversi Energi.

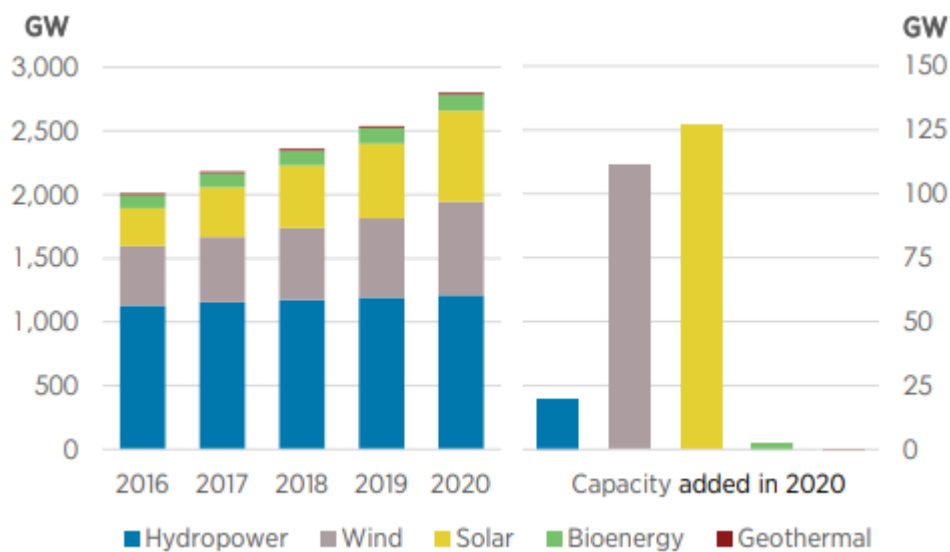
[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB II DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Dasar Teori

2.1.1. Energi Angin

Dunia ini memiliki energi angin yang mempunyai potensi yang dapat mengatasi kebutuhan daya dari seluruh dunia ketika energi angin tersebut dapat dikonversi menjadi listrik secara efisien. Angin akan menjadi energi alternatif yang tidak ada habisnya karena ketersediaannya tidak terbatas di seluruh tempat dan waktu. Walaupun memiliki sifat bebas polusi namun kerugiannya adalah efisiensi yang didapatkan lebih rendah dan biaya instalasi tinggi. Tetapi biaya operasional dan biaya akhir akan jauh lebih murah jika beroperasi secara terus menerus.



Gambar 2. 1 Pertumbuhan Kapasitas Energi Terbarukan (IREN, 2021)

Terdapat perbedaan tekanan udara antara tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang memiliki tekanan yang rendah atau bisa dikatakan dari daerah yang suhunya rendah ke daerah yang bersuhu tinggi, akibat adanya hal tersebut angin yang bergerak terbentuk. Angin merupakan aliran fluida yang mempunyai sifat-sifat aerodinamis, yaitu sifat kompresibel (mampat), viskositas (kekentalan), densitas (kerapatan) dan turbulensi.

Energi yang terkandung didalam aliran angin adalah energi kinetik. Energi ini dapat dikonversi menjadi energi mekanik pada sistem turbin angin. Energi kinetik untuk suatu massa angin m yang bergerak dengan kecepatan u dapat diperoleh dengan persamaan berikut :

$$E = \frac{1}{2} m u^2$$

Bila angin datang dan menerjang turbin pada luasan *cross section* sebesar A , dimana laju dari udara adalah u , maka terjadi suatu peristiwa pemindahan volume fluida dalam setiap satuan waktu :

$$V = u A$$

Kemudian aliran massa dengan kerapatan udara ρ , digunakan dengan persamaan berikut:

$$m = \rho u A$$

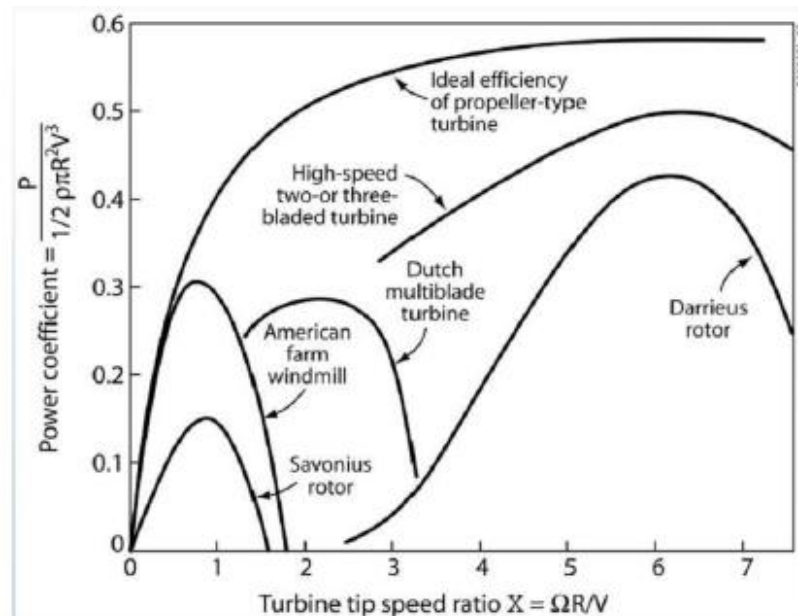
Energi yang tersimpan pada angin dapat ditunjukkan dengan mensubstitusi persamaan sebelumnya menjadi persamaan energi berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A u^3$$

Dimana P adalah suatu bentuk dari energi kinetik angin untuk setiap satuan waktu. Hal inilah yang sering disebut dengan daya, Dimana u adalah kecepatan angin dan ρ densitas udara. Besar densitas udara diatas permukaan air adalah $1,225 \text{ kg/m}^3$ (Nur Fridayana et al., 2018).

2.1.2. Teori Betz Limit

Berdasarkan pemodelan aliran angin dalam dua dimensi kemudian mengenai rotor dari turbin, hal tersebut yang menjelaskan prinsip konversi energi angin pada turbin angin. Kecepatan aliran angin berkurang dan garis aliran membelok ketika melewati rotor pada satu bidang. Kecepatan aliran angin berkurang disebabkan oleh sebagian energi kinetik yang diserap oleh rotor turbin. Putaran rotor menghasilkan perubahan kecepatan angin pada arah tangensial yang mengakibatkan berkurangnya jumlah total energi yang dapat diambil oleh angin. Secara teoritis maksimum energi angin yang dapat diekstrak menjadi energi kinetik hanya sebesar 59,26 %. Besaran tersebut sesuai dengan teori Betz Limit (Nur Fridayana et al., 2018).



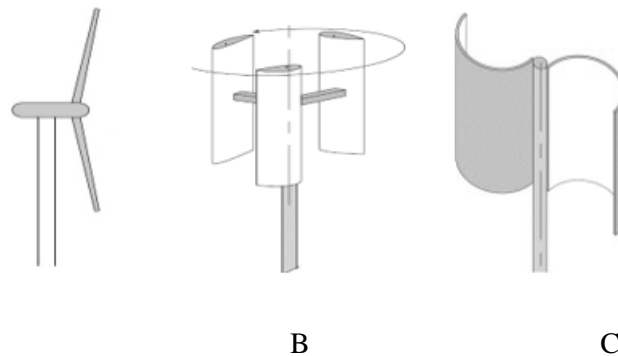
Gambar 2. 2 Grafik Daya yang dapat diserap dengan teori betz limit

2.1.3. Turbin Angin

Turbin angin yang juga dikenal dengan sebutan kincir-angin merupakan alat pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik. Suatu instalasi dengan turbin angin dapat berfungsi sebagai sistem konversi energi angin. Masa kini pemanfaatan turbin angin terus berkembang sebagai turbin angin penghasil energi listrik.

Jenis-jenis turbin angin secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua yaitu turbin angin sumbu mendatar yaitu *Horizontal Axis Wind Turbin (HAWT)* merupakan turbin angin

dimana sumbu putarnya sejajar dengan tanah. Turbin angin sumbu Tegak yaitu *Vertical Axis Wind Turbin (VAWT)* merupakan turbin angin dimana sumbu putarnya tegak lurus atau vertikal dengan tanah. Keuntungan yang dimiliki oleh VAWT seperti desain yang sederhana, dapat bekerja pada segala arah angin (*Omnidirectional*), tidak menimbulkan suara bising, menghemat tempat untuk infrastruktur lainnya serta mudah dalam pemasangan generator, *gearbox* dan *part* pendukung lainnya. Keuntungan lainnya adalah kestabilan struktur karena poros untuk memutar rotor terletak dekat dengan tanah. Hal tersebut dapat meminimalisir kemungkinan terjadi anggukan (*sway*) yang sering terjadi pada turbin horizontal. Selain itu VAWT juga relatif menghasilkan torsi yang lebih tinggi, meskipun secara keseluruhan efisiensinya kalah dibanding HAWT.



Gambar 2. 3 Jenis Turbin Angin (a) HAWT, (b) VAWT Tipe Darrieus, (c) VAWT Tipe Savonius (Nur Fridayana et al., 2018).

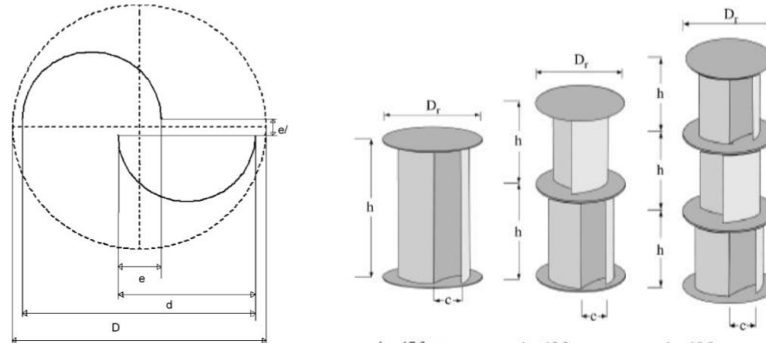
2.1.3.1. Turbin angin Savonius

Cara kerja turbin angin Savonius untuk mendapatkan energi angin adalah bergantung dari perbedaan *drag force* yang bekerja pada sudu ketika aliran udara melalui bagian concave dan convex. Pemanfaatan energi yang didapat dari aliran udara pada Savonius lebih rendah daripada Darrieus. Sehingga penggunaan turbin angin Savonius umumnya tidak digunakan untuk aplikasi daya yang besar. Kelebihan utama dari turbin angin Savonius adalah kemampuannya untuk memulai pergerakannya sendiri (*self starting*).

Beberapa cara untuk mengoptimasi kinerja dari turbin angin Savonius diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Mengubah overlap ratio. Untuk turbin angin Savonius berjumlah dua sudu, dilakukan penelitian dengan mengubah overlap ratio dengan variasi 16.2%, 20%, 25%, 30% dan 35%. Ekstraksi daya maksimum didapat dengan variasi overlap ratio sebesar 16,2% (Gupta, Das, et. al. 2012). Untuk turbin angin Savonius berjumlah tiga sudu, dilakukan penelitian dengan variasi overlap ratio sebesar 0%, 12%, dan 26%. Variasi dengan overlap ratio 0% (tanpa overlap) menghasilkan *torque coefficient* dan *power coefficient* yang lebih baik (K. N. Morshed 2010).
2. Mengubah bentuk dari sudu. Bentuk sudu yang melengkung memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk sudu yang datar (Qasim et. al. 2011). Bentuk sudu semi-circular yang datar memiliki hasil torsi dan RPM yang lebih rendah dibandingkan dengan sudu berbentuk twisted.
3. Mengubah tingkat sudu. Ketika dibandingkan dengan penelitian studi eksperimen didapatkan bahwa turbin angin Savonius dengan tiga tingkat memiliki *torque*

coefficient yang lebih baik daripada satu tingkat. Penelitian lain yang menggunakan variasi turbin angin Savonius dua tingkat dan tiga tingkat. Hasil yang didapatkan bahwa turbin angin Savonius dua tingkat memiliki performa yang lebih baik daripada tiga tingkat (Saha et al. 2008).



Gambar 2. 4 (a) Overlap ratio pada turbin angin Savonius, e. (b) Variasi stage Savonius(Saha et al., 2008)

2.1.3.2. Turbin angin Darrieus

Cara kerja turbin angin Darrieus mendapatkan energi angin adalah diperoleh dari lift force yang bekerja pada tiap sudu searah dengan arah putaran rotor. Untuk tipe turbin ini memiliki kelebihan yaitu memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan dengan tipe VAWT yang lainnya dan *tip speed ratio* (TSR) yang dihasilkan lebih tinggi pada rpm yang lebih tinggi. Namun kelemahan utama dari turbin angin Darrieus adalah ketidakmampuannya untuk memulai pergerakannya sendiri sehingga perlu dorongan awal untuk memulai operasi. Cara untuk mengoptimasi performa dari turbin angin Darrieus adalah dengan mengubah jumlah sudu dan bentuk sudu.

Beberapa karakteristik Turbin angin tipe Darrieus dan Savonius tampak pada tabel berikut:

Tabel 2. 1 Karakteristik pada Turbin Savonius dan Darrieus (Nur Fridayana et al., 2018)

No.	Darrieus	Savonius
	<ul style="list-style-type: none"> • Memanfaatkan gaya angkat/<i>lift</i> • Efisiensi cenderung lebih tinggi dari turbin Savonius • Beroperasi pada kecepatan angin tinggi • Bilah menggunakan bentuk penampang airfoil 	<ul style="list-style-type: none"> • Memanfaatkan gaya dorong/<i>drag</i> • Koefisien daya cenderung lebih rendah daripada turbin Darrieus • Beroperasi pada kecepatan angin rendah • Bilah berbentuk setengah silinder

Turbin angin Darrieus memiliki beberapa tipe dimana perbedaannya terletak dari bentuk sudunya. Inovasi bentuk sudu ini dilakukan guna menyelesaikan permasalahan pada struktur.

Beberapa tipe turbin angin darrieus yaitu H-Rotor, Troposkien, Helical dan Quite Revolution. Struktur paling sederhana yaitu tipe H-Rotor dimana Parameter desain Turbin Angin

2.1.3.3. Tip Speed Ratio

Tip Speed Ratio (γ) adalah perbandingan antara kecepatan ujung sudu/*blade* dengan kecepatan angin yang melewatinya.

$$\gamma = \frac{\omega R}{u}$$

Dimana adalah kecepatan rotasi dari turbin, R merupakan panjang jari-jari turbin dan v kecepatan angin.

2.1.3.4. Koefisien Daya (C_p)

Koefisien daya merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam menganalisis performa dari turbin angin. Efisiensi Turbin adalah perbandingan antara energi kinetic yang diserap oleh turbin angin terhadap energi kinetic angin yang tersedia (Yanuarsyah, 2017). Koefisien daya juga bisa berarti efisiensi kemampuan turbin angin untuk menyerap energi. Kemampuan turbin angin dalam mengkonversi energi angin didapatkan melalui rumusan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \frac{T \omega}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \lambda C_r$$

$$C_p = \lambda C_r$$

Dimana,

C_p = koefisien daya total turbin

C_r = koefisien torsi total

λ = tip speed ratio

2.1.3.5. Torsi Turbin Angin Savonius

Untuk Menghitung torsi yang dihasilkan oleh turbin darrieus, digunakan persamaan sebagai berikut :

$$T = F_{\text{Drag}} \times R_{\text{turbinesavonius}}$$

Dimana:

F_{Drag} = Gaya drag pada turbine savonius

$R_{\text{turbinesavonius}}$ = Radius turbine savonius

2.1.3.6. Torsi Turbin Angin Darrieus

Untuk menghitung torsi yang dihasilkan oleh turbin, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$T = F_{\text{tang}} \times R_{\text{turbinedarrieus}}$$

Dimana:

F_{tang} = Gaya drag pada turbine darrieus

$R_{\text{turbinedarrieus}}$ = Radius Turbine Darrieus

2.1.3.7. Time Step

Perhitungan time step berfungsi untuk mengetahui besarnya time step dalam satu putaran penuh. Persamaan untuk menghitung time step sebagai berikut.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{t}$$

Dimana:

ω = Kecepatan sudut (rad/s)

θ = sudut satu putaran

θ_0 = Sudut nol putaran

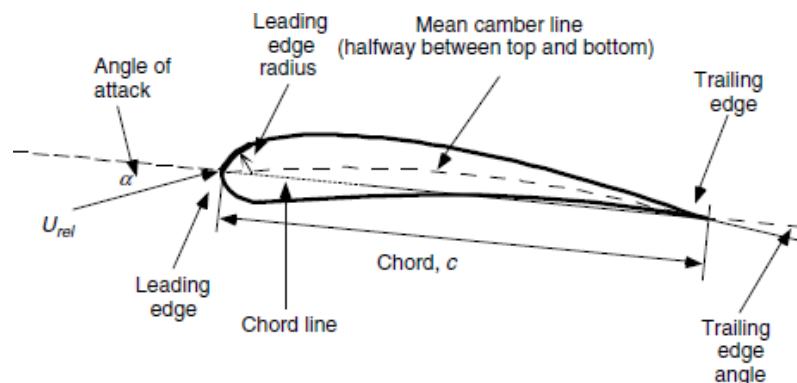
t = Waktu tempuh satu putaran (s)

$$\text{Time Step} = \frac{\text{Waktu tempuh satu putaran}}{\text{Jumlah Frame}}$$

2.1.4. Aspek Aerodinamik

2.1.4.1. Pengertian Airfoil

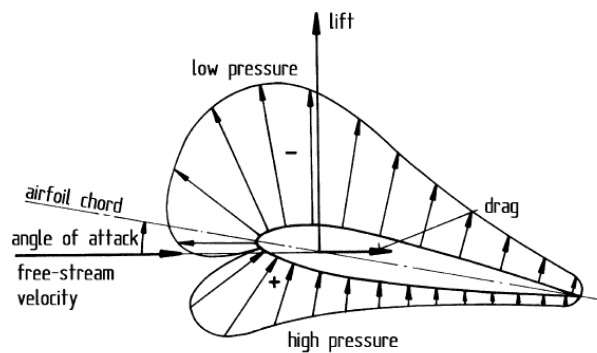
Airfoil merupakan bentuk geometri khusus dari penampang tegak pada sudu turbin angin yang memiliki fungsi untuk menyerap gaya mekanik dari suatu fluida yang ada disekitarnya. Profil airfoil banyak digunakan dalam sayap pesawat, sudu balingbaling, sudu kompresor, sudu turbin angin, turbin jet, hydrofoil pada kapal dan sebagainya. Parameter pada airfoil dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 5 Gambar Airfoil (Nur Fridayana et al., 2018)

2.1.4.2. Aerodinamika Airfoil

Angin melewati airfoil lebih cepat di bagian atas daripada bagian bawahnya. Hal ini akan menimbulkan tekanan yang lebih besar pada bagian bawah sehingga terjadi gaya angkat. Prinsip kerja aerodinamis ini sama halnya pada sayap pesawat terbang (Nur Fridayana et al., 2018).



Gambar 2. 6 Kerja Aerodinamis pada Airfoil (Nur Fridayana et al., 2018)

Gaya aerodinamik adalah gaya yang menggerakkan sudu pada turbin angin. Gaya aerodinamika pada airfoil dibagi menjadi tiga macam yaitu gaya lift, gaya drag dan gaya momen yang bekerja pada airfoil. Gambar 2.6 menunjukkan gambaran gaya-gaya yang bekerja pada airfoil dan penjelasannya sebagai berikut:

- Gaya angkat (*lift*), gaya yang tegak lurus dengan terhadap aliran udara. Gaya angkat ini timbul akibat adanya perbedaan tekanan antara bagian atas dan bawah permukaan airfoil akibat aliran angin yang melewati airfoil. Gaya angkat didefinisikan dengan bilangan tak berdimensi yaitu koefisien angkat (C_L) dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho u^2 A}$$

- Gaya dorong (*drag*), gaya yang bekerja searah dengan aliran angin. Gaya ini bangkit akibat gesekan viscous pada permukaan airfoil dan perbedaan tekanan antara permukaan yang menghadap dan membelakangi arah aliran angin.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u^2 A}$$

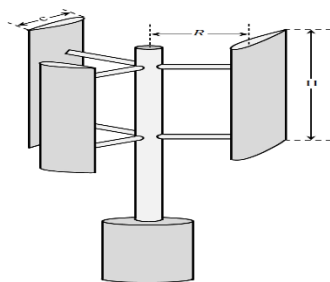
- *Pitching moment*, gaya putar yang terjadi akibat ketidak seimbangan dari perbedaan tekanan sepanjang airfoil. Gaya ini bekerja pada sumbu tegak lurus terhadap penampang melintang airfoil.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho u^2 A c}$$

2.1.4.3. Aerodinamika VAWT Darrieus

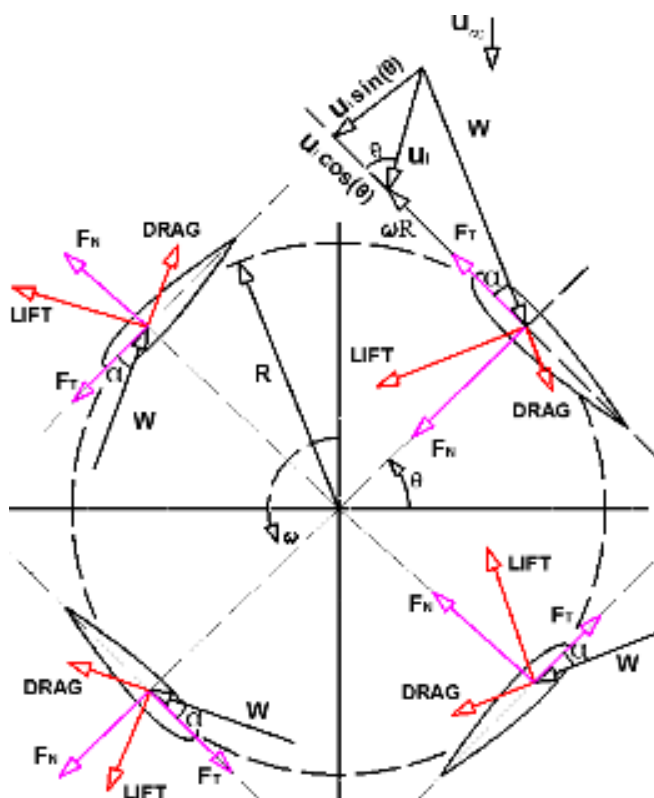
Untuk membandingkan kinerja dari turbin angin, digunakan parameter yang berupa rasio atau perbandingan. Angka rasio ini dibagi menjadi dua yaitu *Solidity Ratio* (σ) dan *Aspect Ratio*. Nilai dari ratio bergantung pada dimensi dan bentuk dari turbin. Pada VAWT Darrieus tipe H-Rotor dimensi ukuran tersebut ditunjukkan pada gambar berikut:

:



Gambar 2. 7 Contoh Ukuran Dimensi dari VAWT Darrieus tipe H-Rotor; R: radius turbin, H: tinggi sudu, c: lebar chord (Nur Fridayana et al., 2018)

Turbin angin *Darrieus* memiliki sumbu rotasi tegak lurus terhadap arah aliran udara. Akibatnya penampang melintang sudu (*airfoil*) mengalami perubahan *angle of attack* (α) selama satu putaran penuh turbin. *Angle of attack* ini dibentuk oleh resultan antara arah aliran hembusan angin dan arah angin akibat kecepatan tangensial dari putaran sudu. Resultan arah angin ini disebut angin relative. Saat sudu berputar resultan aliran udara pada sudu membangkitkan gaya-gaya aerodinamis. Gaya angkat (F_L) dan gaya dorong (F_D) juga bervariasi dengan perubahan posisi azimuth sudu (θ) dan *Tip speed ratio* (λ). Gaya aerodinamis yang dihasilkan dapat dipecahkan menjadi komponen gaya normal (F_N) yang penting dalam pertimbangan struktural dan komponen gaya tangensial (F_T) yang menentukan kinerja yang dicapai oleh VAWT.



Gambar 2. 8 Vektor gaya dan kecepatan pada VAWT Darrieus (Nur Fridayana et al., 2018)

Kinerja aerodinamik VAWT sangat bergantung pada *tip speed ratio*. TSR dapat menentukan nilai dari sudut serang (*angle of attack*) dan kecepatan relatif udara yang menerjang sudu. Pada *tip speed ratio* tinggi nilai maksimum sudut serang yang dicapai rendah .

2.1.5. Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah suatu metode numerik yang biasa digunakan dalam bidang mekanika fluida. Metode ini muncul sekitar tahun 1970 dengan mengkombinasikan permasalahan fisik, perhitungan numerik dan ilmu komputer. Prinsip kerja dari CFD adalah melakukan diskritisasi untuk melakukan penyelesaian numerik dalam volume atur yang lebih kecil. Setiap volume atur tersebut diselesaikan secara iteratif dengan menyelesaikan persamaan pengaturnya yang meliputi hukum konservasi massa, momentum dan energi. Perhitungan secara diskrit tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat keras maupun lunak komputer dengan harapan dapat menyelesaikan permasalahan sesuai dengan kondisi fisiknya (Nur Fridayana et al., 2018)

Sistem analisis CFD terbagi oleh 3 tahap sebagai berikut :

1. *Pre-processor*

Merupakan bagian awal untuk pemodelan matematis dari suatu fenomena fisik fluida ke sebuah program CFD melalui pembuatan geometri, domain, diskritisasi volume atur hingga menentukan lapisan batasnya (*Boundary*).

2. *Solver*

Merupakan bagian utama dari sebuah kegiatan CFD yaitu melakukan perhitungan secara numerik dengan menggunakan algoritma tertentu. Perhitungan yang dilakukan secara iteratif untuk mencapai suatu keadaan yang konvergen sesuai kriteria residual yang diberikan.

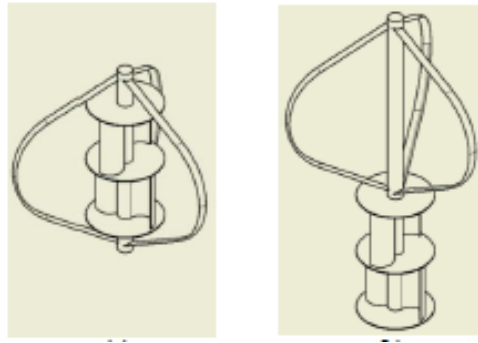
3. *Post-processor*

Hasil simulasi CFD adalah berupa variable-variabel yang memiliki nilai pada titik tertentu. Agar dapat dipahami dengan mudah maka perlu dilakukan olah data dalam bentuk kontur, grafik ataupun tabel-tabel yang diinginkan.

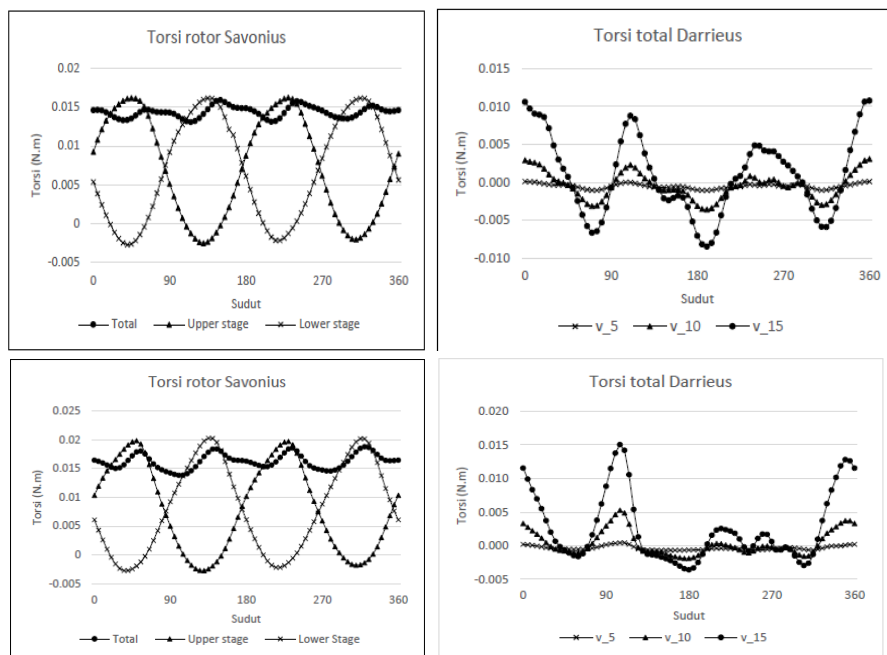
2.2. Tinjauan Pustaka

2.2.1. Yanuarshyah (2017)

Yanuarshyah (2017) melakukan studi eksperimen pada *Vertical Axis Wind Turbin* dengan tipe Savonius *dual-stage* dengan Darrieus tipe *eggbeater* sejumlah tiga sudu dikombinasikan dengan tipe Savonius *dual stage* sejumlah dua sudu untuk masing-masing *stage*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pola aliran dan bangkitan daya yang mampu dihasilkan oleh turbin angin serta pengaruh peletakan rotor savonius pada performa turbin angin.

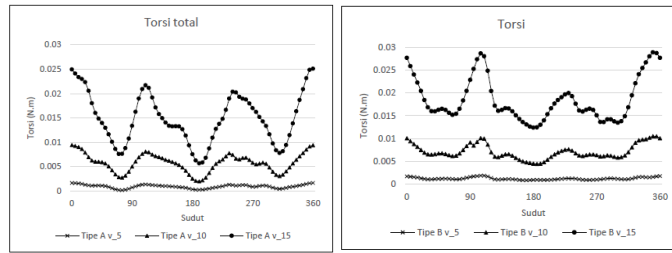


Gambar 2. 9 Layout Turbin Angin Darrieus Savonius(Yanuarshyah 2017)



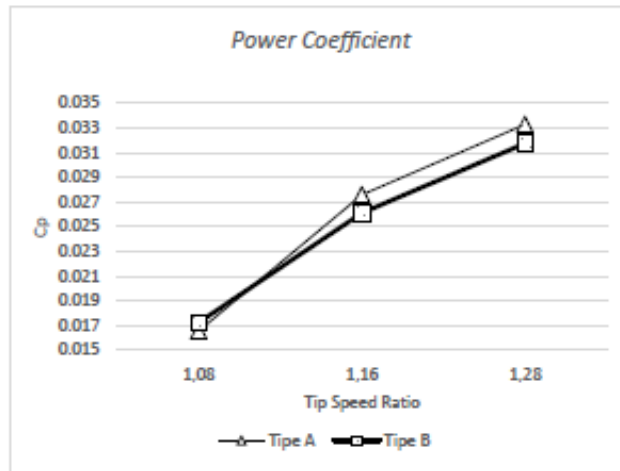
Gambar 2. 10 Grafik hubungan antara torsi turbin angin terhadap sudut azimuth pada turbin Savonius dan Darrieus dengan Konfigurasi A dan B

Gambar 2.10 menunjukkan konfigurasi dari turbin angin dengan peletakan turbin angin tipe Savonius dan Darrieus berada pada sumbu aksial yang sama. Terdapat dua jenis konfigurasi yang akan digunakan untuk penelitian. Konfigurasi yang pertama yaitu peletakan turbin angin Savonius diletakkan di tengah turbin angin Darrieus sehingga seolah-olah turbin angin Savonius berada di dalam turbin angin Darrieus. Konfigurasi yang kedua yaitu peletakan turbin angin savonius diatas turbin darrieus. Keuntungan yang didapatkan dari konfigurasi turbin angin ini adalah dapat mengkonversi berbagai macam aliran angin dan yang datang dari arah manapun. Turbin angin Darrieus-Savonius konfigurasi pertama memiliki tinggi 226 mm dan diameter savonius 75 mm serta darrieus 234 mm. Turbin angin Darrieus-Savonius konfigurasi kedua memiliki tinggi 374 mm dan diameter savonius 75 mm serta darrieus 234 mm (Yanuarsyah, 2017).



Gambar 2. 11 Hasil torsi total untuk satu putaran turbin A dan B

Gambar 2.11 menunjukkan grafik hubungan torsi turbin angin dibandingkan dengan sudut azimuth yang terekam melalui simulasi turbin angin Darrieus-Savonius. Seiring bertambahnya kecepatan angin maka torsi rata-rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus semakin meningkat. Pada kecepatan 5 dan 10 m/s turbin angin Darrieus menghasilkan torsi bernilai negatif yang berarti menghambat putaran turbin angin. Hal ini dikarenakan pada dasarnya turbin angin Darrieus mampu bekerja pada putaran tinggi. Sedangkan pada kecepatan 15 m/s torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus bernilai positif sehingga menambah daya putar yang dihasilkan oleh turbin angin. Torsi negatif terjadi ketika gaya resultan yang bekerja pada sudu-sudu Darrieus bekerja pada arah berlawanan dari arah putaran turbin angin. Akibat adanya momentum yang menyebabkan semakin tinggi kecepatan angin maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan semakin naik kecepatan angin maka semakin naik momentum dan menghasilkan torsi yang lebih tinggi.



Gambar 2. 12 Grafik hubungan antara C_p turbin angin terhadap Tip Speed Ratio Yanuarshyah (2017)

Gambar 2.12 Tren grafik turbin angin tipe A dari penelitian Wakui et. al. selalu di atas daripada tipe B yang berarti tipe A lebih baik daripada tipe B. Sedangkan tren grafik yang didapatkan dari penelitian ini terdapat perbedaan yaitu pada *tip speed ratio* sebesar 1,08. koefisien daya yang dimiliki oleh turbin angin tipe B lebih baik daripada tipe A sedangkan pada *tip speed ratio* 1,16 dan 1,28 koefisien daya tipe A lebih baik daripada tipe B yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Wakui et. Al.

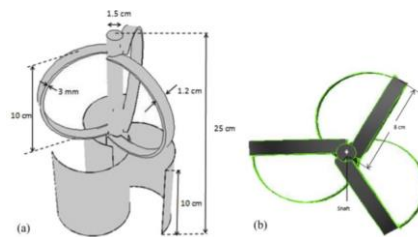
2.2.2. Ghosh et. al. (2015)

Penelitian tahun 2015 yang dilakukan oleh Ghosh e.al. menggunakan studi numerik dengan *software* Fluent 6.0 pada turbin angin Savonius berjumlah tiga sudu yang

dikombinasikan dengan Darrieus berjumlah tiga sudu. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan hasil studi numerik terhadap hasil studi eksperimen pada permodelan turbin angin serupa yang sebelumnya dilakukan oleh Gusta et. al. 2006.

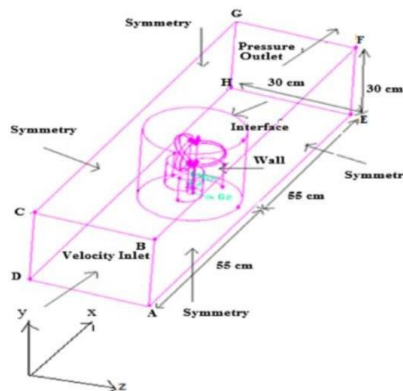
Konstruksi dari turbin angin tersebut adalah turbin Darrieus diletakkan di atas turbin angin Savonius. Pada penelitian ini parameter yang divariasikan adalah nilai *overlap ratio* dari turbin angin tipe Savonius. *Overlap ratio* didefinisikan sebagai jarak dari sisi terdalam dari sudu turbin angin Savonius hingga titik pusat rotasi. Variasi *overlap ratio* yang digunakan adalah 16,2% - 25%. yang didapatkan dengan mengubah diameter keseluruhan dari rotor turbin angin Savonius.

Turbin angin Darrieus memiliki panjang chord sebesar 1,2 cm, *chord width* 3 mm, serta tinggi keseluruhan 10 cm. Sedangkan turbin angin Savonius memiliki tebal sudu 3 mm, jari-jari sudu 8 cm, dan tinggi keseluruhan 10 cm.

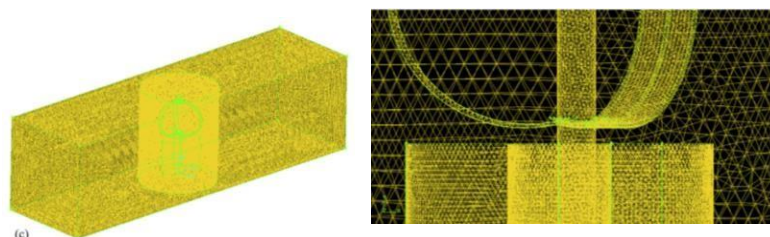


Gambar 2. 13 Geometri turbin angin Darrieus-Savonius. (Ghosh et. al. 2015).

Desain dari turbin ini ditunjukkan pada Gambar 2.13. *Domain* dan *boundary conditions* dari permodelan ditunjukkan pada Gambar 2.14.

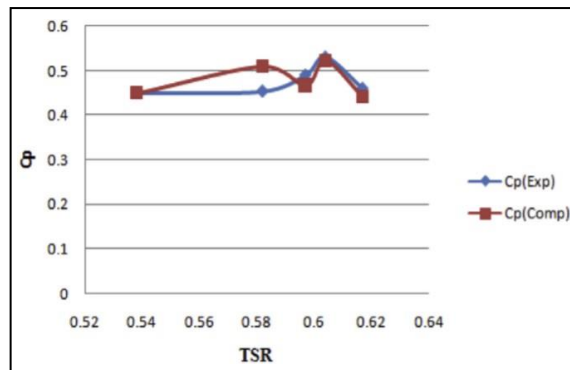


Gambar 2. 14 Domain dan boundary conditions turbin angin

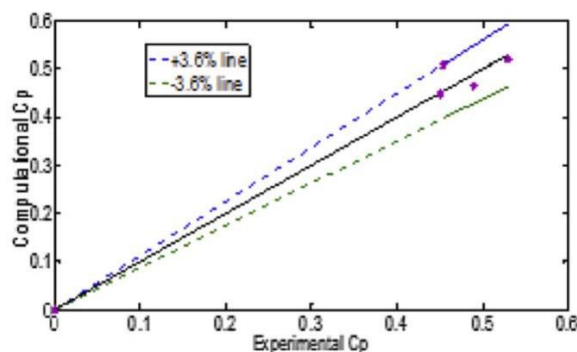


Gambar 2. 15 Meshing untuk simulasi permodelan. (b) Meshing di sekitar turbin angin untuk simulasi permodelan. (Ghosh et. al. 2015).

Tipe *mesh* yang digunakan adalah *grid* dengan total 2.728.017 *nodes*. Permodelan disimulasikan dengan *realizable k-ε turbulence model* dengan kondisi *steady state incompressible flow*. Dari simulasi ini didapatkan grafik hubungan antara C_p dengan *tip speed ratio* dan dibandingkan dengan hasil pada studi eksperimen. Grafik perbandingan C_p dengan TSR antara studi numerik dengan studi eksperimen untuk permodelan dengan variasi *overlap ratio* sebesar 16,8% dapat dilihat pada Gambar 2.15. Grafik perbandingan C_p antara studi numerik dengan studi eksperimen dapat dilihat pada Gambar 2.16. Dari kedua grafik tersebut dapat dilihat terdapat perbedaan antara hasil yang didapatkan dari studi numerik dan yang didapatkan dari studi eksperimen.



Gambar 2. 16 Grafik perbandingan C_p dengan TSR untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi overlap ratio 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).



Gambar 2. 17 Grafik perbandingan C_p hasil studi numerik dengan C_p hasil studi eksperimen untuk turbin angin Darrieus-Savonius dengan variasi overlap ratio 16,8%. (Ghosh et. al. 2015).

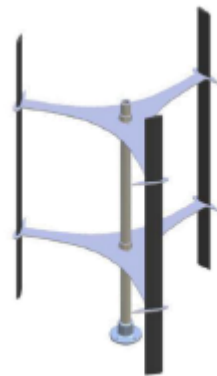
2.2.3. Fridayana (2018)

Fridayana melakukan penelitian dengan simulasi terhadap turbin angin Darrieus. Dimana penelitian tersebut dilakukan dengan simulasi dan eksperimen sekunder yang akan dibandingkan datanya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi profil airfoil, sudut *pitch*, radius turbin (R) dan lebar *chord* (c) pada turbin angin *Darrieus* Tipe *H-Rotor* terhadap performa Aerodinamiknya. Konstruksi turbin terdiri dari 3 bilah turbin darrieus tipe H. Dengan spesifikasi turbin darrieus sebagai berikut :

Tabel 2. 2 Dimensi dari model turbin

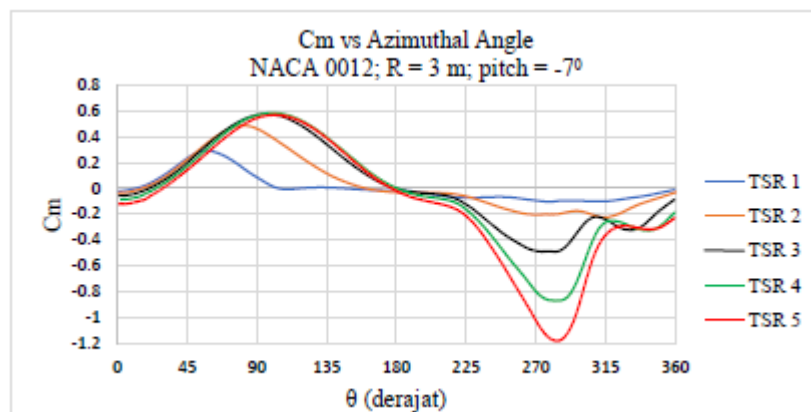
D_{rotor} [mm]	1030
H_{rotor} [mm]	1414
n [-]	3
Profil Airfoil	NACA 0021
A_s [m ²]	1,45642
Chord length (c) [mm]	85,8

Berdasarkan spesifikasi yang dimiliki, maka desain visual dari turbin tersebut dapat dilakukan dan berikut merupakan desain dari turbin:



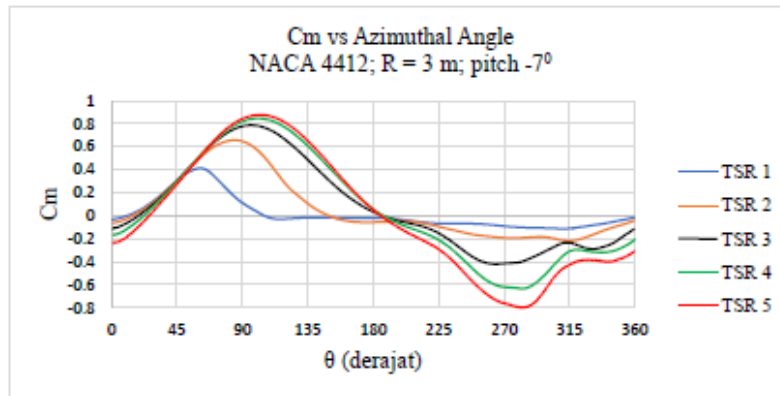
Gambar 2. 18 Layout Model Uji VAWT Darrieus Tipe H-Rotor [18]

Penelitian eksperimen ini membandingkan penelitian yang sebelumnya dengan penelitian yang dilakukan sekarang. Variasi yang dilakukan juga terdapat perubahan radius pada turbin. Berikut merupakan data simulasi ke 5 dan ke 6 dari penelitian tersebut :



Gambar 2. 19 Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-5

Pemberian sudut *pitch* sebesar 7 derajat pada airfoil simetri NACA 0012 tidak memberikan keuntungan. Nilai maksimum C_m relatif sama dengan tanpa adanya sudut *pitch* pada TSR rendah. Terlebih secara keseluruhan memberikan negatif C_m yang sangat besar (Nur Fridayana et al., 2018).



Gambar 2. 20 Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-6

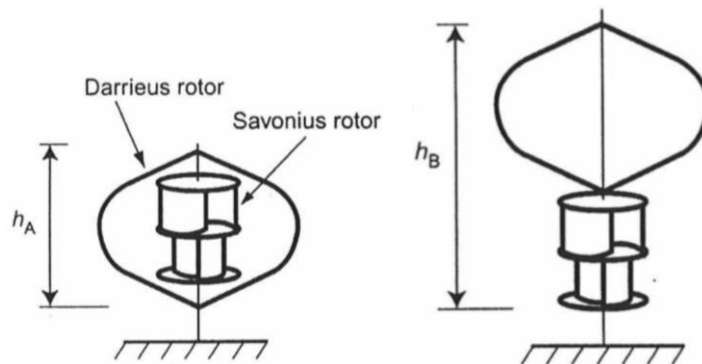
Pemberian sudut *pitch* pada NACA 4412 memberikan keuntungan pada TSR rendah. Namun menjadi kerugian yang patut dipertimbangkan pada $TSR = 3$ keatas karena menghasilkan C_m negatif yang besar.

2.2.4. Wakui et. al. (2014)

Pada tahun 2014 Wakui et. al. Melakukan penelitian dengan dua tipe turbin angin konfigurasi turbin angin Darrieus *eggbeater* dengan Savonius *dual stage*. Masing-masing diberi tipe A dan B untuk melakukan studi numerik. Tipe A turbin angin Savonius diletakkan ditengah turbin angin Darrieus. Desain dari turbin angin *hybrid* ini menjadi sulit dikarenakan beban yang diterima oleh Savonius yang dihasilkan oleh Darrieus pada koefisien daya maksimum, dan Darrieus menerima efek *wake* dari Savonius. Sedangkan tipe B turbin angin Darrieus diletakkan di atas turbin angin Savonius. Data konfigurasi turbin angin ditampilkan pada tabel 2.2.

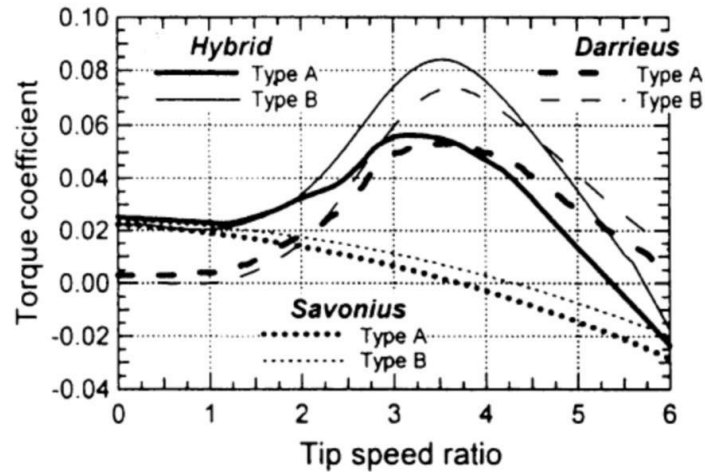
Tabel 2. 3 Data Konfigurasi Turbin Angin (Wakui T et. al. 2014).

Item		Type A	Type B
Rated power output	kW	0.3	0.45
Rated wind speed	m/s	10	10
Darrieus rotor diameter	m	2.0	2.0
Savonius rotor diameter	m	0.6	0.6
Rotor height	m	1.6	2.8
Rotational inertia	kgm ²	2.80	3.05

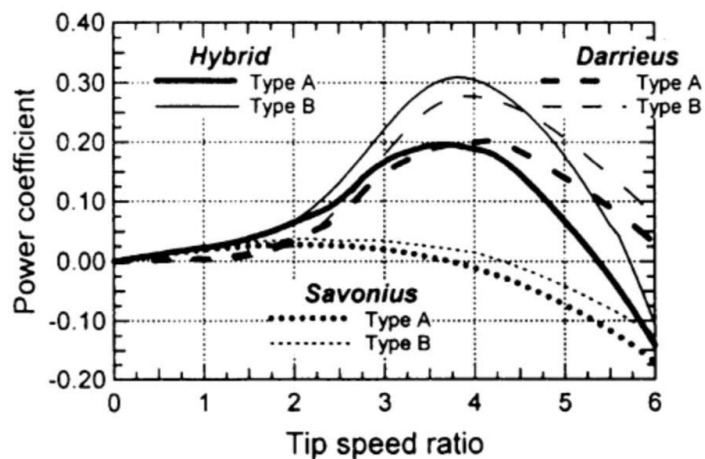


Gambar 2. 21 (a) Turbin angin tipe A. (b) Turbin angin tipe B. (Wakui T et. al. 2014).

Koefisien tertinggi pada turbin tipe A sebesar 0,204 pada *tip speed ratio* sebesar 3,51. Dikarenakan adanya *wake effects* oleh turbin angin Savonius, pada daerah *tip speed ratio* tinggi konfigurasi tipe A ini lebih buruk jika dibandingkan dengan turbin angin Darrieus. Namun lebih baik pada *tip speed ratio* yang rendah (Wakui et al., 2005).



Gambar 2. 22 Grafik perbandingan koefisien torsi terhadap tip speed ratio. (Wakui T et. al. 2014).



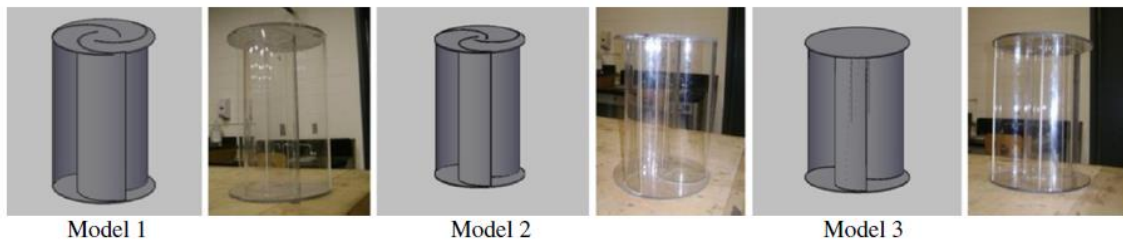
Gambar 2. 23 Grafik perbandingan koefisien daya terhadap tip speed ratio. (Wakui T et. al. 2014).

Koefisien daya tipe B lebih besar yaitu 0,231 pada *tip speed ratio* sebesar 3,76. Turbin angin tipe B ini memiliki skala model yang lebih besar jika dibandingkan dengan tipe B. Dikarenakan turbin angin tipe B memiliki skala yang lebih besar jika dibandingkan dengan tipe A, hal ini menjadikan tipe A lebih kokoh dalam konstruksi. Turbin angin tipe B tidak menghasilkan performa yang bagus jika digunakan dalam skala yang besar. Sehingga dikarenakan konfigurasi tipe A memiliki performa turbin yang baik dan kekokohan konstruksi, maka Wakui T et. al. menyarankan untuk menggunakan turbin angin tipe A daripada tipe B.

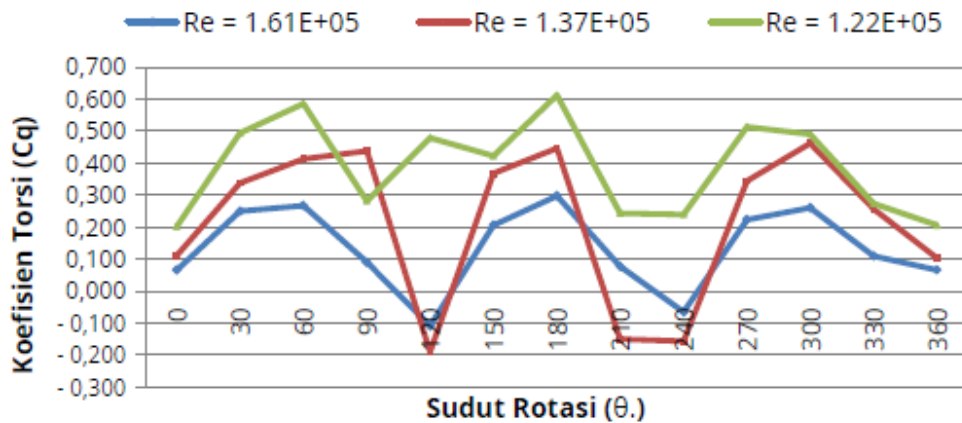
2.2.5. Morshed.et.al (2013)

Pada tahun 2013 Morshed menyelidiki secara eksperimental dan komutasi numerik untuk meneliti peningkatan kinerja turbin angin savonius sumbu vertikal mengembangkan dua tipe

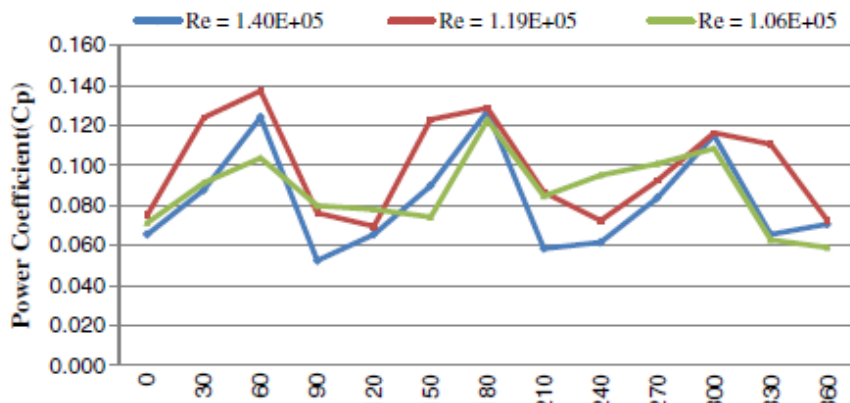
turbin angin konfigurasi turbin angin Darrieus *eggbeater* dengan Savonius *dual-stage*. Penulis pertama kali melakukan serangkaian penyelidikan terowongan angin pada model skala rotor Savonius tiga bilah semi-silinder dengan rasio overlap yang berbeda dan tanpa overlap. Eksperimen ini dilakukan di depan terowongan angin subsonik berkecepatan rendah pada bilangan Reynold yang berbeda. Tekanan di sekitar permukaan cekung dan cembung setiap sudu, serta torsi statis untuk model rotor diukur. Dengan menggunakan data eksperimen ini, penulis menghitung karakteristik aerodinamis seperti koefisien drag, koefisien torsi statis, dan koefisien daya. Penulis kemudian melakukan simulasi dinamika fluida komputasi (CFD) menggunakan perangkat lunak CFD komersial FLUENT dan GAMBIT untuk menganalisis aerodinamika rotor statis dari model tersebut. Hasil eksperimen dan komputasi kemudian dibandingkan untuk verifikasi. Tiga model yang berbeda dengan rasio tumpang tindih yang berbeda dirancang dan dibuat untuk penelitian ini untuk menemukan efek rasio tumpang tindih. Hasil dari bagian eksperimen menunjukkan adanya pengaruh yang signifikan antara overlap ratio dan bilangan Reynolds terhadap peningkatan kinerja aerodinamis turbin angin Savonius. Pada bilangan Reynold yang lebih tinggi, model turbin tanpa rasio tumpang tindih memberikan koefisien aerodinamis yang lebih baik, dan pada bilangan Reynold yang lebih rendah, model dengan rasio tumpang tindih sedang memberikan hasil yang lebih baik (Morshed et al., 2013).



Gambar 2. 24 Bentuk desain 3d dan asli dari turbin savonius



Gambar 2. 25 Koefisien Torsi terhadap sudut azimuth



Gambar 2. 26 Koefisien Power terhadap Sudut Azimuth

Koefisien torsi model turbin angin Savonius 1 dihitung untuk tiga bilangan Reynold yang berbeda. Gambar 2.25 menunjukkan koefisien torsi (C_Q) bervariasi dengan bertambahnya sudut rotasi (θ). Koefisien torsi dihitung untuk efek sudu gabungan pada setiap interval 30° dari 0° hingga 360° . Tiga bilangan Reynolds untuk model 1 adalah $1,61 \times 10^5$ (untuk kecepatan angin 9,66 m/s), $1,37 \times 10^5$ (untuk kecepatan angin 8,23 m/s), dan $1,22 \times 10^5$ (untuk kecepatan angin 7,33 m/s). Untuk setiap bilangan Reynolds, nilai koefisien torsi meningkat dari 0° menjadi 60° dan kemudian mulai menurun dari 60° menjadi 120° . Pola yang sama berulang untuk sudut rotor dari 120° hingga 210° dan dari 240° hingga 330° . Untuk bilangan Reynolds, $1,00 \times 10^5$, nilai koefisien torsi menjadi negatif pada 120° , 210° , dan 240° . Sebisanya mungkin untuk menghilangkan torsi negatif untuk semua posisi rotor, karena torsi negatif ini menyebabkan rotasi terbalik yang dapat mengurangi output daya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Variasi dan *Domain* Simulasi

3.1.1. Variasi

Permodelan pada penelitian ini dilakukan dengan 2 tahap yaitu studi numerik dan studi eksperimen. Penelitian dengan metode numerik ini dilakukan menggunakan *software* Ansys 2018. Variasi studi numerik yang dilakukan adalah besar kecepatan angin yang diberikan, kemudian di validasi dengan rancang bangun serta studi eksperimen. Studi numerik memiliki tiga tahapan utama yaitu *Pre Processing*, *Processing*, dan *Post Processing*. Variasi permodelan studi numerik ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

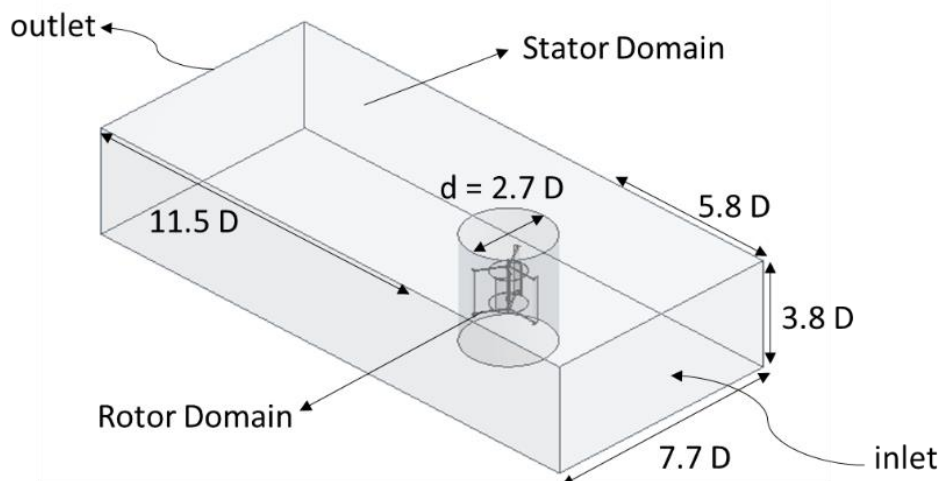
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Kec. angin	RPM	Rad/s	TSR	Time Step
3	198	21	3.6	0.012460
4	272	28	3.7	0.009345
5	349	37	3.8	0.007072
6	430	45	3.9	0.005815
7	514	54	4	0.004846
8	602	63	4.1	0.004153
9	694	73	4.2	0.003584

Data yang digunakan untuk TSR pada turbin diadaptasi dari grafik teori *betz limit* dan berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu.

3.1.2. *Domain* Simulasi

Untuk *domain* pada simulasi ini terdapat dua domain section, yaitu *domain* tetap (*static domain*) dan *domain* berputar (*rotating domain*). *Domain* berputar adalah *domain* yang terletak disekitar turbin dan berbentuk silinder. *Domain* ini berfungsi menjadi bagian dari *rotating motion* yang bertujuan untuk meneliti aliran udara yang berada disekitar turbin yang berputar pada *time step* tertentu. *Domain* tetap adalah *domain* terluar yang dilewati oleh fluida. *Domain* tidak bergerak dan berbentuk balok.



Gambar 3. 1 Skema domain pada simulasi turbin savonius dan darrieus

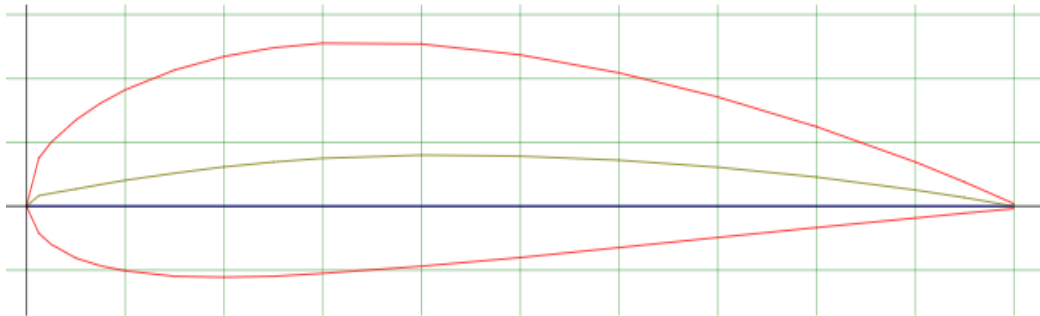
3.2. Pelaksanaan Simulasi Ansys

3.2.1. Persiapan Simulasi

Tahap *Pre-processing* bertujuan untuk membuat model geometri dan *computational domain* yang merepresentasikan suatu masalah fisik. Langkah-langkah yang dikerjakan pada tahap ini yaitu:

1. Mendapatkan koordinat airfoil.

Airfoil adalah komponen yang sangat penting dalam simulasi ini, untuk itu diperlukan ketelitian yang tinggi. Pada simulasi awal digunakan airfoil simetris NACA 4418 dimana koordinat airfoil tersebut digenerasi menggunakan website airfoiltools.com

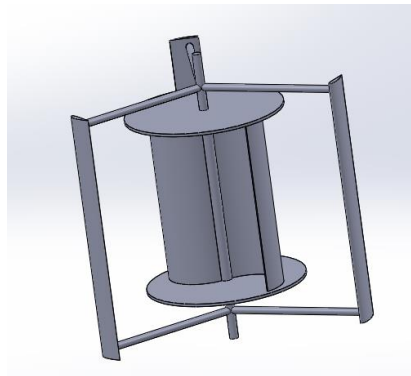
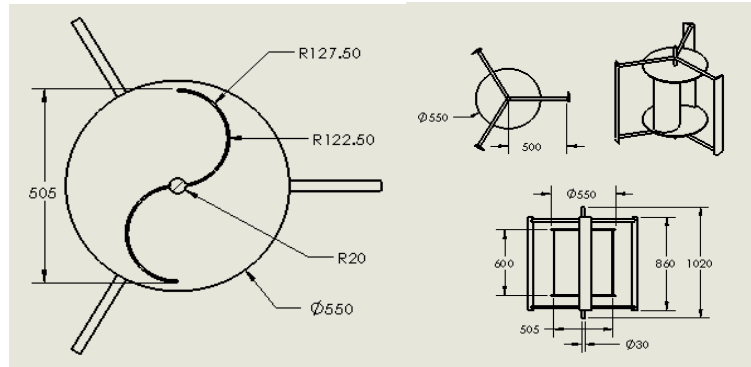


Gambar 3. 2 Koordinat Airfoil dari Website Resmi NASA

Dalam Pemilihan seri NACA mempertimbangkan gaya lift dan drag yang dihasilkan. Untuk gaya lift ini dapat disebabkan oleh besarnya *thickness* yang dimiliki oleh airfoil. Semakin besar *thickness* yang dimiliki, maka koefisien lift akan semakin besar sehingga gaya lift yang dihasilkan akan lebih besar. Namun semakin besar *thickness* akan menghasilkan gaya drag yang lebih besar. (Zhang et al., 2014). Sehingga dalam pemilihannya dibutuhkan *thickness* yang tidak terlalu besar dengan mempertimbangkan agar gaya drag yang dihasilkan bernilai kecil ketika digunakan pada kecepatan angin yang tidak terlalu besar.

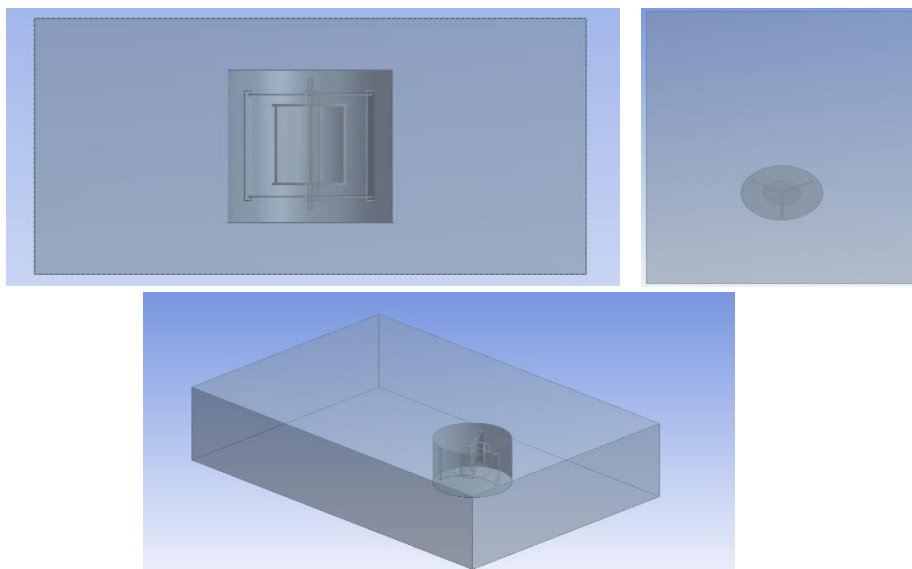
2. Membuat geometri pada ANSYS *Design Modeler*

Tujuan dari pembuatan geometri ini adalah untuk membuat model matematis yang dapat merepresentasikan bentuk fisik dari VAWT *Savonius & Darrieus* tipe *H-Rotor*. Selain meng-*import* koordinat airfoil juga dibuat geometri turbin tiga dimensi sesuai ukuran yang direncanakan. Selain itu juga dilakukan pembuatan berbagai macam domain yang terdiri dari domain fluida, domain area rotasi, domain stasioner dan domain area *blade*.



Gambar 3. 3 Skema model dari gabungan turbine savonius dan darrieus

Dalam tahap ini, dibuat model dari turbin angin sumbu vertikal yang akan dipakai dalam perhitungan numerik. Pembuatan geometri ini juga menyangkut pembuatan domain disekitar model yang akan dipakai. Gambar model turbin angin sumbu vertikal yang dipakai pada penelitian ini terdapat pada Gambar 3.1. Diameter rotor Darrieus ($D = 1040$ mm), panjang Chord dari airfoil rotor Darrieus yang dipakai adalah 100 mm dan profilnya mengikuti profil airfoil NACA 4418. Sementara itu diameter dari rotor savonius 505 mm.

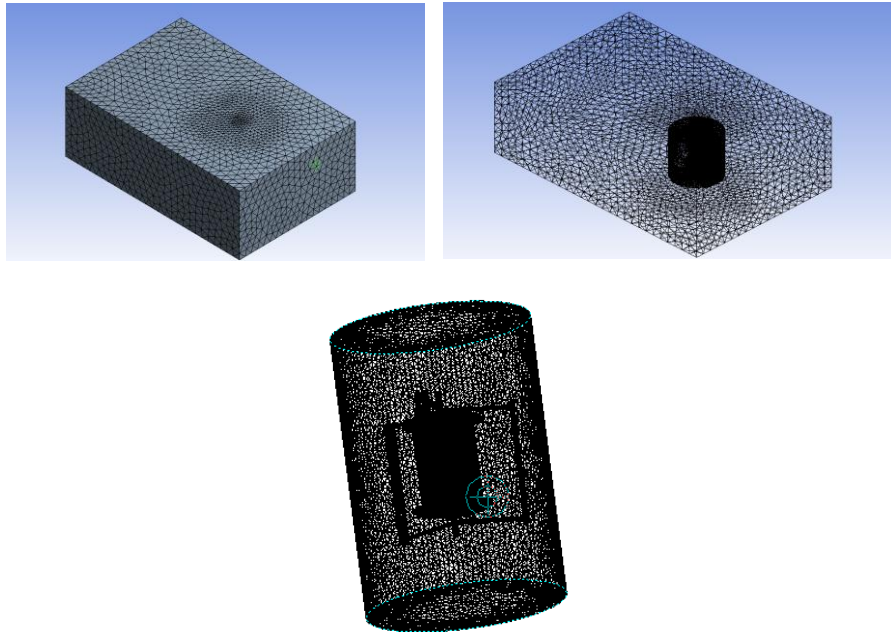


Gambar 3. 4 Geometri Turbine Savonius & Darrieus

3. Meshing

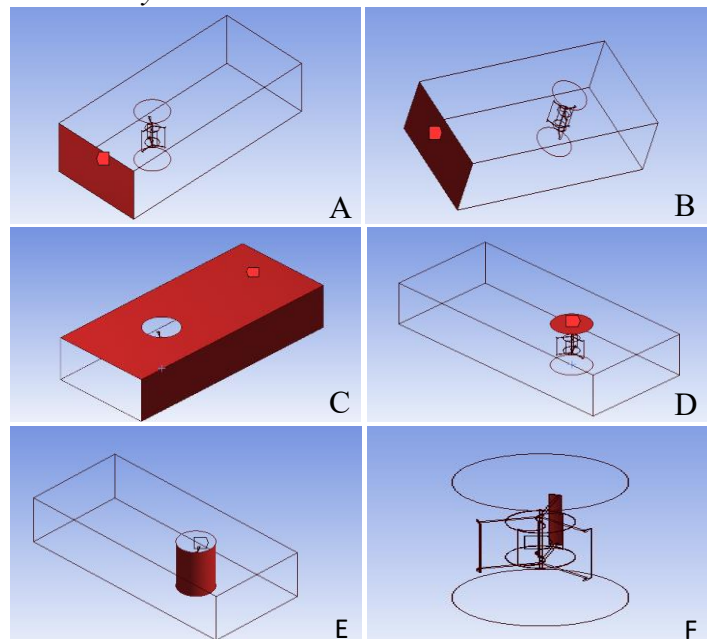
Proses *meshing* sangat berperan dalam berjalanya simulasi. Secara umum semakin banyak jumlah *mesh* maka tingkat akurasi semakin tinggi namun mengakibatkan waktu komputasi yang lama. Dalam simulasi ini struktur yang digunakan adalah *unstructured mesh* dengan metode *meshing tetrahedrons*. *Mesh* diatur agar area rotasi lebih padat dan halus dari area fluida, begitu juga area *blade* dibuat agar lebih padat dari area yang lain. Dengan jumlah meshing yang dimiliki sebagai berikut :

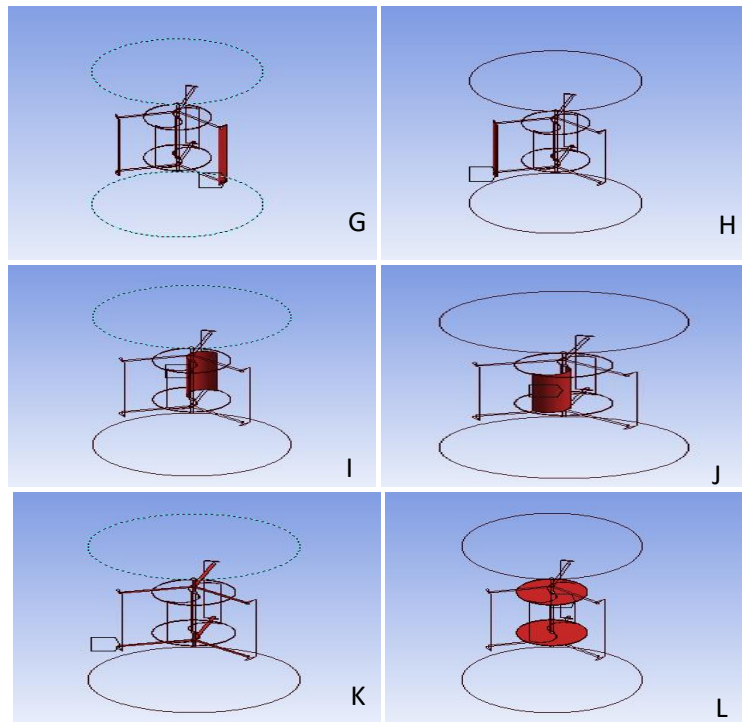
1. Element Meshing: 7696255
2. Nodes Meshing: 1602147



Gambar 3. 5 Hasil meshing keseluruhan domain

4. Penamaan *boundary conditions*





Gambar 3. 6 Penamaan setiap section yang ada pada simulasi

Setiap bagian dari turbine diberikan name selection yang berfungsi untuk memperkenalkan bagian-bagian yang ada pada turbine kepada software yang akan digunakan untuk simulasi. Berdasarkan gambar 4 nama setiap bagian dari turbine diberikan sebagai berikut:

- A. Inlet
- B. Outlet
- C. Walls
- D. atasbawahrot
- E. interfacerot
- F. bladedarrieus1
- G. bladedarrieus2
- H. bladedarrieus3
- I. bladesavonius1
- J. bladesavonius2
- K. armdarrieus
- L. armsavonius

5. Solving

Pada tahap ini dilakukan idealisasi pada masalah-masalah fisik yang ada, diantaranya:

1. Fluida udara merupakan aliran *incompressible*
2. Kondisi aliran adalah transient
3. Perpindahan suhu diabaikan
4. Kecepatan angin diasumsikan arahnya merata

Kemudian dilakukan pengaturan pada *software Fluent* .:

1. Membuka *software Fluent* melalui ANSYS Workbench.

Sebelum *Fluent* dapat digunakan terlebih dulu memilih pengaturan pada tampilan *Fluent Launcher*. Yang perlu diperhatikan adalah untuk mengaktifkan opsi *Double Precision* dan *Parallel (Local Machine)*. Pada bagian *Processes* dibawah *Solver* isikan jumlah proses yang akan dijalankan dalam satu proses simulasi. Semakin banyak proses yang dapat dijalankan akan meningkatkan kecepatan komputasi namun hal tersebut harus sesuai dengan kemampuan *hardware* yang digunakan. Pada simulasi ini diberikan jumlah proses yaitu 2 dan selanjutnya *Fluent* secara otomatis akan membaca file mesh yg telah dibuat.

2. Mendefinisikan pengaturan *General* dan *Models*.

Pelaksanaan simulasi ini memodelkan suatu aliran dengan nilai *Mach Number* yang rendah sehingga digunakan tipe *Pressure-based*. Sedangkan untuk kondisi aliran *supersonic* menggunakan *Density- Based. Viscous model* yang digunakan yaitu *k-omega (2-eqn)*, komputasi dengan model turbulensi ini tergolong lama karena terdiri dari dua persamaan *k* untuk transport energi kinetik turbulen dan ϵ merupakan variabel dari laju *dissipation* energi turbulen. Persamaan ini memberikan hasil yang lebih akurat untuk kasus aliran yang berotasi dan melibatkan separasi aliran. Lebih lengkapnya pengaturan diisi dengan konfigurasi sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Tabel General dan Models

<i>Solver</i>	<i>Type</i>	<i>Pressure-based</i>
	<i>Time</i>	<i>Transient</i>
	<i>Velocity formulation</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Gravity Acceleration (Y)</i>	-9.81 m/s^2
<i>Viscous</i>	<i>Viscous model</i>	<i>k-omega (2 equations)</i>
	<i>k-omega model</i>	<i>SST</i>
	<i>Model Constants</i>	<i>Defaults</i>

3. Memberikan nilai properti pada *Materials*

Tabel 3. 3 Properti Udara

<i>Properties</i>	<i>Method</i>
<i>Density (ρ) (kg/m³)</i>	<i>Constant (1,225)</i>
<i>Viscosity (ν) (kg/m-s)</i>	<i>Constant (0,000017894)</i>

4. Menentukan *Cell Zone Conditions*

Pada kolom *cell zone conditions*, setiap variasi kecepatan angin berbeda beda yaitu menyesuaikan urutan variasi kecepatan angin mulai dari kecepatan

angin 3,4,5,6,7,8,9 m/s. Urutan kecepatan sudut nya sesuai dengan input dari TSR.

Tabel 3. 4 Data Konfigurasi Cell Zone

<i>Stator Domain</i>		
<i>Material Name</i>	Air (udara)	
<i>Frame Motion</i>	Off	
<i>Rotor Domain</i>		
<i>Material Name</i>	Air (udara)	
<i>Mesh Motion</i>	On	
	<i>Relative To Cell Zone</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Rotation-Axis Direction</i>	
	X (m) :	0
	Y (m) :	1
	<i>Rotational Velocity</i>	Sesuai Variasi
<i>statione r area</i>		
<i>Material Name</i>	Air (udara)	

5. Menentukan data *Boundary Conditions*

Pada simulasi ini terdapat beberapa *boundary conditions* yang digunakan yaitu *velocity inlet*, *pressure outlet* dan *wall boundary condition*. *Velocity inlet* diatur sesuai kondisi uji coba *prototype* diatas Gedung teknik mesin dimana kecepatan angin datang memiliki *velocity magnitude* 3-9 m/s Sedangkan *Turbulent Method* dipilih *Intensity and Viscosity Ratio*.

Tabel 3. 5 Data Inlet Boundary Conditions

<i>Velocity Inlet</i>		
<i>Momentum</i>	<i>Velocity Specification Method</i>	<i>Magnitude, Normal to Boundary</i>
	<i>Reference Frame</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Velocity Magnitude (m/s)</i>	3,4,5,6,7,8,9
	<i>Pressure (Pascal)</i>	0

<i>Turbulence</i>	- <i>Specification Method</i>	<i>Intensity and Viscosity Ratio</i>
	- <i>Turbulent Intensity (%)</i>	5
	- <i>Turbulent Viscosity Ratio</i>	10

Table 3. 6 Data Outlet Boundary Conditions

<i>Outlet</i>		
<i>Pressure-outlet</i>	<i>Backflow Reference Fame</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Gauge Pressure (Pascal)</i>	0
	<i>Backflow Direction Specification Method</i>	Normal To Boundary
	<i>Backflow Pressure Specification</i>	Total Pressure
<i>Turbulence</i>	- <i>Specification Method</i>	<i>Intensity and Viscosity Ratio</i>
	- <i>Turbulent Intensity (%)</i>	5
	- <i>Turbulent Viscosity Ratio</i>	10

Table 3. 7 Data ArmDarrieus Bondary Conditions

<i>ArmDarrieus</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>ArmDarrieus</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 8 Data Arm Savonius Boundary Conditions

<i>ArmSavonius</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>ArmSavnius</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 9 Data AtasBawahRot Boundary Conditions

<i>AtasBawahRot</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>AtasBawahRot</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 10 Data BladeDarrieus1 Boundary Conditions

<i>BladeDarrieus1</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>BladeDarrieus1</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 11 Data BladeDarrieus2 Boundary Conditions

<i>BladeDarrieus2</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>BladeDarrieus2</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 12 Data BladeDarrieus3 Boundary Conditions

<i>BladeDarrieus3</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>BladeDarrieus3</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 13 Data BladeSavonius1 Boundary Conditions

<i>BladeSavonius1</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>BladeSavonius1</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 14 Data Blade Savonius2 Boundary Conditions

<i>BladeSavonius2</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
	<i>Rotational</i>	<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>BladeSavonius2</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

6. Pendefinisian *Mesh Interface*

Mesh interface ini berfungsi untuk menjembatani antara dua tau lebih *interface* yang berbeda. Dimana masing-masing *interface* dibentuk oleh *cell zone* yang terpisah. Pembuatan *mesh interface* dimulai dengan membentuk *contact region* yang kemudian didefinisikan *cell zone* mana yang saling berinteraksi.

7. Pendefinisian *Solution Methods*

Pemilihan *Solution Methods* akan memberikan perintah kepada *Fluent* bagai mana algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan numerik. Pada kasus model VAWT 2-dimensi, pemilihan *Solution Methods* tidak memberikan perbedaan hasil koefisien momen yang signifikan . Pada simulasi kali ini penyelesaian dan diskritisasi yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 3. 15 Data Solution Methods

<i>Pressure-Velocity</i>	<i>Scheme</i>	<i>SIMPLE</i>
<i>Spatial Discretization</i>	<i>Gradient</i>	Least Squares Cell Based (default)
	<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
	<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>First Order Upwind</i>

8. Pengaturan *Residual Monitor*

Iterasi dikatakan konvergen bila nilai residual berada dibawah maksimum eror yang diijinkan. Bila konvergensi sudah terjadi maka iterasi dihentikan lalu melanjutkan komputasi pada *time step selanjutnya*.

Pemberian nilai toleransi eror yang semakin kecil menjadikan waktu komputasi tiap *time step* menjadi lama dengan ekspektasi hasil yang didapatkan semakin baik.

Oleh karenanya perlu diberikan nilai kriteria konvergensi secara bijak. Pada simulasi ini, nilai kriteria residual ditunjukkan dalam Tabel 3.15 di bawah ini.

Tabel 3. 16 Kriteria Konvergen

<i>Equations</i>	<i>continuity</i>	<i>0,001</i>
	<i>x-velocity</i>	<i>0,001</i>
	<i>y-velocity</i>	<i>0,001</i>
	<i>z-velocity</i>	<i>0,001</i>
	<i>k</i>	<i>0,001</i>
	<i>epsilon</i>	<i>0,001</i>

9. Melakukan inisialisasi simulasi

Kondisi aliran yang disimulasikan dalam pekerjaan ini adalah *transient*, Namun untuk memberikan nilai kondisi awal dilakukan dengan inisialisasi berupa simulasi aliran *steady*. Tebakan awal yang digunakan untuk perhitungan adalah besaran kecepatan angin datang. Jadi pilih opsi *inlet* pada bagian *Compute From*.

Tabel 3. 17 Data Solutions Initialization

<i>Initialization Methods</i>	<i>Hybrid Initialization</i>	
<i>Compute From</i>	-	
<i>Reference Frame</i>	-	
<i>Initial Values</i>	<i>Gauge Pressure</i>	-
	<i>X Velocity (m/s)</i>	-
	<i>Y Velocity (m/s)</i>	-
	<i>Z Velocity (m/s)</i>	-
	<i>Turbulent Kinetic Energy (m²/s²)</i>	<i>Defaults (Computer calculation)</i>
	<i>Turbulent Dissipation Rate (m²/s³)</i>	<i>Defaults (Computer calculation)</i>

10. Menjalankan kalkulasi

Tahapan ini merupakan tahap terakhir dari proses komputasi. *Time step* adalah jarak waktu antar komputasi. Dimana dalam satu *time step* dapat diselesaikan dengan beberapa kali iterasi hingga mencapai nilai konvergen.

Pada simulasi ini *time step* yang diinginkan adalah waktu untuk sudu/*blade* menempuh sudut 15° . Sehingga kecepatan putar yang diinputkan akan mempengaruhi harga *time step*. Sehingga harus dihitung dengan persamaan berikut

$$\text{Time Step} = \frac{\text{Waktu per putaran}}{\text{Jumlah Frame}}$$

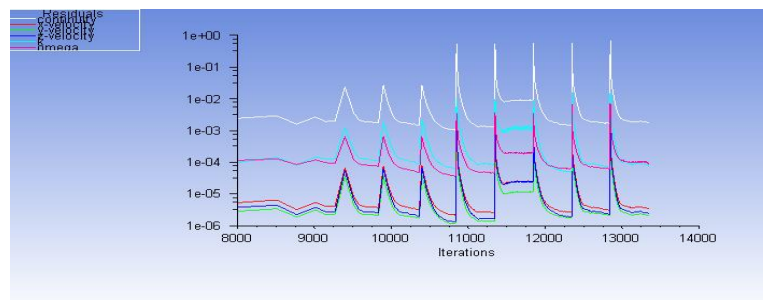
Sedangkan *Number of Step* adalah seberapa banyak *time step* yang akan dihitung. Pada simulasi ini turbin diinginkan menjalani 1 kali rotasi dengan setiap sudut tempuh 15°

$$\text{Number of Time Steps} = \frac{360}{\theta}$$

Setiap satu komputasi *time step* akan dihitung dengan beberapa kali iterasi. Harapannya banyaknya iterasi yang dilakukan mampu mencapai konvergensi sesuai kriteria yang telah ditentukan. Tetapi semakin banyak iterasi tidak menjamin kalkulasi akan mencapai konvergen. Untuk itu perlu diberikan batasan berupa banyaknya iterasi maksimum yang boleh dilakukan. Menimbang model dan *mesh* yang telah dibuat juga kriteria konvergensi yang telah ditentukan maka pada simulasi ini diberikan maksimum iterasi sebanyak 600. kalkulasi akan berhenti jika iterasi yang telah dilakukan mencapai angka 600, lalu secara otomatis akan dilanjutkan kalkulasi pada *time step* berikutnya.

11. Monitoring

Ketika simulasi berjalan bisa diamati apakah hasil komputasi sudah mengalami konvergen atau belum, apakah model yang dibuat sudah baik atau buruk juga dapat diketahui apakah penentuan nilai maksimum iterasi dan kriteria konvergensi sudah tepat. Tampilan *monitoring residual* terlihat seperti pada Gambar 3.8



Gambar 3. 7 Monitoring Residual

3.3. Alat dan Bahan Eksperimen

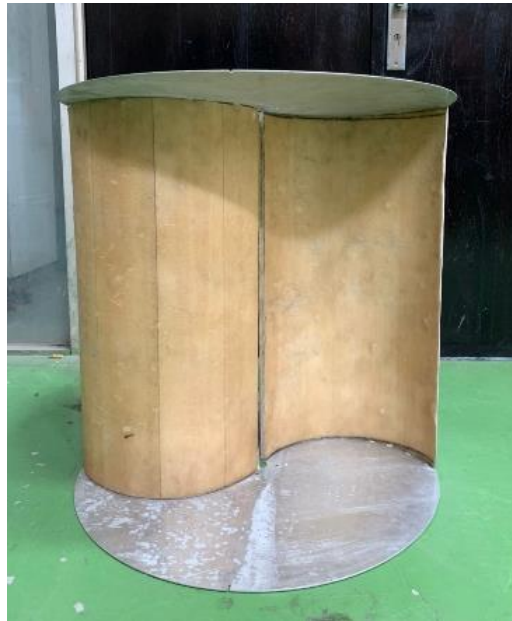
Pada penelitian ini digunakan beberapa alat dan bahan untuk menunjang pengambilan data eksperimen. Alat dan bahan tersebut antara lain sebagai berikut.

3.3.1. Turbin Savonius

Penelitian ini menggunakan turbin angin tipe Savonius 2 sudu. Berikut merupakan spesifikasi dari turbin angin Savonius yang digunakan:

- Bahan sudu turbin : Kayu Balsa dan *Glass Fiber*
- Bahan *endplate* turbin: Plat Aluminium
- Diameter sudu turbin : 255 mm
- Tinggi turbin : 600 mm
- Diameter *endplate* : 550 mm
- Tebal sudu turbin : 10 mm
- Tebal *endplate* : 1.5 mm
- Massa total turbin : 5.3 kg

Turbin angin Savonius yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.8



Gambar 3. 8 Turbin Angin Savonius

3.3.2. Turbin Darrieus

Penelitian ini juga menggunakan turbin angin tipe Darrieus H-Rotor. Berikut merupakan spesifikasi dari turbin angin Darrieus yang digunakan:

- Bahan sudu turbin : Kayu Balsa dan *Glass Fiber*
- Jenis *Airfoil* Turbin : NACA 4418
- Tinggi turbin : 860 mm
- Panjang *Chord* : 100 mm
- Massa turbin Darrieus : 2.1 kg

Turbin angin Darrieus yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9 *Turbin Angin Darrieus*

3.3.3. Poros Turbin

Penelitian ini menggunakan poros turbin yang berfungsi meneruskan torsi dan putaran yang dihasilkan oleh turbin. Untuk spesifikasi dari poros yang digunakan dapat dilihat sebagai berikut:

- Bahan *shaft* turbin : *Shaft* Pejal Aluminium Seri 6
- Panjang *shaft* turbin : 105 mm
- Diameter *shaft* turbin : 25 mm

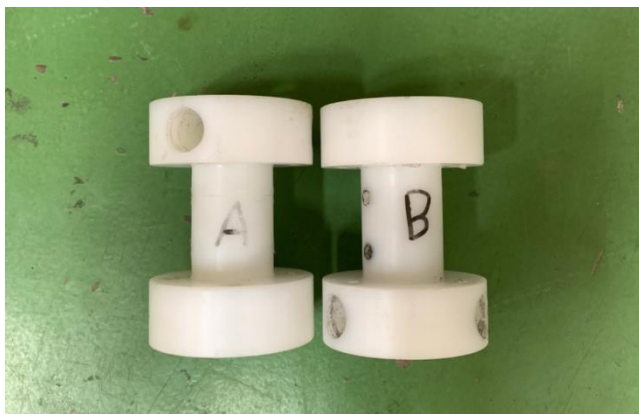
Poros turbin yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.10.



Gambar 3. 10 *Poros Turbin*

3.3.4. Dudukan Turbin

Penelitian ini menggunakan dudukan turbin yang berfungsi untuk menghubungkan turbin angin Savonius dan Darrieus ke shaft turbin. Dudukan turbin dibuat dari bahan Teflon yang kemudian dibubut sesuai desain. Dudukan turbin yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 *Dudukan Turbin*

3.3.5. Tapered Bearing

Penelitian ini menggunakan *tapered bearing* yang berfungsi sebagai bantalan *shaft* turbin dan menahan beban dari massa turbin. Jenis *tapered bearing* yang digunakan adalah *bearing* seri FAG 32305. *Tapered bearing* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3. 12 *Tapered Bearing FAG 32305*

3.3.6. Ball Bearing

Penelitian ini menggunakan *ball bearing* yang berfungsi sebagai bantalan *shaft* turbin. Jenis *ball bearing* yang digunakan adalah *bearing* seri SKF 6305/C3. *Ball bearing* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3. 13 *Ball Bearing SKF 6305/C3*

3.3.7. Rubber Coupling

Penelitian ini menggunakan *coupling* yang berfungsi sebagai penghubung antara *shaft* turbin dan *generator*. Jenis *coupling* yang digunakan adalah *coupling* seri L-075. *Coupling* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Rubber Coupling

3.3.8. Generator

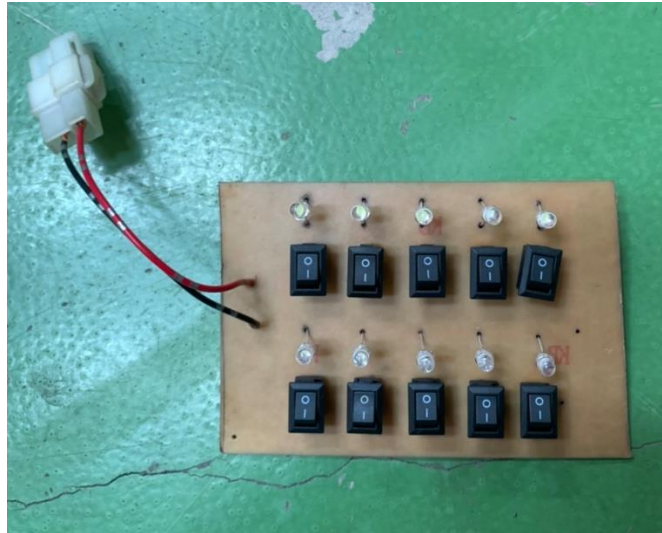
Penelitian ini menggunakan *generator* yang berfungsi sebagai penghasil listrik untuk rangkaian lampu. *Generator* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.15.



Gambar 3. 15 Generator

3.3.9. Rangkaian Lampu

Penelitian ini menggunakan rangkaian lampu yang berfungsi sebagai beban untuk turbin dan untuk mengukur daya yang dihasilkan oleh turbin. Rangkaian lampu yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Rangkaian Lampu

3.3.10. Tower Turbin

Penelitian ini menggunakan *tower* agar turbin terpasang cukup tinggi sekitar 3 m untuk mendapatkan angin. *Tower* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.17.



Gambar 3. 17 Tower Turbin

3.3.11. Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang melewati turbin. Kecepatan angin diukur dalam satuan m/s oleh *anemometer*. Pada penelitian ini digunakan *anemometer* Krisbow KW06-564 seperti gambar 3.18.



Gambar 3. 18 Anemometer

Spesifikasi *anemometer* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.19.

Tabel 3. 18 *Krisbow KW06-564 Anemometer*

Spesifikasi Krisbow KW06-564 Anemometer	
Range	0.4 – 30.00 m/s
Accuracy	±3 %, ±0.20 m/s
Resolution	0.01

3.3.12. Multimeter

Multimeter digunakan untuk mengukur voltase dan kuat arus listrik yang dihasilkan oleh *generator* yang kemudian digunakan untuk menghitung daya yang dihasilkan oleh *generator*. Pada penelitian ini digunakan *multimeter* Fluke 27-II dan Dekko DM-133T seperti gambar 3.19.



Gambar 3. 19

Spesifikasi *multimeter* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.20.

Tabel 3. 19 Spesifikasi Multimeter

	Fluke 27-II	Dekko DM-133T
Range Tegangan AC	0.1 mV – 1000 V	1 mV – 600 V
Range Tegangan DC	0.1 mV – 1000 V	0.1 mV – 600 V
Range Kuat Arus AC	0.1 μ A – 10 A	0.1 mA – 10 A

Range Kuat Arus DC	0.1 μ A – 10 A	0.1 mA – 10 A
Range Resistansi	0.1 Ω – 50 M Ω	1 Ω – 20 M Ω
Range Kapasitansi	1 nF – 9999 μ F	1 nF – 200 μ F

3.3.13. Tachometer

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putar turbin. Kecepatan putar turbin diukur dalam satuan rpm oleh *tachometer*. Pada penelitian ini digunakan *Digital Tachometer* DT6236B seperti gambar 3.20.



Gambar 3. 20

Spesifikasi *tachometer* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.21.

Tabel 3. 20 DT6236 *Digital Tachometer*

Spesifikasi DT6236B <i>Digital Tachometer</i>	
Range	5– 99999 rpm
Accuracy	\pm 0.05 %
Resolution	0.1

3.3.14. Bor

Bor digunakan untuk membuat lubang pada turbin untuk dudukan turbin. Jenis bor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.21.



Gambar 3. 21 Bor

3.3.15. Gerinda

Gerinda digunakan untuk keperluan memotong pada manufaktur turbin. Jenis gerinda yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.22.



Gambar 3. 22 Gerinda

3.3.16. Masking Tape

Masking tape digunakan untuk keperluan pengecatan dan pendempulan pada turbin. *Masking tape* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.23.



Gambar 3. 23 Masking Tape

3.3.17. Glass Fiber

Glass fiber digunakan untuk melapisi permukaan turbin agar tahan terhadap air. Jenis *fiber glass* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.24.



Gambar 3. 24 Glass Fiber

3.3.18. Resin Epoxy

Resin *epoxy* digunakan untuk memperkuat *fiber* yang ada turbin. Jenis resin *epoxy* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.25.



Gambar 3. 25 Resin Epoxy

3.3.19. Dempul

Dempul digunakan untuk memperhalus permukaan turbin agar tahan terhadap air. Jenis dempul yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.26.



Gambar 3. 26 Dempul

3.3.20. Dextone

Dextone digunakan untuk menempel turbin Darrieus dengan lengannya. Dextone yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.27.



Gambar 3. 27 Dextone

3.3.21. Lem G

Lem G digunakan untuk menempel turbin Savonius dengan *endplate*. Lem G yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.28.



Gambar 3. 28 Lem G

3.3.22. Lubricant

Lubricant digunakan untuk melumasi *bearing* agar gesekan yang terjadi dapat berkurang. *Lubricant* juga digunakan sebagai pembersih karat pada *bearing*. *Lubricant* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.29.



Gambar 3. 29 Lubricant Rexco

3.3.23. Amplas

Amplas digunakan untuk menghaluskan permukaan turbin. Amplas yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.30.



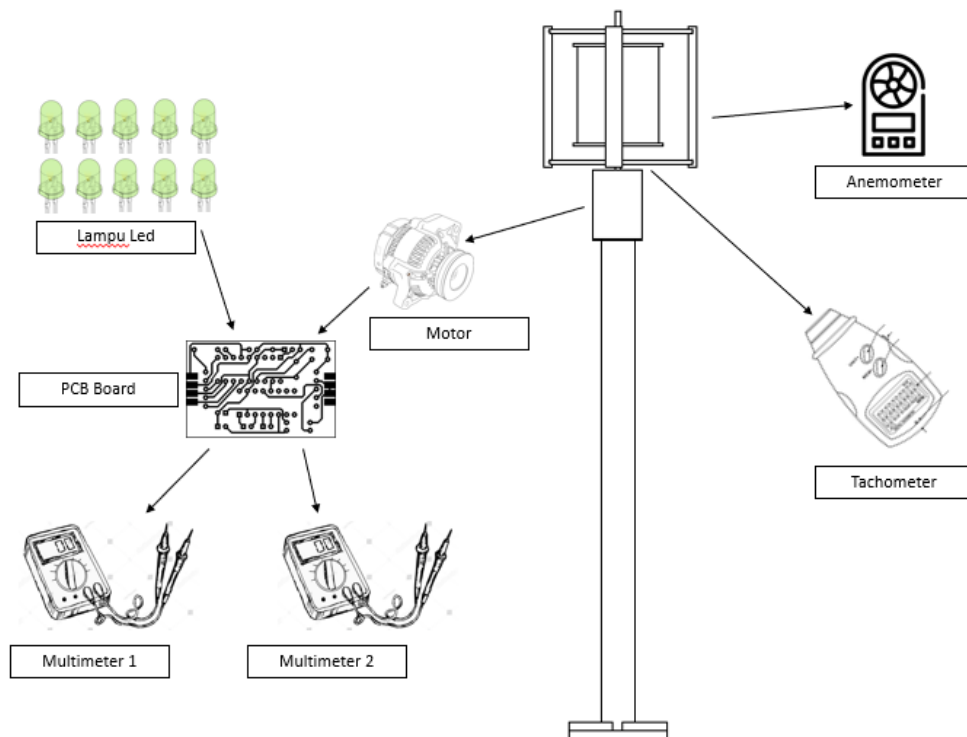
Gambar 3. 30 Amplas

3.4. Data Eksperimen

Data yang akan digunakan sebagai data validasi adalah data studi eksperimen turbin angin Savonius. Studi eksperimen akan dilakukan di gedung lantai 4 Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS dengan menggunakan variasi yang digunakan pada studi numerik. Berikut langkah-langkah dari studi eksperimen yang akan dilakukan:

1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang turbin angin Savonius pada tower turbin.
3. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer.
4. Setelah kecepatan angin stabil, kecepatan putar poros diukur dengan menggunakan tachometer.
5. Melakukan pengukuran torsi dinamis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.
6. Mengulangi langkah 3 sampai 5 pada kecepatan angin yang berbeda sesuai dengan variasi yang ditentukan.
7. Mengolah data yang diperoleh berupa kecepatan angin, kecepatan putar turbin, dan nilai torsi dinamis. Data tersebut akan diolah menjadi nilai C_p dan C_m yang kemudian akan di plot sebagai grafik sebagai fungsi tip speed ratio.

3.5. Skema Penelitian Eksperimen



Gambar 3. 31 Skema Penelitian Eksperimen

Langkah-langkah pengambilan data dengan cara eksperimen adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan alat ukur yang digunakan pada turbin savonius dan darrieus
2. Menyambungkan alat ukur berupa 2 buah multimeter pada *board* PCB, dimana *board* tersebut sudah disambungkan dengan 10 buah led yang bertujuan sebagai beban untuk turbin. Fungsi *multimeter* adalah untuk merekam nilai tegangan dan arus listrik yang keluar dari motor.

3. Kemudian Anemometer digunakan untuk menghitung kecepatan angin, dimana *anemometer* ditempatkan pada sebelah turbin dengan tidak mengganggu aliran angin yang mengenai turbin.
4. Setelah itu *tachometer* disiapkan untuk menghitung jumlah putaran turbin pada setiap waktu. *Tachometer* diletakkan untuk membaca putaran shaft, dimana shaft sudah diberikan titik referensi agar *tachometer* dapat membaca putaran shaft dengan laser.
5. Pengukuran dilakukan selama 15 menit, dengan melihat potensi kecepatan angin yang cukup besar. Dengan dilakukannya *survey*, didapat kecepatan angin yang besar pada saat siang hari pukul 12.00-14.30 dan malam hari pukul 21.00-00.00.

3.6. Contoh Perhitungan

3.6.1. Perhitungan Simulasi

3.6.1.1. Perhitungan Kecepatan Sudut

Dengan asumsi kecepatan angin $TSR = 4.5$, dan kecepatan angin turbin $v = 3$ m/s. Untuk radius turbin adalah tetap yaitu $R = 0.52$ m. Maka perhitungan menjadi berikut:

$$\gamma = \frac{\omega R}{u}$$

$$\omega = \frac{\gamma u}{R}$$

$$\omega = \frac{4.5 \times 3}{0.52} = 26 \text{ rad/s}$$

3.6.1.2. Perhitungan Time Step

Untuk merekam fenomena aliran yang terjadi tiap 5 derajatnya, maka diperlukan lah perhitungan *time step* dalam analisis aliran unsteady ini. contoh perhitungan berikut digunakan untuk merekam aliran tiap 15° pada kecepatan 6 m/s dengan kecepatan sudut 3.66 rad/s.

$$\omega = \frac{\theta - \theta_0}{\text{Waktu per putaran}}$$

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{\theta - \theta_0}{\omega}$$

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi}{3.66 \text{ rad/s}} = 1.7158 \text{ s}$$

$$\text{Time Step} = \frac{\text{Waktu per putaran}}{\text{Jumlah Frame}} = \frac{1.714}{24} = 0.0714 \text{ s}$$

3.6.1.3. Perhitungan Torsi Statis Setiap Sudut Azimuth untuk Savonius Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, variasi kecepatan angin bernilai 3 m/s dengan nilai gaya drag dan lift hasil dari simulasi, sudut azimuth sebesar 90° dan Radius turbine sebesar 0.252. Persamaan perhitungan sebagai berikut:

$$T_{S1} = F_x R \cos \phi + F_z R \sin \phi$$

$$T_{S2} = F_x R \cos (\phi + 180) + F_z R \sin (\phi + 180)$$

Maka hasil torsi adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 21 Contoh Perhitungan Torsi Statis Savonius

Turbine	Sudut Azimuth	Fx	Fz	Radius	Torsi
Savonius 1	90	-0.1291243	-0.6640145	0.52	-0.35
Savonius 2	90	-0.4592959	-0.9977383	0.52	0.52

3.6.1.4. Perhitungan Torsi Statis Setiap Sudut Azimuth untuk Darrieus Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, variasi kecepatan angin bernilai 3m/s dengan nilai gaya drag dan lift hasil dari simulasi, sudut azimuth sebesar 90 dan Radius turbine sebesar 0.52. Persamaan perhitungan sebagai berikut:

$$Td_1 = Fx R \cos (\phi + 30) + Fz R \sin (\phi + 30)$$

$$Td_2 = Fx R \cos (\phi - 90) + Fz R \sin (\phi - 90)$$

$$Td_3 = Fx R \cos (\phi + 150) + Fz R \sin (\phi + 90)$$

Maka hasil torsi adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 22 Contoh Perhitungan Torsi Statis Darrieus

Turbine	Sudut Azimuth	Fx	Fz	Radius	Torsi
Darrieus 1	90	-0.4958945	0.2031357	0.52	0.22
Darrieus 2	90	-0.01037179	-0.104302	0.52	-0.01
Darrieus 3	90	-0.6832824	-0.1875518	0.52	0.26

3.6.1.5. Perhitungan Torsi Dinamis Pada Turbin Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, untuk mendapatkan Torsi dinamis dengan cara men rata-ratakan setiap torsi statis pada turbine darrieus dan savonius.

3.6.1.6. Perhitungan Daya Aktual Pada Turbin Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, untuk mendapatkan daya aktual yang dihasilkan oleh turbin dengan nilai torsi sebesar 1.25 Nm dan kecepatan sudut sebesar 88 rad/s. Maka didapat daya yang dihasilkan sebesar :

$$P = T \times \omega$$

$$P = 1.25 \text{ Nm} \times 88 \text{ rad/s}$$

$$P = 110 \text{ watt}$$

3.6.1.7. Perhitungan Daya Teoritis Pada Turbin Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, untuk mendapatkan daya teoritis yang dihasilkan oleh turbin dengan nilai densitas udara sebesar 1.225 kg/m³ dan luas frontal area sebesar 0.89 m² dengan kecepatan angin sebesar 3 m/s

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1.225 \text{ kg/m}^3 \times 0.89 \text{ m}^2 \times (3 \text{ m/s})^3$$

$$P = 14.79 \text{ watt}$$

3.6.1.8. Perhitungan Koefisien Daya Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, nilai T rata-rata dari simulasi *Fluent* adalah 0.21 Nm dengan kecepatan sudut 26 rad/s kemudian dengan densitas 1.225 kg/m^3 dan luas area sebesar 0.89 m^2 serta kecepatan angin sebesar 3 m/s. Didapat perhitungan Cp sebagai berikut:

$$C_p = \frac{\text{extracted energy}}{\text{wind kinetic energy}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A v^3}$$

$$C_p = \frac{0.21 \times 26}{\frac{1}{2} \times (1.225) \times 0.89 \times (3)^3}$$

$$C_p = 0.37$$

3.6.1.9. Perhitungan Koefisien Momen Secara Simulasi

Pada contoh perhitungan ini, nilai Cp rata-rata dari simulasi *Fluent* adalah 0.37 dengan nilai TSR 4.5 Didapat perhitungan Cm sebagai berikut

$$C_m = \frac{C_p}{TSR}$$

$$C_m = \frac{0.37}{4.5}$$

$$C_m = 1.67$$

3.6.2. Perhitungan Eksperimen

Dalam melakukan perhitungan eksperimen, untuk mencari daya teoritis, koefisien daya, dan koefisien momen serta TSR menggunakan rumus yang sama untuk melakukan perhitungan secara simulasi.

3.6.2.1. Perhitungan Daya Pada Turbin Secara Eksperimen

Pada contoh perhitungan ini, untuk mendapatkan daya pada turbin secara eksperimen adalah dengan mengetahui besar voltase, contohnya nilai voltase 3.5 V. Kemudian mengetahui nilai ampere, contohnya nilai ampere 2 A. Maka daya yang dihasilkan sebesar :

$$P = V \times I$$

$$P = 3.5 \text{ V} \times 2 \text{ A}$$

$$P = 7 \text{ W}$$

3.6.2.2. Perhitungan Torsi Pada Turbin Secara Eksperimen

Setelah mendapatkan nilai daya yang dihasilkan secara eksperimen, setelah itu dilakukan perhitungan torsi dengan nilai daya sebesar 7 watt dan kecepatan sudut 2.1 rad/s. Maka, torsi turbin yang dihasilkan sebesar:

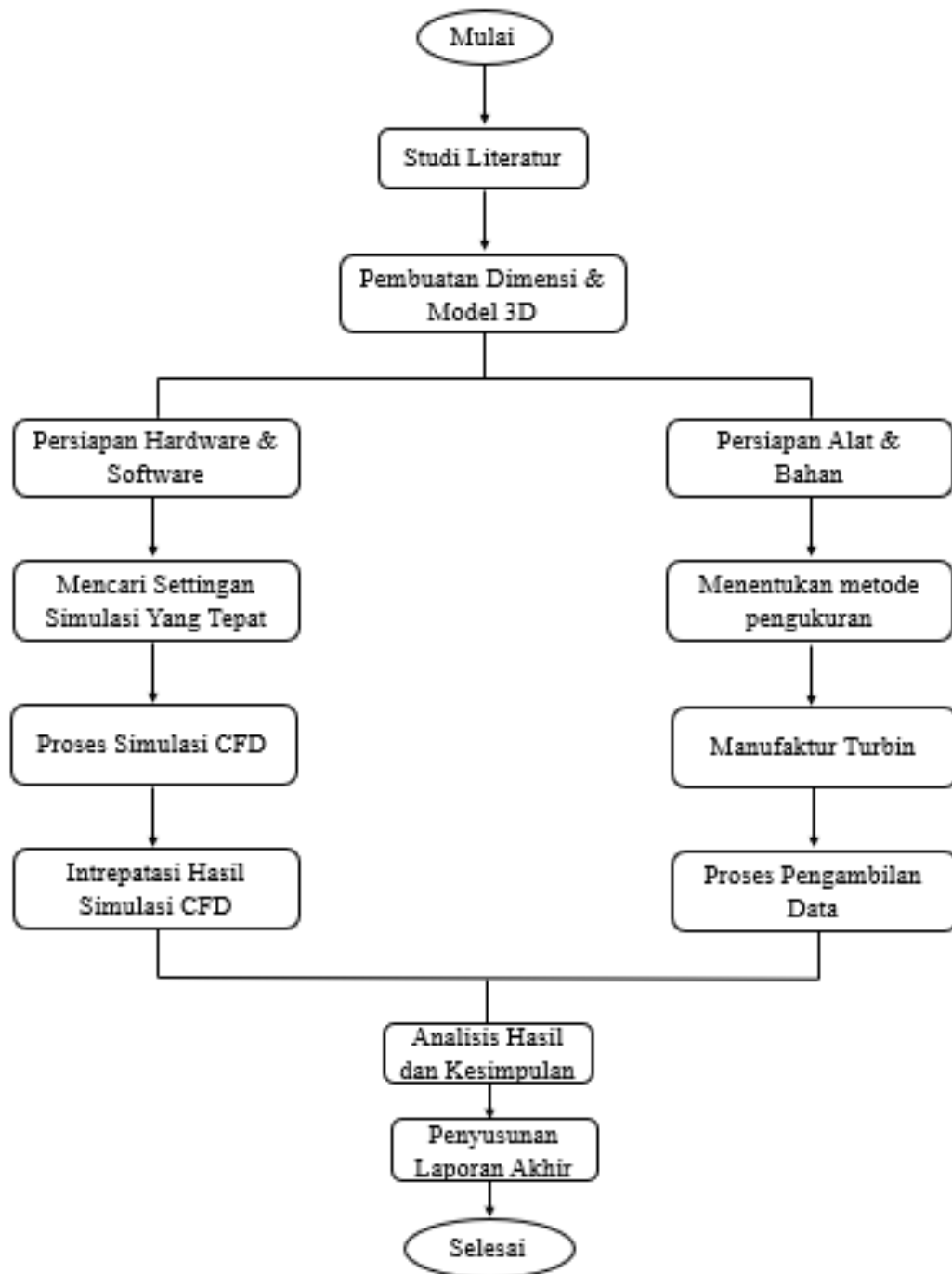
$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{7 \text{ w}}{2.1 \text{ rad/s}}$$

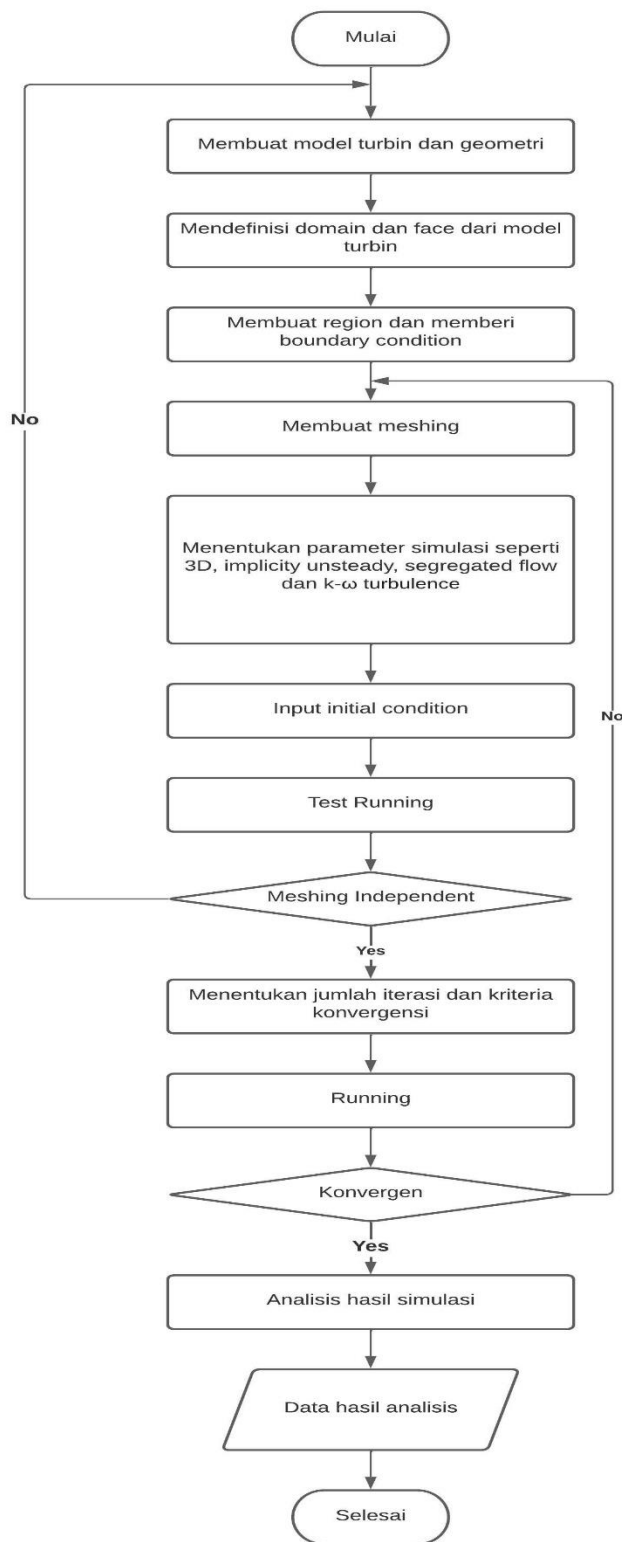
$$T = 3.33 \text{ N}$$

3.7. Diagram Alir (Flowchart)

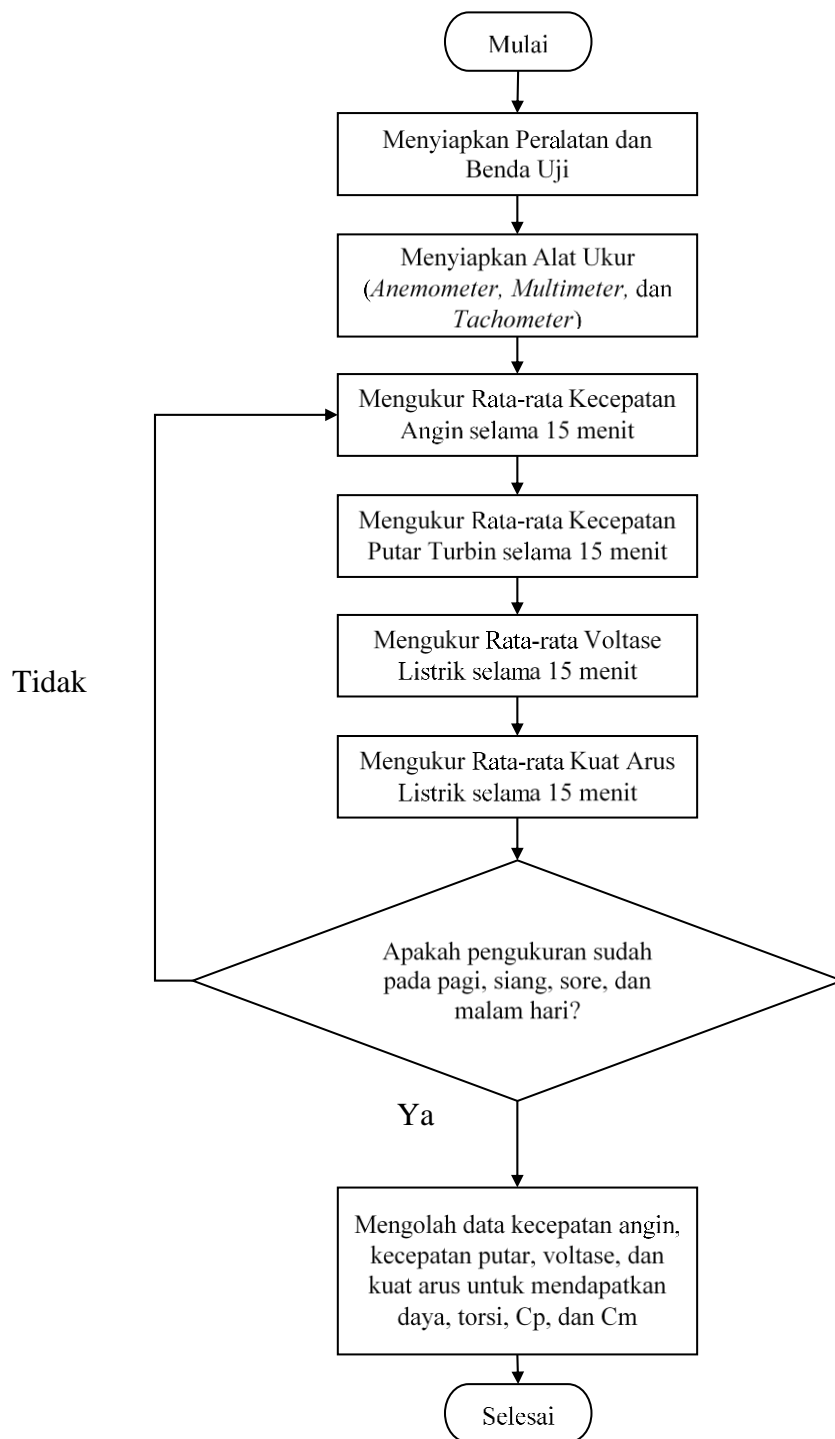
Pada penelitian ini diagram alir yang digunakan untuk simulasi adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 32 Diagram alir penelitian secara umum



Gambar 3. 33 Diagram alir penelitian secara numerik



Gambar 3. 34 Diagram Alir Studi Eksperimen

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Permodelan

Dalam Penelitian ini terdapat dua permodelan yaitu model simulasi dan model eksperimen. Dimana untuk model simulasi digunakan untuk input data pada software. Model Simulasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Model Simulasi

Kec. angin	RPM	Rad/s	TSR
3	198	21	3.6
4	272	28	3.7
5	349	37	3.8
6	430	45	3.9
7	514	54	4
8	602	63	4.1
9	694	73	4.2

Fenomena dari aliran yang melintasi turbin angin nantinya akan direkam pada posisi sudut setiap 15° . Untuk itu, diperlukan perhitungan time step sehingga setiap stepnya dapat merekam fenomena aliran pada posisi sudut tiap 15° .

Untuk permodelan yaitu model eksperimen digunakan *input* data sebagai berikut:

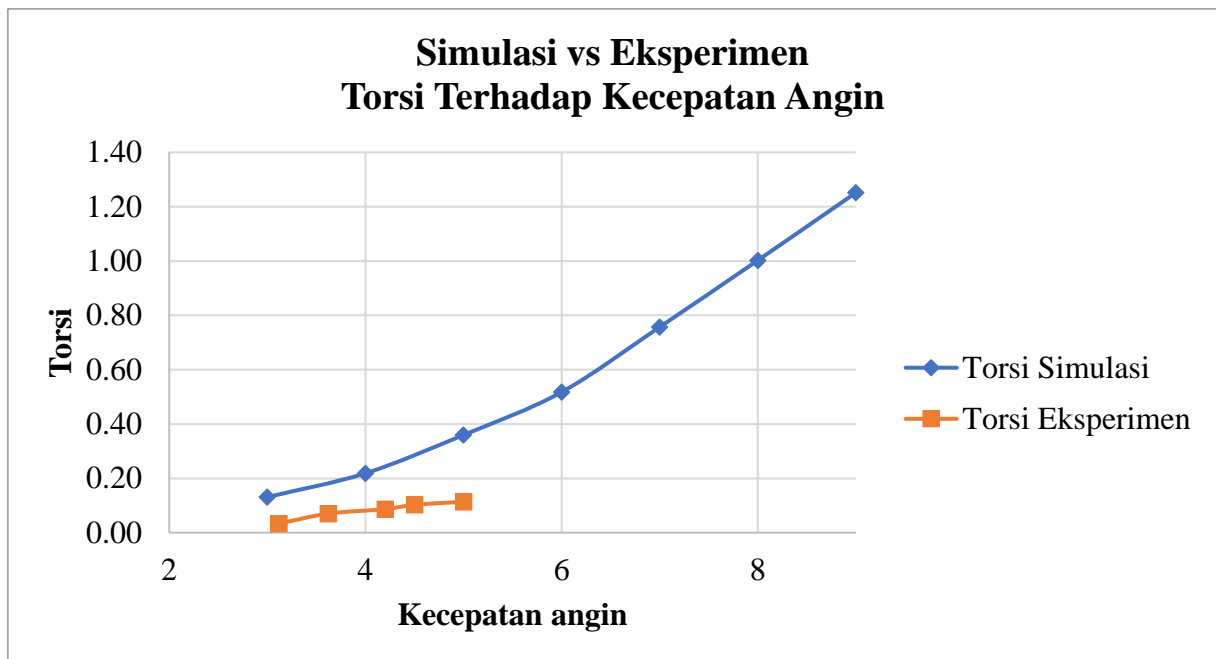
Tabel 4. 2 Model Eksperimen

Kecepatan Angin	RPM	Rad/s	TSR
2.25	24.60	2.57	0.59
3.12	79.60	8.33	1.39
3.78	96.50	10.10	1.39
4.12	109.50	11.46	1.45
4.58	120.00	12.56	1.43
5.00	130.10	13.62	1.42

Pada penelitian secara eksperimen dilakukan pengukuran berupa kecepatan angin, kecepatan sudut turbin untuk data *input* awal. Kemudian dilakukan pengukuran untuk mencari performa turbin berupa daya, torsi, koefisien daya, dan koefisien momen dengan alat ukur *Avometer/Multimeter*.

4.2. Perbandingan Hasil Penelitian Eksperimen Dengan Simulasi

4.2.1. Perbandingan Torsi Simulasi dengan Eksperimen



Gambar 4. 1 Grafik Perbandingan Torsi Simulasi dengan Eksperimen

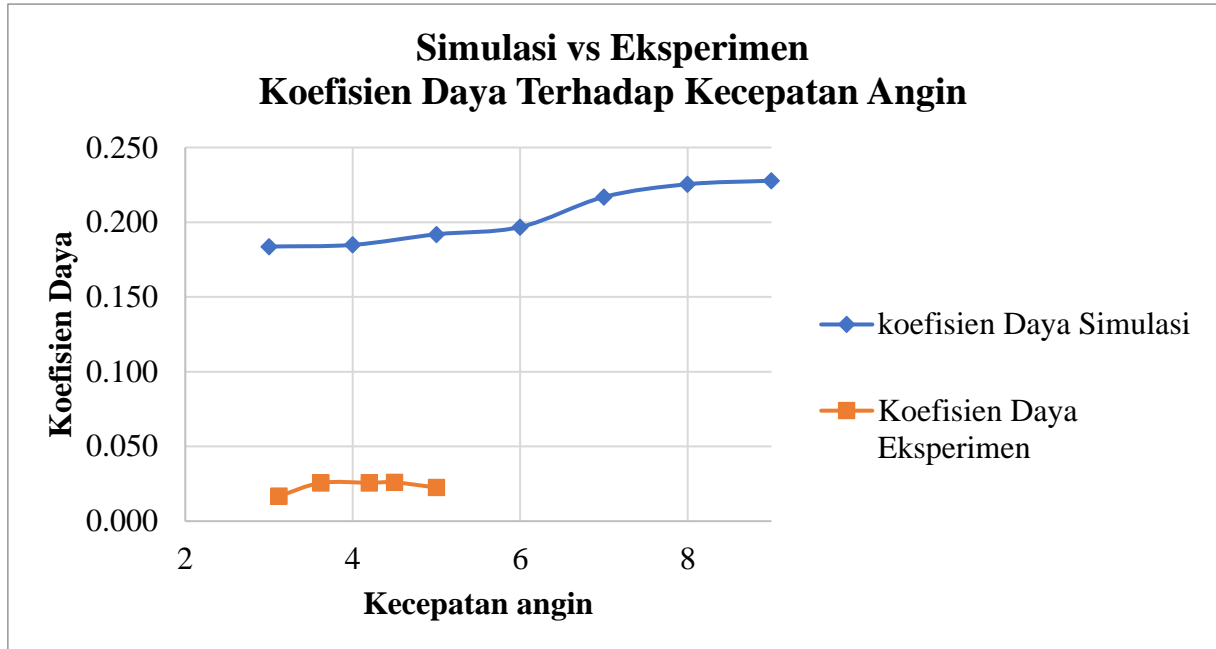
Pada Gambar 4.1 menunjukkan grafik perbandingan torsi antara simulasi dengan eksperimen. Torsi yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang terjadi pada turbin angin *hybrid* dengan 2 sudu savonius dan 3 sudu darrieus memiliki tren yang naik seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Nilai torsi maksimum pada simulasi sebesar 1.25 Nm dan torsi minimumnya sebesar 0.13 Nm. Torsi maksimum pada eksperimen sebesar 0.112 Nm dan torsi minimumnya sebesar 0.0232. Tren grafik torsi eksperimen berada dibawah torsi simulasi, hal tersebut dikarenakan daya aktual yang dihasilkan oleh eksperimen lebih kecil dibandingkan simulasi. Daya aktual yang kecil dikarenakan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh turbin bernilai kecil. Hal ini disebabkan oleh kecepatan putaran turbin lebih kecil dibandingkan simulasi. Oleh karena itu tren dan nilai eksperimen lebih kecil dibandingkan dengan simulasi.

Faktor eksternal yang dapat menyebabkan hasil eksperimen berada dibawah hasil simulasi adalah performa *bearing* yang kurang cukup baik. Dalam pengambilan data *bearing* harus terus diberi pelumasan berupa *lubricant* agar mengurangi gesekan. Tetapi pada saat berputar pemberian pelumas tidak dapat berjalan dengan baik sehingga pemberian pelumas hanya pada awal sebelum turbin berputar. Hal tersebut dapat mengganggu putaran turbin sehingga torsi yang dihasilkan menjadi kurang baik. Hal lain juga perlu diperhatikan *losses* dari kopling karet yang digunakan. Apabila terjadi kemiringan pada *alignment* shaft mengakibatkan putaran turbin tidak sempurna. Dengan demikian dapat mengurangi nilai koefisien daya yang diperoleh. Perlu diperhatikan juga kelurusan poros turbin agar tidak terjadi putaran yang berat sebelah.

Kondisi saat pengambilan data eksperimen dan simulasi berbeda. Dimana pada saat studi eksperimen terdapat scaffolding yang cukup mengganggu arah aliran angin dikarenakan angin yang datang pada saat eksperimen berasal dari arah yang berbeda. Seharusnya

pengambilan data saat eksperimen memperhatikan luas daerah turbinnya seperti mendekati ukuran stator domain pada simulasi. Kemudian pengukuran kecepatan angin berasal dari satu arah saja.

4.2.2. Perbandingan Koefisien Daya Simulasi dengan Eksperimen



Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Koefisien Daya Saat Simulasi dan Eksperimen

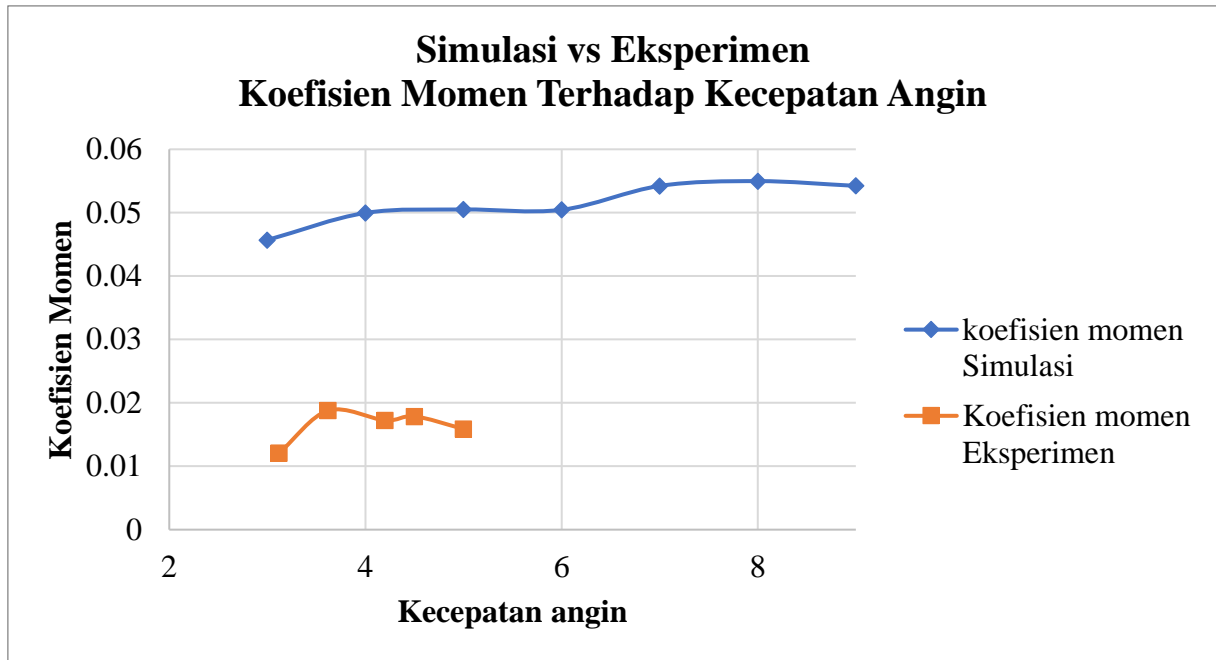
Pada Gambar 4.2 menunjukkan grafik perbandingan koefisien daya antara simulasi dengan eksperimen. Koefisien daya dihasilkan terhadap kecepatan angin yang terjadi pada turbin angin *hybrid* dengan 2 sudu savonius dan 3 sudu darrieus sesuai gambar grafik tersebut adalah grafik koefisien daya dari simulasi dan eksperimen memiliki tren yang naik kemudian turun seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Nilai koefisien daya maksimum pada simulasi sebesar 0.227 dan nilai koefisien daya minimumnya sebesar 0.164. Nilai koefisien daya maksimum pada eksperimen sebesar 0.026 dan nilai daya minimum sebesar 0.010. Tren grafik koefisien daya eksperimen berada dibawah koefisien daya pada simulasi, hal tersebut dikarenakan daya aktual yang dihasilkan oleh eksperimen lebih kecil dibandingkan simulasi. Koefisien daya yang kecil dikarenakan voltase dan ampere yang dihasilkan oleh turbin bernilai kecil sehingga daya aktual yang dihasilkan juga kecil. Mengakibatkan nilai koefisien daya yang dihasilkan juga kecil.

Faktor eksternal yang dapat menyebabkan hasil koefisien daya pada eksperimen kurang baik adalah dikarenakan bearing yang menghasilkan gaya gesek yang berlebih. Gaya gesek tersebut dapat menghambat putaran turbin, sehingga putaran turbin terhambat menghasilkan torsi yang kurang baik. Hal ini mengakibatkan nilai koefisien daya kurang baik dibandingkan dengan simulasi. Hal lain juga perlu diperhatikan *losses* dari kopling karet yang digunakan. Apabila terjadi kemiringan pada *alignment* shaft mengakibatkan putaran turbin tidak sempurna. Hal tersebut dapat mengurangi nilai koefisien daya yang diperoleh. Perlu diperhatikan juga kelurusan poros turbin agar tidak terjadi putaran yang berat sebelah.

Kondisi saat pengambilan data eksperimen dan simulasi berbeda. Dimana pada saat studi eksperimen terdapat scaffolding yang cukup mengganggu arah aliran angin dikarenakan

angin yang datang pada saat eksperimen berasal dari arah yang berbeda. Seharusnya pengambilan data saat eksperimen memperhatikan luas daerah turbinnya seperti mendekati ukuran stator domain pada simulasi. Kemudian pengukuran kecepatan angin berasal dari satu arah saja.

4.2.3. Perbandingan Koefisien Momen Simulasi dengan Eksperimen



Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Koefisien Momen pada Simulasi dan Eksperimen

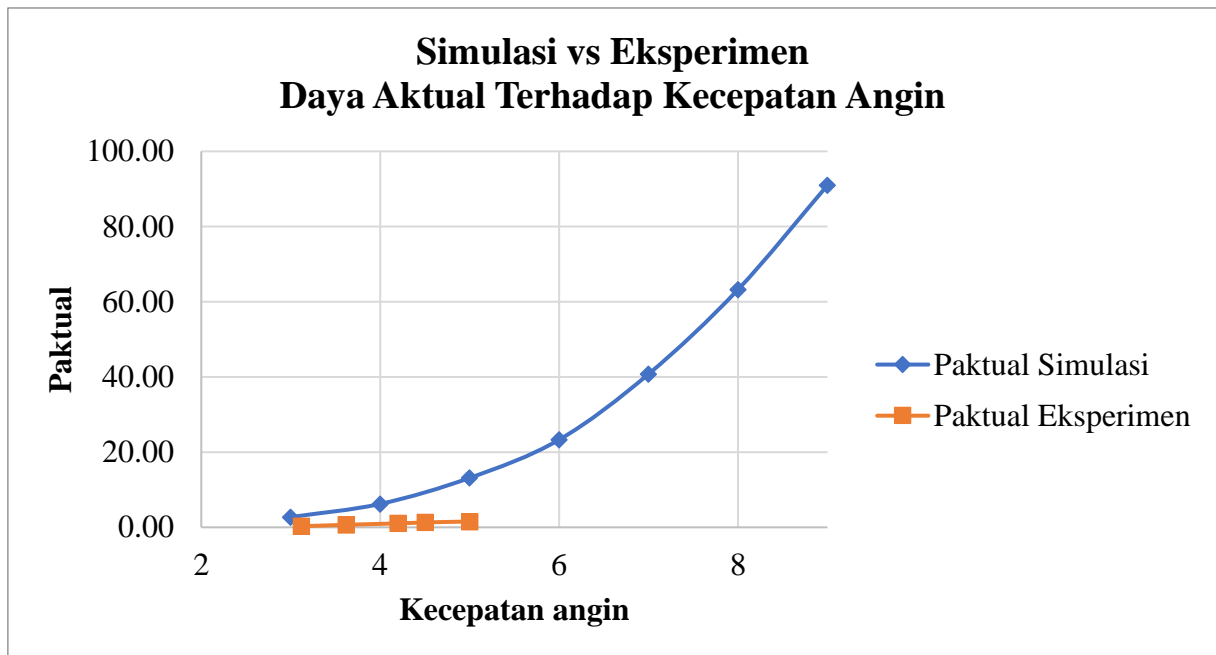
Pada Gambar 4.3 menunjukkan grafik perbandingan koefisien momen antara simulasi dengan eksperimen. Koefisien momen yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang terjadi pada turbin angin *hybrid* dengan 2 sudu savonius dan 3 sudu darrieus memiliki tren yang naik turun dengan fluktuasi yang tidak terlalu besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Nilai koefisien momen maksimum pada simulasi sebesar 0.054 dan nilai koefisien momen minimumnya sebesar 0.0457. Nilai koefisien momen maksimum pada eksperimen sebesar 0.018 dan nilai koefisien momen minimumnya sebesar 0.012. Tren grafik koefisien momen eksperimen berada dibawah koefisien momen pada simulasi, hal tersebut dikarenakan koefisien daya yang dihasilkan oleh eksperimen lebih kecil dibandingkan simulasi. Koefisien daya yang kecil dikarenakan tegangan dan arus yang dihasilkan oleh turbin bernilai kecil sehingga daya aktual yang dihasilkan juga kecil. Mengakibatkan nilai koefisien daya yang dihasilkan juga kecil. Kemudian nilai TSR yang dihasilkan juga lebih kecil dibandingkan dengan simulasi, sehingga mengakibatkan koefisien momen eksperimen lebih kecil daripada simulasi.

Faktor eksternal yang dapat menyebabkan hasil koefisien daya pada eksperimen kurang baik adalah dikarenakan bearing yang menghasilkan gaya gesek yang berlebih. Gaya gesek tersebut dapat menghambat putaran turbin, sehingga putaran turbin terhambat menghasilkan torsi yang kurang baik. Hal ini mengakibatkan nilai koefisien daya kurang baik dibandingkan dengan simulasi. Hasil koefisien daya yang kurang baik berbanding lurus terhadap nilai koefisien momen yang diperoleh pada turbin. Hal lain juga perlu diperhatikan *losses* dari kopling karet yang digunakan. Apabila terjadi kemiringan pada *alignment* shaft mengakibatkan

putaran turbin tidak sempurna. Hal tersebut dapat mengurangi nilai koefisien daya yang diperoleh. Perlu diperhatikan juga kelurusan poros turbin agar tidak terjadi putaran yang berat sebelah.

Kondisi saat pengambilan data eksperimen dan simulasi berbeda. Dimana pada saat studi eksperimen terdapat scaffolding yang cukup mengganggu arah aliran angin dikarenakan angin yang datang pada saat eksperimen berasal dari arah yang berbeda. Seharusnya pengambilan data saat eksperimen memperhatikan luas daerah turbinnya seperti mendekati ukuran stator domain pada simulasi. Kemudian pengukuran kecepatan angin berasal dari satu arah saja.

4.2.4. Perbandingan Daya Aktual Simulasi dengan Eksperimen



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Daya Aktual Antara Simulasi Dengan Eksperimen

Pada Gambar 4.4 menunjukkan grafik perbandingan daya aktual antara simulasi dengan eksperimen. Berdasarkan grafik daya aktual yang dihasilkan terhadap kecepatan angin yang terjadi pada turbin angin *hybrid* dengan 2 sudu savonius dan 3 sudu darrieus, secara simulasi dan eksperimen memiliki tren yang cenderung naik seiring bertambahnya kecepatan angin. Nilai daya maksimum pada simulasi sebesar 90.97 watt dan nilai daya minimumnya sebesar 2.43 watt. Nilai daya maksimum pada eksperimen sebesar 1.54 watt dan nilai daya minimumnya sebesar 0.060 watt. Tren grafik daya aktual eksperimen berada dibawah daya aktual pada simulasi, hal tersebut dikarenakan kecepatan sudut turbin pada eksperimen sangat kecil dan nilai TSR juga kecil mengakibatkan nilai voltase dan ampere menjadi kecil. Nilai daya aktual eksperimen juga tidak memiliki jarak yang cukup jauh sehingga fluktuasi yang terjadi pada grafik tidak terlalu besar.

Faktor eksternal yang dapat menyebabkan hasil eksperimen berada dibawah hasil simulasi adalah performa *bearing* yang kurang cukup baik. Dalam pengambilan data *bearing* harus terus diberi pelumasan berupa *lubricant* agar mengurangi gesekan. Tetapi pada saat berputar pemberian pelumas tidak dapat berjalan dengan baik sehingga pemberian pelumas hanya pada awal sebelum turbin berputar. Hal tersebut dapat mengganggu putaran turbin

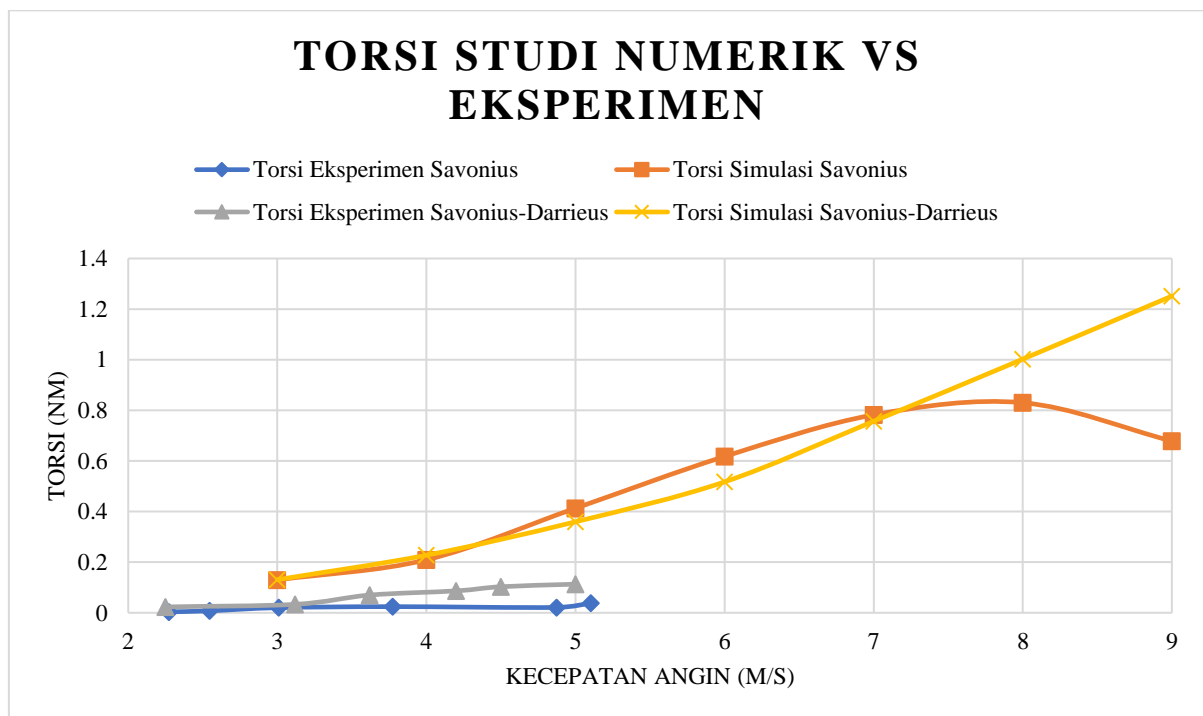
sehingga torsi yang dihasilkan menjadi kurang baik. Hasil torsi yang kurang baik berbanding lurus terhadap daya yang diperoleh oleh turbin. Hal lain juga perlu diperhatikan *losses* dari kopling karet yang digunakan. Apabila terjadi kemiringan pada *alignment* shaft mengakibatkan putaran turbin tidak sempurna. Dengan demikian dapat mengurangi nilai koefisien daya yang diperoleh disebabkan oleh perolehan daya yang kurang baik. Perlu diperhatikan juga kelurusan poros turbin agar tidak terjadi putaran yang berat sebelah.

Kondisi saat pengambilan data eksperimen dan simulasi berbeda. Dimana pada saat studi eksperimen terdapat scaffolding yang cukup mengganggu arah aliran angin dikarenakan angin yang datang pada saat eksperimen berasal dari arah yang berbeda. Seharusnya pengambilan data saat eksperimen memperhatikan luas daerah turbinnya seperti mendekati ukuran stator domain pada simulasi. Kemudian pengukuran kecepatan angin berasal dari satu arah saja.

4.3. Perbandingan Hasil Penelitian Terhadap Turbin Savonius Setelah Penambahan Turbin Darrieus.

Penelitian ini merupakan gabungan dan lanjutan daripada penelitian Diyantra Muhammad Pangestu (2022) dengan turbin savonius. Oleh karena itu untuk menunjukkan kinerja aerodinamik dengan penambahan turbin darrieus dibutuhkan perbandingan antara penelitian ini dengan penelitian Diyantra Muhammad Pangestu (2022).

4.3.1. Perbandingan Torsi Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus

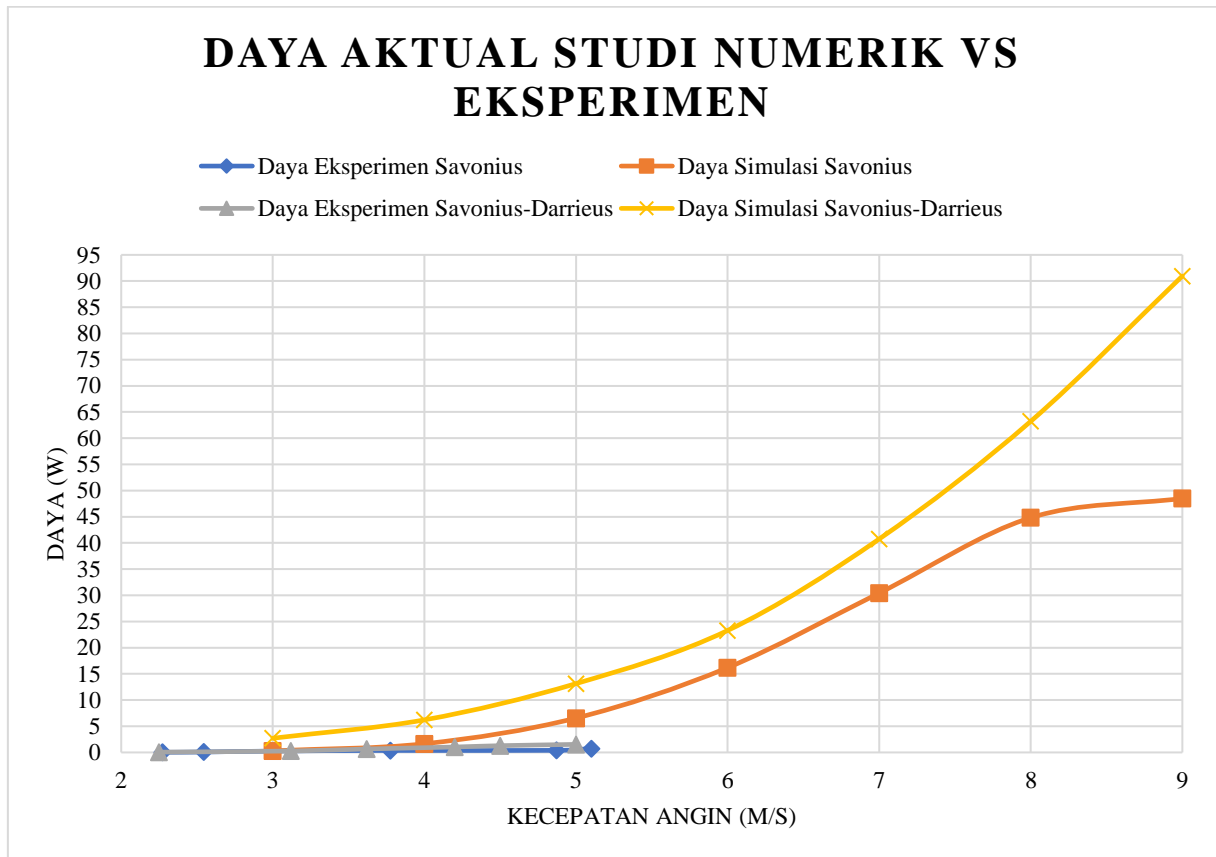


Gambar 4.5 Perbandingan Torsi Savonius dan Savonius-Darrieus

Pada Gambar 4.5 menunjukkan grafik perbandingan torsi turbin savonius dengan turbin savonius-darrieus antara simulasi dengan eksperimen. Berdasarkan gambar grafik tersebut, grafik torsi savonius-darrieus berada diatas grafik torsi savonius baik simulasi dan eksperimen. Hal tersebut dikarenakan dengan adanya penambahan turbin darrieus menaikkan momen turbin dengan menambah jumlah bilah pada turbin. Ditambah cara kerja turbin berputar, dengan

adanya turbin darrieus maka terdapat bantuan gaya berupa gaya lift untuk menggerakkan turbin sedangkan turbin savonius hanya menggunakan gaya drag untuk menggerakkan turbin. Nilai torsi maksimum secara simulasi turbin savonius-darrieus sebesar 1.25 Nm dan turbin savonius sebesar 0.83 Nm. Nilai torsi maksimum secara eksperimen turbin savonius-darrieus sebesar 0.113 Nm dan turbin savonius sebesar 0.038 Nm.

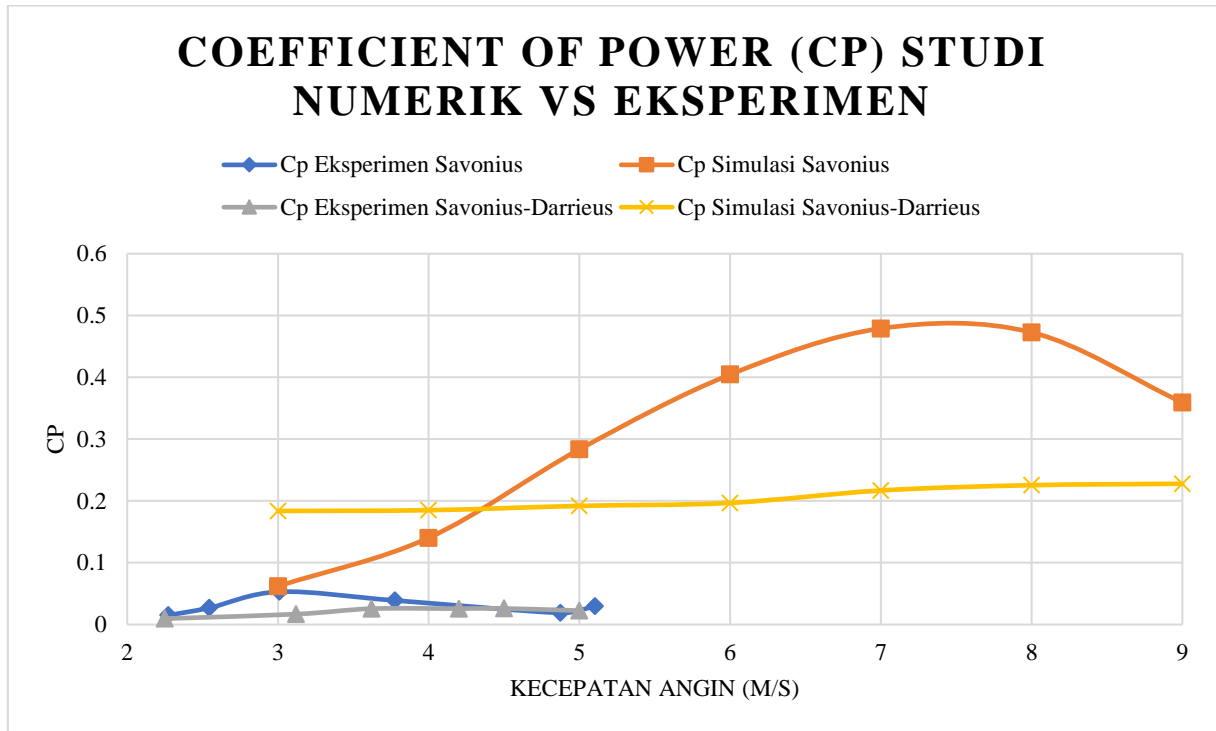
4.3.2. Perbandingan Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus



Gambar 4. 6 Perbandingan Daya Savonius dan Savonius-Darrieus

Pada Gambar 4.6 menunjukkan grafik perbandingan daya turbin savonius dengan turbin savonius-darrieus antara simulasi dengan eksperimen. Berdasarkan gambar grafik tersebut, grafik torsi savonius-darrieus berada diatas grafik torsi savonius baik simulasi dan eksperimen. Hal tersebut dikarenakan dengan adanya penambahan turbin darrieus menaikkan *frontal* area sehingga daerah yang dilalui turbin semakin besar oleh karena itu daya yang dihasilkan dapat meningkat. Nilai daya maksimum secara simulasi turbin savonius-darrieus sebesar 90.97 watt dan turbin savonius sebesar 48.5 watt. Nilai daya maksimum secara eksperimen turbin savonius-darrieus sebesar 1.54 watt dan turbin savonius sebesar 0.75 watt.

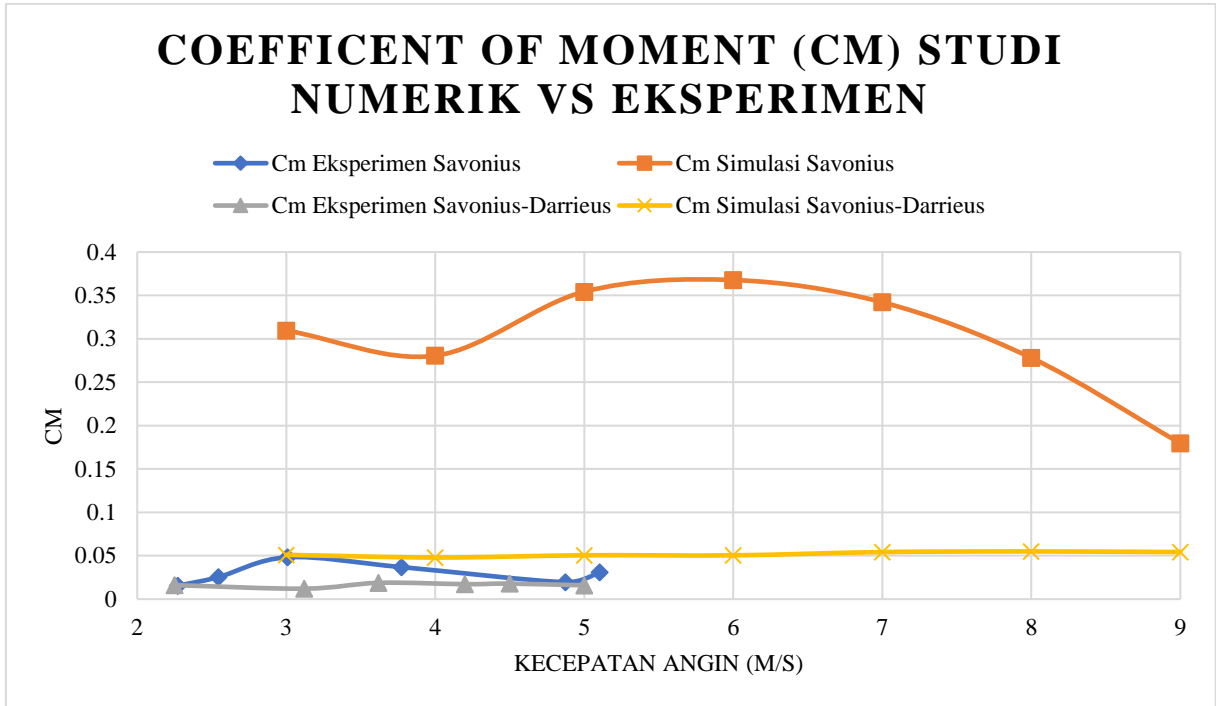
4.3.3. Perbandingan Koefisien Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus



Gambar 4. 7 Perbandingan Koefisien Daya Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus

Pada Gambar 4.7 menunjukkan grafik perbandingan koefisien daya turbin savonius dengan turbin savonius-darrieus antara simulasi dengan eksperimen. Berdasarkan gambar grafik tersebut, grafik koefisien daya turbin savonius-darrieus berada dibawah grafik torsi savonius baik simulasi dan eksperimen. Hal tersebut dikarenakan dengan adanya penambahan turbin darrieus dapat menghalangi laju aliran angin yang menuju turbin savonius dikarenakan posisi turbin darrieus menutupi turbin savonius. Nilai koefisien daya maksimum secara simulasi turbin savonius-darrieus sebesar 0.228 dan turbin savonius sebesar 0.479. Nilai koefisien daya maksimum secara eksperimen turbin savonius-darrieus sebesar 0.026 dan turbin savonius sebesar 0.053.

4.3.4. Perbandingan Koefisien Momen Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus



Gambar 4. 8 Perbandingan Koefisien Momen Turbin Savonius dan Turbin Savonius-Darrieus

Pada Gambar 4.8 menunjukkan grafik perbandingan koefisien momen turbin savonius dengan turbin savonius-darrieus antara simulasi dengan eksperimen. Berdasarkan gambar grafik tersebut, grafik koefisien momen turbin savonius-darrieus berada dibawah grafik torsi savonius baik simulasi dan eksperimen. Hal tersebut dikarenakan dengan adanya penambahan turbin darrieus menghasilkan koefisien daya yang cukup rendah oleh karena itu menghasilkan koefisien momen yang cukup rendah. Nilai koefisien momen maksimum secara simulasi turbin savonius-darrieus sebesar 0.055 dan turbin savonius sebesar 0.368. Nilai koefisien momen maksimum secara eksperimen turbin savonius-darrieus sebesar 0.019 dan turbin savonius sebesar 0.048.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB V KESIMPULAN & SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis kinerja aerodinamik yang dilakukan dengan metode CFD dan studi eksperimen turbin angin Savonius & Darrieus didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai torsi yang dihasilkan dipengaruhi oleh penambahan kecepatan angin dan penambahan jenis sudu turbin. Semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan. Dengan adanya turbin darrieus menghasilkan daya dan torsi yang lebih besar dikarenakan luas *frontal area* yang dimiliki semakin besar akan tetapi semakin banyak jumlah sudu yang ditambahkan, maka nilai koefisien daya yang dihasilkan semakin rendah. Pada penelitian ini torsi rata-rata maksimum didapat pada saat simulasi dicapai pada kecepatan angin 9 m/s dengan nilai torsinya adalah 1,25 N.m sedangkan pada eksperimen torsi rata-rata maksimum dicapai pada kecepatan 5 m/s dengan nilai torsinya 0.1133 N.m.
2. Nilai torsi pada simulasi berasal dari gaya lift yang dihasilkan pada turbin darrieus, menghasilkan semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu sudu, maka semakin besar pula gaya lift yang dihasilkan. Hal tersebut dapat membantu sudu savonius dikarenakan sudu savonius menggunakan gaya drag untuk menghasilkan torsi sehingga nilai resultan dari gaya lift dan gaya drag akan bertambah. Pertambahan nilai Resultan gaya ini berbanding lurus dengan pertambahan nilai torsi.
3. Daya yang dihasilkan pada simulasi berasal dari torsi serta kecepatan sudut pada turbin sedangkan daya yang dihasilkan pada eksperimen berasal dari tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh turbin. Pada penelitian ini daya maksimum yang dihasilkan didapat pada simulasi yaitu pada kecepatan 9 m/s sebesar 90.97-Watt sedangkan pada eksperimen daya maksimum yang dihasilkan pada kecepatan 5 m/s sebesar 1.54 Watt.
4. Daya yang dihasilkan lebih besar dengan adanya penambahan sudu darrieus dikarenakan semakin banyak sudu yang ditambah menghasilkan daya yang semakin besar. Hal tersebut disebabkan oleh *frontal area* pada turbin semakin besar untuk dapat menyerap energi angin.
5. Pada penelitian ini koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi. Semakin tinggi nilai torsi maka koefisien daya yang dihasilkan pun akan semakin baik. Hal tersebut juga mempengaruhi daya aktual yang dihasilkan oleh turbin sehingga dapat menghasilkan koefisien daya yang baik. Koefisien Daya maksimum didapat pada simulasi saat kecepatan 9 m/s sebesar 0.2278 atau sebesar 22.7% sedangkan daya maksimum pada eksperimen saat kecepatan angin 3.62 m/s sebesar 0.026 atau sebesar 2.6%. Daya aktual eksperimen lebih kecil dibandingkan dengan simulasi dikarenakan tegangan dan arus listrik yang dihasilkan cukup kecil. Tegangan dan arus listrik yang keluar berbanding lurus dengan kecepatan sudut yang dihasilkan pada turbin.
6. Pada penelitian ini dihasilkan koefisien momen yang cukup fluktuatif untuk penelitian secara eksperimen sedangkan pada simulasi koefisien momen yang dihasilkan tidak terlalu fluktuatif dikarenakan perbedaan hasil koefisien momen setiap variasi waktu tidak terlalu signifikan. Koefisien momen bergantung pada hasil koefisien daya dan TSR yang dihasilkan oleh turbin.
7. Penggunaan turbin *hybrid* tidak dianjurkan pada kecepatan yang relative rendah namun untuk hasil dan perfora yang lebih baik turbin hybrid dapat digunakan pada saat kecepatan angin tinggi serta dapat dilakukan modifikasi dan perubahan secara desain seperti merubah radius turbin darrieus dan menambah *stage* pada turbin *hybrid*.

5.2. Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan dari penulis untuk penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan settingan simulasi yang lain seperti turbulence model, nilai konvergen untuk turbin Savonius dan Darrieus Kemudian menggunakan software CFD yang bisa menginisiasi putaran turbin secara otomatis sehingga hasil simulasi yang didapatkan semakin akurat apabila dibandingkan dengan eksperimen.
2. Diperlukan kalibrasi dan menentukan ketelitian pada alat ukur agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.
3. Diperlukan studi lebih lanjut terkait pemilihan bahan untuk turbin Savonius dan Darrieus dalam pembuatan turbin secara eksperimen.
4. Studi numerik transient lebih baik mengambil putaran turbin yang lebih banyak lagi dan dilakukan simulasi dengan waktu yang lebih lama sampai fluktuasi yang dihasilkan bernilai kecil.
5. Kondisi pada saat pengambilan data studi eksperimen dan studi numerik sama, tidak ada yang mengganggu arah aliran angin pada saat eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik [BPS]. 2020. *Statistik Daerah Provinsi Jawa Timur 2020*: Badan Pusat Statistik Kota Surabaya
- Kracht, P., Giebhardt, J., Lutz, M. A., Vecchio, M., Moroso, A., & Bard, J., 2012. *Implementation of a Vertical Axis Marine Current Turbin for Off-grid Village Electrification in Indonesia*. 4th International Conference on Ocean Energy, 17 October, Dublin.
- Republik Indonesia, 2017. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 39 Tahun 2017 tentang Pelaksanaan Kegiatan Fisik Pemanfaatan Energi Baru dan Energi Terbarukan serta Konservasi*. Jakarta.
- Republik Indonesia, 2016. *Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 5899 K/20/MEM/2016 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2016 s.d. 2025*. Jakarta.
- Teja, Dananta Putra. 2017. *Numerical Study of Darrieus – Savonius Wind Turbin with Addition Rotor Darrieus Rotor Stage*. Surabaya.
- Ghosh, A., Biswas, A., Sharma, K.K., Gupta, R., 2014. *Computational Analysis of Flow Physics of a Combined Three Bladed Darrieus Savonius Wind Rotor*. Elsevier Ltd.
- Dwiyantoro, B. A., Suphandani, V., Rahman, 2015. Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius. Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV (SNTTMXIV).
- Energi, K., Sumber, D. A. N., & Mineral, D. (2022). *Menteri ESDM: Perlu Upaya Konkrit dan Terencana Capai Target Bauran 23 % Di Tahun* (Vol. 2025, pp. 22–25).
- IREN. (2021). Renewable Energy Capacity Highlights. *International Renewable Energy Agency*, 00(March 2021), 1–3.
<https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>
- Morshed, K. N., Rahman, M., & Molina, G. (2013). *Pengujian terowongan angin dan simulasi numerik pada kinerja aerodinamis turbin angin Savonius tiga bilah*. 1–14.
- Nur Fridayana, E., Wisnu Wardhana, I., & Eko Budi Djatmiko, I. (2018). *FINAL PROJECT-MO.141326 AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE (VAWT) DARRIEUS TYPE H-ROTOR USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) APPROACH*.
- Saha, U. K., Thotla, S., & Maity, D. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8–9), 1359–1375. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005>

Wakui, T., Tanzawa, Y., Hashizume, T., & Nagao, T. (2005). Hybrid configuration of darrieus and savonius rotors for stand-alone wind turbine-generator systems. *Electrical Engineering in Japan (English Translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 150(4), 13–22. <https://doi.org/10.1002/eej.20071>

Yanuarsyah, I. (2017). *Studi Numerik Turbin Angin Darrieus-Savonius Dengan Variasi Penempatan Rotor Savonius*. 1–116.

Zhang, X., Li, W., & Kong, C. (2014). Effect of relative thickness on improving airfoil aerodynamic performance by blunt trailing-edge modification. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/604151>

P3TekKBTKE. (2020). *Potensi Energi Angin Indonesia 2020*. Retrieved from Badan Layanan Umum P3tek KBTKE: https://p3tkebt.esdm.go.id/pilot-plan-project/energi_angin/potensi-energi-angin-indonesia-2020

LAMPIRAN

1. Data Perhitungan Simulasi

Kecepatan 3 m/s

Sudut Azimuth	Darrieus 1			Torsi	Power	Darrieus 2			Torsi	Power	Darrieus 3			Torsi	Power
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.26	-0.78	0.82	-0.41	10.55	0.61	-0.38	0.72	-0.20	5.18	0.08	0.08	0.12	0.04	1.14
30	0.21	-0.50	0.54	-0.26	6.77	0.40	-0.37	0.55	-0.19	4.96	0.00	0.06	0.06	0.03	0.82
45	0.19	-0.28	0.33	-0.14	3.72	0.24	-0.24	0.34	-0.12	3.22	-0.14	0.29	0.32	0.15	3.87
60	0.19	-0.05	0.19	-0.03	0.73	0.11	-0.10	0.15	-0.05	1.35	-0.26	0.66	0.71	0.34	8.96
75	0.18	0.18	0.26	0.10	2.48	0.01	-0.01	0.02	-0.01	0.20	-0.24	0.76	0.79	0.39	10.21
90	0.20	0.42	0.47	0.22	5.73	-0.10	-0.01	0.10	-0.01	0.14	-0.19	0.50	0.54	0.26	6.81
105	0.21	0.55	0.59	0.28	7.39	-0.28	-0.10	0.30	-0.05	1.39	-0.17	0.17	0.24	0.09	2.33
120	0.21	0.45	0.50	0.23	6.08	-0.40	-0.29	0.50	-0.15	3.90	-0.16	-0.12	0.20	-0.06	1.62
135	0.33	0.27	0.43	0.14	3.64	-0.49	-0.49	0.70	-0.26	6.65	-0.13	-0.26	0.30	-0.14	3.58
150	0.20	0.03	0.20	0.01	0.36	-0.47	-0.42	0.63	-0.22	5.73	-0.10	-0.26	0.28	-0.14	3.52
165	-0.10	0.10	0.15	0.05	1.40	-0.36	-0.20	0.41	-0.11	2.74	-0.09	-0.19	0.21	-0.10	2.57
180	-0.33	0.47	0.57	0.24	6.29	-0.32	-0.03	0.32	-0.01	0.34	-0.05	-0.08	0.10	-0.04	1.12
195	-0.46	0.63	0.78	0.33	8.53	-0.31	0.13	0.33	0.07	1.78	0.02	0.02	0.03	0.01	0.26
210	-0.47	0.43	0.64	0.22	5.82	-0.36	0.30	0.47	0.16	4.06	0.19	0.04	0.19	0.02	0.50
225	-0.43	0.12	0.45	0.06	1.68	-0.50	0.50	0.71	0.26	6.81	0.32	-0.17	0.36	-0.09	2.29
240	-0.37	-0.14	0.39	-0.07	1.83	-0.62	0.54	0.82	0.28	7.28	0.32	-0.44	0.55	-0.23	6.02
255	-0.29	-0.29	0.41	-0.15	3.96	-0.66	0.30	0.72	0.15	4.03	0.27	-0.48	0.55	-0.25	6.48
270	-0.24	-0.36	0.43	-0.19	4.88	-0.42	0.02	0.42	0.01	0.28	0.23	-0.36	0.43	-0.19	4.93
285	-0.16	-0.30	0.34	-0.15	4.01	0.15	0.14	0.20	0.07	1.87	0.19	-0.19	0.27	-0.10	2.59
300	-0.07	-0.15	0.17	-0.08	2.02	0.55	0.53	0.76	0.27	7.11	0.18	-0.03	0.18	-0.02	0.40
315	-0.01	-0.02	0.02	-0.01	0.27	0.67	0.67	0.95	0.35	9.05	0.20	0.14	0.24	0.07	1.89
330	0.08	-0.01	0.08	-0.01	0.17	0.65	0.48	0.81	0.25	6.51	0.23	0.31	0.39	0.16	4.26
360	0.11	-0.31	0.33	-0.16	4.23	0.52	-0.11	0.53	-0.06	1.51	0.28	0.46	0.54	0.24	6.24

Savonius 1				Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan	Frad (N)			Ftang (N)	Resultan			
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.23	-1.36	1.83	-0.34	18.34	1.56	1.34	2.05	0.34	18.06	
0.98	-0.49	1.10	-0.12	6.59	1.35	0.87	1.61	0.22	11.78	
0.83	0.23	0.86	0.06	3.09	1.10	0.38	1.16	0.09	5.07	
0.49	0.39	0.63	0.10	5.33	0.61	0.12	0.62	0.03	1.62	
-0.09	-0.09	0.13	-0.02	1.16	-0.16	0.41	0.44	0.10	5.53	
-0.66	-0.66	0.94	-0.17	8.98	-1.00	1.00	1.41	0.25	13.49	
-0.83	-0.64	1.05	-0.16	8.69	-1.61	1.28	2.06	0.32	17.29	
-0.54	-0.02	0.55	0.00	0.22	-1.76	0.94	1.99	0.24	12.69	
-0.30	0.59	0.66	0.15	7.95	-1.43	0.25	1.45	0.06	3.36	
-0.44	0.94	1.03	0.24	12.64	-1.42	-0.38	1.47	-0.10	5.18	
-0.69	1.06	1.27	0.27	14.36	-1.80	-1.36	2.25	-0.34	18.40	
-0.89	0.89	1.26	0.22	12.06	-1.70	-1.70	2.40	-0.43	22.94	
-1.05	0.66	1.24	0.17	8.94	-1.36	-1.28	1.87	-0.32	17.34	
-1.03	0.39	1.11	0.10	5.28	-1.04	-0.60	1.20	-0.15	8.14	
-0.78	0.13	0.79	0.03	1.78	-0.71	-0.07	0.71	-0.02	0.93	
-0.28	0.10	0.30	0.03	1.37	-0.28	0.04	0.28	0.01	0.57	
0.43	0.52	0.67	0.13	7.04	0.19	-0.25	0.31	-0.06	3.34	
1.09	1.09	1.55	0.28	14.77	0.33	-0.33	0.47	-0.08	4.49	
1.54	1.31	2.02	0.33	17.71	0.13	0.08	0.15	0.02	1.07	
1.71	0.98	1.97	0.25	13.28	0.03	0.47	0.47	0.12	6.33	
1.70	0.40	1.74	0.10	5.41	0.17	0.65	0.68	0.16	8.84	
1.73	-0.44	1.79	-0.11	5.96	0.36	0.81	0.89	0.21	11.01	
1.52	-1.52	2.15	-0.38	20.57	0.75	0.75	1.07	0.19	10.19	

Kecepatan 4 m/s

Sudut Azimuth	Darrieus 1			Torsi	Power	Darrieus 2			Torsi	Power	Darrieus 3			Torsi
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.45	-1.41	1.48	-0.73	25.67	1.09	-0.69	1.29	-0.36	12.48	0.14	0.14	0.20	0.07
30	0.36	-0.91	0.98	-0.47	16.53	0.72	-0.65	0.97	-0.34	11.91	-0.02	0.10	0.11	0.05
45	0.32	-0.50	0.59	-0.26	9.02	0.42	-0.42	0.60	-0.22	7.72	-0.25	0.50	0.56	0.26
60	0.30	-0.11	0.33	-0.06	2.06	0.19	-0.18	0.26	-0.09	3.21	-0.47	1.16	1.25	0.60
75	0.29	0.29	0.41	0.15	5.31	0.03	-0.03	0.04	-0.01	0.49	-0.41	1.31	1.38	0.68
90	0.31	0.70	0.76	0.36	12.69	-0.17	-0.02	0.17	-0.01	0.28	-0.34	0.90	0.96	0.47
105	0.33	0.93	0.99	0.48	16.93	-0.46	-0.17	0.49	-0.09	3.05	-0.30	0.30	0.43	0.16
120	0.32	0.78	0.85	0.41	14.28	-0.69	-0.48	0.84	-0.25	8.74	-0.29	-0.21	0.36	-0.11
135	0.55	0.49	0.74	0.25	8.88	-0.84	-0.84	1.19	-0.44	15.32	-0.25	-0.48	0.54	-0.25
150	0.36	0.05	0.36	0.03	0.93	-0.86	-0.79	1.17	-0.41	14.41	-0.20	-0.48	0.52	-0.25
165	-0.14	0.14	0.20	0.07	2.52	-0.67	-0.40	0.78	-0.21	7.30	-0.16	-0.35	0.39	-0.18
180	-0.53	0.76	0.92	0.39	13.77	-0.58	-0.07	0.59	-0.04	1.29	-0.11	-0.17	0.20	-0.09
195	-0.76	1.09	1.33	0.57	19.90	-0.57	0.22	0.61	0.11	3.96	0.02	0.02	0.02	0.01
210	-0.80	0.76	1.11	0.40	13.90	-0.61	0.49	0.78	0.26	8.93	0.28	0.06	0.29	0.03
225	-0.75	0.25	0.79	0.13	4.57	-0.82	0.82	1.15	0.42	14.85	0.60	-0.22	0.64	-0.11
240	-0.65	-0.22	0.68	-0.11	3.98	-1.05	0.94	1.41	0.49	17.12	0.61	-0.75	0.97	-0.39
255	-0.51	-0.51	0.72	-0.27	9.30	-1.15	0.57	1.29	0.30	10.40	0.53	-0.87	1.02	-0.45
270	-0.41	-0.65	0.77	-0.34	11.80	-0.90	0.05	0.90	0.03	0.96	0.44	-0.67	0.81	-0.35
285	-0.29	-0.57	0.64	-0.30	10.43	0.06	0.13	0.14	0.07	2.37	0.39	-0.39	0.55	-0.20
300	-0.15	-0.32	0.35	-0.17	5.81	0.87	0.81	1.19	0.42	14.70	0.35	-0.09	0.36	-0.05
315	-0.03	-0.07	0.08	-0.04	1.31	1.18	1.18	1.67	0.61	21.51	0.38	0.21	0.43	0.11
330	0.09	-0.02	0.09	-0.01	0.31	1.19	0.91	1.50	0.48	16.63	0.43	0.51	0.67	0.27
345	0.19	-0.19	0.27	-0.10	3.51	1.09	0.36	1.14	0.19	6.50	0.49	0.75	0.90	0.39
360	0.14	-0.60	0.62	-0.31	10.93	0.97	-0.16	0.98	-0.08	2.89	0.52	0.78	0.94	0.41

Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.19	-2.43	3.27	-0.61	44.24	2.77	2.38	3.66	0.60	43.37
1.78	-0.90	1.99	-0.23	16.37	2.40	1.56	2.87	0.39	28.44
1.56	0.40	1.61	0.10	7.22	1.97	0.68	2.08	0.17	12.30
1.01	0.78	1.27	0.20	14.16	1.15	0.17	1.16	0.04	3.17
0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	-0.21	0.65	0.68	0.16	11.82
-1.06	-1.06	1.50	-0.27	19.32	-1.72	1.72	2.44	0.43	31.38
-1.48	-1.15	1.87	-0.29	20.87	-2.89	2.33	3.71	0.59	42.36
-1.11	-0.18	1.12	-0.04	3.20	-3.27	1.81	3.74	0.46	32.92
-0.51	1.01	1.13	0.25	18.36	-2.72	0.59	2.78	0.15	10.78
-0.71	1.63	1.78	0.41	29.63	-2.41	-0.54	2.47	-0.14	9.82
-1.16	1.87	2.21	0.47	34.10	-3.11	-2.28	3.85	-0.57	41.50
-1.59	1.59	2.25	0.40	29.02	-3.04	-3.04	4.30	-0.77	55.39
-1.91	1.20	2.26	0.30	21.81	-2.48	-2.39	3.44	-0.60	43.48
-1.94	0.73	2.07	0.18	13.24	-1.93	-1.17	2.26	-0.30	21.38
-1.52	0.24	1.54	0.06	4.28	-1.42	-0.15	1.43	-0.04	2.74
-0.69	0.10	0.69	0.02	1.80	-0.71	0.18	0.74	0.04	3.21
0.54	0.73	0.91	0.18	13.20	0.16	-0.29	0.33	-0.07	5.20
1.76	1.76	2.49	0.44	32.00	0.63	-0.63	0.89	-0.16	11.41
2.69	2.35	3.57	0.59	42.77	0.38	-0.04	0.38	-0.01	0.80
3.06	1.91	3.60	0.48	34.73	0.01	0.80	0.80	0.20	14.64
3.05	0.89	3.18	0.22	16.21	0.16	1.16	1.17	0.29	21.18
2.91	-0.38	2.94	-0.10	6.93	0.50	1.38	1.47	0.35	25.20
3.03	-2.12	3.70	-0.53	38.56	0.91	1.48	1.73	0.37	26.87
2.80	-2.80	3.96	-0.71	50.93	1.29	1.29	1.83	0.33	23.57

Kecepatan 5 m/s

Sudut Azimuth	Darrius 1			Torsi	Power	Darrius 2			Torsi	Power	Darrius 3			Torsi	Power
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.70	-2.23	2.34	-1.16	52.26	1.70	-1.08	2.01	-0.56	25.35	0.19	0.19	0.26	0.10	4.37
30	0.56	-1.45	1.55	-0.75	33.82	1.12	-1.02	1.51	-0.53	23.89	-0.07	0.16	0.17	0.08	3.76
45	0.50	-0.78	0.93	-0.41	18.32	0.65	-0.65	0.92	-0.34	15.20	-0.41	0.81	0.90	0.42	18.85
60	0.47	-0.18	0.50	-0.09	4.23	0.28	-0.25	0.38	-0.13	5.96	-0.72	1.83	1.97	0.95	42.80
75	0.44	0.44	0.62	0.23	10.33	0.02	-0.03	0.04	-0.02	0.70	-0.61	2.04	2.13	1.06	47.68
90	0.48	1.07	1.17	0.55	24.94	-0.28	-0.02	0.28	-0.01	0.54	-0.49	1.36	1.45	0.71	31.94
105	0.49	1.40	1.49	0.73	32.79	-0.72	-0.26	0.77	-0.13	6.06	-0.43	0.43	0.61	0.23	10.14
120	0.50	1.18	1.28	0.61	27.61	-1.07	-0.74	1.30	-0.38	17.27	-0.41	-0.36	0.55	-0.19	8.45
135	0.86	0.73	1.13	0.38	17.01	-1.30	-1.30	1.84	-0.68	30.50	-0.35	-0.75	0.83	-0.39	17.61
150	0.52	0.07	0.53	0.04	1.67	-1.32	-1.22	1.80	-0.63	28.49	-0.28	-0.73	0.78	-0.38	17.12
165	-0.29	0.29	0.41	0.15	6.75	-1.04	-0.62	1.22	-0.32	14.52	-0.23	-0.53	0.58	-0.27	12.37
180	-0.87	1.23	1.51	0.64	28.87	-0.92	-0.10	0.92	-0.05	2.41	-0.15	-0.24	0.28	-0.12	5.55
195	-1.24	1.72	2.12	0.90	40.35	-0.90	0.35	0.97	0.18	8.29	0.04	0.04	0.06	0.02	0.93
210	-1.30	1.16	1.74	0.60	27.19	-0.98	0.79	1.26	0.41	18.50	0.47	0.09	0.48	0.05	2.22
225	-1.20	0.34	1.25	0.18	7.91	-1.29	1.29	1.83	0.67	30.25	0.92	-0.39	1.00	-0.20	9.03
240	-1.03	-0.38	1.09	-0.20	8.79	-1.67	1.47	2.22	0.76	34.30	0.94	-1.21	1.53	-0.63	28.22
255	-0.81	-0.81	1.14	-0.42	18.93	-1.82	0.86	2.01	0.45	20.18	0.81	-1.36	1.58	-0.71	31.82
270	-0.65	-1.00	1.19	-0.52	23.36	-1.30	0.06	1.30	0.03	1.49	0.67	-1.04	1.24	-0.54	24.39
285	-0.45	-0.85	0.96	-0.44	19.88	0.25	0.29	0.38	0.15	6.72	0.58	-0.58	0.83	-0.30	13.68
300	-0.22	-0.45	0.50	-0.23	10.48	1.41	1.33	1.94	0.69	31.18	0.54	-0.12	0.56	-0.06	2.83
315	-0.04	-0.07	0.09	-0.04	1.74	1.84	1.84	2.60	0.95	42.96	0.59	0.35	0.68	0.18	8.12
330	0.17	-0.03	0.17	-0.01	0.66	1.81	1.35	2.26	0.70	31.62	0.67	0.84	1.07	0.44	19.61
345	0.33	-0.33	0.47	-0.17	7.69	1.67	0.49	1.74	0.25	11.43	0.74	1.17	1.39	0.61	27.38
360	0.24	-0.90	0.94	-0.47	21.17	1.47	-0.30	1.50	-0.16	7.05	0.76	1.20	1.42	0.63	28.14

Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3.39	-3.79	5.09	-0.96	88.70	4.34	3.74	5.73	0.94	87.61
2.76	-1.40	3.09	-0.35	32.74	3.74	2.46	4.48	0.62	57.67
2.47	0.63	2.55	0.16	14.81	3.03	1.08	3.22	0.27	25.26
1.62	1.26	2.05	0.32	29.44	1.77	0.28	1.80	0.07	6.54
0.06	0.06	0.09	0.02	1.43	-0.34	1.02	1.07	0.26	23.85
-1.57	-1.57	2.22	-0.40	36.71	-2.74	2.74	3.87	0.69	64.11
-2.23	-1.68	2.79	-0.42	39.36	-4.62	3.73	5.94	0.94	87.36
-1.67	-0.17	1.68	-0.04	3.96	-5.23	2.91	5.98	0.73	68.13
-0.74	1.64	1.80	0.41	38.44	-4.34	0.99	4.45	0.25	23.05
-1.07	2.59	2.80	0.65	60.65	-3.88	-0.87	3.98	-0.22	20.43
-1.79	2.94	3.44	0.74	68.70	-4.88	-3.61	6.07	-0.91	84.53
-2.51	2.51	3.55	0.63	58.75	-4.74	-4.74	6.70	-1.19	110.86
-3.01	1.90	3.56	0.48	44.40	-3.85	-3.67	5.32	-0.92	85.81
-3.00	1.14	3.21	0.29	26.74	-2.99	-1.76	3.47	-0.44	41.08
-2.30	0.40	2.33	0.10	9.24	-2.20	-0.19	2.21	-0.05	4.42
-0.94	0.24	0.97	0.06	5.58	-1.09	0.27	1.12	0.07	6.25
1.01	1.29	1.64	0.32	30.10	0.26	-0.47	0.53	-0.12	10.91
2.92	2.92	4.13	0.74	68.29	0.91	-0.91	1.28	-0.23	21.25
4.35	3.80	5.77	0.96	88.87	0.43	0.12	0.44	0.03	2.84
4.91	3.04	5.77	0.77	71.13	-0.04	1.34	1.34	0.34	31.39
4.86	1.40	5.06	0.35	32.69	0.20	1.90	1.91	0.48	44.41
4.74	-0.81	4.80	-0.20	18.85	0.74	2.25	2.37	0.57	52.66
4.81	-3.47	5.93	-0.87	81.19	1.36	2.33	2.70	0.59	54.46
4.35	-4.35	6.16	-1.10	101.88	2.06	2.06	2.91	0.52	48.12

Kecepatan 6 m/s

Sudut Azimuth	Darrius 1			Torsi	Power	Darrius 2			Torsi	Power	Darrius 3			Torsi	Power
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.97	-3.26	3.40	-1.70	93.31	2.44	-1.57	2.90	-0.82	44.97	0.24	0.24	0.34	0.13	6.96
30	0.81	-2.12	2.27	-1.10	60.73	1.60	-1.47	2.18	-0.77	42.12	-0.12	0.23	0.26	0.12	6.57
45	0.71	-1.14	1.35	-0.60	32.75	0.93	-0.93	1.32	-0.48	26.65	-0.60	1.17	1.31	0.61	33.34
60	0.66	-0.28	0.71	-0.14	7.90	0.39	-0.36	0.53	-0.19	10.18	-1.04	2.62	2.82	1.36	74.92
75	0.61	0.61	0.86	0.32	17.44	0.02	-0.04	0.04	-0.02	1.05	-0.86	2.91	3.03	1.51	83.20
90	0.65	1.48	1.61	0.77	42.30	-0.39	-0.03	0.39	-0.02	0.86	-0.71	1.98	2.11	1.03	56.77
105	0.66	1.95	2.06	1.01	55.78	-1.00	-0.36	1.06	-0.19	10.18	-0.61	0.61	0.86	0.32	17.47
120	0.69	1.68	1.82	0.87	47.98	-1.49	-1.02	1.81	-0.53	29.29	-0.57	-0.54	0.78	-0.28	15.31
135	1.20	1.04	1.59	0.54	29.78	-1.84	-1.84	2.60	-0.95	52.48	-0.50	-1.10	1.21	-0.57	31.34
150	0.76	0.11	0.76	0.06	3.14	-1.91	-1.77	2.61	-0.92	50.71	-0.41	-1.06	1.14	-0.55	30.41
165	-0.40	0.40	0.57	0.21	11.49	-1.54	-0.93	1.80	-0.49	26.69	-0.33	-0.76	0.83	-0.40	21.76
180	-1.23	1.75	2.14	0.91	50.03	-1.34	-0.17	1.35	-0.09	4.88	-0.22	-0.35	0.41	-0.18	9.92
195	-1.76	2.48	3.04	1.29	70.83	-1.31	0.49	1.40	0.26	14.12	0.05	0.05	0.07	0.02	1.35
210	-1.85	1.63	2.47	0.85	46.76	-1.39	1.11	1.78	0.57	31.61	0.64	0.13	0.66	0.07	3.65
225	-1.73	0.50	1.80	0.26	14.33	-1.80	1.80	2.54	0.93	51.42	1.34	-0.50	1.43	-0.26	14.36
240	-1.49	-0.54	1.58	-0.28	15.32	-2.36	2.09	3.16	1.09	59.91	1.39	-1.72	2.21	-0.89	49.07
255	-1.17	-1.17	1.65	-0.61	33.36	-2.62	1.27	2.91	0.66	36.29	1.21	-1.99	2.33	-1.03	56.83
270	-0.93	-1.43	1.71	-0.75	41.02	-1.95	0.10	1.96	0.05	2.95	1.00	-1.53	1.83	-0.79	43.64
285	-0.65	-1.24	1.40	-0.64	35.46	0.21	0.34	0.40	0.17	9.61	0.87	-0.87	1.24	-0.45	24.98
300	-0.33	-0.67	0.75	-0.35	19.13	1.96	1.84	2.69	0.96	52.55	0.81	-0.20	0.83	-0.10	5.67
315	-0.07	-0.13	0.15	-0.07	3.74	2.65	2.65	3.75	1.38	75.81	0.87	0.47	0.99	0.24	13.40
330	0.21	-0.04	0.22	-0.02	1.01	2.63	1.98	3.29	1.03	56.53	0.97	1.17	1.52	0.61	33.39
345	0.43	-0.43	0.61	-0.22	12.26	2.41	0.72	2.52	0.37	20.58	1.07	1.64	1.96	0.85	46.94
360	0.31	-1.29	1.33	-0.67	36.92	2.13	-0.42	2.17	-0.22	12.12	1.10	1.68	2.01	0.88	48.18

Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.87	-5.47	7.32	-1.38	156.47	6.25	5.42	8.27	1.37	154.93
3.96	-2.04	4.46	-0.51	58.36	5.37	3.58	6.45	0.90	102.49
3.61	0.91	3.72	0.23	25.89	4.35	1.59	4.64	0.40	45.62
2.47	1.90	3.12	0.48	54.42	2.58	0.40	2.61	0.10	11.37
0.30	0.28	0.41	0.07	8.11	-0.41	1.39	1.45	0.35	39.72
-2.05	-2.05	2.90	-0.52	58.66	-3.87	3.87	5.47	0.98	110.66
-3.10	-2.32	3.88	-0.58	66.38	-6.67	5.42	8.60	1.37	155.10
-2.47	-0.28	2.48	-0.07	8.13	-7.68	4.34	8.82	1.09	123.99
-1.02	2.39	2.59	0.60	68.26	-6.49	1.59	6.68	0.40	45.33
-1.42	3.76	4.02	0.95	107.55	-5.52	-1.13	5.64	-0.28	32.32
-2.56	4.25	4.96	1.07	121.68	-6.93	-5.07	8.59	-1.28	145.08
-3.67	3.67	5.19	0.92	104.94	-6.83	-6.83	9.67	-1.72	195.48
-4.39	2.77	5.19	0.70	79.13	-5.61	-5.37	7.76	-1.35	153.57
-4.40	1.68	4.72	0.42	48.16	-4.37	-2.61	5.09	-0.66	74.66
-3.39	0.59	3.44	0.15	16.91	-3.28	-0.29	3.29	-0.07	8.16
-1.45	0.32	1.48	0.08	9.19	-1.77	0.48	1.83	0.12	13.62
1.32	1.74	2.18	0.44	49.72	0.18	-0.51	0.55	-0.13	14.72
4.09	4.09	5.78	1.03	116.96	1.30	-1.30	1.84	-0.33	37.18
6.26	5.51	8.34	1.39	157.52	0.75	0.03	0.75	0.01	0.92
7.15	4.55	8.47	1.15	130.19	-0.08	1.91	1.91	0.48	54.57
7.08	2.15	7.40	0.54	61.47	0.14	2.79	2.80	0.70	79.87
6.70	-0.91	6.76	-0.23	26.11	0.89	3.25	3.37	0.82	93.03
6.89	-4.84	8.42	-1.22	138.35	1.87	3.34	3.82	0.84	95.39
6.33	-6.33	8.95	-1.59	180.97	2.94	2.94	4.16	0.74	84.10

Kecepatan 7 m/s

Sudut Azimuth	Darrieus 1			Torsi	Power	Darrieus 2			Torsi	Power	Darrieus 3			Torsi
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	1.32	-4.48	4.68	-2.33	153.92	3.31	-2.16	3.96	-1.12	74.14	0.29	0.29	0.41	0.15
30	1.12	-2.93	3.14	-1.53	100.66	2.17	-2.00	2.95	-1.04	68.74	-0.23	0.32	0.39	0.16
45	0.98	-1.57	1.85	-0.82	53.96	1.24	-1.24	1.76	-0.65	42.61	-0.85	1.67	1.87	0.87
60	0.89	-0.37	0.97	-0.19	12.83	0.49	-0.45	0.66	-0.23	15.29	-1.37	3.61	3.86	1.87
75	0.83	0.83	1.17	0.43	28.33	-0.02	-0.02	0.03	-0.01	0.85	-1.07	3.91	4.06	2.03
90	0.87	1.98	2.16	1.03	67.81	-0.56	-0.04	0.57	-0.02	1.39	-0.88	2.64	2.78	1.37
105	0.89	2.57	2.72	1.34	88.27	-1.38	-0.49	1.46	-0.25	16.71	-0.75	0.75	1.07	0.39
120	1.07	2.27	2.51	1.18	77.81	-2.01	-1.39	2.45	-0.72	47.65	-0.70	-0.79	1.06	-0.41
135	1.69	1.38	2.19	0.72	47.47	-2.50	-2.50	3.54	-1.30	85.91	-0.61	-1.50	1.62	-0.78
150	0.94	0.13	0.95	0.07	4.54	-2.57	-2.36	3.49	-1.23	81.05	-0.50	-1.40	1.49	-0.73
165	-0.70	0.70	0.99	0.36	24.01	-2.08	-1.22	2.41	-0.64	41.94	-0.41	-0.97	1.06	-0.51
180	-1.82	2.54	3.12	1.32	87.03	-1.84	-0.20	1.85	-0.10	6.69	-0.26	-0.41	0.48	-0.21
195	-2.50	3.32	4.15	1.72	113.83	-1.79	0.71	1.93	0.37	24.52	0.10	0.10	0.14	0.05
210	-2.60	2.13	3.36	1.11	73.21	-1.94	1.57	2.49	0.81	53.75	0.96	0.20	0.98	0.10
225	-2.41	0.56	2.48	0.29	19.25	-2.56	2.56	3.62	1.33	87.77	1.79	-0.81	1.96	-0.42
240	-2.05	-0.81	2.21	-0.42	27.71	-3.30	2.84	4.35	1.47	97.33	1.81	-2.44	3.04	-1.27
255	-1.61	-1.61	2.27	-0.84	55.13	-3.58	1.62	3.93	0.84	55.45	1.56	-2.70	3.12	-1.40
270	-1.27	-1.90	2.29	-0.99	65.37	-2.36	0.09	2.37	0.05	3.24	1.30	-2.05	2.43	-1.07
285	-0.87	-1.56	1.79	-0.81	53.61	0.77	0.73	1.06	0.38	25.01	1.12	-1.12	1.59	-0.58
300	-0.41	-0.77	0.87	-0.40	26.51	2.94	2.82	4.08	1.47	96.78	1.06	-0.21	1.08	-0.11
315	-0.05	-0.08	0.10	-0.04	2.83	3.61	3.61	5.10	1.88	123.80	1.14	0.72	1.35	0.37
330	0.37	-0.06	0.37	-0.03	1.92	3.49	2.51	4.30	1.30	86.07	1.30	1.71	2.14	0.89
345	0.67	-0.67	0.94	-0.35	22.90	3.19	0.80	3.29	0.41	27.33	1.39	2.28	2.66	1.18
360	0.49	-1.65	1.72	-0.86	56.52	2.78	-0.70	2.87	-0.37	24.17	1.37	2.28	2.66	1.19

Power	Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.06	6.56	-7.41	9.90	-1.87	254.44	8.50	7.41	11.28	1.87	254.24
10.88	5.30	-2.75	5.97	-0.69	94.29	7.25	4.91	8.75	1.24	168.66
57.16	4.86	1.24	5.01	0.31	42.65	5.81	2.23	6.22	0.56	76.48
123.75	3.32	2.59	4.22	0.65	88.99	3.38	0.63	3.43	0.16	21.46
134.31	0.42	0.40	0.58	0.10	13.81	-0.70	2.01	2.12	0.51	68.90
90.53	-2.66	-2.66	3.76	-0.67	91.32	-5.44	5.44	7.69	1.37	186.57
25.85	-4.02	-2.91	4.96	-0.73	99.76	-9.28	7.55	11.96	1.90	259.07
27.20	-3.04	-0.02	3.04	0.00	0.52	-10.57	5.98	12.15	1.51	205.32
51.48	-1.27	3.43	3.65	0.86	117.57	-8.93	2.17	9.19	0.55	74.31
48.07	-1.92	5.20	5.54	1.31	178.35	-7.81	-1.71	8.00	-0.43	58.63
33.46	-3.48	5.80	6.77	1.46	199.07	-9.57	-7.12	11.92	-1.79	244.30
13.96	-5.01	5.01	7.09	1.26	171.95	-9.27	-9.27	13.10	-2.33	318.00
3.44	-5.98	3.80	7.08	0.96	130.51	-7.56	-7.12	10.39	-1.79	244.39
6.70	-5.86	2.30	6.29	0.58	78.83	-5.84	-3.35	6.73	-0.84	114.81
27.73	-4.32	0.88	4.41	0.22	30.23	-4.28	-0.30	4.29	-0.08	10.30
83.66	-1.52	0.71	1.68	0.18	24.42	-2.16	0.53	2.23	0.13	18.25
92.60	2.30	2.84	3.65	0.72	97.48	0.38	-0.85	0.93	-0.21	29.21
70.44	6.05	6.05	8.56	1.52	207.64	1.58	-1.58	2.24	-0.40	54.38
38.55	8.87	7.75	11.78	1.95	265.97	0.57	0.56	0.80	0.14	19.23
7.11	9.96	6.19	11.73	1.56	212.27	-0.31	2.87	2.88	0.72	98.46
24.68	9.78	2.80	10.17	0.70	95.94	0.16	3.99	3.99	1.00	136.79
58.54	9.52	-1.83	9.70	-0.46	62.87	1.14	4.64	4.78	1.17	159.24
78.09	9.52	-7.02	11.82	-1.77	240.84	2.55	4.64	5.30	1.17	159.28
78.25	8.53	-8.53	12.06	-2.15	292.74	4.16	4.16	5.88	1.05	142.74

Kecepatan 8 m/s

Sudut Azimuth	Darrieus 1			Torsi	Power	Darrieus 2			Torsi	Power	Darrieus 3			Torsi	Power
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
15	1.73	-5.92	6.17	-3.08	237.08	4.32	-2.84	5.17	-1.48	113.87	0.34	0.34	0.48	0.18	13.57
30	1.47	-3.89	4.16	-2.02	155.74	2.82	-2.62	3.85	-1.36	104.92	-0.33	0.41	0.53	0.21	16.48
45	1.28	-2.08	2.44	-1.08	83.17	1.61	-1.61	2.28	-0.84	64.55	-1.11	2.18	2.44	1.13	87.22
60	1.16	-0.50	1.26	-0.26	20.01	0.62	-0.56	0.83	-0.29	22.45	-1.83	4.78	5.12	2.49	191.56
75	1.05	1.05	1.49	0.55	42.12	-0.06	-0.02	0.06	-0.01	0.80	-1.36	5.10	5.28	2.65	204.25
90	1.10	2.51	2.74	1.30	100.38	-0.74	-0.05	0.74	-0.03	1.99	-1.14	3.46	3.65	1.80	138.61
105	1.10	3.26	3.44	1.70	130.52	-1.77	-0.62	1.87	-0.32	24.68	-0.96	0.96	1.36	0.50	38.45
120	1.43	2.95	3.28	1.53	118.17	-2.57	-1.77	3.12	-0.92	70.77	-0.89	-1.06	1.39	-0.55	42.59
135	2.21	1.79	2.84	0.93	71.59	-3.22	-3.22	4.55	-1.67	128.85	-0.78	-1.97	2.12	-1.03	79.00
150	1.20	0.18	1.22	0.09	7.06	-3.35	-3.08	4.55	-1.60	123.25	-0.63	-1.82	1.92	-0.95	72.79
165	-0.91	0.91	1.28	0.47	36.25	-2.72	-1.61	3.16	-0.84	64.50	-0.51	-1.24	1.35	-0.65	49.81
180	-2.37	3.27	4.04	1.70	131.10	-2.41	-0.26	2.42	-0.14	10.49	-0.32	-0.51	0.61	-0.27	20.56
195	-3.27	4.30	5.40	2.24	172.17	-2.34	0.93	2.51	0.48	37.08	0.13	0.13	0.18	0.07	5.23
210	-3.43	2.80	4.42	1.45	112.03	-2.50	2.02	3.21	1.05	80.82	1.23	0.25	1.26	0.13	10.04
225	-3.17	0.70	3.25	0.36	27.84	-3.34	3.34	4.72	1.74	133.60	2.33	-1.05	2.56	-0.54	41.90
240	-2.70	-1.08	2.91	-0.56	43.06	-4.29	3.68	5.65	1.91	147.25	2.38	-3.20	3.99	-1.67	128.32
255	-2.11	-2.11	2.98	-1.10	84.37	-4.67	2.10	5.12	1.09	84.09	2.06	-3.57	4.12	-1.86	142.90
270	-1.65	-2.47	2.97	-1.28	98.76	-3.06	0.12	3.06	0.06	4.85	1.73	-2.72	3.22	-1.41	108.86
285	-1.13	-2.00	2.30	-1.04	80.26	1.02	0.96	1.40	0.50	38.61	1.47	-1.47	2.09	-0.77	59.05
300	-0.53	-0.98	1.11	-0.51	39.21	3.87	3.71	5.36	1.93	148.61	1.38	-0.27	1.41	-0.14	10.90
315	-0.05	-0.10	0.11	-0.05	3.89	4.75	4.75	6.72	2.47	190.14	1.49	0.94	1.76	0.49	37.56
330	0.48	-0.07	0.49	-0.04	2.85	4.62	3.31	5.68	1.72	132.60	1.68	2.21	2.78	1.15	88.35
345	0.85	-0.85	1.20	-0.44	34.06	4.19	1.02	4.31	0.53	41.00	1.78	2.92	3.42	1.52	116.76
360	0.63	-2.11	2.20	-1.10	84.54	3.63	-0.95	3.75	-0.49	37.99	1.76	2.94	3.42	1.53	117.54

Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
8.52	-9.68	12.90	-2.44	387.76	11.11	9.72	14.76	2.45	389.18
6.84	-3.60	7.73	-0.91	144.25	9.42	6.47	11.43	1.63	259.06
6.31	1.59	6.51	0.40	63.57	7.49	2.99	8.07	0.75	119.57
4.39	3.42	5.57	0.86	137.05	4.35	0.88	4.44	0.22	35.22
0.71	0.68	0.98	0.17	27.26	-0.91	2.62	2.77	0.66	104.96
-3.23	-3.23	4.56	-0.81	129.23	-7.11	7.11	10.06	1.79	284.86
-5.05	-3.57	6.18	-0.90	143.05	-12.20	9.95	15.74	2.51	398.33
-3.90	0.11	3.90	0.03	4.23	-13.99	7.96	16.09	2.01	318.58
-1.69	4.48	4.79	1.13	179.45	-11.99	2.98	12.36	0.75	119.16
-2.48	6.73	7.17	1.70	269.55	-10.30	-2.19	10.53	-0.55	87.62
-4.55	7.55	8.81	1.90	302.27	-12.48	-9.27	15.55	-2.34	371.25
-6.58	6.58	9.31	1.66	263.55	-12.15	-12.15	17.19	-3.06	486.59
-7.81	5.00	9.27	1.26	200.08	-9.96	-9.38	13.68	-2.36	375.50
-7.61	3.01	8.18	0.76	120.71	-7.66	-4.43	8.85	-1.12	177.24
-5.57	1.22	5.70	0.31	48.66	-5.58	-0.42	5.60	-0.11	16.88
-1.91	1.02	2.16	0.26	41.00	-2.84	0.69	2.92	0.17	27.76
3.06	3.78	4.86	0.95	151.28	0.40	-1.04	1.12	-0.26	41.83
7.93	7.93	11.21	2.00	317.36	1.99	-1.99	2.81	-0.50	79.57
11.67	10.21	15.51	2.57	408.76	0.72	0.77	1.06	0.19	30.77
13.15	8.20	15.50	2.07	328.30	-0.42	3.79	3.81	0.96	151.74
12.90	3.71	13.42	0.93	148.40	0.12	5.30	5.30	1.33	212.03
12.46	-2.34	12.68	-0.59	93.56	1.37	6.14	6.29	1.55	245.74
12.42	-9.13	15.41	-2.30	365.45	3.26	6.08	6.89	1.53	243.27
11.15	-11.15	15.77	-2.81	446.44	5.47	5.47	7.74	1.38	219.15

Kecepatan 9 m/s

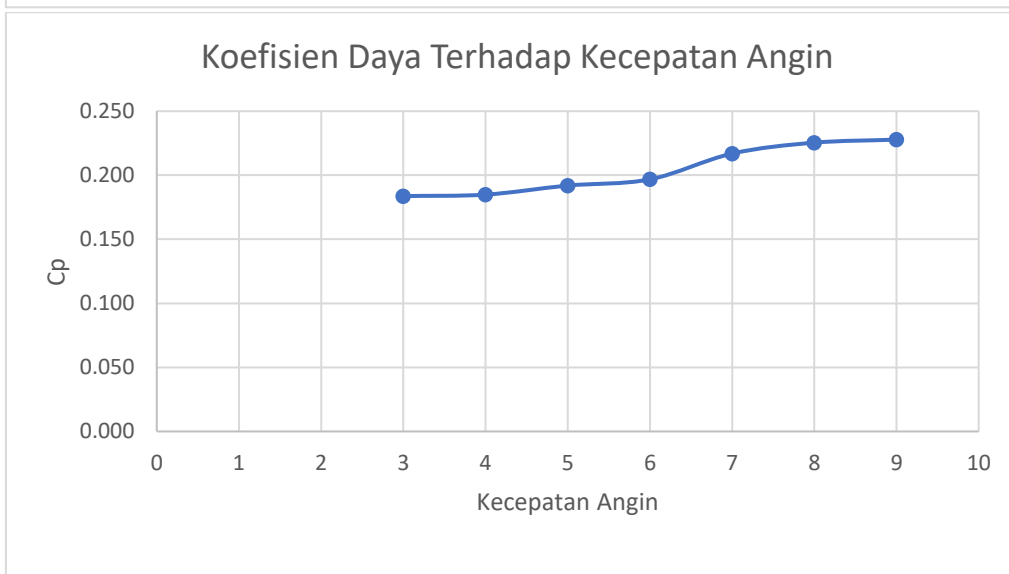
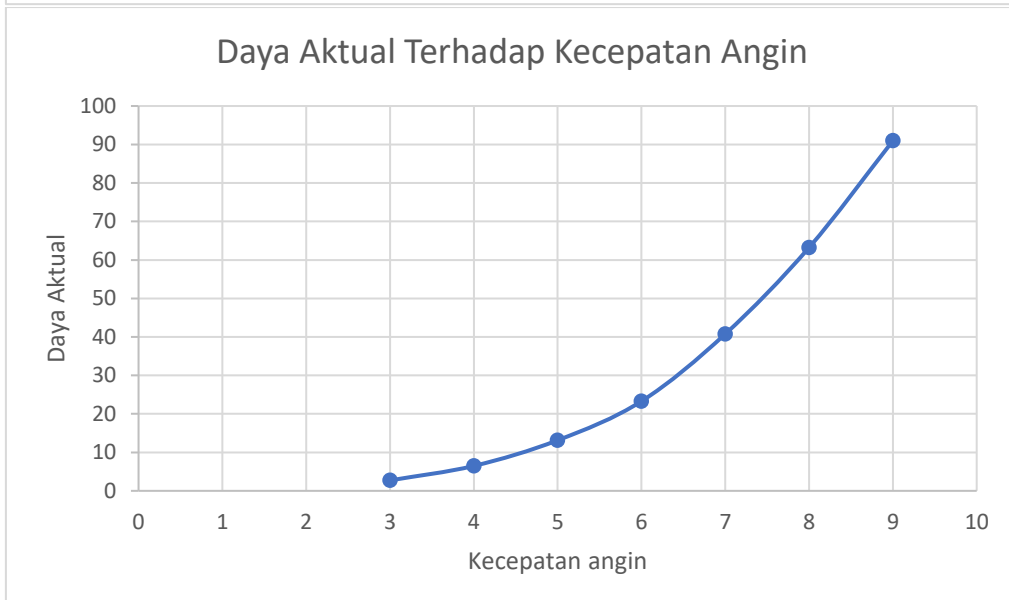
Sudut Azimuth	Darrieus 1			Torsi	Power	Darrieus 2			Torsi	Power	Darrieus 3			Torsi	Power
	Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	2.15	-7.58	7.88	-3.94	346.84	5.48	-3.62	6.56	-1.88	165.66	0.40	0.40	0.56	0.21	18.24
30	1.86	-5.01	5.34	-2.60	229.23	3.59	-3.33	4.90	-1.73	152.46	-0.48	0.51	0.70	0.27	23.47
45	1.62	-2.67	3.12	-1.39	122.26	2.05	-2.05	2.90	-1.06	93.68	-1.46	2.78	3.14	1.45	127.39
60	1.44	-0.66	1.58	-0.35	30.42	0.78	-0.71	1.05	-0.37	32.28	-2.27	5.94	6.36	3.09	271.73
75	1.26	1.26	1.78	0.66	57.71	-0.08	-0.02	0.09	-0.01	0.87	-1.69	6.35	6.57	3.30	290.38
90	1.31	3.08	3.35	1.60	141.15	-0.91	-0.06	0.92	-0.03	2.61	-1.43	4.35	4.58	2.26	199.23
105	1.30	4.02	4.23	2.09	184.13	-2.15	-0.74	2.27	-0.39	33.95	-1.24	1.24	1.76	0.65	56.83
120	1.76	3.75	4.15	1.95	171.72	-3.16	-2.15	3.82	-1.12	98.52	-1.15	-1.35	1.77	-0.70	61.69
135	2.77	2.33	3.62	1.21	106.51	-3.98	-3.98	5.64	-2.07	182.35	-1.02	-2.53	2.73	-1.31	115.70
150	1.61	0.22	1.62	0.12	10.23	-4.24	-3.93	5.78	-2.05	179.96	-0.82	-2.34	2.48	-1.21	106.91
165	-1.08	1.08	1.53	0.56	49.47	-3.51	-2.12	4.10	-1.10	97.10	-0.65	-1.59	1.72	-0.82	72.59
180	-2.94	4.13	5.07	2.15	188.79	-3.07	-0.39	3.10	-0.20	17.80	-0.43	-0.68	0.81	-0.36	31.30
195	-4.14	5.69	7.04	2.96	260.55	-2.99	1.14	3.20	0.59	52.08	0.13	0.13	0.18	0.07	5.83
210	-4.33	3.73	5.71	1.94	170.47	-3.14	2.50	4.01	1.30	114.42	1.44	0.28	1.47	0.15	13.00
225	-4.02	1.00	4.14	0.52	45.61	-4.08	4.08	5.77	2.12	186.65	2.96	-1.19	3.19	-0.62	54.25
240	-3.43	-1.32	3.67	-0.69	60.29	-5.33	4.64	7.07	2.41	212.28	3.13	-3.98	5.06	-2.07	182.13
255	-2.66	-2.66	3.76	-1.38	121.74	-5.95	2.78	6.57	1.45	127.24	2.76	-4.61	5.37	-2.40	210.92
270	-2.07	-3.13	3.76	-1.63	143.36	-4.16	0.17	4.16	0.09	7.94	2.30	-3.54	4.23	-1.84	162.12
285	-1.44	-2.61	2.98	-1.36	119.49	0.80	0.94	1.24	0.49	43.02	1.97	-1.97	2.79	-1.03	90.26
300	-0.70	-1.34	1.51	-0.69	61.10	4.70	4.45	6.47	2.32	203.75	1.82	-0.42	1.87	-0.22	19.20
315	-0.09	-0.21	0.23	-0.11	9.75	6.08	6.08	8.60	3.16	278.27	1.94	1.10	2.23	0.57	50.29
330	0.52	-0.08	0.53	-0.04	3.55	5.92	4.33	7.34	2.25	198.12	2.16	2.65	3.42	1.38	121.07
345	0.95	-0.95	1.34	-0.49	43.40	5.39	1.41	5.57	0.73	64.46	2.34	3.65	4.33	1.90	166.83
360	0.70	-2.70	2.79	-1.41	123.66	4.72	-1.13	4.85	-0.59	51.71	2.30	3.65	4.31	1.90	167.12

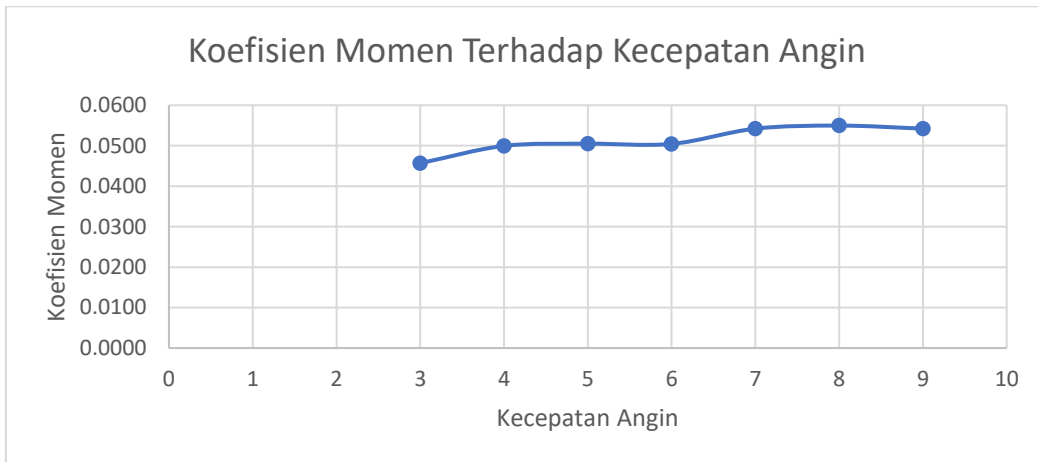
Savonius 1			Torsi	Power	Savonius 2			Torsi	Power Sav2
Frad (N)	Ftang (N)	Resultan			Frad (N)	Ftang (N)	Resultan		
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	
10.73	-12.29	16.32	-3.10	562.40	14.07	12.35	18.72	3.11	565.14
8.58	-4.63	9.74	-1.17	211.76	11.89	8.26	14.47	2.08	377.90
8.00	1.93	8.23	0.49	88.39	9.42	3.88	10.19	0.98	177.58
5.69	4.39	7.19	1.11	200.96	5.52	1.16	5.64	0.29	52.91
1.21	1.16	1.68	0.29	53.16	-0.99	3.18	3.33	0.80	145.30
-3.78	-3.78	5.34	-0.95	172.92	-8.78	8.78	12.41	2.21	401.71
-6.22	-4.38	7.61	-1.10	200.41	-15.33	12.53	19.80	3.16	573.57
-5.08	0.01	5.08	0.00	0.60	-17.86	10.25	20.59	2.58	469.08
-2.18	5.60	6.01	1.41	256.43	-15.62	4.05	16.14	1.02	185.52
-3.04	8.40	8.93	2.12	384.22	-12.92	-2.49	13.16	-0.63	114.17
-5.71	9.49	11.07	2.39	434.30	-15.58	-11.40	19.31	-2.87	521.65
-8.34	8.34	11.79	2.10	381.50	-15.47	-15.47	21.88	-3.90	707.98
-9.90	6.30	11.74	1.59	288.51	-12.81	-12.20	17.70	-3.08	558.47
-9.75	3.85	10.48	0.97	175.96	-9.90	-5.93	11.54	-1.49	271.37
-7.27	1.56	7.43	0.39	71.47	-7.33	-0.65	7.36	-0.16	29.82
-2.73	1.20	2.99	0.30	54.93	-4.07	1.10	4.21	0.28	50.41
3.44	4.40	5.59	1.11	201.41	0.02	-0.90	0.90	-0.23	40.97
9.62	9.62	13.61	2.43	440.39	2.43	-2.43	3.44	-0.61	111.27
14.65	12.91	19.52	3.25	590.63	1.34	0.51	1.43	0.13	23.32
16.83	10.77	19.98	2.71	492.72	-0.28	4.50	4.51	1.13	205.85
16.61	5.10	17.38	1.29	233.41	0.20	6.59	6.59	1.66	301.37
15.57	-2.22	15.73	-0.56	101.57	1.70	7.68	7.87	1.94	351.54
15.69	-11.10	19.22	-2.80	508.00	4.01	7.63	8.62	1.92	349.34
14.28	-14.28	20.20	-3.60	653.65	6.78	6.78	9.59	1.71	310.27

Data Perhitungan Studi Numerik

Simulasi										
Kec. angin	RPM	Rad/s	TSR	Time Step	Torsi (Avg)	P Aktual	P teoritis	Cp	Cm	Radius Turbine
3	198	21	3.6	0.012460	0.117149	2.43	14.7911	0.164	0.0457	0.52
4	272	28	3.7	0.009345	0.227717	6.48	35.0605	0.185	0.0500	0.52
5	349	37	3.8	0.007072	0.359677	13.14	68.4775	0.192	0.0505	0.52
6	430	45	3.9	0.005815	0.517404	23.28	118.329	0.197	0.0505	0.52
7	514	54	4	0.004846	0.756911	40.76	187.902	0.217	0.0542	0.52
8	602	63	4.1	0.004153	1.002379	63.23	280.484	0.225	0.0550	0.52
9	694	73	4.2	0.003584	1.251409	90.97	399.361	0.228	0.0542	0.52

Grafik Performa Turbin Savonius-Darrieus Studi Numerik



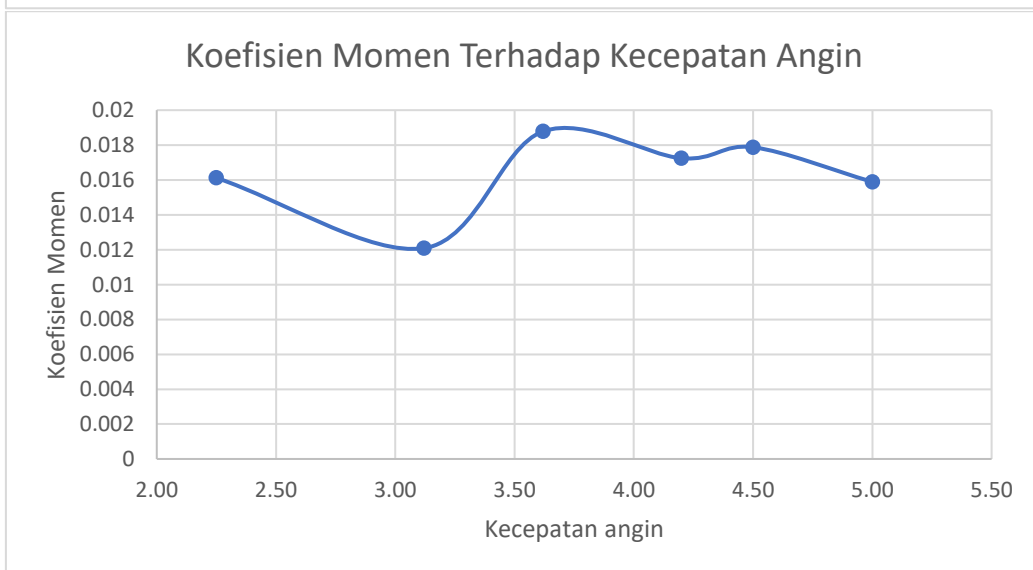
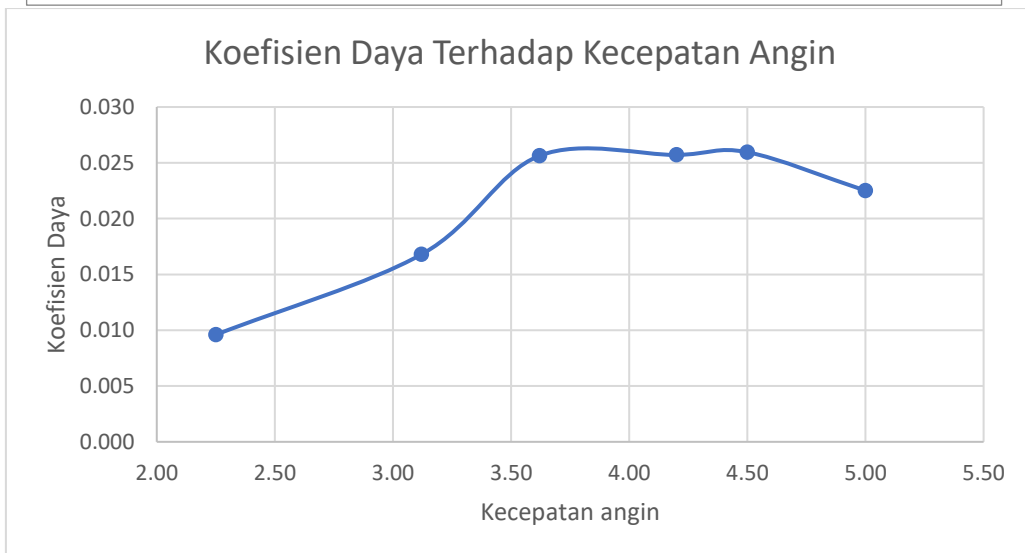


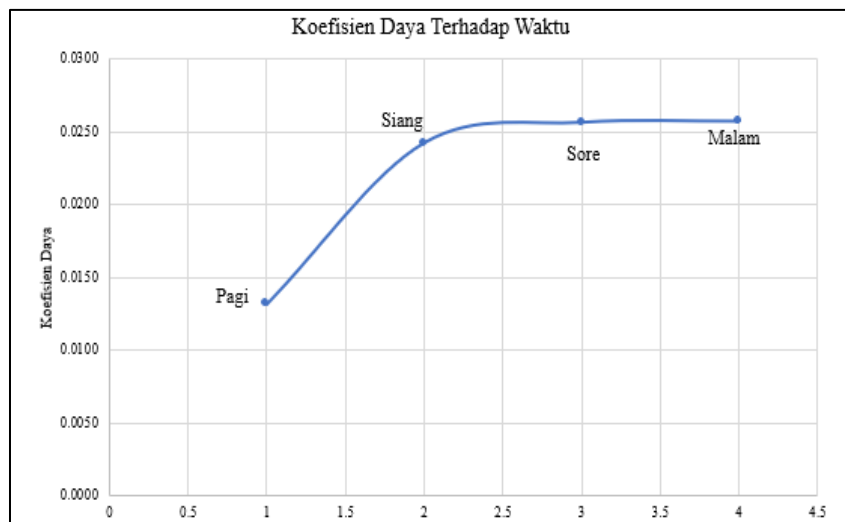
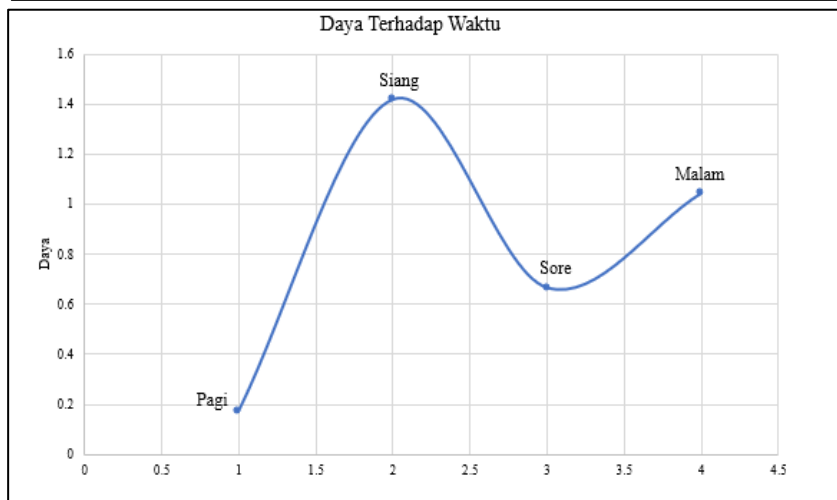
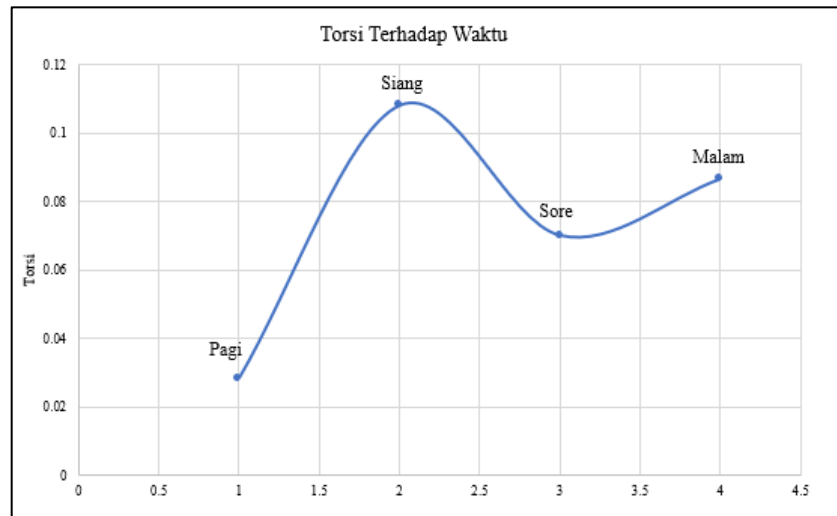
2. Data Perhitungan Studi Eksperimental

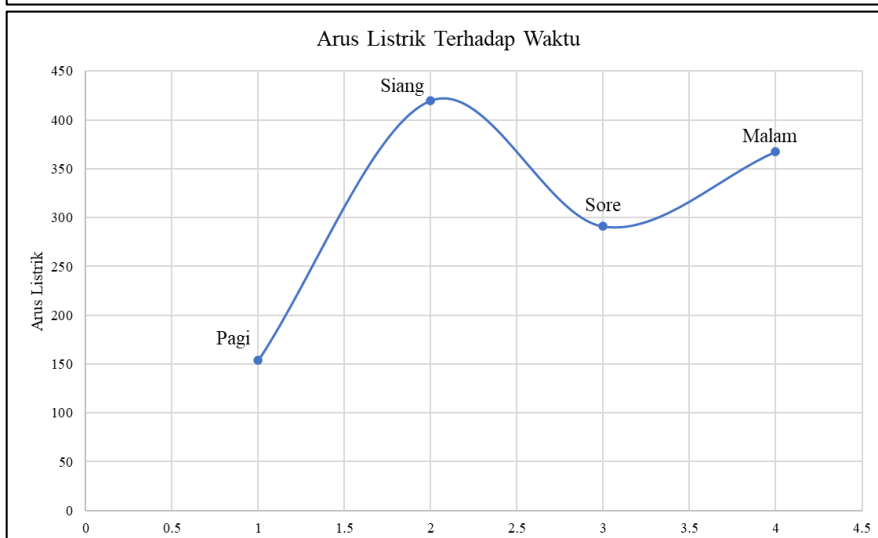
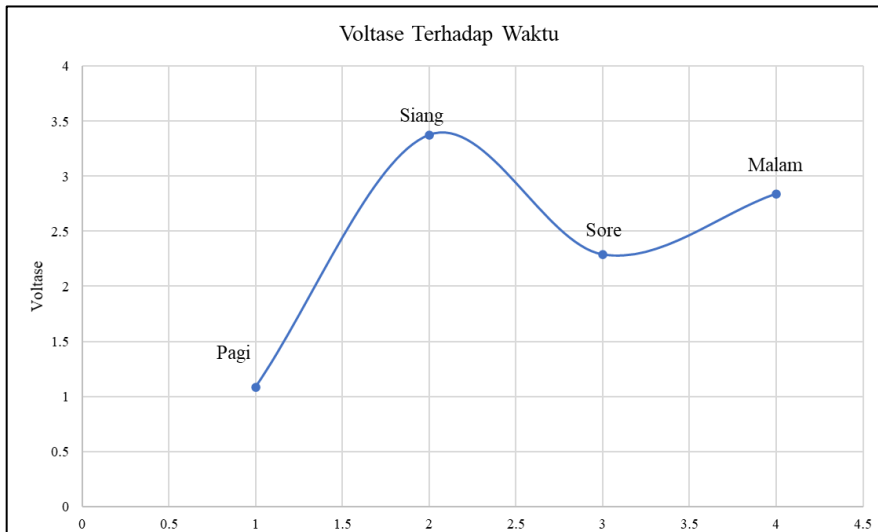
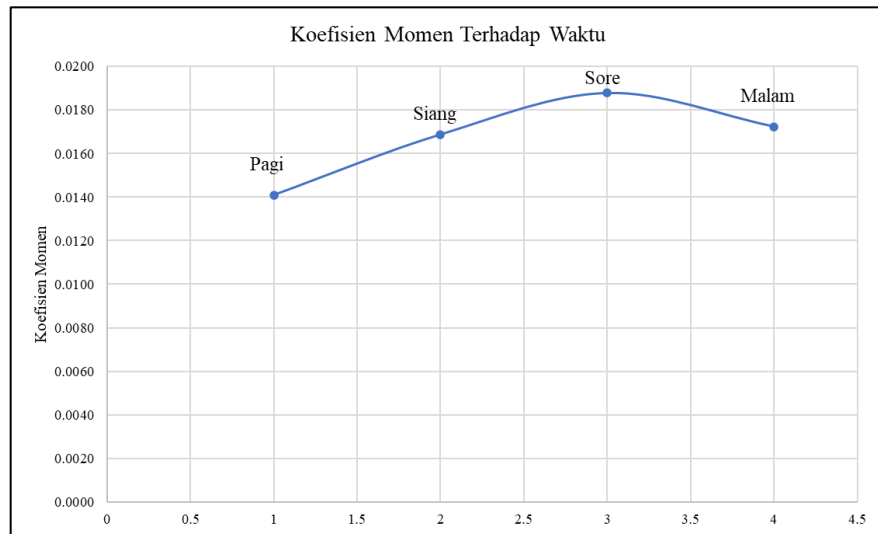
Eksperimen												
Pengambilan Data	Kecepatan Angin	RPM	Rad/s	TSR	Torsi	Voltase (V)	mpere (mA)	Paktual	Pteoritis	Cp	Cm	Waktu
Pengambilan Data 1	2.25	24.6	2.57611	0.60	0.0232444	0.40	149.70	0.0599	6.24001	0.010	0.016118017	Pagi
Pengambilan Data 2	3.12	79.6	8.3357	1.39	0.0335072	1.77	157.80	0.2793	16.638	0.017	0.012083367	Pagi
Pengambilan Data 3	3.62	90.7	9.49809	1.36	0.0701267	2.29	290.86	0.6661	25.9874	0.026	0.018785598	Sore
Pengambilan Data 4	4.20	115	12.0428	1.49	0.0866448	2.84	367.41	1.0434	40.5869	0.02571	0.017242604	Malam
Pengambilan Data 5	4.50	120	12.5664	1.45	0.1030995	3.19	406.14	1.2956	49.9201	0.02595	0.017872699	Siang
Pengambilan Data 6	5.00	130.1	13.624	1.42	0.1131545	3.56	433.04	1.5416	68.4775	0.02251	0.015888785	Siang

Grafik Performa Turbin Savonius-Darrieus Studi Eksperimental



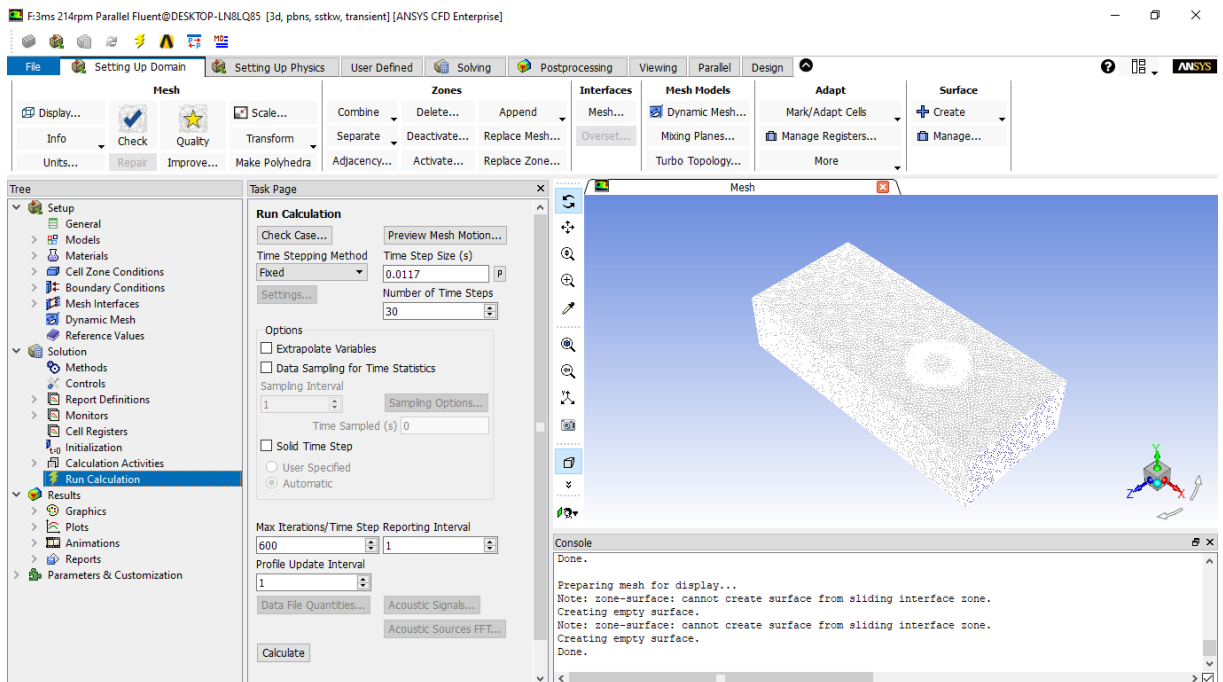
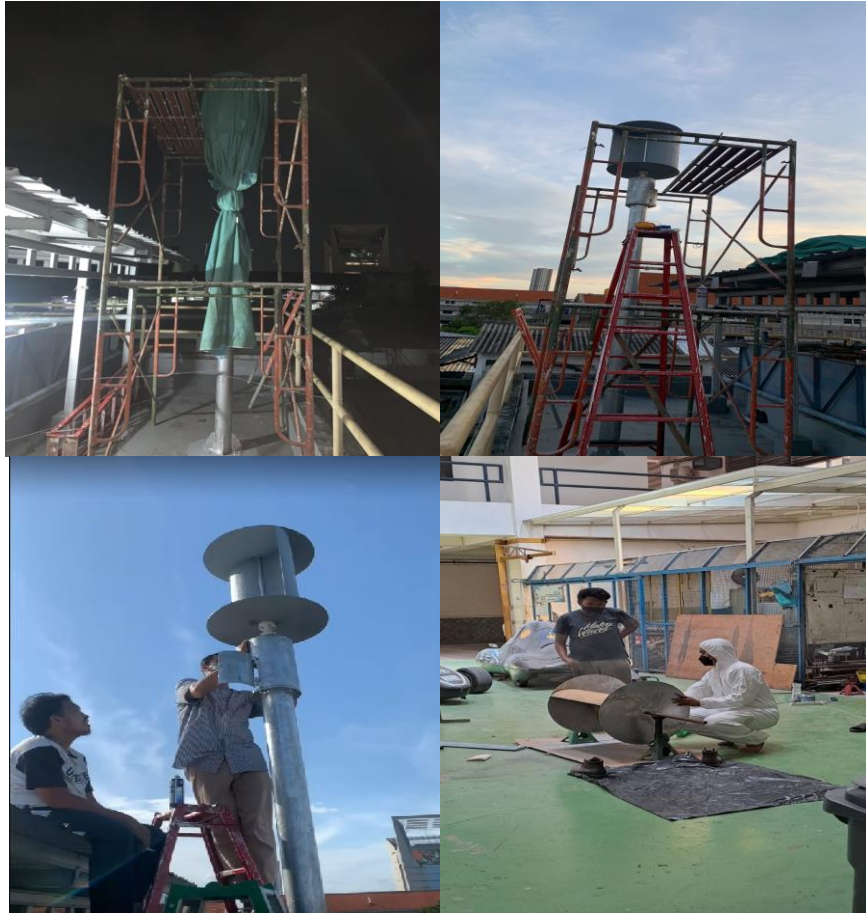






3. Proses Pembuatan Turbin





BIODATA PENULIS



William Mikhael Parlindungan, lahir di Batam 03 januari 2000. Anak pertama dari Behrin Olwin Siagian dan Evi Rina Situmorang. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis mulai menuntut ilmu dari jenjang TK Yos Sudarso 1 (2004-2006), lalu melanjutkan ke SD Yos Sudarso (2006-2012), kemudian melanjutkan ke SMP Yos Sudarso (2012-2015), dan SMA Negeri 1 Batam (2015-2018). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2018, penulis melanjutkan studi strata 1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin (2018-2022) melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Ketika menimba ilmu diperkuliahan, penulis mengikuti organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin dimulai dari semester 3 dan 4 (2019-2020) menjadi Staf Divisi ORG. Kemudian menjadi Kepala Biro Organisasi Divisi ORG pada semester 5 dan 6 (2020-2021). Setelah itu penulis aktif dalam tim riset yaitu ITS Team Sapuangin sebagai staf Divisi Vehicle Dynamic pada semester 5 dan 6 (2020-2021). Kemudian penulis menjabat sebagai General Manager dalam ITS Team Sapuangin pada semester 7 dan 8 (2021-2022). Pelatihan yang pernah penulis ikuti semasa kuliah Latihan Keterampilan Mahasiswa Wirausaha Tingkat Dasar (LKMWW-TD) Departemen Teknik Mesin ITS pada tahun 2018. Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Pra Dasar (LKMM-Pra TD) FTI ITS pada tahun 2019. Kursus Dasar-dasar otomotif (KDDO) Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin pada tahun 2019. Apabila terdapat kritik dan saran, dapat menghubungi penulis melalui email yaitu williammpsiagian@gmail.com