

TUGAS AKHIR - TM184835

**ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN
SAVONIUS *SINGLE STAGE* DENGAN PENDEKATAN
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) DAN STUDI
EKSPERIMENTAL**

DIYANTRA MUHAMMAD PANGESTU

NRP 02111840000115

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 *SINGLE STAGE* DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC* (CFD) DAN STUDI EKSPERIMENTAL

DIYANTRA MUHAMMAD PANGESTU

NRP 02111840000115

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 SINGLE
STAGE SAVONIUS WIND TURBINE WITH
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) AND
EXPERIMENTAL STUDY APPROACH**

DIYANTRA MUHAMMAD PANGESTU

NRP 02111840000115

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 *SINGLE* *STAGE* DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIIC (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 :

Diyantra Muhammad Pangestu
NRP. 02111840000115

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 Suryo, 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 SINGLE STAGE SAVONIUS WIND TURBINE WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) AND EXPERIMENTAL STUDY APPROACH

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements for obtaining a Bachelor degree at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering Departement of Mechanical
Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By:

Diyantra Muhammad Pangestu
NRP. 02111840000115

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

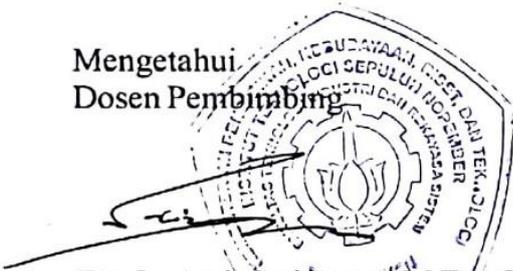
Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Diyantra Muhammad Pangestu/02111840000115
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 *SINGLE STAGE* DENGAN PENDEKATAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIIC* (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.

Mengetahui
Dosen Pembimbing



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

Surabaya, 9 Juli 2022

Mahasiswa,

(Diyantra Muhammad Pangestu)
NRP.02111840000115

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

STATEMENT OF ORIGINALITY

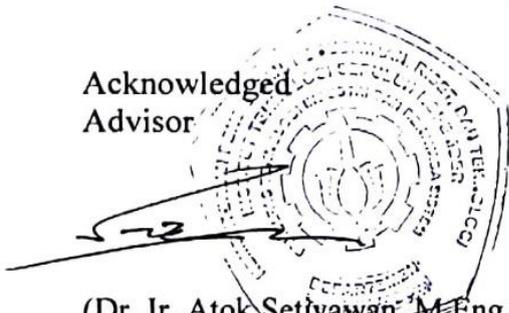
The undersigned below:

Name of student / NRP: Diyantra Muhammad Pangestu/0211184000115
Departement : 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 SINGLE STAGE SAVONIUS WIND TURBINE 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

A handwritten signature in black ink, appearing to read "DMP", written over a horizontal line.

(Diyantra Muhammad Pangestu)
NRP.0211184000115

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

**ANALISIS KINERJA AERODINAMIK DARI TURBIN ANGIN SAVONIUS SINGLE
STAGE DENGAN PENDEKATAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIIC (CFD)
DAN STUDI EKSPERIMENTAL**

Nama Mahasiswa/NRP : Diyantra Muhammad Pangestu/0211184000115
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

Abstrak

Seiring dengan berkembangnya teknologi, kebutuhan energi listrik akan terus meningkat. Akan tetapi, sumber energi listrik di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil. Hal ini sangat berdampak buruk bagi lingkungan mengingat pemanasan global yang terus meningkat tiap tahunnya akibat penggunaan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, perlu dilakukan riset energi terbarukan untuk menggantinya dengan bahan bakar fosil sebagai penghasil energi listrik. Salah satu contoh energi terbarukan yang dapat digunakan adalah energi angin. Energi angin dapat diekstrak melalui kincir atau turbin angin. Turbin angin Savonius merupakan salah satu jenis dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan angin terhadap daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin, mengetahui nilai C_p dan C_m yang dihasilkan oleh turbin, dan membandingkan hasil kinerja turbin antara simulasi dan eksperimen. Penelitian ini dilakukan dalam dua tahap, yaitu studi numerik kemudian studi eksperimen.

Studi numerik pada penelitian ini menggunakan *software ANSYS Workbench 18.1* untuk menganalisa kinerja dari turbin. Studi numerik dibagi menjadi tiga bagian yaitu, *pre-processing*, *solving*, dan *post-processing*. Studi eksperimen dilakukan pada kondisi keadaan angin terbuka. Kecepatan angin, kecepatan putar poros turbin, voltase dan kuat arus listrik dihasilkan oleh *generator* akan diukur. Data-data tersebut kemudian diolah lagi agar mendapat nilai C_p dan C_m yang dihasilkan oleh turbin. Variasi yang digunakan pada studi numerik adalah variasi kecepatan angin dari 3 m/s sampai 9 m/s, sedangkan pada studi eksperimen didapatkan variasi kecepatan angin maksimum sebesar 5.1 m/s.

Hasil yang didapat dari penelitian ini adalah nilai daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tidak selalu meningkat dengan semakin besarnya kecepatan angin yang melewati turbin. Nilai daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin akan meningkat pada kecepatan awal, namun pada suatu titik, nilai daya dan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan menurun. Dari analisa data didapatkan nilai maksimum C_p dan C_m dari turbin hasil studi numerik adalah sebesar 0.48 dan 0.37. Nilai maksimum C_p dan C_m dari turbin hasil studi eksperimen adalah sebesar 0.053 dan 0.048. Dari penelitian juga didapatkan bahwa performa turbin angin Savonius hasil studi eksperimen lebih buruk dibandingkan dengan performa turbin hasil studi numerik. Penurunan performa turbin ini disebabkan karena adanya gesekan pada *bearing*, *misalignment* pada *shaft* turbin, dan getaran dari turbin yang menyebabkan banyak energi yang terbuang.

Kata kunci: Angin, C_m , C_p , Daya, Savonius, Torsi.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

AERODYNAMIC PERFORMANCE ANALYSIS OF SINGLE STAGE SAVONIUS WIND TURBINE WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD) AND EXPERIMENTAL STUDY APPROACH

Student Name/NRP : Diyantra Muhammad Pangestu/0211184000115
Departement : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.

Abstract

Along with the development of technology, the need of electricity will increase. However, the source of electricity in Indonesia still using fossil energy. This is very bad for the environment because the global warming is increasing each year due to usage of fossil energy. Therefore, a research regarding renewable energy is needed to replace fossil energy as the source of electricity. One of the renewable energy that can be used is wind energy. Wind energy can be extracted by means of turbine. Savonius wind turbine is one type of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). This study is intended to find the effect of wind velocity to power and torque generation of the turbine, find the C_p and C_m value of the turbine, and to compare the turbine performance from numerical analysis and experiment analysis. This study is done in two phases, which is numerical analysis then experiment analysis.

Numerical analysis is done by using ANSYS Workbench 18.1 software to analyze the performance of the turbine. Numerical analysis is split into three parts, which is pre-processing, solving, and post processing. Experimental analysis is done in the condition of open area. The velocity of the wind, rotational velocity of the turbine, voltage and electricity current form generator will be measured. Those data will be processed again to find the C_p and C_m value of the turbine. The variation that is used in numerical study is variation of wind velocity from 3 m/s to 9 m/s, whereas in experimental study the maximum wind velocity is 5.1 m/s.

The results obtained from this study are the value of power and torque generated by the Savonius wind turbine doesn't always increase with the increasing wind velocity that passes through the turbine. The power and torque generated by the wind turbine will increase at lower speed, but at some point it will decrease. From the data analysis, the maximum value of C_p and C_m from the numerical study are 0.48 and 0.37, respectively. The maximum value of C_p and C_m from the experimental study are 0.053 and 0.048, respectively. It was also found that the performance of the Savonius wind turbine from the experimental study is way worse than the numerical study. This performance drop is caused by friction in the bearings, misalignment of the shaft, and vibration from the turbine which causes a lot of energy loss.

Keyword: C_m , C_p , Savonius, Torque, Wind.

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT. Yang telah memeberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan pendidikan program sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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. Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya yang diberikan kepada penulis.
2. Kedua orang tua yang telah mendoakan, menasehati, membesarkan serta tidak pernah lelah memberikan kasih sayangnya kepada penulis demi kelancaran kuliah, tugas akhir dan setiap hal yang dilalui penulis.
3. 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.
4. 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.
5. Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah memberikan dana dalam proses manufaktur turbin angin Savonius.
6. Semua warga Lab Kompor yang telah banyak membantu, menemani dan berjuang bersama penulis.
7. Teman-teman Sapuangin yang telah menemani dan menjadi wadah penulis dalam berdiskusi serta memberi saran.
8. Teman-teman LBMM yang telah memberi support serta tempat untuk bercanda dan tempat untuk mengambil ilmu selain ilmu dari perkuliahan.
9. Pak Faisal sebagai pembimbing dalam mengerjakan penelitian secara eksperimen, mulai dari pemilihan material, dimensi, serta desain turbin yang akan digunakan.
10. 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	v
APPROVAL SHEET	vii
PERNYATAAN ORISINALITAS	ix
STATEMENT OF ORIGINALITY	xi
Abstrak	xiii
Abstract	xv
KATA PENGANTAR	xvii
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.1.1 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius “Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; <i>Reynolds Number</i> = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”.....	5
2.1.2 Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan <i>Returning Blade</i> Terhadap Performa Turbin Angin Savonius “Studi Kasus untuk Rasio Panjang Plat Pengganggu Relatif Terhadap Diameter Sudu Turbin (L/D) = $1,1547$ ”.....	9
2.1.3 Studi Numerik Turbin Angin Darrieus – Savonius Dengan Penambahan <i>Stage Rotor Darrieus</i>	11
2.1.4 Analisis Kinerja Aerodinamik Dari <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (VAWT) Darrieus Tipe H-Rotor Dengan Pendekatan <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD).....	13
2.1.5 Analisis dan Pemodelan Savonius <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> Dengan Variasi <i>Blade</i> Terhadap Aliran Udara Dengan Metode CFD (<i>Computational fluid Dynamic</i>)......	15
2.2 Dasar Teori.....	18
2.2.1 Energi Angin.....	18
2.2.2 Turbin Angin.....	19
2.2.2.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (HAWT).....	19

2.2.2.2	<i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i>	20
2.2.3	Turbin Savonius	20
2.2.4	Gaya <i>Drag</i>	21
2.2.5	Perhitungan Daya.....	22
2.2.5.1	Daya Teoritis Angin	22
2.2.5.2	Daya Aktual Turbin.....	22
2.2.6	Perhitungan Torsi.....	22
2.2.6.1	Torsi Statis.....	22
2.2.6.2	Torsi Dinamis	23
2.2.7	Parameter Turbin Angin	23
2.2.7.1	<i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	23
2.2.7.2	<i>Coefficient of Power (Cp)</i>	23
2.2.7.3	<i>Coefficient of Moment (Cm)</i>	23
2.2.8	<i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i>	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		25
3.1	Variasi dan Domain Simulasi	25
3.1.1	Variasi	25
3.1.2	Domain Simulasi.....	25
3.2	Prosedur Studi Numerik.....	25
3.2.1	<i>Pre-processing</i>	25
3.2.2	<i>Solving</i>	29
3.2.3	<i>Post-processing</i>	34
3.3	Alat dan Bahan Eksperimen	35
3.3.1	Turbin Savonius	35
3.3.2	<i>Shaft</i> Turbin	35
3.3.3	Dudukan Turbin	36
3.3.4	<i>Tapered Bearing</i>	36
3.3.5	<i>Ball Bearing</i>	36
3.3.6	<i>Rubber Coupling</i>	37
3.3.7	<i>Generator</i>	37
3.3.8	Rangkaian Lampu	37
3.3.9	<i>Tower</i> Turbin	38
3.3.10	<i>Anemometer</i>	38
3.3.11	<i>Multimeter</i>	39

3.3.12	<i>Tachometer</i>	39
3.3.13	Bor	40
3.3.14	Gerinda.....	40
3.3.15	<i>Masking Tape</i>	40
3.3.16	<i>Glass Fiber</i>	41
3.3.17	Resin <i>Epoxy</i>	41
3.3.18	Dempul.....	41
3.3.19	Dextone.....	42
3.3.20	Lem G	42
3.3.21	<i>Lubricant</i>	42
3.3.22	Amplas	43
3.4	Prosedur Studi Eksperimen.....	43
3.5	Diagram Alir	45
3.6	Jadwal Penelitian	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		49
4.1	Data Penelitian	49
4.2	Contoh Perhitungan Studi Numerik.....	49
4.2.1	Perhitungan Kecepatan Putar Turbin (ω).....	49
4.2.2	Perhitungan Jumlah <i>Time Step</i>	49
4.2.3	Perhitungan Waktu per Putaran	50
4.2.4	Perhitungan <i>Time Step</i>	50
4.2.5	Perhitungan Torsi Pada Tiap Sudu Turbin	50
4.2.6	Perhitungan Torsi Total pada Turbin dan Torsi Dinamis Turbin	51
4.2.7	Perhitungan Daya Aktual Turbin Studi Numerik	52
4.2.8	Perhitungan Nilai <i>Coefficient of Power</i> (C_p) Turbin Studi Numerik	52
4.2.9	Perhitungan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C_m) Turbin Studi Numerik.....	52
4.3	Contoh Perhitungan Studi Eksperimen.....	53
4.3.1	Perhitungan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR).....	53
4.3.2	Perhitungan Daya Aktual Turbin Studi Eksperimen	53
4.3.3	Perhitungan Torsi Dinamis Turbin Studi Eksperimen.....	53
4.3.4	Perhitungan Nilai C_p Turbin Studi Eksperimen	53
4.3.5	Perhitungan Nilai C_m Turbin Studi Eksperimen.....	54
4.4	Analisa Performa Turbin Angin Savonius.....	54
4.4.1	Analisa Nilai Torsi sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius	54

4.4.2	Analisa Nilai Daya sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius	56
4.4.3	Analisa Nilai <i>Coefficient of Power</i> (C_p) sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius.....	57
4.4.4	Analisa Nilai <i>Coefficient of Moment</i> (C_m) sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius	59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		65
BIODATA PENULIS		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran (Nafi'ah, 2018)	5
Gambar 2. 2 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran (Nafi'ah, 2018)	5
Gambar 2. 3 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> pada $y/D = 0,0$ (Nafi'ah, 2018).....	6
Gambar 2. 4 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> pada $y/D = 0,25$ (Nafi'ah, 2018).....	6
Gambar 2. 5 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan <i>Reynolds</i> pada $y/D = 0,0$ (Nafi'ah, 2018).....	6
Gambar 2. 6 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 9,7 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	7
Gambar 2. 7 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 14,5 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	7
Gambar 2. 8 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 17,8 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	7
Gambar 2. 9 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 9,7 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	8
Gambar 2. 10 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 14,5 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	8
Gambar 2. 11 Grafik Perbandingan Nilai <i>Coefficient of Moment</i> Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi <i>Tip Speed Ratio</i> pada $Re = 17,8 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018).....	8
Gambar 2. 12 (a) Grafik putaran turbin Savonius tanpa plat datar pengganggu (n_0) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re), (b) Grafik putaran turbin Savonius (n) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α), (c) Grafik Perbandingan Putaran (n/n_0) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α) (Prakoso, 2016).....	9
Gambar 2. 13 (a) Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_0) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re), (b) Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α), (c) Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut halang (α) (Prakoso, 2016)	10
Gambar 2. 14 (a) Grafik <i>Coefficient of Power</i> tanpa plat datar pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi bilangan <i>Reynolds</i> (Re), (b) Grafik <i>Coefficient of Power</i> turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α) (Prakoso, 2016)	10
Gambar 2. 15 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>single stage</i> (Teja, 2017)	11
Gambar 2. 16 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>dual stage</i> (Teja, 2017)	12
Gambar 2. 17 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$, 1.28×10^7 , 1.91×10^7 (Teja, 2017).....	12
Gambar 2. 18 Grafik koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$, 1.28×10^7 , 1.91×10^7 (Teja, 2017)	12
Gambar 2. 19 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>single stage</i> pada kecepatan 10 m/s, $Re = 6.38 \times 10^6$ (Teja, 2017).....	13

Gambar 2. 20	Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus <i>dual stage</i> pada kecepatan 10 m/s, $Re = 6.38 \times 10^6$ (Teja, 2017).....	13
Gambar 2. 21	Layout Model Uji VAWT Darrieus Tipe H-Rotor (Fridayana, 2018).....	14
Gambar 2. 22	(a) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-1, (b) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-2, (c) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-3 (Fridayana, 2018)	14
Gambar 2. 23	Nilai Maksimum C_m tiap-tiap TSR pada simulasi 1, 2 dan 3 (Fridayana, 2018)	15
Gambar 2. 24	Nilai rata-rata C_m tiap-tiap TSR pada simulasi 1, 2 dan 3 (Fridayana, 2018).15	15
Gambar 2. 25	Grafik tekanan (Pa) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018).....	16
Gambar 2. 26	Grafik Putaran (Rpm) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)	17
Gambar 2. 27	Grafik Torsi (Nm) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018).....	17
Gambar 2. 28	Grafik Daya (Watt) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)	17
Gambar 2. 29	Pertumbuhan Kapasitas Energi Angin (Reve, 2014)	18
Gambar 2. 30	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (HAWT).....	19
Gambar 2. 31	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (VAWT).....	20
Gambar 2. 32	Skema Turbin Angin Savonius	20
Gambar 2. 33	Penguraian komponen gaya drag terhadap permukaan benda	21
Gambar 3. 1	Domain Simulasi.....	25
Gambar 3. 2	Skema Turbin Angin Savonius	26
Gambar 3. 3	Dimensi Turbin Angin Savonius.....	26
Gambar 3. 4	Geometri Turbin pada ANSYS <i>Design Modeler</i> Tampak <i>Isometric</i>	27
Gambar 3. 5	Geometri Turbin pada ANSYS <i>Design Modeler</i> Tampak Depan.....	27
Gambar 3. 6	Geometri Turbin pada ANSYS <i>Design Modeler</i> Tampak Atas.....	27
Gambar 3. 7	(a) <i>Inlet</i> , (b) <i>Outlet</i> , (c) <i>Wall</i> , (d) <i>Rotating Atas Bawah</i> , (e) <i>Rotating Surface</i> , (f) Savonius <i>Endplate</i> , (g) Savonius <i>Blade 1</i> , (h) Savonius <i>Blade 2</i>	28
Gambar 3. 8	Hasil <i>Meshing</i>	28
Gambar 3. 9	<i>Monitoring Residual</i>	34
Gambar 3. 10	Turbin Angin Savonius	35
Gambar 3. 11	<i>Shaft</i> Turbin.....	36
Gambar 3. 12	Dudukan Turbin	36
Gambar 3. 13	<i>Tapered Bearing</i> FAG 32305.....	36
Gambar 3. 14	<i>Ball Bearing</i> SKF 6305/C3	37
Gambar 3. 15	<i>Rubber Coupling</i>	37
Gambar 3. 16	<i>Generator</i>	37
Gambar 3. 17	Rangkaian Lampu	38
Gambar 3. 18	<i>Tower</i> Turbin.....	38
Gambar 3. 19	<i>Anemometer</i>	38
Gambar 3. 20	<i>Multimeter</i>	39
Gambar 3. 21	<i>Tachometer</i>	40
Gambar 3. 22	Bor.....	40
Gambar 3. 23	Gerinda.....	40
Gambar 3. 24	<i>Masking Tape</i>	41
Gambar 3. 25	<i>Glass Fiber</i>	41
Gambar 3. 26	Resin <i>Epoxy</i>	41
Gambar 3. 27	Dempul.....	42

Gambar 3. 28 Dextone	42
Gambar 3. 29 Lem G	42
Gambar 3. 30 <i>Lubricant</i> Rexco.....	43
Gambar 3. 31 Amplas	43
Gambar 3. 32 Skema Alat Studi Eksperimen	44
Gambar 3. 33 Diagram Alir Studi Numerik.....	45
Gambar 3. 34 Diagram Alir Studi Eksperimen.....	46
Gambar 3. 35 Diagram alir penelitian secara umum	47
Gambar 4. 1 Grafik Torsi Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin	55
Gambar 4. 2 Grafik Daya Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin	56
Gambar 4. 3 Grafik Coefficient of Power (C_p) Trubin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin	58
Gambar 4. 4 Grafik Coefficient of Moment (C_m) Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin	59

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Parameter penelitian (Teja, 2017).....	11
Tabel 2. 2 Dimensi dari Model Turbin (Fridayana, 2018).....	13
Tabel 2. 3 Geometri turbin angin vertikal Savonius tipe U (Setyawan, 2018).....	16
Tabel 2. 4 Geometri turbin angin vertikal Savonius tipe L (Setyawan, 2018)	16
Tabel 2. 5 Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di atas Permukaan Tanah (Prakoso, 2016)....	19
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian.....	25
Tabel 3. 2 Properti <i>Meshing</i>	29
Tabel 3. 3 Tabel <i>General dan Models</i>	29
Tabel 3. 4 Properti Udara.....	30
Tabel 3. 5 Data Konfigurasi <i>Cell Zone</i>	30
Tabel 3. 6 Data <i>Inlet Boundary Conditions</i>	30
Tabel 3. 7 Data <i>Outlet Boundary Conditions</i>	30
Tabel 3. 8 Data <i>Rotating Atas Bawah Boundary Conditions</i>	31
Tabel 3. 9 Data Savonius <i>Endplate Boundary Conditions</i>	31
Tabel 3. 10 Data Savonius <i>Blade 1 Boundary Conditions</i>	31
Tabel 3. 11 Data Savonius <i>Blade 2 Boundary Conditions</i>	32
Tabel 3. 12 Data <i>Solution Methods</i>	32
Tabel 3. 13 Kriteria Konvergen	33
Tabel 3. 14 Data <i>Solutions Initialization</i>	33
Tabel 3. 15 Krisbow KW06-564 <i>Anemometer</i>	39
Tabel 3. 16 Spesifikasi <i>Multimeter</i>	39
Tabel 3. 17 DT6236 <i>Digital Tachometer</i>	40
Tabel 3. 18 Jadwal Penelitian	47
Tabel 4. 1 Input Data Studi Numerik.....	49
Tabel 4. 2 Input Data Studi Eksperimen.....	49
Tabel 4. 3 Gaya <i>Drag</i> Pada Sudu Turbin Pada Posisi 285°	51
Tabel 4. 4 Torsi Statis Turbin Pada Posisi 285°	51

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan bertambahnya waktu, teknologi selalu terus berkembang mengikuti berkembangnya zaman. Dapat dilihat pada zaman sekarang dimana semua aspek dalam kehidupan menggunakan teknologi. Mulai dari kegiatan kecil yang dilakukan sehari – hari, hingga kegiatan perindustrian semuanya menggunakan teknologi. Dengan penggunaan teknologi ini, permintaan kebutuhan akan energi listrik juga akan meningkat. Berdasarkan Kementerian ESDM Indonesia, kebutuhan energi listrik di Indonesia pada tahun 2024 diproyeksikan sebesar 464,2 TWh (KementerianESDM, 2015). Akan tetapi, pada saat ini, sumber utama dari energi listrik masih berbasis bahan bakar fosil. Hal ini sangat berdampak buruk terhadap lingkungan mengingat pemanasan global yang terus meningkat karena penggunaan bahan bakar fosil. Dapat dilihat bahwa emisi gas CO₂ dunia meningkat 4,9% pada tahun 2021 (GlobalCarbonProject, 2021). Oleh karena itu, perlu dilakukan riset energi terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil sebagai penghasil energi listrik agar pemanasan global dapat berkurang. Terdapat banyak pilihan sumber energi terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil sebagai penghasil energi listrik, contohnya adalah energi angin.

Energi angin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil sebagai penghasil energi listrik. Energi angin memiliki beberapa keuntungan yaitu, energi angin sangat mudah didapatkan dan juga infrastruktur untuk membangun pembangkit listrik tenaga angin tidak semahal dengan energi terbarukan yang lainnya. Pembangkit listrik tenaga angin ini sangat efektif untuk ditempatkan pada daerah pantai dan pegunungan karena kecepatan angin pada daerah pantai dan pegunungan sangat tinggi. Mengingat Indonesia adalah negara kepulauan dimana memiliki banyak pantai dan juga memiliki banyak gunung, maka energi angin memiliki potensi yang sangat bagus untuk diterapkan di Indonesia. Berdasarkan P3tek KBTKE, kecepatan angin rata-rata di Indonesia adalah sebesar 4-6 m/s (P3TekKBTKE, 2020). Oleh karena itu, energi angin memiliki potensi yang sangat bagus untuk dikembangkan kedepannya.

Untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik dibutuhkan sebuah turbin angin. Salah satu jenis turbin angin yang cukup efisien adalah turbin angin jenis *Vertical Axis Wind Turbine* atau VAWT. VAWT memiliki kesitimewaan dibandingkan dengan jenis turbin yang lain, yaitu kemampuannya untuk menerima angin dari segala arah, sehingga kinerja dari turbin tidak terpengaruh dari arah angin. VAWT terdiri dari turbin angin Savonius dan Darrieus. Turbin angin Savonius mempunyai konstruksi yang simple dan juga harga yang murah. Selain itu, turbin Savonius memiliki torsi awal yang cukup bagus pada kecepatan rendah. Namun, turbin Savonius memiliki efisiensi yang rendah. Sedangkan turbin Darrieus memiliki kelebihan yang hampir sama dengan turbin Savonius yaitu, konstruksi yang simpel dan harga yang murah. Turbin Darrieus juga memiliki efisiensi yang cukup bagus pada kecepatan tinggi, tetapi turbin Darrieus memiliki kekurangan yaitu, ketidakmampuannya berputar dengan sendirinya. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian tentang VAWT agar efisiensi dari VAWT dapat meningkat.

Banyak peneliti yang melakukan riset untuk meningkatkan efisiensi dari VAWT. Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh (R. Gupta A. B., 2008) pada turbin angin Savonius dan Savonius-Darrieus. Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai C_p dan C_m dari turbin angin Savonius dan turbin angin Savonius-Darrieus. Dimana turbin Savonius yang digunakan adalah jenis turbin Savonius 3 sudu dengan D sebesar 8 cm dan H sebesar 20 cm. Untuk turbin Savonius-Darrieus menggunakan jenis turbin *dual stage* dimana turbin Darrieus tipe *eggbeater* yang memiliki tinggi sebesar 10 cm dan radius sebesar 4 cm diletakkan dibagian bawah dan

turbin Savonius yang memiliki tinggi 10 cm dan diameter 8 cm diletakkan dibagian atas. Penelitian dilakukan di dalam *wind tunnel* dengan variasi kecepatan 0 – 30 m/s dan variasi *overlap* turbin 0%, 16.2%, dan 20%. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini menunjukkan bahwa turbin Savonius pada setiap variasi *overlap* mengalami peningkatan nilai C_p dan C_m dengan meningkatnya nilai TSR, namun pada titik tertentu, nilai C_p dan C_m akan berkurang dengan meningkatnya TSR. Didapatkan pada 0% *overlap* nilai maksimum C_p dan C_m sebesar 0.357 dan 1.224. Pada 16.2% *overlap*, nilai maksimum C_p dan C_m sebesar 0.438 dan 1.369 dan pada 20% *overlap* nilai maksimum C_p dan C_m sebesar 0.466 dan 1.331. Dari hasil eksperimen turbin Savonius-Darrieus didapatkan bahwa nilai C_p dan C_m meningkat dengan meningkatnya nilai TSR, namun pada titik tertentu, nilai C_p dan C_m akan berkurang dengan meningkatnya TSR. Pada 0% *overlap* nilai maksimum C_p dan C_m adalah sebesar 0.512 dan 1.107. Pada 16.2% *overlap* nilai maksimum C_p dan C_m sebesar 0.382 dan 1.104. Pada 20% *overlap* nilai maksimum C_p dan C_m sebesar 0.340 dan 1.113. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa penggunaan turbin Savonius-Darrieus dengan 0% *overlap* memiliki performa yang maksimal dibandingkan dengan turbin Savonius pada *overlap* berapapun dengan jenis tes yang sama, namun terjadi penurunan performa dengan bertambahnya *overlap* pada turbin Savonius-Darrieus, tidak seperti turbin Savonius yang performanya meningkat dengan meningkatnya *overlap*.

Dari penelitian diatas, perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut tentang penggunaan turbin VAWT untuk meningkatkan efisiensi dari VAWT. Penelitian yang akan dilakukan memiliki fokus pada performa VAWT dengan menggunakan jenis turbin Savonius *single-stage*. Penelitian dilakukan dengan menggunakan turbin Savonius dua sudu dengan diameter 255 mm dan tinggi 600 mm.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan angin terhadap daya dan torsi yang dapat dihasilkan oleh turbin angin Savonius?
2. Berapakah nilai C_p dan C_m yang dapat dihasilkan oleh turbin angin Savonius?
3. Bagaimana hasil perbandingan performa dan efisiensi turbin antara simulasi dan eksperimen?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Turbin yang digunakan adalah Turbin Savonius *single stage* memiliki 2 buah sudu.
2. Analisa dilakukan dengan turbin Savonius dengan diameter sudu turbin 255 mm.
3. Studi numerik pada penampang tiga dimensi dilakukan *transient*.
4. Aliran fluida pada *inlet* dianggap konstan dan *incompressible*.
5. *Software* yang digunakan adalah Ansys *Workbench*.
6. Putaran turbin saat simulasi sebagai *rotating motion* yang kecepatan putarnya dapat diatur.
7. Data kecepatan angin yang digunakan pada studi numerik diasumsikan hanya satu arah yaitu dari arah *inlet*.
8. Getaran pada instalasi turbin angin tidak diikutsertakan pada studi numerik.
9. Studi eksperimen dilakukan dengan kondisi angin secara riil.
10. Aliran udara pada studi eksperimen dianggap *uniform flow*.
11. Arah aliran angin pada studi eksperimen mengikuti kondisi aliran angin pada alam.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan angin terhadap daya dan torsi yang dapat dihasilkan oleh turbin angin Savonius.
2. Untuk mengetahui nilai C_p dan C_m yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius.
3. Untuk mengetahui hasil perbandingan performa dan efisiensi turbin antara simulasi dan eksperimen.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan riset tentang pengembangan energi terbarukan, yaitu energi angin.
2. Dapat dijadikan referensi untuk riset tentang VAWT di masa yang akan mendatang.
3. Terbentuknya turbin angin Savonius yang dapat digunakan sebagai alat untuk praktikum mata kuliah Mesin Konversi Energi.

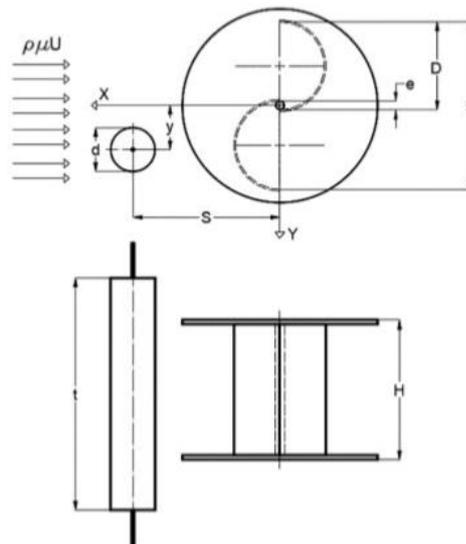
[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

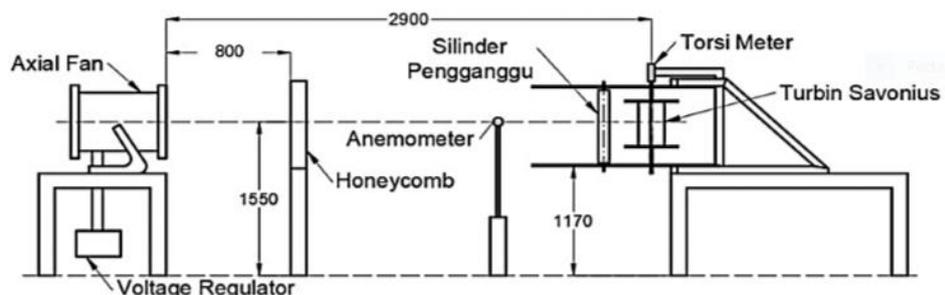
2.1.1 Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius “Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; $Reynolds Number = 9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ ”

Nafi'ah (2018) melakukan studi eksperimen pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Savonius *single stage* dengan jumlah dua sudu, Studi eksperimen dilakukan dengan cara meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin savonius dengan meletakkan silinder pengganggu di depan *returning blade* dan mengetahui pengaruh variasi perbandingan antara jarak silinder pengganggu dan diameter sudu turbin angin savonius terhadap performa dari turbin tersebut.



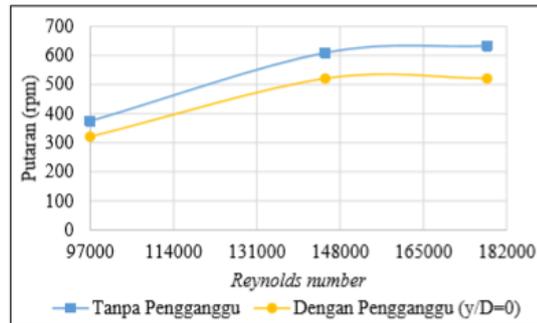
Gambar 2. 1 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran (Nafi'ah, 2018)

Gambar 2.1 menunjukkan konfigurasi peletakkan silinder pengganggu pada sisi *returning blade* dari turbin angin Savonius. Terdapat 3 jenis konfigurasi peletakkan silinder pengganggu terhadap turbin angin Savonius yaitu dengan perbandingan jarak silinder pengganggu dengan arah tegak lurus arah angin dan diameter sudu turbin angin Savonius (y/D) sebesar 0,0; 0,25; 0,5. Penelitian dilakukan dengan variasi 3 jenis bilangan Reynolds yaitu sebesar $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; dan $17,8 \times 10^4$. Variasi bilangan Reynolds tersebut diatur menggunakan *axial fan* yang dapat diatur voltasenya agar mendapatkan bilangan Reynolds sesuai dengan yang diinginkan. Berikut susunan peralatan penelitian.

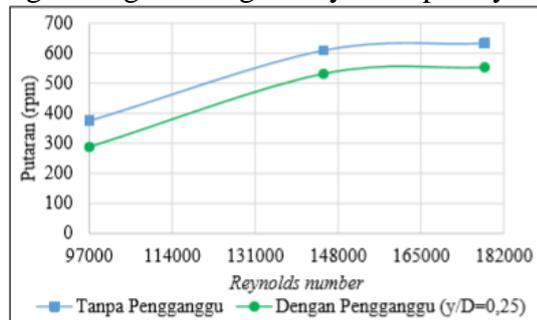


Gambar 2. 2 Skema Penelitian dan Parameter Pengukuran (Nafi'ah, 2018)

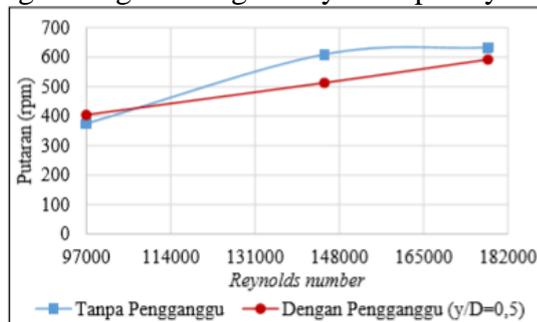
Penelitian dilakukan untuk mengukur perbandingan performa turbin angin Savonius tanpa silinder penggannggu dan dengan silinder pengganggu. Parameter yang diukur adalah nilai putaran dari turbin, nilai *Coefficient of Power* dari turbin, dan nilai *Coefficient of Moment* dari turbin.



Gambar 2. 3 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan Reynolds pada $y/D = 0,0$ (Nafi'ah, 2018)

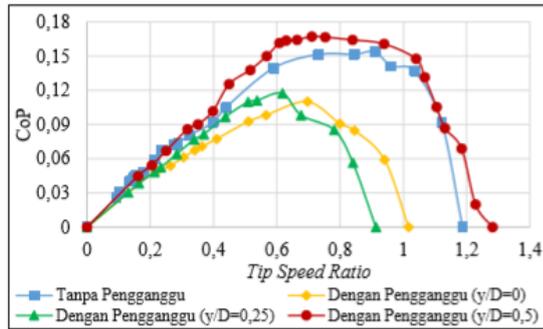


Gambar 2. 4 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan Reynolds pada $y/D = 0,25$ (Nafi'ah, 2018)

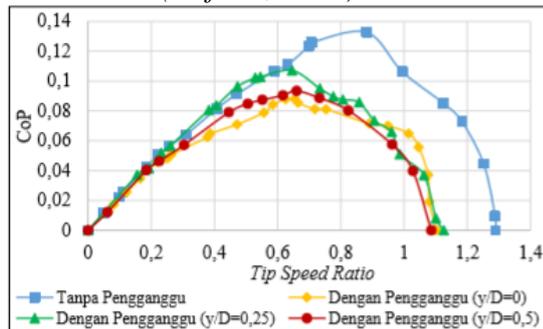


Gambar 2. 5 Grafik Perbandingan Nilai Putaran Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi Bilangan Reynolds pada $y/D = 0,0$ (Nafi'ah, 2018)

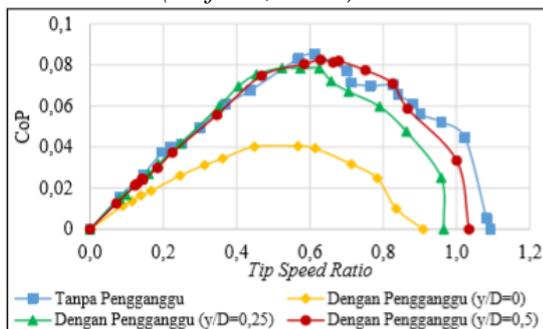
Gambar 2.3, 2.4, dan 2.5 menunjukkan perbandingan nilai putaran turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Dapat dilihat bahwa penambahan silinder pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan besar y/D 0,5 efektif untuk meningkatkan putaran dari turbin angin Savonius, tetapi penambahan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25 dan pada bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25; 0,5 tidak efektif untuk meningkatkan putaran dari turbin angin Savonius. Putaran dari turbin malah menurun dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu.



Gambar 2. 6 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 9,7 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)

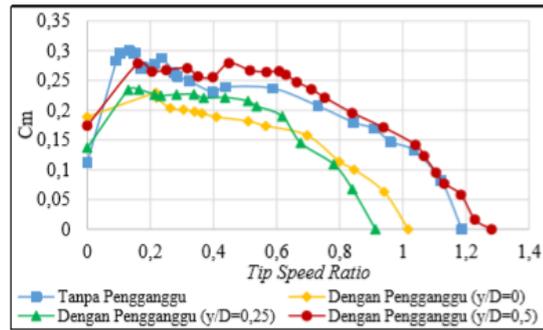


Gambar 2. 7 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)

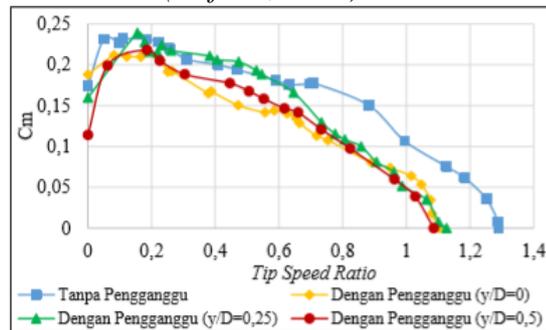


Gambar 2. 8 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)

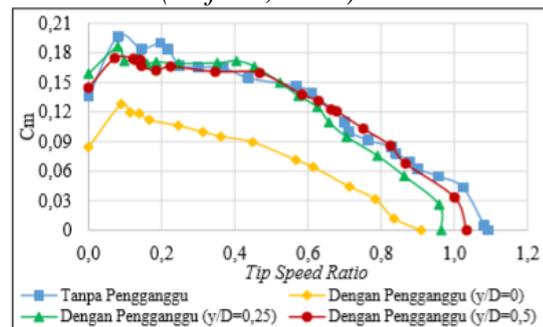
Gambar 2.6, 2.7, dan 2.8 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Power* (C_p) dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Dapat dilihat bahwa penambahan silinder pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan besar y/D 0,5 efektif untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius karena nilai C_p dari turbin meningkat ketika diberi silinder pengganggu, tetapi penambahan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25 dan pada bilangan Reynilids $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25; 0,5 tidak efektif untuk meningkatkan efisiensi dari turbin angin Savonius karena nilai C_p dari turbin dengan silinder pengganggu malah menurun dibandingkan turbin tanpa silinder pengganggu.



Gambar 2. 9 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 9,7 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)



Gambar 2. 10 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 14,5 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)

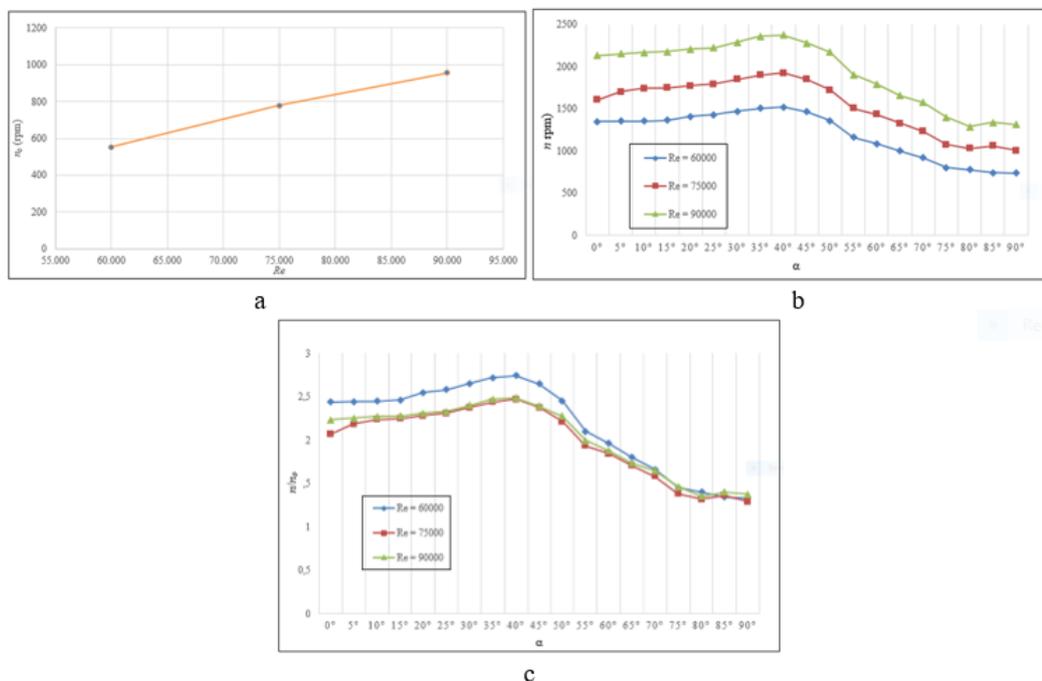


Gambar 2. 11 Grafik Perbandingan Nilai *Coefficient of Moment* Turbin Angin Savonius tanpa dan dengan Silinder Pengganggu sebagai Fungsi *Tip Speed Ratio* pada $Re = 17,8 \times 10^4$ (Nafi'ah, 2018)

Gambar 2.9, 2.10, dan 2.11 menunjukkan perbandingan nilai *Coefficient of Moment* (C_m) dari turbin angin Savonius tanpa silinder pengganggu dan dengan silinder pengganggu. Dapat dilihat bahwa penambahan silinder pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan besar y/D 0,5 efektif untuk meningkatkan nilai C_m dari turbin angin Savonius, tetapi penambahan silinder pengganggu pada bilangan Reynolds $9,7 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25 dan pada bilangan Reynolds $14,5 \times 10^4$ dan $17,8 \times 10^4$ dengan y/D 0,0; 0,25; 0,5 tidak efektif untuk meningkatkan nilai C_m dari turbin angin Savonius karena nilai C_m dari turbin dengan silinder pengganggu malah menurun dibandingkan turbin tanpa silinder pengganggu.

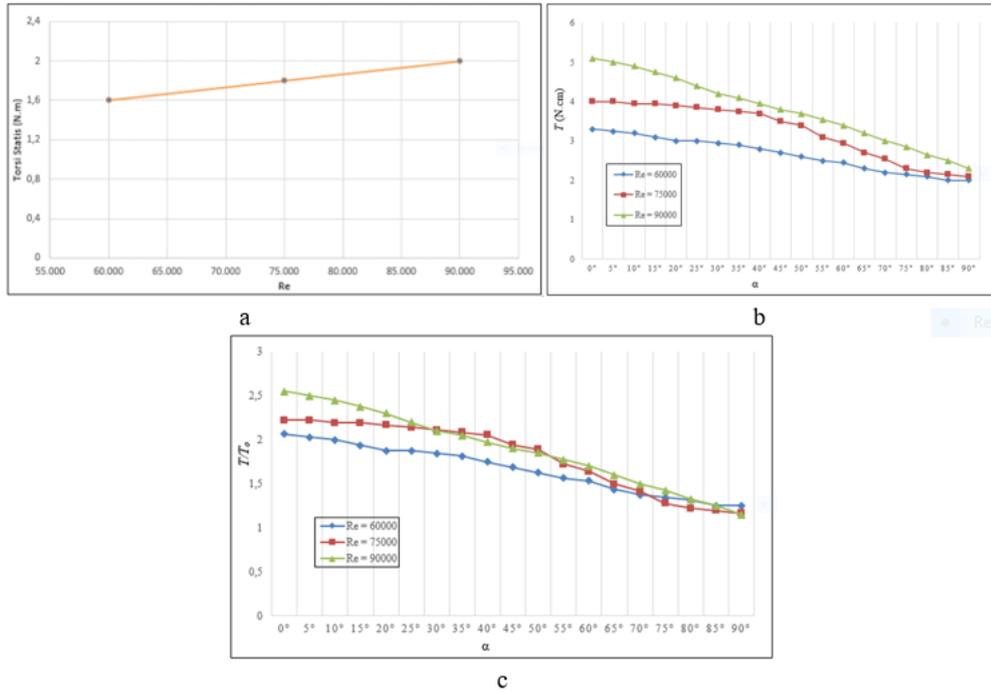
2.1.2 Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Sudut Penempatan Plat Datar Pengganggu di Depan *Returning Blade* Terhadap Performa Turbin Angin Savonius “Studi Kasus untuk Rasio Panjang Plat Pengganggu Relatif Terhadap Diameter Sudu Turbin (L/D) = 1,1547”

Prakoso (2016) melakukan studi eksperimen pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Savonius *single stage* dengan jumlah dua sudu, Studi eksperimen dilakukan dengan cara meletakkan plat datar pengganggu di depan *returning blade*. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan performa turbin angin savonius dengan meletakkan plat datar pengganggu di depan *returning blade* dan mengetahui pengaruh variasi sudut plat datar pengganggu terhadap performa dari turbin tersebut. Penelitian dilakukan dengan menggunakan variasi 3 bilangan Reynolds yaitu 6×10^4 ; $7,5 \times 10^4$; 9×10^4 dan sudut plat datar pengganggu dengan variasi sudut $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$. Parameter yang diukur adalah kecepatan putar dari turbin angin Savonius, nilai torsi statis yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius, dan nilai *Coefficient of Performance* (C_p).



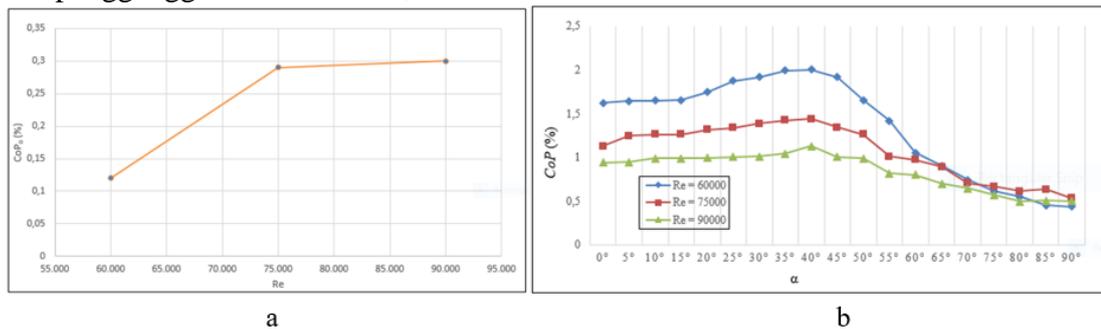
Gambar 2. 12 (a) Grafik putaran turbin Savonius tanpa plat datar pengganggu (n_0) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re), (b) Grafik putaran turbin Savonius (n) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α), (c) Grafik Perbandingan Putaran (n/n_0) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α) (Prakoso, 2016)

Dari gambar 2.12 didapatkan nilai kecepatan turbin meningkat dengan ditambahkannya plat datar pengganggu. Hal ini dapat dilihat dari gambar 2.12.c dimana nilai perbandingan antara kecepatan putar turbin angin Savonius dengan plat datar pengganggu dan tanpa plat datar pengganggu (n/n_0) pada setiap sudut plat datar adalah diatas 1 yang berarti bahwa kecepatan turbin dengan plat datar pengganggu lebih besar daripada tanpa plat datar pengganggu. Dari gambar 2.12.b dapat dilihat kecepatan putar turbin meningkat dengan meningkatnya sudut plat datar pengganggu hingga sudut tertentu. Pada sudut 40° , kecepatan putar turbin menurun terus dengan bertambahnya sudut plat datar pengganggu, namun kecepatan tersebut masih lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan putar turbin tanpa plat datar pengganggu.



Gambar 2. 13 (a) Grafik torsi statis tanpa plat datar pengganggu (T_0) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re), (b) Grafik torsi statis (T) sebagai fungsi sudut bukaan plat datar pengganggu (α), (c) Grafik perbandingan torsi statis (T/T_0) sebagai fungsi sudut halang (α) (Prakoso, 2016)

Dari gambar 2.13 didapatkan nilai torsi turbin meningkat dengan ditambahkannya plat datar pengganggu. Hal ini dapat dilihat dari gambar 2.13.c dimana nilai perbandingan antara torsi statis dari turbin angin Savonius dengan plat datar pengganggu dan tanpa plat datar pengganggu (T/T_0) pada setiap sudut plat datar adalah diatas 1 yang berarti bahwa torsi statis turbin dengan plat datar pengganggu lebih besar daripada tanpa plat datar pengganggu. Dari gambar 2.13.b dapat dilihat torsi statis turbin cenderung menurun dengan meningkatnya sudut plat datar pengganggu. Pada sudut 0° , torsi statis turbin memiliki nilai maksimum.



Gambar 2. 14 (a) Grafik *Coefficient of Power* tanpa plat datar pengganggu (CoP_0) sebagai fungsi bilangan Reynolds (Re), (b) Grafik *Coefficient of Power* turbin Savonius (CoP) sebagai fungsi sudut halang (α) (Prakoso, 2016)

Dari gambar 2.14 didapatkan nilai C_p turbin meningkat dengan ditambahkannya plat datar pengganggu. Hal ini dapat dilihat dari gambar 2.14.b dimana nilai C_p turbin angin Savonius pada setiap variasi sudut plat datar pengganggu lebih besar daripada nilai C_p turbin angin Savonius tanpa plat datar pengganggu. Dari gambar 2.14.b juga dapat dilihat nilai C_p cenderung meningkat hingga sudut plat datar pengganggu sebesar 40° kemudian nilai C_p mengalami penurunan hingga sudut plat datar pengganggu sebesar 90° . Nilai maksimum C_p berada pada sudut plat datar pengganggu sebesar 40° pada setiap bilangan Reynolds.

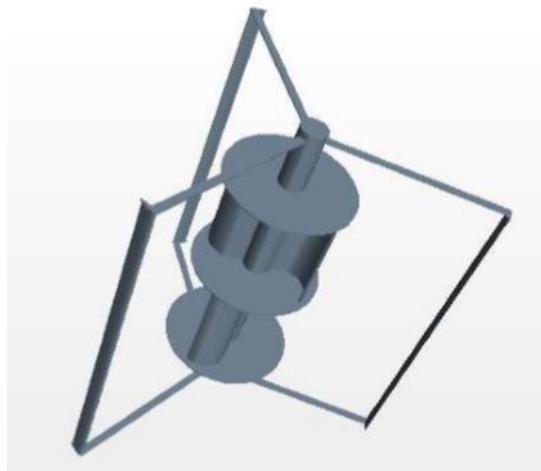
2.1.3 Studi Numerik Turbin Angin Darrieus – Savonius Dengan Penambahan Stage Rotor Darrieus

Teja (2017) melakukan studi numerik pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe hybrid Savonius *dual stage* dan Darrieus *single stage & dual stage*. Jumlah sudu yang digunakan pada turbin Savonius adalah sebanyak 2 buah sudu dan untuk turbin Darrieus adalah sebanyak 3 buah sudu. Studi numerik dilakukan dengan melakukan simulasi dengan bantuan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kontur aliran angin yang mengalir melalui turbin angin Darrieus – Savonius, membandingkan performa turbin Darrieus *single stage* dan *dual stage* pada turbin Darrieus – Savonius, mengetahui torsi dan koefisien daya yang optimal dari penambahan turbin Darrieus pada instalasi turbin Darrieus – Savonius, dan mengetahui dan membandingkan torsi dan koefisien daya dari penambahan panjang sudu turbin Darrieus. Penelitian tersebut dilakukan dengan variasi seperti berikut:

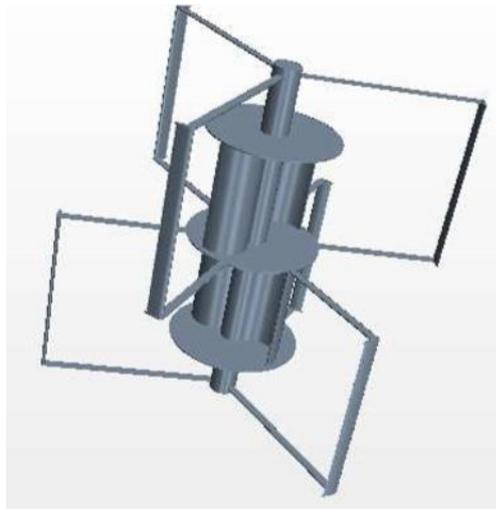
Tabel 2. 1 Parameter penelitian (Teja, 2017)

Parameter	Keterangan		
Jumlah Stage Darrieus	<i>Single stage</i> dan <i>Dual stage</i>		
Panjang <i>chord</i>	1 cm ($\sigma = 0.26$) dan 2 cm ($\sigma = 0.52$)		
Pengambilan putaran	Setiap 5 ⁰ atau 72 fps		
Kecepatan angin (m/s)	5	10	15
Kecepatan sudut turbin (rpm)	440	950	1500
Reynolds Number (Re) rotor Darrieus dengan chord 1 cm	3,19 x 10 ⁶	6.38 x 10 ⁶	9.57 x 10 ⁶
Reynold Number (Re) rotor Darrieus dengan chord 2 cm	6.38 x 10 ⁶	1.28 x 10 ⁷	1.91 x 10 ⁷

Instalasi turbin yang akan dipakai pada penelitian ini adalah seperti berikut:

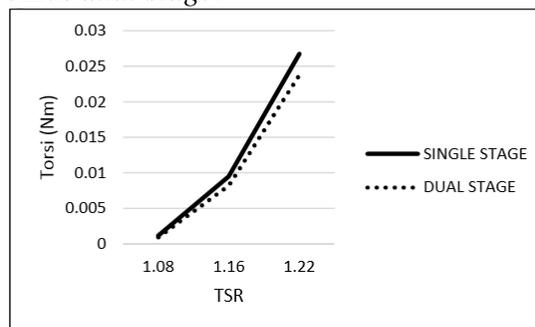


Gambar 2. 15 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* (Teja, 2017)

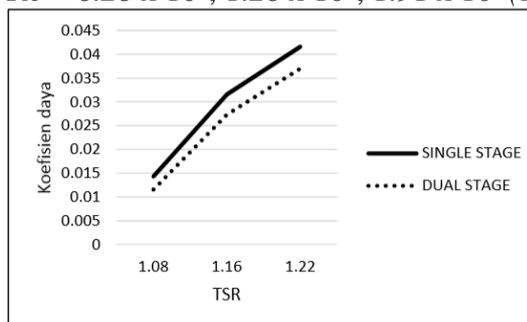


Gambar 2. 16 Skema model dari turbin angin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* (Teja, 2017)

Dari studi numerik didapatkan bahwa nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius *single stage* menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Darrieus – Savonius *dual stage*.

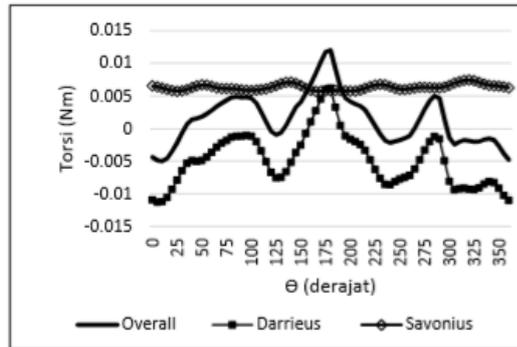


Gambar 2. 17 Grafik torsi rata – rata yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$, 1.28×10^7 , 1.91×10^7 (Teja, 2017)

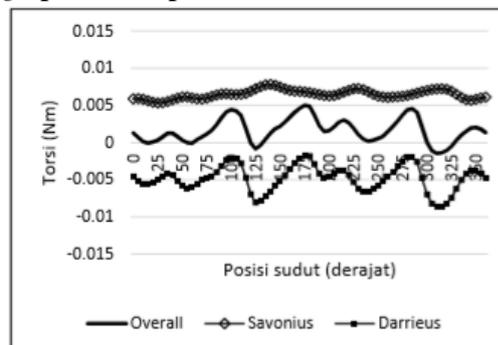


Gambar 2. 18 Grafik koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin angin Darrieus – Savonius terhadap TSR, $Re = 6.28 \times 10^6$, 1.28×10^7 , 1.91×10^7 (Teja, 2017)

Performa dari turbin Darrieus – Savonius *dual stage* mampu menghasilkan rentang torsi minimum – maksimum yang lebih sempit dibandingkan dengan turbin Darrieus – Savonius *single stage*, namun nilai torsi rata-rata yang dihasilkan oleh *dual stage* masih lebih rendah dibandingkan *single stage*.



Gambar 2. 19 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *single stage* pada kecepatan 10 m/s, $Re = 6.38 \times 10^6$ (Teja, 2017)



Gambar 2. 20 Grafik tren torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus – Savonius dengan rotor Darrieus *dual stage* pada kecepatan 10 m/s, $Re = 6.38 \times 10^6$ (Teja, 2017)

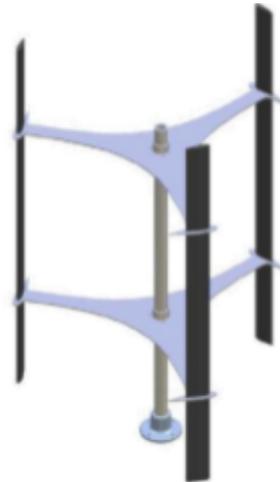
2.1.4 Analisis Kinerja Aerodinamik Dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) Darrieus Tipe H-Rotor Dengan Pendekatan *Computational Fluid Dynamic* (CFD)

Fridayana (2018) melakukan studi numerik dan eksperimen pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Darrieus *single stage* dengan jumlah tiga sudu, dimana data antara studi numerik dan eksperimen akan dibandingkan. Studi numerik dilakukan dengan cara melakukan simulasi dengan bantuan *software ANSYS Workbench*. Studi eksperimen dilakukan dengan cara mengambil data eksperimen dari penelitian terdahulu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi profil *airfoil*, sudut *pitch*, radius turbin, dan lebar *chord* pada turbin angin Darrieus Tipe H-Rotor terhadap performa Aerodinamiknya. Instalasi turbin yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah tipe Darrieus H-Rotor dengan 3 buah sudu dengan spesifikasi turbin Darrieus seperti berikut:

Tabel 2. 2 Dimensi dari Model Turbin (Fridayana, 2018)

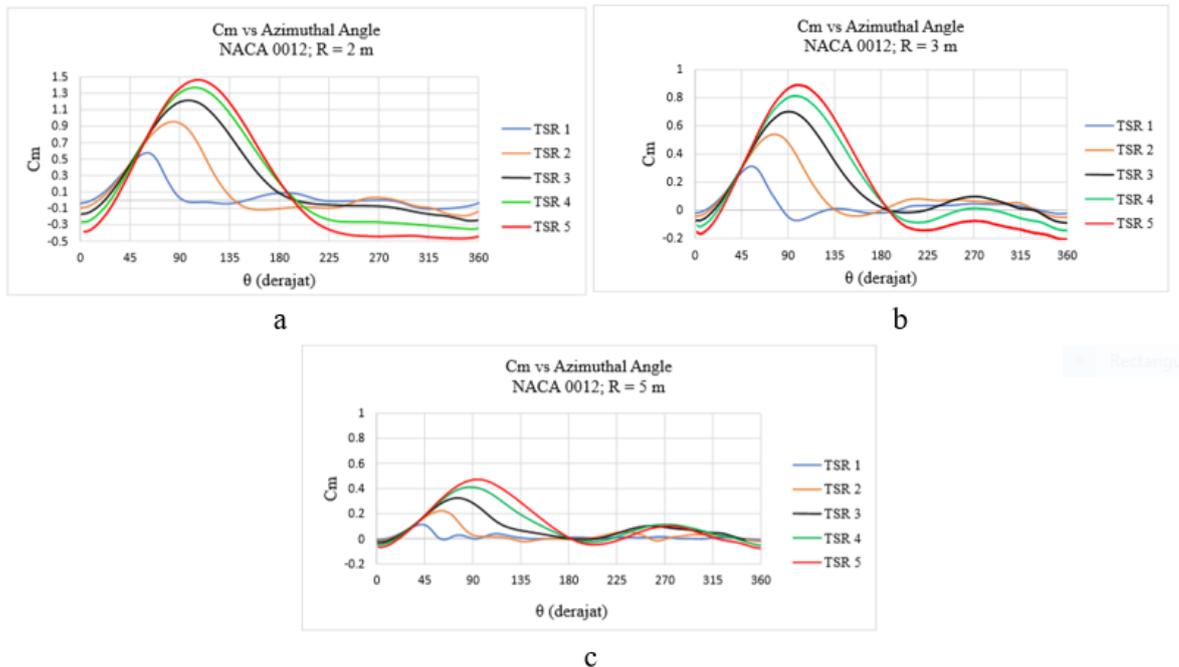
D_{rotor} [mm]	1030
H_{rotor} [mm]	1414
n [-]	3
Profil Airfoil	NACA 0021
A_s [m ²]	1,45642
<i>Chord length</i> (c) [mm]	85,8

Berikut merupakan desain dari turbin:



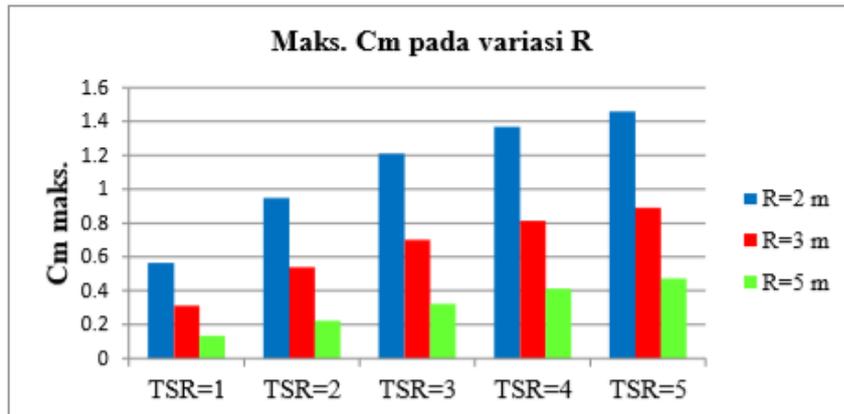
Gambar 2. 21 Layout Model Uji VAWT Darrieus Tipe H-Rotor (Fridayana, 2018)

Pada penelitian dilakukan variasi berupa perubahan radius dari turbin Darrieus. Berikut merupakan hasil simulasi 1, 2, dan 3 yang menggunakan variasi radius turbin sebesar 2 m, 3 m, dan 5 m.



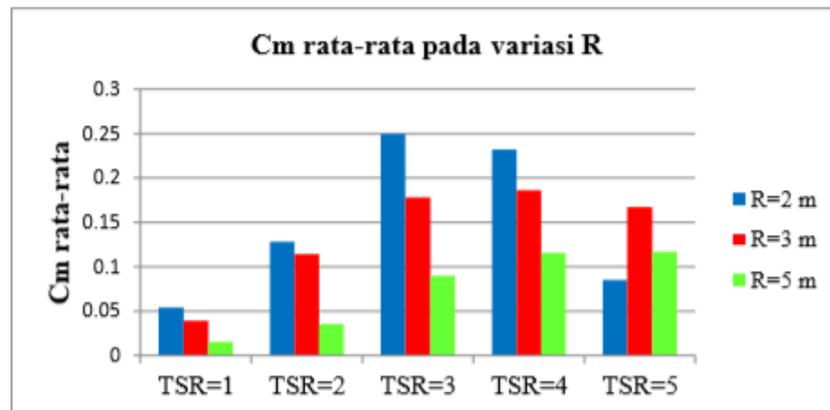
Gambar 2. 22 (a) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-1, (b) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-2, (c) Kurva C_m vs θ dengan Variasi TSR pada Simulasi ke-3 (Fridayana, 2018)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa dengan variasi radius turbin, performa dari turbin angin Darrieus relatif mirip. Dari simulasi didapatkan bahwa dengan meningkatnya radius turbin, nilai C_m cenderung turun, tetapi dengan bertambahnya radius nilai C_m negatif juga semakin berkurang. Dapat dilihat pada radius turbin 2 m terdapat cukup banyak nilai C_m negatif dan pada radius turbin 5 m nilai C_m negatif sangat berkurang. Pada radius turbin 3 m memiliki performa yang menengah, nilai C_m yang dibawah radius 2 m, tetapi diatas radius 5 m, dan nilai C_m negatif yang lebih sedikit daripada radius 2 m, tetapi lebih banyak daripada radius 5 m.



Gambar 2. 23 Nilai Maksimum Cm tiap-tiap TSR pada simulasi 1, 2 dan 3 (Fridayana, 2018)

Gambar 2.28 menunjukkan bahwa nilai maksimum Cm dari turbin dengan radius yang lebih kecil selalu memiliki nilai yang lebih besar. Artinya radius turbin yang lebih kecil memberikan kemampuan yang lebih besar dalam mengkonversi energi angin yang menerjang turbin.



Gambar 2. 24 Nilai rata-rata Cm tiap-tiap TSR pada simulasi 1, 2 dan 3 (Fridayana, 2018)

Gambar 2.29 adalah nilai rata-rata Cm yang dihasilkan turbin selama berotasi 1 kali penuh. Turbin dengan radius 2 m nilai Cm rata-rata nya naik hingga TSR = 3, setelahnya nilai Cm rata-rata berkurang. Hal tersebut terjadi karena negatif momen yang terbentuk semakin besar. Hal serupa juga terjadi untuk turbin dengan radius 3 m dan 5 m. Bedanya nilai rata-rata Cm turbin radius 3 m mempunyai nilai tertinggi pada TSR = 4. Sedangkan turbin radius 5 m Cm rata-ratanya selalu naik hingga TSR = 5. Pada TSR = 5 terlihat bahwa turbin dengan radius 2 m memiliki Cm rata-rata terkecil dibanding turbin lain. Sedangkan yang tertinggi diperoleh oleh turbin dengan radius 3 m. Hal tersebut terjadi karena turbindengan radius kecil memberikan momen negatif yang besar untuk TSR tinggi.

2.1.5 Analisis dan Pemodelan Savonius Vertical Axis Wind Turbine Dengan Variasi Blade Terhadap Aliran Udara Dengan Metode CFD (Computational fluid Dynamic)

Setyawan (2018) melakukan studi numerik pada Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Savonius single stage dengan 3 buah sudu. Dua jenis turbin Savonius digunakan dalam penelitian ini, yaitu turbin Savonius dengan sudu berbentuk U dan turbin Savonius dengan sudu berbentuk L. Studi numerik dilakukan dengan cara melakukan simulasi pada turbin angin Savonius dengan bantuan software ANSYS Workbench. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan angin terhadap kinerja turbin angin Savonius dan untuk

mengetahui pengaruh variasi bentuk sudu terhadap kinerja turbin angin Savonius. Berikut merupakan geometri dari turbin angin Savonius yang akan dipakai:

Tabel 2. 3 Geometri turbin angin vertikal Savonius tipe U (Setyawan, 2018)

Tipe <i>blade</i>	= Tipe U
Jumlah <i>blade</i>	= 3 (tiga)
Diameter poros	= 0.05 m
Diameter dalam	= 0,5 m
Diameter luar	= 0,51 m
Tebal	= 0.01 m
Tinggi	= 1.5 m
Diameter tutup turbin	= 1.25 m
Tebal tutup turbin	= 0.03 m

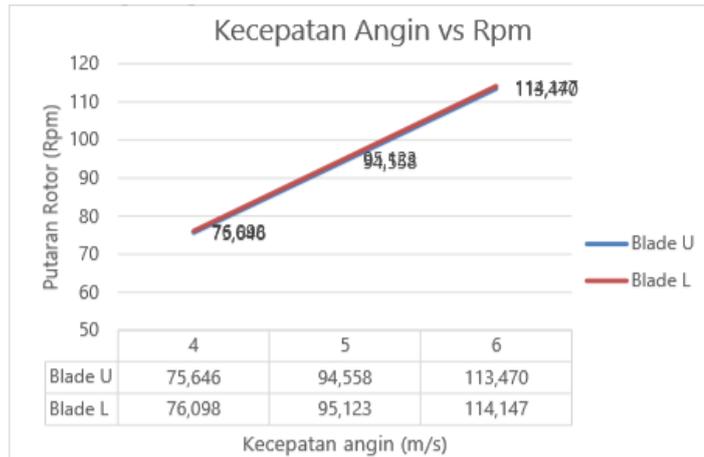
Tabel 2. 4 Geometri turbin angin vertikal Savonius tipe L (Setyawan, 2018)

Tipe <i>blade</i>	= Tipe L
Jumlah <i>blade</i>	= 3 (tiga)
Radius Fillet	= 0.15 m
Panjang <i>blade</i>	= 0.5 m
Tebal	= 0.01 m
Tinggi	= 1.5 m
Diameter tutup turbin	= 1.25 m
Tebal tutup turbin	= 0.03 m

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa hubungan antara besar tekanan yang terjadi pada turbin akibat dari kecepatan udara adalah berbanding lurus, semakin besar kecepatan udara yang melewati turbin maka tekanan yang timbul juga akan semakin besar seperti yang dapat dilihat dari gambar 2.30:



Gambar 2. 25 Grafik tekanan (Pa) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)



Gambar 2. 26 Grafik Putaran (Rpm) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)

Kecepatan putaran yang dihasilkan dari turbin angin savonius dengan variasi sudu tipe U dan L dengan variasi kecepatan udara 4 m/s, 5 m/s, dan 6 m/s adalah pada sudu tipe U kecepatan putaran yang terjadi adalah 113 Rpm dan pada sudu tipe L kecepatan putarannya adalah 114 Rpm. Pada turbin angin savonius dengan variasi sudu tipe U dan L nilai torsi terbesar pada masing-masing model yaitu pada sudu tipe U sebesar 10.012 Nm dan pada sudu tipe L sebesar 11.947 Nm. Dari hal tersebut dapat diketahui bahwa nilai torsi terbesar adalah pada savonius dengan tipe sudu L yaitu 11.947 Nm. Pada turbin angin savonius dengan variasi sudu tipe U dan L daya terbesar yang bisa dihasilkan oleh masing-masing model yaitu pada sudu tipe L sebesar 119.264 Watt dan pada sudu tipe U sebesar 118.905 Watt.



Gambar 2. 27 Grafik Torsi (Nm) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)



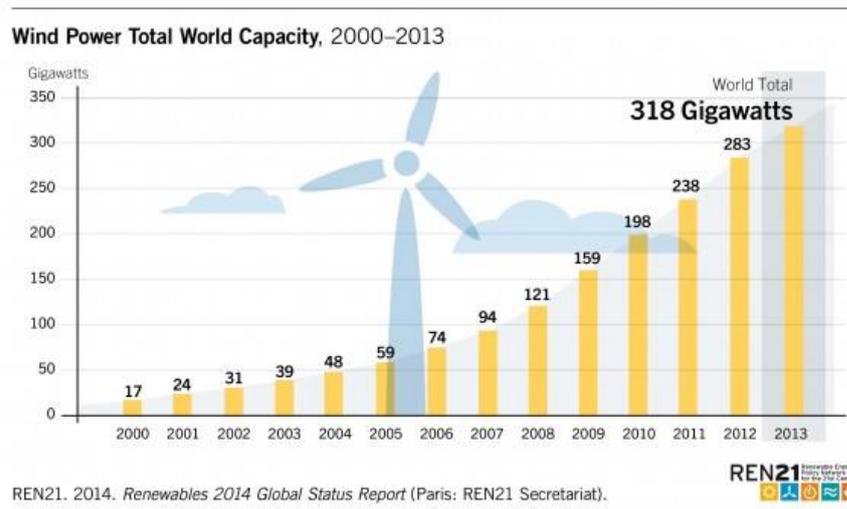
Gambar 2. 28 Grafik Daya (Watt) terhadap kecepatan udara (m/s) (Setyawan, 2018)

Dapat dilihat dari hasil penelitian bahwa turbin angin Savonius dengan sudu berbentuk L memiliki performa yang lebih baik daripada turbin angin Savonius dengan sudu berbentuk U pada setiap parameter.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Energi Angin

Angin merupakan pergerakan udara yang bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Dengan adanya perbedaan tekanan tersebut, udara dapat bergerak dan mempunyai energi kinetik. Energi kinetik tersebut dapat diekstrak dengan menggunakan turbin atau kincir angin menjadi energi listrik. Angin terjadi karena adanya perbedaan suhu udara yang menyebabkan terjadi perputaran udara yang menyebabkan udara berpindah. Energi angin merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang takkan ada habisnya. Energi angin juga tidak menghasilkan polusi seperti bahan bakar fosil yang menghasilkan banyak polusi. Oleh karena itu, energi angin merupakan salah satu jenis sumber energi terbarukan yang cukup menjanjikan. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini bahwa pemanfaatan energi angin terus meningkat dari tahun ke tahun.



Gambar 2. 29 Pertumbuhan Kapasitas Energi Angin (Reve, 2014)

Pemanfaatan energi angin dapat mengurangi ketergantungan akan bahan bakar fosil yang semakin lama menjadi semakin terbatas. Energi angin merupakan salah satu energi angin yang sangat berkembang di dunia. Energi angin dapat diubah menjadi bentuk energi lain seperti energi mekanik atau energi listrik. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan kincir atau turbin angin dan generator. Proses konversi energi angin menjadi energi listrik dilakukan dalam 2 tahap, yaitu tahap pertama mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik dengan menggunakan turbin. Angin akan berhembus melewati turbin, sehingga turbin dapat berputar dan menghasilkan energi mekanik. Kemudian energi mekanik tersebut dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan generator yang terhubung dengan turbin angin. Besar energi angin sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin, jenis turbin, dan, jenis generator (Prakoso, 2016). Oleh karena itu, perlu diidentifikasi daerah mana saja yang memiliki potensi energi angin yang sangat besar agar pemanfaatan energi angin tersebut dapat berjalan efektif. Kondisi angin yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik adalah sebagai berikut:

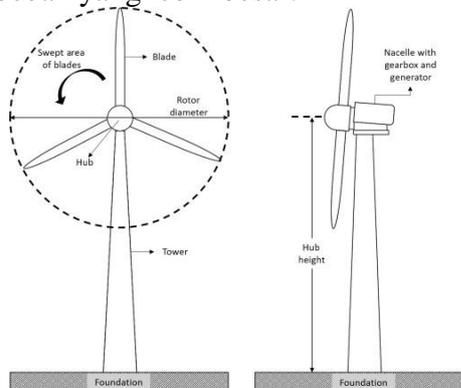
Tabel 2. 5 Tingkat Kecepatan Angin 10 Meter di atas Permukaan Tanah (*Prakoso, 2016*)

Tingkat Kecepatan Angin 10 meter di atas permukaan Tanah		
Kelas	Kecepatan	Kondisi Alam di Daratan
1	0,00 – 0,02	-----
2	0,3 – 1,5	Angin tenang, asap lurus ke atas
3	1,6 – 3,3	Asap bergerak mengikuti arah angin
4	3,4 – 5,4	Wajah terasa ada angin, daun2 bergoyang pelan, petunjuk arah angin bergerak
5	5,5 – 7,9	Debu jalan, kertas beterbangan, ranting pohon bergoyang
6	8,0 – 10, 7	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar
7	10,8 – 13,8	Ranting pohon besar bergoyang, air plampung berombak kecil
8	13,9 – 17,1	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga
9	17,2 – 20,7	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan arah angin
10	20,8 – 24,4	Dapat mematahkan ranting pohon, rumah rubuh
11	24,5 – 28,4	Dapat merubuhkan pohon, menimbulkan kerusakan
12	28,5 – 32,6	Menimbulkan kerusakan parah
13	32,7 – 36,9	Tornado

2.2.2 Turbin Angin

2.2.2.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

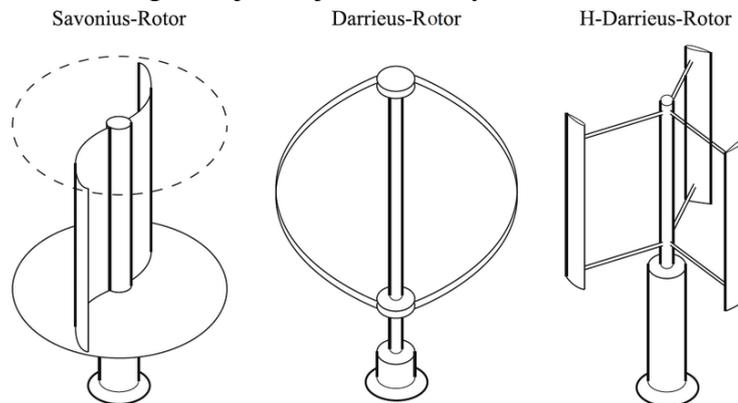
Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) adalah jenis turbin angin yang memiliki sumbu putar horizontal. Dengan posisi sumbu putar yang horizontal, sudu dari turbin akan tegak lurus terhadap arah angin. HAWT memiliki beberapa kelebihan, yaitu HAWT memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada VAWT. Oleh karena itu HAWT lebih sering digunakan daripada VAWT. HAWT juga dapat beroperasi pada kecepatan tinggi karena sudu turbinnya tegak lurus terhadap arah angin. Tetapi, HAWT juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu dengan posisi sumbu putarnya yang horizontal, generator harus dipasang di atas *tower*, sehingga *maintenance* akan jauh lebih sulit dibanding dengan VAWT. Dengan *generator* yang terpasang diatas *tower*, *tower* harus menumpu beban yang lebih besar.



Gambar 2. 30 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

2.2.2.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

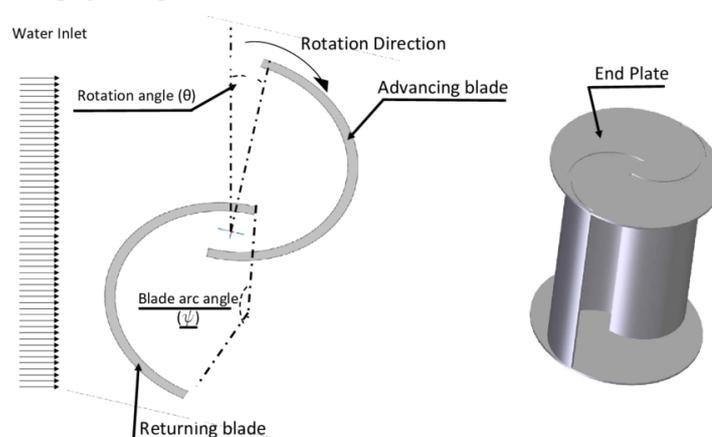
Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) adalah jenis turbin angin yang memiliki sumbu putar vertikal yang menyebabkan turbin juga akan berputar secara vertikal. Dengan posisi sumbu putar yang vertikal, turbin VAWT dapat menerima angin dari segala arah, tidak seperti HAWT yang hanya bisa menerima angin dari arah tertentu. VAWT memiliki beberapa kelebihan yaitu, mekanisme dari generator dapat diletakkan di tanah, sehingga tower dari turbin tidak perlu men-support generator. Hal ini juga akan memudahkan maintenance pada turbin karena generator terletak di tanah, sehingga mudah diakses. Kelebihan lainnya adalah VAWT memiliki torsi yang cukup tinggi pada kecepatan rendah yang membuatnya cukup efisien pada daerah yang kecepatan anginnya rendah. Namun, VAWT memiliki kekurangan yaitu efisiensi dari VAWT masih tergolong rendah dibandingkan dengan HAWT. Oleh karena itu VAWT jarang digunakan. VAWT dibagi menjadi 2 jenis turbin yaitu turbin Savonius dan Darrieus.



Gambar 2. 31 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

2.2.3 Turbin Savonius

Turbin Savonius merupakan salah satu jenis dari Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). Turbin Savonius pertama kali ditemukan oleh Sigurd J. Savonius pada tahun 1922. Turbin ini mempunyai bentuk sudu setengah lingkaran. Oleh karena itu, turbin ini berbentuk huruf S jika dilihat dari atas. Turbin ini juga disebut turbin drag type karena prinsip kerjanya yang memanfaatkan gaya drag pada sudu turbin untuk memutar poros. Pada turbin savonius terdapat 2 jenis sudu, yaitu advancing blade dan returning blade. Advancing blade adalah sisi sudu yang berbentuk cekung dari arah datangnya angin, sedangkan returning blade adalah sisi sudu yang cembung dari arah datangnya angin.



Gambar 2. 32 Skema Turbin Angin Savonius

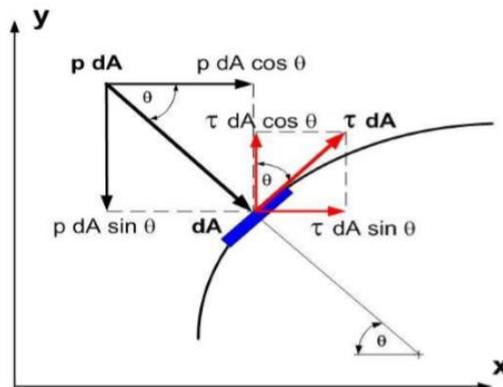
Prinsip kerja dari turbin Savonius ini adalah dengan memanfaatkan angin yang melewati turbin Savonius. Aliran angin yang melewati turbin Savonius akan menghasilkan gaya drag pada sudu turbin. Sudu tersebut akan memutar poros karena adanya perbedaan gaya drag pada

advancing blade dan *returning blade*. Pada *advancing blade*, gaya *drag* lebih besar daripada gaya *drag* pada *returning blade* karena dengan bentuknya yang cekung, *advancing blade* mempunyai nilai *drag coefficient* yang lebih besar daripada *returning blade* yang berbentuk cembung. Karena adanya perbedaan gaya *drag* pada sudu turbin, poros dapat berputar. Nilai torsi yang dihasilkan oleh poros turbin adalah selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* yang kemudian dikalikan dengan jari-jari turbin. Nilai daya yang dihasilkan oleh turbin adalah hasil perkalian dari nilai torsi yang dihasilkan turbin dengan kecepatan putar turbin. Semakin besar selisih gaya *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade*, semakin besar juga nilai torsi dan daya yang dihasilkan. Dengan meningkatnya nilai daya dan torsi, nilai C_p dan C_m pun juga akan meningkat.

Turbin Savonius ini memiliki beberapa kelebihan, yaitu kemampuan *self-start*nya yang tidak membutuhkan torsi awal untuk berputar. Turbin Savonius juga cocok digunakan pada kecepatan rendah, tetapi turbin Savonius memiliki kekurangan, yaitu turbin Savonius kurang efisien untuk digunakan pada kecepatan tinggi.

2.2.4 Gaya Drag

Sebuah *body* jika ditempatkan dalam aliran fluida, maka *body* tersebut akan mendapatkan gaya dari aliran yang mengelilinginya (Nafi'ah, 2018). Gaya yang diakibatkan oleh aliran tersebut dibagi menjadi 2, yaitu gaya *drag* dan gaya *lift*. Gaya *drag* adalah komponen dari gaya pada suatu benda yang terkena aliran fluida yang arahnya sejajar dengan arah aliran fluida. Gaya *drag* juga merupakan penggabungan dari *skin friction drag* (F_{Df}) dan *pressure drag* (F_{Dp}). *Skin friction drag* adalah gaya hambat yang arahnya tangensial terhadap permukaan benda yang disebabkan oleh adanya tegangan geser antara fluida yang mengalir dan permukaan benda. Sedangkan *pressure drag* adalah gaya hambat yang arahnya tegak lurus dengan permukaan benda yang disebabkan adanya tekanan dari fluida yang mengalir. Resultan dari kedua gaya hambat tersebut lah yang disebut dengan gaya *drag* total. Gaya *drag* total tersebut dapat dirumuskan seperti dibawah ini.



Gambar 2. 33 Penguraian komponen gaya *drag* terhadap permukaan benda

Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa nilai *skin friction drag* merupakan integral dari seluruh permukaan benda terhadap tegangan geser (τ). Sedangkan nilai *pressure drag* merupakan integral dari seluruh permukaan benda terhadap tekanan (p). Nilai dari *skin friction drag* dan *pressure drag* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_{Df} = \int_A \tau dA \sin\theta$$

$$F_{Dp} = \int_A p dA \cos\theta$$

$$F_D = F_{Df} + F_{Dp}$$

$$F_D = \int_A \tau dA \sin\theta + \int_A p dA \cos\theta$$

Dimana: F_D = Gaya *Drag* Total (N)
 F_{Df} = *Skin Friction Drag* (N)
 F_{Dp} = *Pressure Drag* (N)

2.2.5 Perhitungan Daya

Turbin angin menghasilkan daya dengan cara mengkonversikan energi angin menjadi energi mekanik. Besar dari daya tersebut dapat dihitung secara teoritis. Daya tersebut dibagi menjadi 2, yaitu daya teoritis energi angin dan daya aktual/mechanik yang dihasilkan oleh turbin.

2.2.5.1 Daya Teoritis Angin

Besarnya daya teoritis dari angin yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik oleh turbin bergantung pada energi kinetik yang terdapat dalam laju aliran angin. Energi kinetik tersebut dapat dirumuskan seperti berikut.

$$Ek = \frac{1}{2} \dot{m} u^2$$

Nilai \dot{m} pada persamaan diatas dapat dirumuskan seperti berikut.

$$\dot{m} = \rho u A$$

Sehingga daya teoritis dari laju angin (P_w) dapat dirumuskan sebagai berikut.

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

Dimana: Ek = Energi Kinetik Angin
 \dot{m} = Laju Massa Aliran Angin
 ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)
 A = Luas Penampang Turbin (m^2)
 u = Kecepatan Angin (m/s)
 P_w = Daya Teoritis Angin

2.2.5.2 Daya Aktual Turbin

Besarnya daya aktual/mechanik turbin (P_r) dapat dihitung menggunakan rumus dibawah ini.

$$P_r = T_D \omega$$

Dimana: P_r = Daya Mekanik Turbin
 T_D = Torsi Dinamis Turbin (Nm)
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

2.2.6 Perhitungan Torsi

Torsi adalah sebuah gaya yang menyebabkan suatu benda untuk berputar. Torsi dirumuskan menjadi gaya dikali panjang lengan dari suatu benda. Torsi sendiri dibagi menjadi 2, yaitu torsi statis dan torsi dinamis.

2.2.6.1 Torsi Statis

Torsi statis adalah torsi yang digunakan untuk menahan turbin tetap pada posisinya (Nafi'ah, 2018). Torsi statis juga dapat diartikan torsi dari turbin pada sudut tertentu. Torsi statis dapat dirumuskan seperti berikut:

$$T_S = F_D R$$

Dimana: T_S = Torsi Statis (Nm)
 F_D = Gaya *Drag* Total (N)
 R = Jari-jari Turbin (m)

2.2.6.2 Torsi Dinamis

Torsi dinamis adalah torsi yang dihasilkan oleh turbin saat turbin berputar. Untuk menghitung torsi dinamis dapat dengan cara menghitung rata-rata nilai torsi statis dari turbin pada seluruh posisi sudut turbin.

2.2.7 Parameter Turbin Angin

Berikut merupakan beberapa parameter yang dapat memengaruhi kinerja efisiensi dari turbin angin.

2.2.7.1 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio atau yang disebut juga TSR adalah perbandingan antara kecepatan ujung dari sudu turbin terhadap kecepatan angin. TSR dilambangkan menjadi λ . TSR dapat dirumuskan seperti berikut.

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

Dimana: λ = *Tip Speed Ratio*

ω = Kecepatan Sudut Turbin (rad/s)

R = Jari-jari Turbin (m)

u = Kecepatan Angin (m/s)

2.2.7.2 Coefficient of Power (Cp)

Coefficient of Power atau Cp adalah perbandingan antara daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin (P_r) terhadap daya kinetik dari angin (P_w). Cp dapat digunakan sebagai indikator performa dari turbin. Semakin besar nilai Cp dari suatu turbin, maka semakin efisien kinerja dari turbin tersebut. Cp dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Cp = \frac{P_r}{P_w} = \frac{T_D \omega}{\frac{1}{2} \rho A u^3}$$

Dimana: Cp = *Coefficient of Power*

P_r = Daya Mekanik Turbin (W)

P_w = Daya Kinetik Angin (W)

T_D = Torsi Dinamis Turbin (Nm)

ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)

A = Luas Penampang Turbin (m^2)

u = Kecepatan Angin (m/s)

2.2.7.3 Coefficient of Moment (Cm)

Coefficient of Moment atau Cm adalah perbandingan antara torsi yang dihasilkan oleh turbin (T) terhadap torsi teoritis dari angin. Cm dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$Cm = \frac{T_D}{\frac{1}{2} \rho A u^2 R}$$
$$Cm = \frac{Cp}{\lambda}$$

Dimana: Cm = *Coefficient of Moment*

T_D = Torsi Dinamis Turbin (Nm)

ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)

A = Luas Penampang Turbin (m^2)

u = Kecepatan Angin (m/s)

R = Jari-jari Turbin (m)

Cp = *Coefficient of Power*

λ = *Tip Speed Ratio*

2.2.8 *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 (Fridayana, 2018)

Sistem analisis CFD terbagi oleh 3 tahap sebagai berikut :

1. *Pre-processing*

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. *Solving*

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-processing*

Hasil simulasi CFD adalah berupa variabel-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.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Variasi dan Domain Simulasi

3.1.1 Variasi

Studi numerik ini dilakukan menggunakan *software* ANSYS *Workbench* 18.1. Pemodelan pada penelitian ini dilakukan dengan 2 tahap yaitu studi numerik dan studi eksperimen. Variasi studi numerik yang akan 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*, *Solving*, dan *Post-Processing*. Variasi pemodelan studi numerik ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

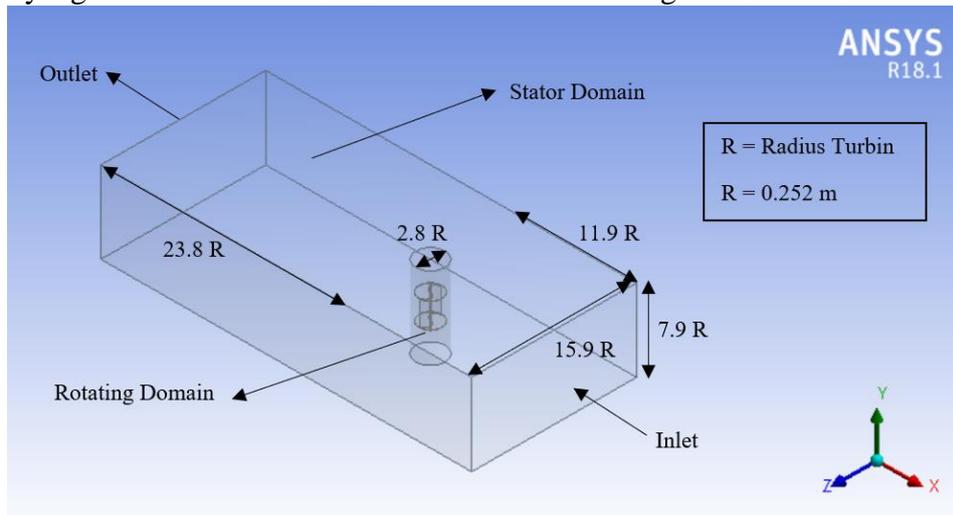
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Variasi Penelitian							
Kecepatan Angin (m/s)	3	4	5	6	7	8	9
<i>Tip Speed Ratio</i>	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2
Radius Turbin (m)	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252	0.252
Jumlah <i>Frame</i>	24	24	24	24	24	24	24
Waktu per putaran (s)	2.64	0.79	0.39	0.24	0.16	0.12	0.09
<i>Time Step</i> (s)	0.1099	0.0329	0.0165	0.0099	0.0067	0.0048	0.0037
Kecepatan Sudut Turbin (rpm)	22.75	75.83	151.65	250.23	371.55	515.62	682.44

Data yang digunakan untuk putaran turbin diadaptasi dari eksperimen yang telah dilakukan oleh (Sukanta Roy, 2016). Kemudian data ini diinterpolasi untuk mendapatkan data TSR pada kecepatan angin yang sesuai.

3.1.2 Domain Simulasi

Untuk domain pada simulasi ini terdapat dua domain, yaitu *static domain* dan *rotating domain*. *Rotating domain* 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. *Static domain* adalah domain terluar yang dilewati oleh fluida. *Static domain* tidak bergerak dan berbentuk balok.



Gambar 3. 1 Domain Simulasi

3.2 Prosedur Studi Numerik

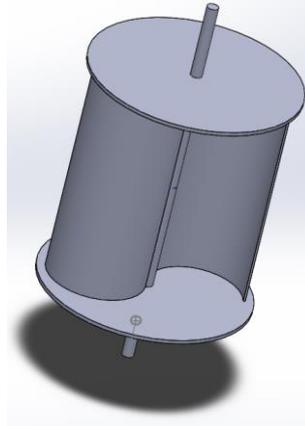
3.2.1 Pre-processing

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

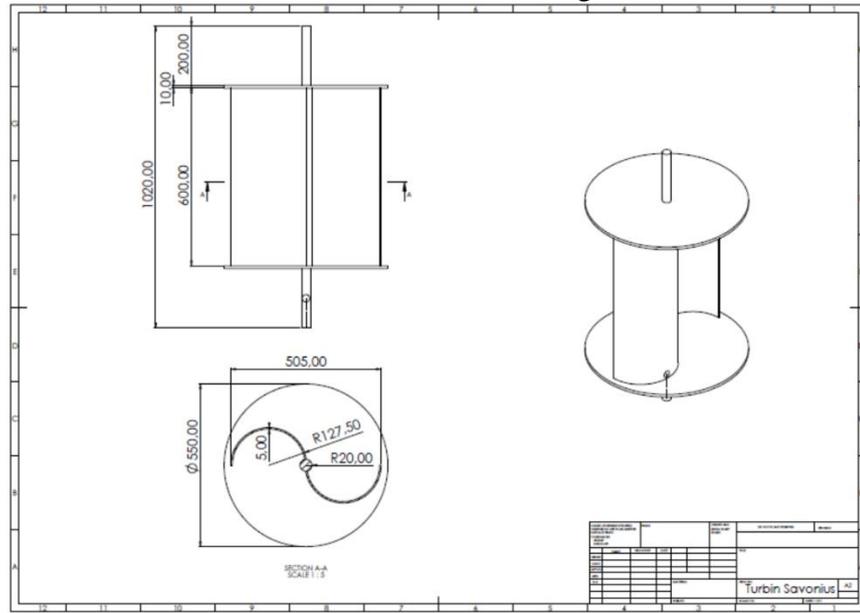
tahap ini yaitu:

1. Mendesain geometri turbin angin Savonius.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius tipe sudu U tanpa overlap. Sudu turbin memiliki diameter sebesar 255 mm dan tinggi turbin sebesar 600 mm. Ditunjukkan pada gambar 3.2 bentuk desain turbin angin Savonius dan pada gambar 3.3 ditunjukkan dimensi lengkap dari turbin.



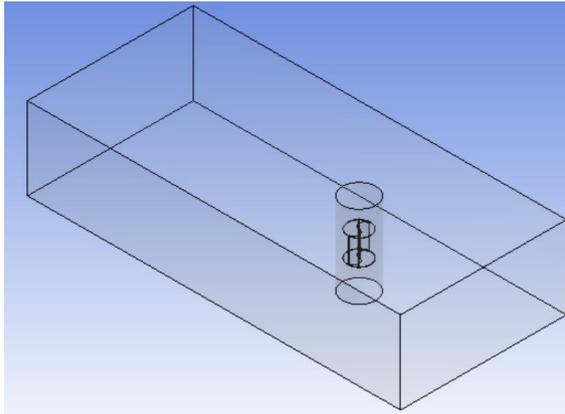
Gambar 3. 2 Skema Turbin Angin Savonius



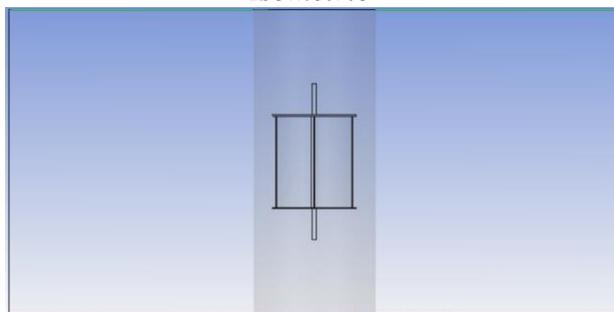
Gambar 3. 3 Dimensi Turbin Angin Savonius

2. Membuat geometri pada ANSYS *Design Modeler*

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. *Static domain* berbentuk balok dengan panjang 9 m, lebar 4 m, dan tinggi 2 m. Untuk *rotating domain* berbentuk silinder dengan diameter 0,7 m dan tinggi 4 m. Gambar 3.4, 3.5 dan 3.6 menunjukkan tampak dari geometri turbin pada ANSYS *design modeler*.



Gambar 3. 4 Geometri Turbin pada ANSYS *Design Modeler* Tampak *Isometric*



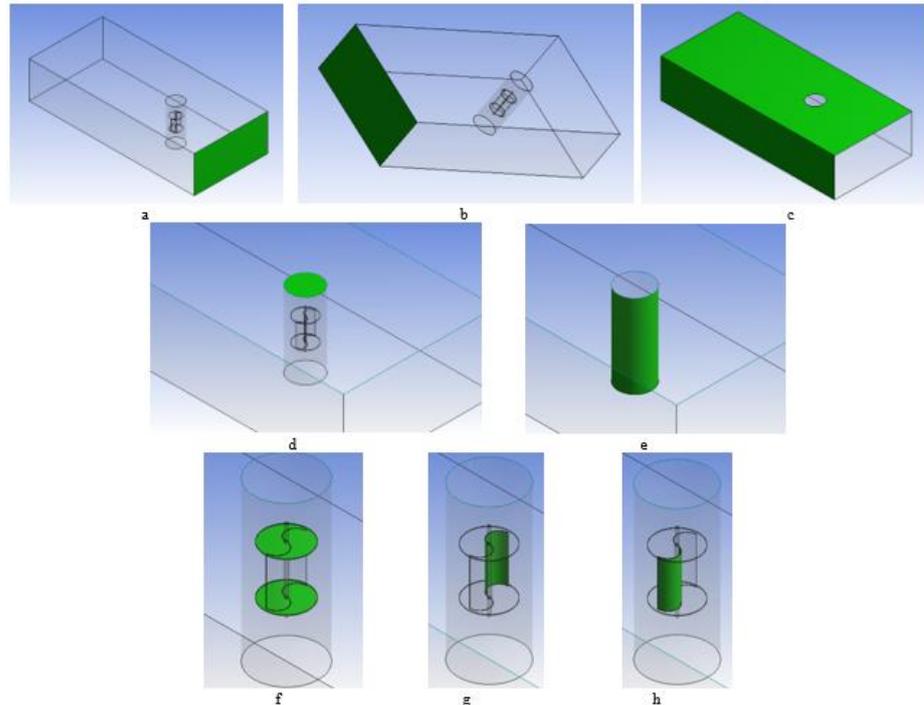
Gambar 3. 5 Geometri Turbin pada ANSYS *Design Modeler* Tampak Depan



Gambar 3. 6 Geometri Turbin pada ANSYS *Design Modeler* Tampak Atas

3. Penamaan *boundary conditions*

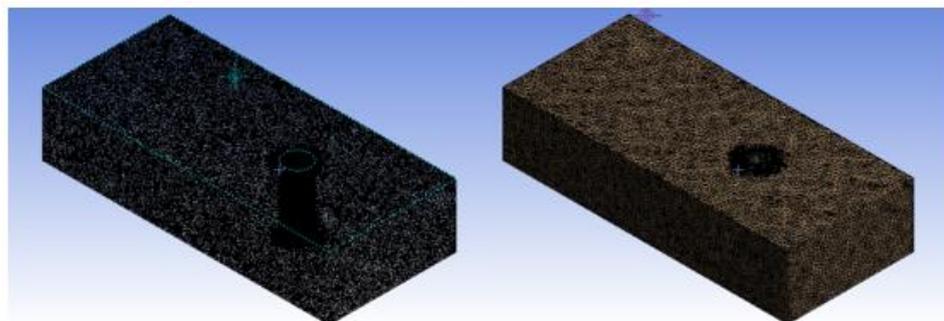
Setiap bagian dari turbin diberikan nama yang berfungsi untuk mendefinisikan bagian-bagian yang ada pada turbin kepada *software* yang akan digunakan untuk simulasi. Untuk nama dari setiap bagian yang ada di turbin ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3. 7 (a) *Inlet*, (b) *Outlet*, (c) *Wall*, (d) *Rotating Atas Bawah*, (e) *Rotating Surface*, (f) *Savonius Endplate*, (g) *Savonius Blade 1*, (h) *Savonius Blade 2*

4. *Meshing*

Setelah dilakukan pembuatan geometri pada ANSYS *design modeler*, dilakukan proses *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. Nilai *skewness* dan *orthogonal* dari *meshing* juga menentukan tingkat akurasi dari simulasi. Semakin kecil nilai *skewness*, maka semakin akurat juga hasil simulasi, sedangkan untuk nilai *orthogonal*, semakin besar nilai *orthogonal* semakin akurat hasil dari simulasi. 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. *Meshing* yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.8 dan properti dari *meshing* dapat dilihat pada tabel 3.2:



Gambar 3. 8 Hasil *Meshing*

Tabel 3. 2 Properti *Meshing*

Jumlah <i>Nodes</i>	1,334,899
Jumlah <i>Elements</i>	6,310,295
Nilai <i>Orthogonal</i> Maksimum	0,99
Nilai <i>Orthogonal</i> Minimum	0,34
Nilai <i>Orthogonal</i> Rata-rata	0,69
Nilai <i>Skewness</i> Maksimum	0.66
Nilai <i>Skewness</i> Minimum	2.48×10^{-4}
Nilai <i>Skewness</i> Rata-rata	0.31

3.2.2 Solving

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

- Fluida udara merupakan aliran *incompressible*
- Kondisi aliran adalah *transient*
- Perpindahan suhu diabaikan
- Kecepatan angin diasumsikan arahnya merata

Kemudian dilakukan pengaturan pada *software Fluent* .:

- 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.

- 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)*. 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. 3 Tabel *General* dan *Models*

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

- Memberikan nilai properti pada *Materials*

Tabel 3. 4 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>

d) Menentukan *Cell Zone Conditions*

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

Tabel 3. 5 Data Konfigurasi *Cell Zone*

<i>Stator Domain</i>		
<i>Material Name</i>	<i>Air (udara)</i>	
<i>Frame Motion</i>	<i>Off</i>	
<i>Rotor Domain</i>		
<i>Material Name</i>	<i>Air (udara)</i>	
<i>Mesh Motion</i>	<i>On</i>	
	<i>Relative To Cell Zone</i>	<i>Absolute</i>
	<i>Rotation-Axis Direction</i>	
	<i>X (m) :</i>	<i>0</i>
	<i>Y (m) :</i>	<i>1</i>
	<i>Rotational Velocity</i>	<i>22.75; 75.83; 151.65; 250.23; 371.55; 515.62; dan 682.44 rpm</i>
<i>Stationary area</i>		
<i>Material Name</i>	<i>Air (udara)</i>	

e) 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 variasi kecepatan angin yang digunakan. Sedangkan *Turbulent Method* dipilih *Intensity and Viscosity Ratio*.

Tabel 3. 6 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>	<i>3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 m/s</i>
	<i>Pressure (Pascal)</i>	<i>0</i>
<i>Turbulence</i>	- <i>Specification Method</i>	<i>Intensity and Viscosity Ratio</i>
	- <i>Turbulent Intensity (%)</i>	<i>5</i>
	- <i>Turbulent Viscosity Ratio</i>	<i>10</i>

Tabel 3. 7 Data *Outlet Boundary Conditions*

<i>Outlet</i>		
<i>Pressure-outlet</i>	<i>Backflow Reference Fame</i>	<i>Absolute</i>

	<i>Gauge Pressure (Pascal)</i>	<i>0</i>
	<i>Backflow Direction Specification Method</i>	<i>Normal to Boundary</i>
	<i>Backflow Pressure Specification</i>	<i>Total Pressure</i>
<i>Turbulence</i>	- <i>Specification Method</i>	<i>Intensity and Viscosity Ratio</i>
	- <i>Turbulent Intensity (%)</i>	<i>5</i>
	- <i>Turbulent Viscosity Ratio</i>	<i>10</i>

Tabel 3. 8 Data Rotating Atas Bawah Boundary Conditions

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

Tabel 3. 9 Data Savonius Endplate Boundary Conditions

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

Tabel 3. 10 Data Savonius Blade 1 Boundary Conditions

Savonius Blade 1		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion Rotational</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
		<i>Rotational</i>

	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>Savonius Blade 1</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

Tabel 3. 11 Data *Savonius Blade 2* Boundary Conditions

<i>Savonius Blade 2</i>		
<i>Moving Wall</i>	<i>Motion Rotational</i>	<i>Relative to Adjacent Cell Zone</i>
		<i>Rotational</i>
	<i>Rotation Axis Origin&Direction</i>	0
<i>Savonius Blade 2</i>		
<i>Sand Grain Roughness</i>	<i>Roughness Height (m)</i>	0
	<i>Roughness Constant</i>	0.5

f) Pendefinisian *Mesh Interface*

Mesh interface ini berfungsi untuk menjembatani antara dua atau 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.

g) Pendefinisian *Solution Methods*

Pemilihan *Solution Methods* akan memberikan perintah kepada *Fluent* bagaimana algoritma yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan numerik. Pada simulasi kali ini penyelesaian dan diskritisasi yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 3. 12 Data *Solution Methods*

<i>Pressure-Velocity</i>	<i>Scheme</i>	<i>SIMPLE</i>
<i>Spatial Discretization</i>	<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based (default)</i>
	<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>

h) Pengaturan *Residual Monitor*

Iterasi dikatakan konvergen bila nilai residual berada dibawah maksimum *error* yang diijinkan. Bila konvergensi sudah terjadi maka iterasi dihentikan lalu melanjutkan komputasi pada *time step selanjutnya*. Pemberian nilai toleransi *error* yang semakin kecil menjadikan waktu

komputasi tiap *time step* menjadi lama dengan ekspektasi hasil yang didapatkan semakin baik.

Pada simulasi ini, nilai kriteria residual ditunjukkan dalam Tabel 3.12 di bawah ini.

Tabel 3. 13 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>

i) 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. 14 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>

j) 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.

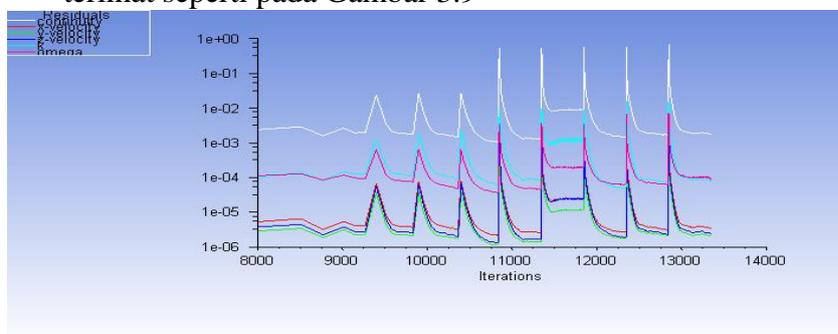
Pada simulasi ini *time step* yang diinginkan adalah waktu untuk sudu menempuh sudut 15⁰. Sehingga kecepatan putar yang diinputkan akan mempengaruhi harga *time step*. Sehingga harus dihitung dengan persamaan berikut

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

Sedangkan *Number of Step* adalah seberapa banyak *time step* yang akan dihitung. Setiap satu komputasi *time step* akan dihitung dengan beberapa kali iterasi. 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.

k) *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 3.9



Gambar 3. 9 *Monitoring Residual*

3.2.3 *Post-processing*

Data hasil dari simulasi CFD menggunakan *software* ANSYS adalah berupa *plotting* nilai gaya *drag* dan nilai *Cm* pada tiap 15° turbin berputar. Setelah itu, data *Cm* akan disajikan dalam bentuk grafik antara nilai *Cm* dan sudut putaran turbin.

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

$$Waktu\ per\ putaran = \frac{2\ \pi}{\omega}$$

Untuk mencari nilai *Cp*, perlu dilakukan pengolahan data untuk mendapatkan nilai *Cp* dari turbin. Untuk menghitung nilai *Cp* dapat menggunakan rumus dibawah ini:

$$Cp = Cm\ \lambda$$

Nilai *Cm* pada setiap sudut turbin dikalikan dengan nilai TSR untuk mendapatkan nilai *Cp* dari turbin. Setelah nilai *Cp* didapatkan, data nilai *Cp* juga akan disajikan dalam bentuk grafik antara nilai *Cp* dan sudut putaran turbin.

Untuk mendapatkan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin juga diperlukan pengolahan data terlebih dahulu. Dari hasil simulasi didapatkan data gaya *drag* pada sudu turbin tiap sudut putaran turbin. Gaya *drag* tersebut kemudian dikalikan dengan radius sudu turbin untuk mendapatkan torsi. Setelah itu, nilai torsi pada setiap sudut di rata-rata untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dari turbin. Untuk menghitung torsi yang dihasilkan oleh turbin dapat menggunakan rumus dibawah ini:

$$T_S = (F_{D1} - F_{D2}) R$$

$$T_D = \frac{\sum_{i=0}^n T_S}{n}$$

Dimana: T_D = Torsi Dinamis (Nm)
 T_S = Torsi Statis (Nm)
 F_{D1} = Gaya Drag di Savonius Blade 1 (N)
 F_{D2} = Gaya Drag di Savonius Blade 2 (N)
 n = Jumlah Data
 R = Jari-jari Turbin (m)

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 3.10.



Gambar 3. 10 Turbin Angin Savinius

3.3.2 Shaft Turbin

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

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

Shaft turbin yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.11.



Gambar 3. 11 *Shaft* Turbin

3.3.3 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 3.12.



Gambar 3. 12 Dudukan Turbin

3.3.4 *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 3.13.



Gambar 3. 13 *Tapered Bearing* FAG 32305

3.3.5 *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 3.14.



Gambar 3. 14 *Ball Bearing SKF 6305/C3*

3.3.6 *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 3.15.



Gambar 3. 15 *Rubber Coupling*

3.3.7 *Generator*

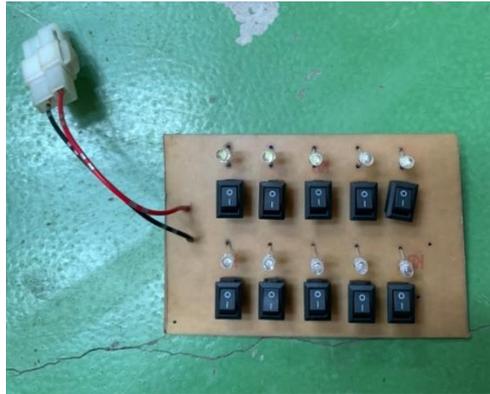
Penelitian ini menggunakan *generator* yang berfungsi sebagai penghasil listrik untuk rangkaian lampu. *Generator* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.16.



Gambar 3. 16 *Generator*

3.3.8 *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 3.17.



Gambar 3. 17 Rangkaian Lampu

3.3.9 *Tower Turbin*

Penelitian ini menggunakan *tower* agar turbin terpasang cukup tinggi untuk mendapatkan angin. *Tower* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.18.



Gambar 3. 18 *Tower Turbin*

3.3.10 *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 3.19.



Gambar 3. 19 *Anemometer*

Spesifikasi *anemometer* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.15.

Tabel 3. 15 Krisbow KW06-564 *Anemometer*

Spesifikasi Krisbow KW06-564 <i>Anemometer</i>	
Range	0.4 – 30.00 m/s
Accuracy	$\pm 3 \%$, ± 0.20 m/s
Resolution	0.01

3.3.11 *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 3.20.



Gambar 3. 20 *Multimeter*

Spesifikasi *multimeter* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.16.

Tabel 3. 16 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

3.3.12 *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 3.21.



Gambar 3. 21 Tachometer

Spesifikasi *tachometer* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.17.

Tabel 3. 17 DT6236 Digital Tachometer

Spesifikasi DT6236B Digital Tachometer	
Range	5– 99999 rpm
Accuracy	±0.05 %
Resolution	0.1

3.3.13 Bor

Bor digunakan untuk membuat lubang pada turbin untuk dudukan turbin. Jenis bor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.22.



Gambar 3. 22 Bor

3.3.14 Gerinda

Gerinda digunakan untuk keperluan memotong pada manufaktur turbin. Jenis gerinda yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.23.



Gambar 3. 23 Gerinda

3.3.15 Masking Tape

Masking tape digunakan untuk keperluan pengecatan dan pendempulan pada turbin. *Masking tape* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.24.



Gambar 3. 24 *Masking Tape*

3.3.16 *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 3.25.



Gambar 3. 25 *Glass Fiber*

3.3.17 *Resin Epoxy*

Resin *epoxy* digunakan untuk memperkuat *fiber* yang ada turbin. Jenis resin *epoxy* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.26.



Gambar 3. 26 *Resin Epoxy*

3.3.18 *Dempul*

Dempul digunakan untuk memperhalus permukaan turbin agar tahan terhadap air. Jenis dempul yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.27.



Gambar 3. 27 Dempul

3.3.19 Dextone

Dextone digunakan untuk menempel turbin Darrieus dengan lengannya. Dextone yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.28.



Gambar 3. 28 Dextone

3.3.20 Lem G

Lem G digunakan untuk menempel turbin Savonius dengan *endplate*. Lem G yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.29.



Gambar 3. 29 Lem G

3.3.21 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 3.30.



Gambar 3. 30 Lubricant Rexco

3.3.22 Amplas

Amplas digunakan untuk menghaluskan permukaan turbin. Amplas yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.31.

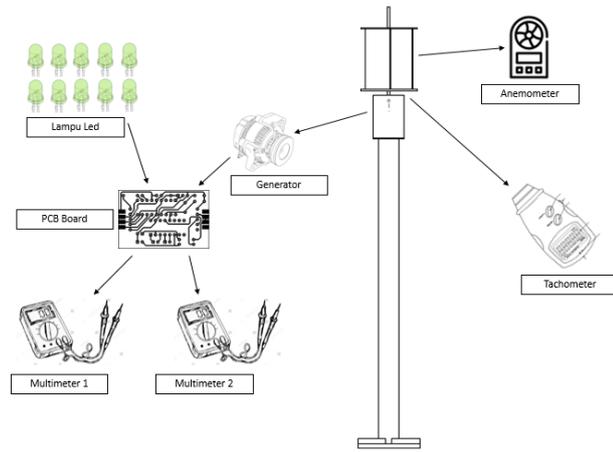


Gambar 3. 31 Amplas

3.4 Prosedur Studi Eksperimen

Studi eksperimen dilakukan untuk membandingkan performa turbin pada kondisi ideal (Studi numerik) dengan kondisi riil. Studi eksperimen akan dilakukan di gedung lantai 4 Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS. Berikut langkah-langkah dari studi eksperimen yang akan dilakukan:

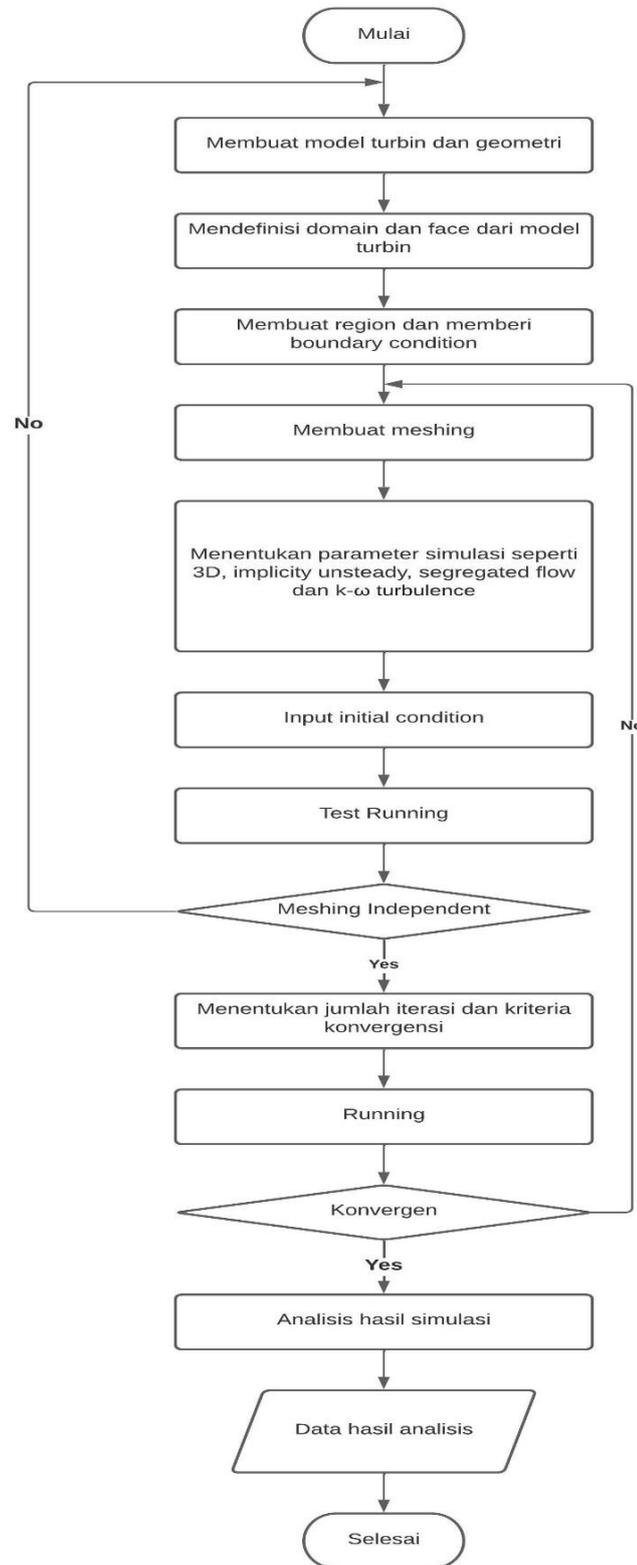
1. Menyiapkan peralatan yang akan digunakan.
2. Memasang turbin angin Savonius pada *tower* turbin.
3. Menyiapkan alat ukur *anemometer*, *tachometer*, dan *multimeter*.
4. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan *anemometer*.
5. Mengukur kecepatan putar turbin dengan menggunakan *tachometer*.
6. Voltase dan kuat arus listrik yang dihasilkan oleh generator diukur dengan menggunakan *multimeter*.
7. Langkah 4, 5, dan 6 dilakukan selama 15 menit yang kemudian nilai kecepatan angin, kecepatan putar turbin, voltase, dan kuat arus listrik dihitung nilai rata-ratanya.
8. Mengulangi langkah 4 sampai 7 pada jam yang berbeda, yaitu pada pagi, siang, sore, dan malam hari.
9. Mengolah data yang diperoleh berupa nilai rata-rata kecepatan angin, kecepatan putar turbin, voltase, dan kuat arus listrik. Data tersebut akan diolah menjadi nilai daya aktual, torsi, *coefficient of power*, dan *coefficient of moment*.



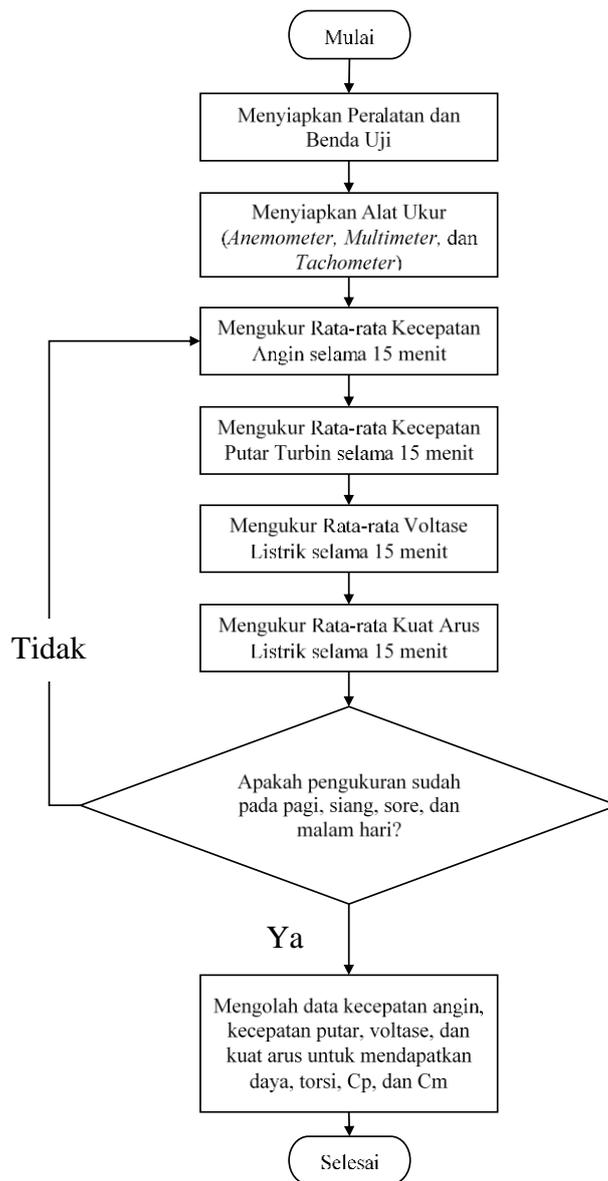
Gambar 3. 32 Skema Alat Studi Eksperimen

3.5 Diagram Alir

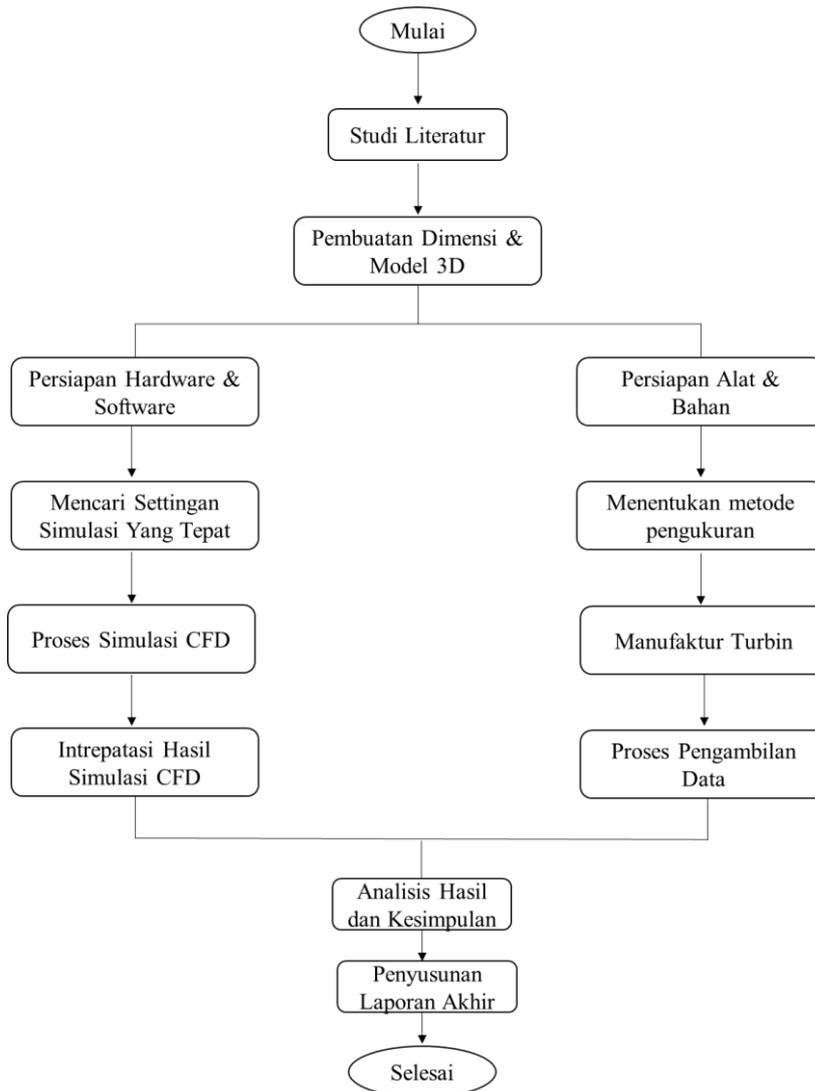
Diagram alir penelitian yang digunakan untuk studi numerik, studi eksperimen, dan penelitian keseluruhan adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 33 Diagram Alir Studi Numerik



Gambar 3. 34 Diagram Alir Studi Eksperimen



Gambar 3. 35 Diagram alir penelitian secara umum

3.6 Jadwal Penelitian

Berikut merupakan *timeline* penelitian yang akan dilaksanakan:

Tabel 3. 18 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan																																			
		November				Desember				Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	Studi Literatur	█																																			
2	Pembuatan Proposal	█																																			
3	Perancangan Desain Turbin	█				█																															
4	Proses Manufaktur Turbin	█				█																															
5	Percobaan Software ANSYS	█				█																															
6	Mencari Settingan Simulasi	█				█																															
7	Seminar Proposal Tugas Akhir	█																																			
8	Pengambilan Data Studi Numerik	█																																			
9	Pengambilan Data Studi Eksperimen	█																																			
10	Analisa Data	█																																			
11	Pembuatan Laporan	█																																			
12	Sidang Tugas Akhir	█																																			

[Halaman Ini Sengaja Dikosongkan]

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Penelitian

Pengambilan data menggunakan udara sebagai fluida kerja. Studi numerik dan eksperimen menggunakan asumsi aliran *incompressible*, sehingga nilai dari densitas udara konstan. Pemodelan studi numerik menggunakan input yang dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Input Data Studi Numerik

Kecepatan Angin (m/s)	3	4	5	6	7	8	9
TSR	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
Densitas Udara (kg/m ³)	1.225						
Kenaikan Posisi Turbin Tiap Pengamatan (deg)	15						
Tinggi Turbin (m)	0.6						
Jari-Jari Turbin (m)	0.252						
<i>Swept Area</i> Turbin (m ²)	0.3024						

Data yang digunakan untuk TSR turbin diadaptasi dari simulasi yang dilakukan (Sukanta Roy, 2016). Kemudian data ini diekstrapolasi untuk mendapatkan data kecepatan sudut turbin pada kecepatan angin yang sesuai. Untuk studi eksperimen digunakan input yang dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Input Data Studi Eksperimen

Kecepatan Angin (m/s)	3	4	5	6	7	8	9
Densitas Udara (kg/m ³)	1.225						
Tinggi Turbin (m)	0.6						
Jari-Jari Turbin (m)	0.252						
<i>Swept Area</i> Turbin (m ²)	0.3024						

4.2 Contoh Perhitungan Studi Numerik

Contoh perhitungan yang akan dibahas menggunakan data hasil simulasi pada kecepatan angin 7 m/s. Contoh perhitungan yang akan dibahas adalah perhitungan nilai kecepatan putar turbin, jumlah *time step*, waktu per putaran, *time step*, torsi pada tiap sudu turbin, torsi total pada turbin, torsi rata-rata turbin, daya aktual turbin, nilai *Coefficient of Power* (Cp), dan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) dari turbin.

4.2.1 Perhitungan Kecepatan Putar Turbin (ω)

Persamaan untuk mendapatkan kecepatan putar turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

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

Dimana: ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)
 λ = *Tip Speed Ratio*
 u = Kecepatan Angin (m/s)
 R = Jari-jari Turbin (m)

Pada kecepatan angin 7 m/s, nilai TSR turbin adalah sebesar 1.4. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai kecepatan putar seperti dibawah ini:

$$\omega = \frac{1.4 \times 7}{0.252}$$

$$\omega = 38.91 \text{ rad/s}$$

4.2.2 Perhitungan Jumlah *Time Step*

Persamaan untuk mendapatkan jumlah *time step* adalah sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Time Step} = \frac{\text{Jumlah Putaran Turbin} \times 360}{\text{Kenaikan Posisi Turbin Tiap Pengamatan}}$$

Studi numerik mengamati torsi pada turbin dalam 1 putaran, sehingga jumlah putaran turbin yang diamati adalah sebesar 1 putaran. Dalam 1 putaran tersebut dilakukan pengamatan setiap 15° turbin bergerak, sehingga jumlah *time step* dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$\text{Jumlah Time Step} = \frac{1 \times 360}{15}$$

$$\text{Jumlah Time Step} = 24$$

4.2.3 Perhitungan Waktu per Putaran

Persamaan untuk mendapatkan waktu per putaran pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Dimana: ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

Pada kecepatan angin 7 m/s, didapatkan nilai kecepatan putar turbin (ω) sebesar 38.91 rad/s. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai waktu per putaran adalah sebagai berikut:

$$\text{Waktu per putaran} = \frac{2\pi}{38.91}$$

$$\text{Waktu per putaran} = 0.1615 \text{ s}$$

4.2.4 Perhitungan Time Step

Persamaan untuk mendapatkan time step pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

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

Pada kecepatan angin 7 m/s, didapatkan nilai waktu per putaran sebesar 0.1615 s dan jumlah *time step* sebesar 24. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai dari *time step* seperti dibawah ini:

$$\text{Time Step} = \frac{0.1615}{24}$$

$$\text{Time Step} = 0.00673 \text{ s}$$

4.2.5 Perhitungan Torsi Pada Tiap Sudu Turbin

Persamaan untuk mendapatkan torsi pada tiap sudu turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$T_{B1} = F_{XB1}R \cos(\theta) + F_{ZB1} R \sin(\theta)$$

$$T_{B2} = F_{XB2} R \cos(\theta + 180) + F_{ZB2} R \sin(\theta + 180)$$

Dimana: T_{B1} = Torsi Pada *Blade* 1 (Nm)
 T_{B2} = Torsi Pada *Blade* 2 (Nm)
 F_{XB1} = Gaya *Drag* Sumbu X *Blade* 1 (N)
 F_{XB2} = Gaya *Drag* Sumbu X *Blade* 2 (N)
 F_{ZB1} = Gaya *Drag* Sumbu Z *Blade* 1 (N)
 F_{ZB2} = Gaya *Drag* Sumbu Z *Blade* 2 (N)
 θ = Sudut Posisi Turbin (deg)
 R = Jari-jari Turbin (m)

Terdapat perbedaan persamaan antara torsi pada *blade* 1 dan *blade* 2, dimana pada persamaan torsi pada *blade* 2, nilai sudut posisi turbin ditambah sebesar 180°. Hal ini dikarenakan oleh geometri turbin yang memiliki 2 buah sudu, sehingga jarak antar *blade* 1 dan *blade* 2 sebesar 180°.

Pada kecepatan angin 7 m/s dan sudut turbin sebesar 285°, didapatkan nilai gaya *drag* pada tiap sudu sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Gaya *Drag* Pada Sudu Turbin Pada Posisi 285°

Teta (deg)	F _{XB1} (N)	F _{XB2} (N)	F _{ZB1} (N)	F _{ZB2} (N)
285	-8.87	-5.52	-8.97	-7.39

Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai T_{B1} dan T_{B2} seperti berikut:

$$T_{B1} = (-8.87 \times 0.252 \times \cos(285)) + (-8.97 \times 0.252 \times \sin(285))$$

$$T_{B1} = 1.604 \text{ Nm}$$

$$T_{B2} = (-5.52 \times 0.252 \times \cos(285 + 180)) + (-7.39 \times 0.252 \times \sin(285 + 180))$$

$$T_{B2} = -1.459 \text{ Nm}$$

4.2.6 Perhitungan Torsi Total pada Turbin dan Torsi Dinamis Turbin

Persamaan untuk mendapatkan torsi total pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$T_S = T_{B1} + T_{B2}$$

Sedangkan persamaan untuk mendapatkan torsi dinamis turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$T_D = \frac{\Sigma T_S}{\text{Jumlah Time Step}}$$

- Dimana: T_S = Torsi Statis (Nm)
 T_{B1} = Torsi Pada *Blade* 1 (Nm)
 T_{B2} = Torsi Pada *Blade* 2 (Nm)
 T_D = Torsi Dinamis (Nm)

Pada kecepatan angin 7 m/s dan sudut turbin 285°, didapatkan nilai T_{B1} dan T_{B2} adalah sebesar 1.604 Nm dan -1.459 Nm. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai dari torsi statis pada sudut turbin 285° seperti dibawah ini:

$$T_S = 1.604 + (-1.459)$$

$$T_S = 0.144 \text{ Nm}$$

Untuk mendapatkan nilai torsi dinamis dari turbin diperlukan data nilai torsi statis dari turbin pada setiap *time step*. Pada kecepatan angin 7 m/s didapatkan nilai torsi statis dari turbin seperti dibawah ini:

Tabel 4. 4 Torsi Statis Turbin Pada Posisi 285°

Teta (Deg)	Torsi Statis (Nm)	Teta (Deg)	Torsi Statis (Nm)	Teta (Deg)	Torsi Statis (Nm)
15	0.294	135	0.755	255	0.106
30	0.547	150	0.57	270	0.02
45	0.721	165	0.639	285	0.144
60	0.678	180	0.92	300	0.266
75	0.757	195	1.23	315	0.426
90	0.998	210	1.319	330	0.853
105	1.108	225	1.043	345	1.573
120	0.99	240	0.527	360	2.277

Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai torsi dinamis dari turbin sebagai berikut:

$$T_D = \frac{18.771}{24}$$

$$T_D = 0.782 \text{ Nm}$$

4.2.7 Perhitungan Daya Aktual Turbin Studi Numerik

Persamaan untuk mendapatkan daya aktual turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$P_R = T_D \omega$$

Dimana: P_R = Daya Aktual Turbin (W)
 T_D = Torsi Dinamis (Nm)
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

Pada kecepatan angin 7 m/s, didapatkan nilai torsi dinamis sebesar 0.782 Nm dan nilai kecepatan putar turbin sebesar 38.91 rad/s. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai dari daya aktual turbin seperti dibawah ini:

$$P_R = 0.782 \times 38.91$$

$$P_R = 30.431 \text{ W}$$

4.2.8 Perhitungan Nilai *Coefficient of Power* (C_p) Turbin Studi Numerik

Persamaan untuk mendapatkan nilai C_p turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_R}{P_w} = \frac{T_D \omega}{\frac{1}{2} \rho A u^3}$$

Dimana: C_p = *Coefficient of Power*
 P_R = Daya Mekanik Turbin (W)
 P_w = Daya Kinetik Angin (W)
 T_D = Torsi Dinamis Turbin (Nm)
 ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)
 A = *Swept Area* Turbin (m^2)
 u = Kecepatan Angin (m/s)
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

Pada kecepatan angin 7 m/s, didapatkan nilai daya aktual turbin sebesar 30.421 W. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai C_p dari turbin sebagai berikut:

$$C_p = \frac{0.782 \times 38.91}{\frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.3024 \times 7^3}$$

$$C_p = \frac{30.431}{63.53}$$

$$C_p = 0.48$$

4.2.9 Perhitungan Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) Turbin Studi Numerik

Persamaan untuk mendapatkan nilai C_m turbin pada kecepatan angin 7 m/s adalah sebagai berikut:

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

Dimana: C_m = *Coefficient of Moment*
 C_p = *Coefficient of Power*
 λ = Tip Speed Ratio

Pada kecepatan angin 7 m/s, didapatkan nilai C_p dari turbin sebesar 0.48 dan nilai TSR sebesar 1.4. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai C_m dari turbin seperti dibawah ini:

$$C_m = \frac{0.48}{1.4}$$

$$C_m = 0.34$$

4.3 Contoh Perhitungan Studi Eksperimen

Contoh perhitungan yang akan dibahas menggunakan data hasil eksperimen pada pengambilan data ke-2. Contoh perhitungan yang akan dibahas adalah perhitungan nilai *tip speed ratio* (TSR), daya aktual turbin, nilai torsi, nilai *Coefficient of Power* (Cp), dan nilai *Coefficient of Moment* (Cm) dari turbin.

4.3.1 Perhitungan Tip Speed Ratio (TSR)

Persamaan untuk mendapatkan TSR turbin pada pengambilan data ke-2 adalah sebagai berikut:

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

Dimana: λ = Tip Speed Ratio
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)
 u = Kecepatan Angin (m/s)
 R = Jari-jari Turbin (m)

Pada pengambilan data ke-2, nilai kecepatan putar rata-rata turbin adalah sebesar 18.78 rad/s dan kecepatan angin rata-rata sebesar 4.87 m/s. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai kecepatan putar seperti dibawah ini:

$$\lambda = \frac{18.78 \times 0.252}{4.87}$$
$$\lambda = 0.97$$

4.3.2 Perhitungan Daya Aktual Turbin Studi Eksperimen

Persamaan untuk mendapatkan daya aktual turbin pada pengambilan data ke-2 adalah sebagai berikut:

$$P_R = V I$$

Dimana: P_R = Daya Aktual Turbin (W)
 V = Voltase Generator (V)
 I = Kuat Arus Generator (mA)

Pada pengambilan data ke-2, didapatkan nilai voltase rata-rata sebesar 1.53 V dan nilai kuat arus rata-rata sebesar 262.25 mA. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai dari daya aktual turbin seperti dibawah ini:

$$P_R = 1.53 \times 262.25$$
$$P_R = 401.63 \text{ mW}$$
$$P_R = 0.4 \text{ W}$$

4.3.3 Perhitungan Torsi Dinamis Turbin Studi Eksperimen

Persamaan untuk mendapatkan torsi turbin pada pengambilan data ke-2 adalah sebagai berikut:

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

Dimana: T = Torsi Turbin (W)
 P_R = Daya Aktual Turbin (W)
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

Pada pengambilan data ke-2, didapatkan nilai daya aktual rata-rata sebesar 0.4 W dan nilai kecepatan putar rata-rata turbin sebesar 18.78 rad/s. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai dari daya aktual turbin seperti dibawah ini:

$$T = \frac{0.4}{18.78}$$
$$T = 0.021 \text{ Nm}$$

4.3.4 Perhitungan Nilai Cp Turbin Studi Eksperimen

Persamaan untuk mendapatkan nilai Cp turbin pada pengambilan data ke-2 adalah

sebagai berikut:

$$Cp = \frac{P_R}{P_w} = \frac{T_D \omega}{\frac{1}{2} \rho A u^3}$$

Dimana: C_p = *Coefficient of Power*
 P_R = Daya Mekanik Turbin (W)
 P_w = Daya Kinetik Angin (W)
 T_D = Torsi Dinamis Turbin (Nm)
 ρ = Massa Jenis Udara (kg/m^3)
 A = *Swept Area* Turbin (m^2)
 u = Kecepatan Angin (m/s)
 ω = Kecepatan Putar Turbin (rad/s)

Pada pengambilan data ke-2, didapatkan nilai daya aktual rata-rata turbin sebesar 30.421 W dan kecepatan angin rata-rata sebesar 4.87 m/s. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai C_p dari turbin sebagai berikut:

$$Cp = \frac{0.4}{\frac{1}{2} \times 1.225 \times 0.3024 \times 4.87^3}$$

$$Cp = 0.019$$

4.3.5 Perhitungan Nilai C_m Turbin Studi Eksperimen

Persamaan untuk mendapatkan nilai C_m turbin pada pengambilan data ke-2 adalah sebagai berikut:

$$Cm = \frac{Cp}{\lambda}$$

Dimana: C_m = *Coefficient of Moment*
 C_p = *Coefficient of Power*
 λ = Tip Speed Ratio

Pada pengambilan data ke-2, didapatkan nilai C_p dari turbin sebesar 0.019 dan nilai TSR sebesar 0.97. Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai C_m dari turbin seperti dibawah ini:

$$Cm = \frac{0.019}{0.97}$$

$$Cm = 0.0196$$

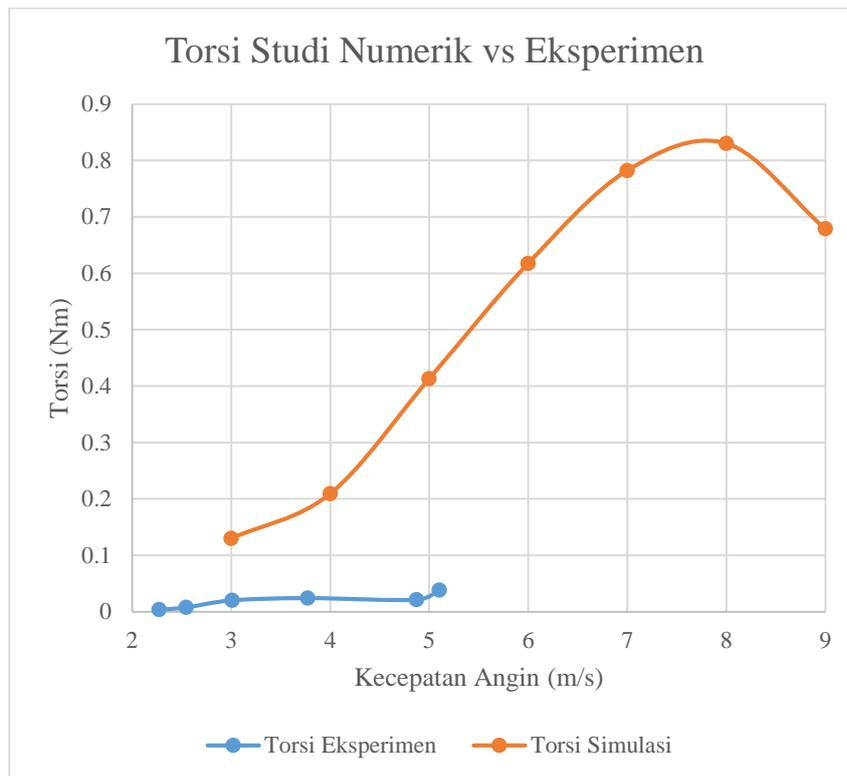
4.4 Analisa Performa Turbin Angin Savonius

Pada sub bab ini, analisa performa turbin dilakukan dengan metode studi numerik dan studi eksperimen, dimana pada studi numerik pengambilan data dilakukan setiap 15° turbin berputar dan dalam 1 putaran turbin dan pada studi eksperimen pengambilan data dilakukan pada pagi, siang, sore, dan malam hari dimana pada tiap jam dilakukan pengambilan sampel selama 15 menit. Pada studi eksperimen didapatkan nilai kecepatan angin rata-rata maksimum sebesar 5.1 m/s dan nilai rata-rata minimum sebesar 2.2 m/s. Data tersebut juga sesuai dengan kecepatan angin rata-rata yang ada di Surabaya dimana menurut Badan Pusat Statistik Surabaya (BPS, 2015) bahwa nilai kecepatan angin rata-rata di Surabaya adalah sebesar 3.6 m/s. Variasi yang akan dianalisa adalah variasi torsi turbin sebagai fungsi kecepatan angin, daya turbin sebagai fungsi kecepatan angin, nilai C_p turbin sebagai fungsi kecepatan angin, dan nilai C_m turbin sebagai fungsi kecepatan angin. Berikut penjelasan performa turbin pada setiap variasi.

4.4.1 Analisa Nilai Torsi sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius

Grafik pada gambar 4.1 menjelaskan nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen sebagai fungsi kecepatan angin. Torsi turbin

dari studi numerik diukur pada 7 variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan angin 3 hingga 9 m/s. Perhitungan torsi studi numerik dilakukan dengan merata-ratakan nilai torsi statis dari turbin selama 1 putaran turbin. Untuk torsi yang dihasilkan turbin pada studi eksperimen diukur pada 6 kali pengambilan data dimana didapatkan kecepatan angin rata-rata pada 6 kali percobaan tersebut adalah sebesar 2.27; 2.55; 3.01; 3.78; 4.87; dan 5.1 m/s. Perhitungan torsi dilakukan dengan membagi nilai daya aktual turbin rata-rata dengan kecepatan putar rata-rata turbin. Berikut nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen.



Gambar 4. 1 Grafik Torsi Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin

Pada gambar 4.1 diatas dapat dilihat nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi kecepatan angin. Dari gambar tersebut dapat dilihat nilai torsi dari studi numerik pada kecepatan angin 3 m/s, nilai torsi turbin sebesar 0.13 Nm. Pada kecepatan angin 4 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.21 Nm. Pada kecepatan angin 5 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.41 Nm. Pada kecepatan angin 6 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.62 Nm. Pada kecepatan angin 7 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.78 Nm. Pada kecepatan angin 8 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.83 Nm. Pada kecepatan angin 9 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.68 Nm. Dari grafik diatas dapat dilihat juga bahwa nilai torsi dari studi eksperimen pada kecepatan angin 2.27 m/s adalah sebesar 0.0037 Nm. Pada kecepatan angin 2.55 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.0078 Nm. Pada kecepatan angin 3.01 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.02 Nm. Pada kecepatan angin 3.78 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.024 Nm. Pada kecepatan angin 4.87 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.021 Nm. Pada kecepatan angin 5.1 m/s nilai torsi turbin sebesar 0.038 Nm.

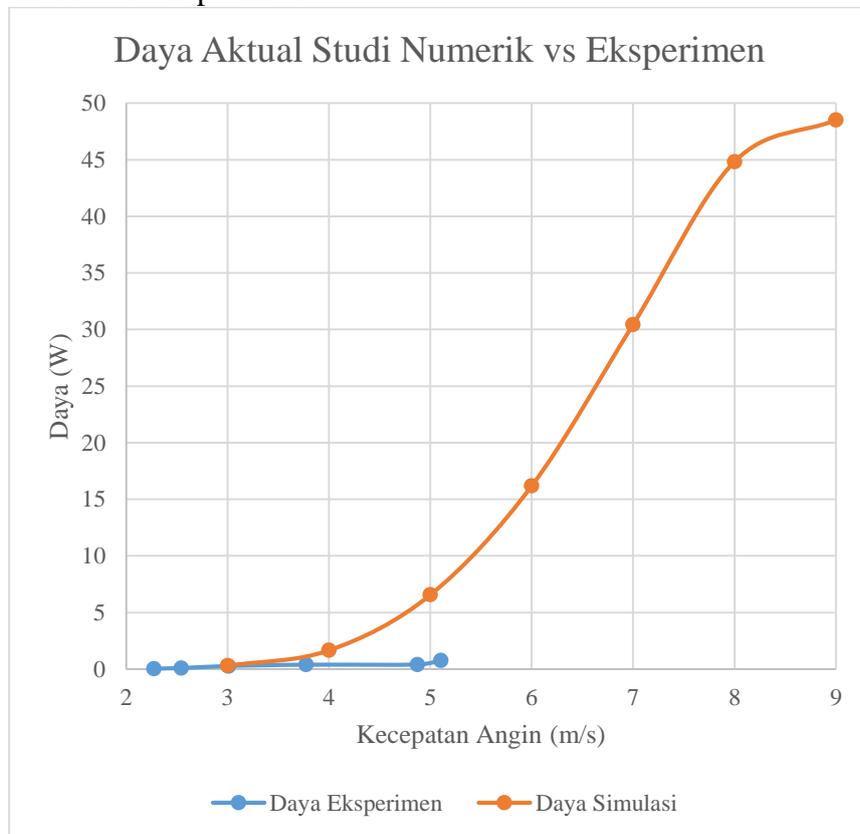
Nilai torsi maksimal dari turbin hasil studi numerik adalah sebesar 0.83 Nm pada kecepatan 8 m/s dan nilai torsi minimum dari turbin sebesar 0.13 Nm pada kecepatan 3 m/s, sedangkan untuk nilai torsi maksimal dari turbin hasil studi eksperimen adalah sebesar 0.038 Nm pada kecepatan 5.1 m/s dan nilai torsi minimum dari turbin sebesar 0.0037 Nm pada kecepatan 2.27 m/s. Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa *trendline* grafik cenderung meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin hingga titik optimalnya, namun pada suatu

titik, *trendline* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan kemampuan turbin angin Savonius pada kecepatan angin tinggi kurang baik.

Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa nilai rata-rata torsi hasil eksperimen hanya sebesar 3.69% dari torsi rata-rata hasil studi numerik, hal tersebut dikarenakan adanya hambatan yang berupa getaran pada turbin, sehingga energi yang diserap oleh turbin tidak sepenuhnya ditransmisikan ke *shaft* turbin. Selain getaran, gesekan pada *bearing* juga menghambat kinerja dari turbin. Terdapat perbedaan kondisi aliran angin juga pada studi numerik dan eksperimen dimana pada studi numerik arah aliran angin hanya berasal dari satu arah yaitu dari arah inlet pada domain simulasi, sedangkan pada studi eksperimen arah aliran angin tidak hanya dari satu arah, melainkan berubah-ubah dari segala arah mengikuti kondisi aliran angin pada alam. Terdapat juga perbedaan densitas udara antara studi numerik dan eksperimen dimana pada studi numerik digunakan densitas udara standar dan pada studi eksperimen densitas udara berubah-ubah berdasarkan temperatur udara. Oleh karena itu nilai torsi hasil studi eksperimen lebih rendah dibandingkan dengan nilai torsi hasil studi numerik.

4.4.2 Analisa Nilai Daya sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius

Grafik pada gambar 4.2 menjelaskan nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen sebagai fungsi kecepatan angin. Daya yang dihasilkan turbin dari studi numerik diukur pada 7 variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan angin 3 hingga 9 m/s. Perhitungan daya studi numerik dilakukan dengan mengalikan nilai torsi turbin dengan kecepatan putarnya. Untuk daya yang dihasilkan turbin pada studi eksperimen diukur pada 6 kali pengambilan data dimana didapatkan kecepatan angin rata-rata pada 6 kali percobaan tersebut adalah sebesar 2.27; 2.55; 3.01; 3.78; 4.87; dan 5.1 m/s. Perhitungan daya dilakukan dengan mengalikan nilai voltase rata-rata *generator* dengan kuat arus listrik rata-rata *generator*. Berikut nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen.



Gambar 4. 2 Grafik Daya Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin

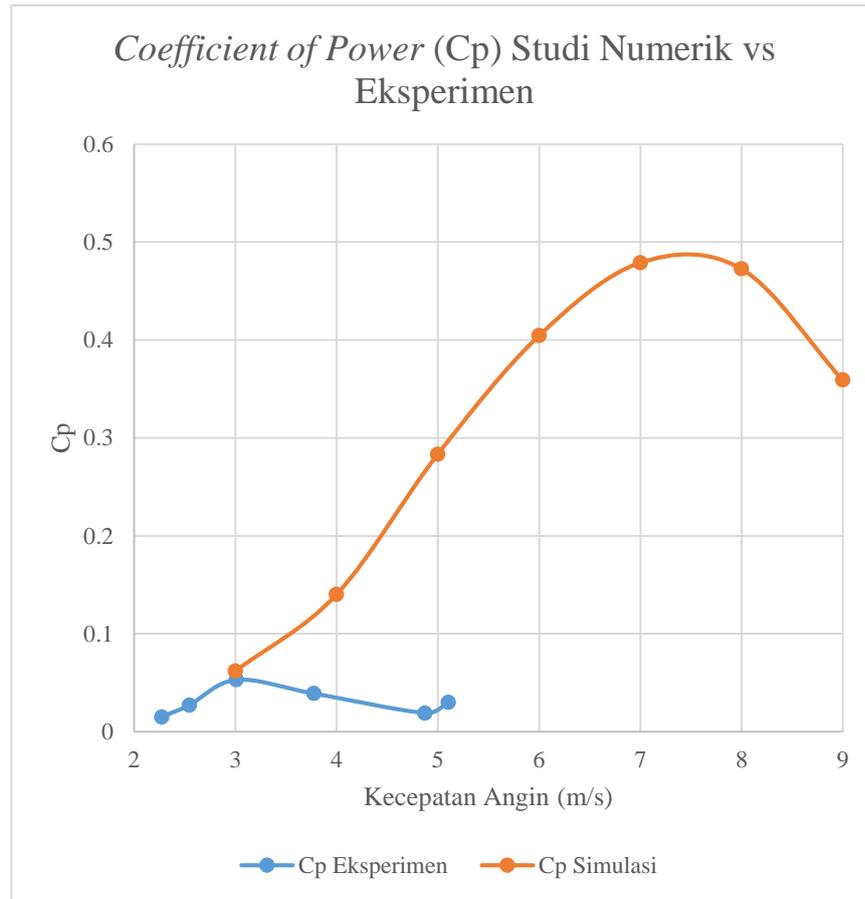
Pada gambar 4.2 diatas dapat dilihat nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi kecepatan angin. Dari gambar tersebut dapat dilihat nilai daya yang dihasilkan oleh turbin dari studi numerik pada kecepatan angin 3 m/s adalah sebesar 0.31 W. Pada kecepatan angin 4 m/s nilai daya turbin sebesar 1.66 W. Pada kecepatan angin 5 m/s nilai daya turbin sebesar 6.56 W. Pada kecepatan angin 6 m/s nilai daya turbin sebesar 16.18 W. Pada kecepatan angin 7 m/s nilai daya turbin sebesar 30.43 W. Pada kecepatan angin 8 m/s nilai daya turbin sebesar 44.83 W. Pada kecepatan angin 9 m/s nilai daya turbin sebesar 48.5 W. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga nilai daya yang dihasilkan oleh turbin dari studi eksperimen pada kecepatan angin 2.27 m/s adalah sebesar 0.032 W. Pada kecepatan angin 2.55 m/s nilai daya turbin sebesar 0.084 W. Pada kecepatan angin 3.01 m/s nilai daya turbin sebesar 0.267 W. Pada kecepatan angin 3.78 m/s nilai daya turbin sebesar 0.385 W. Pada kecepatan angin 4.87 m/s nilai daya turbin sebesar 0.4 W. Pada kecepatan angin 5.1 m/s nilai daya turbin sebesar 0.75 W.

Nilai daya maksimal dari turbin hasil studi numerik adalah sebesar 48.5 W pada kecepatan 9 m/s dan nilai daya minimum dari turbin sebesar 0.31 W pada kecepatan 3 m/s, sedangkan untuk nilai daya maksimal dari turbin hasil studi eksperimen adalah sebesar 0.75 W pada kecepatan 5.1 m/s dan nilai daya minimum dari turbin sebesar 0.032 W pada kecepatan 2.27 m/s. Dari grafik dapat dilihat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, nilai daya yang dihasilkan akan meningkat juga, dimana berdasarkan teori, daya yang dihasilkan oleh turbin berbanding lurus dengan kecepatan angin, sehingga semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar juga daya yang akan dihasilkan.

Dapat dilihat pada gambar 4.2 bahwa nilai daya rata-rata hasil eksperimen hanya sebesar 1.51% dari nilai daya rata-rata hasil studi numerik, hal tersebut dikarenakan adanya gesekan yang terjadi pada *bearing* turbin yang menyebabkan banyak energi yang terbuang. Selain itu, getaran yang terjadi pada turbin juga menyebabkan banyak *losses*. Terdapat juga perbedaan kondisi pengukuran antara studi numerik dan eksperimen dimana arah angin pada studi eksperimen berubah-ubah mengikuti kondisi alam, terjadinya perbedaan densitas udara antara studi numerik dan eskperimen, dan juga terjadinya fluktuasi kecepatan angin pada studi eksperimen yang membuat putaran turbin menjadi tidak stabil, sehingga daya yang dapat dihasilkan pada studi numerik tidak sebesar daya yang dihasilkan studi numerik. Selain terjadi perbedaan kondisi pengukuran antara studi numerik dan eksperimen, kesalahan dalam pengukuran data pada studi eksperimen yang disebabkan ketidaktelitian alat dan *human error* juga membuat hasil dari studi eksperimen lebih kecil daripada hasil dari studi numerik. Oleh karena itu nilai daya yang dihasilkan turbin hasil studi eksperimen lebih rendah jika dibandingkan hasil studi numerik.

4.4.3 Analisa Nilai *Coefficient of Power* (Cp) sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius

Grafik pada gambar 4.3 menjelaskan nilai Cp yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen sebagai fungsi kecepatan angin. Nilai Cp yang dihasilkan oleh turbin dari studi numerik diukur pada 7 variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan angin 3 hingga 9 m/s. Untuk nilai Cp yang dihasilkan oleh turbin dari studi eksperimen diukur pada 6 kali pengambilan data dimana didapatkan kecepatan angin rata-rata pada 6 kali percobaan tersebut adalah sebesar 2.27; 2.55; 3.01; 3.78; 4.87; dan 5.1 m/s. Perhitungan Cp dilakukan dengan membandingkan nilai daya aktual yang dihasilkan turbin dengan nilai daya teoritis turbin. Dimana nilai daya teoritis dari turbin didapatkan dengan menggunakan rumus ($P = \frac{1}{2} \rho A v^3$). Berikut nilai Cp yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen.



Gambar 4. 3 Grafik *Coefficient of Power (Cp)* Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin

Pada gambar 4.3 diatas dapat dilihat nilai C_p yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi kecepatan angin. Dari gambar tersebut dapat dilihat nilai C_p yang dihasilkan oleh turbin pada kecepatan angin 3 m/s adalah sebesar 0.06. Pada kecepatan angin 4 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.14. Pada kecepatan angin 5 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.28. Pada kecepatan angin 6 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.4. Pada kecepatan angin 7 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.48. Pada kecepatan angin 8 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.47. Pada kecepatan angin 9 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.36. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga nilai C_p yang dihasilkan oleh turbin dari studi eksperimen pada kecepatan angin 2.27 m/s adalah sebesar 0.015. Pada kecepatan angin 2.55 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.027. Pada kecepatan angin 3.01 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.053. Pada kecepatan angin 3.78 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.039. Pada kecepatan angin 4.87 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.019. Pada kecepatan angin 5.1 m/s nilai C_p turbin sebesar 0.03.

Nilai C_p maksimal dari turbin hasil studi numerik adalah sebesar 0.48 pada kecepatan 7 m/s dan nilai C_p minimum dari turbin sebesar 0.06 pada kecepatan 3 m/s, sedangkan untuk nilai C_p maksimal dari turbin hasil studi eksperimen adalah sebesar 0.053 pada kecepatan 3.01 m/s dan nilai C_p minimum dari turbin sebesar 0.015 pada kecepatan 2.27 m/s. Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa *trendline* grafik cenderung meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin hingga titik optimalnya, namun pada suatu titik, *trendline* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan kemampuan turbin angin Savonius pada kecepatan angin tinggi kurang baik.

Dari gambar 4.3 juga dapat dilihat bahwa nilai rata-rata C_p hasil eksperimen hanya sebesar 9.7% dari nilai C_p rata-rata hasil studi numerik, hal tersebut juga disebabkan oleh hal yang sama yang menyebabkan daya yang dihasilkan oleh turbin hasil studi eksperimen lebih

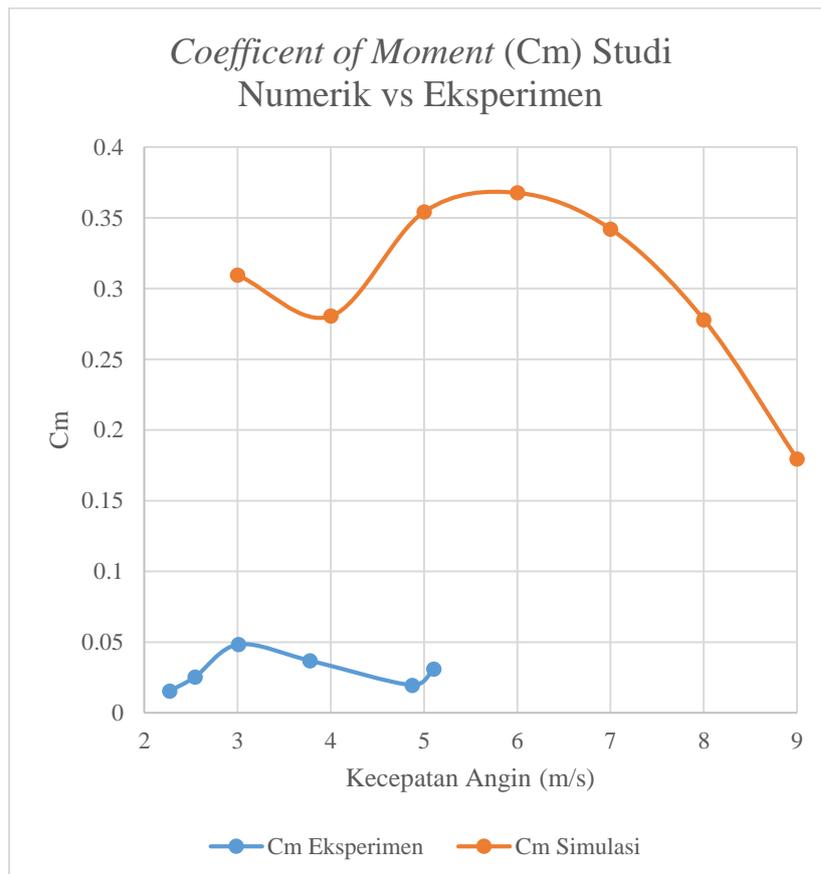
rendah dibandingkan dengan hasil dari studi numerik, yaitu adanya gesekan pada *bearing*, adanya getaran pada turbin, perbedaan kondisi aliran angin antara studi numerik dan eksperimen, perbedaan densitas udara antara studi numerik dan eksperimen, fluktuasi kecepatan angin pada studi eksperimen, dan kesalahan dalam pengukuran data studi eksperimen, sehingga terdapat perbedaan nilai *Coefficient of Power* (C_p) yang besar antara studi numerik dan eksperimen.

4.4.4 Analisa Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) sebagai Fungsi Kecepatan Angin pada Turbin Angin Savonius

Grafik pada gambar 4.4 menjelaskan nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen sebagai fungsi kecepatan angin. Nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin dari studi numerik diukur pada 7 variasi kecepatan angin, yaitu kecepatan angin 3 hingga 9 m/s. Untuk nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin dari studi eksperimen diukur pada 6 kali pengambilan data dimana didapatkan kecepatan angin rata-rata pada 6 kali percobaan tersebut adalah sebesar 2.27; 2.55; 3.01; 3.78; 4.87; dan 5.1 m/s. Perhitungan C_m dilakukan dengan membagi nilai C_p dengan TSR. Perhitungan tersebut menggunakan rumus seperti berikut:

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

Berikut nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius hasil studi numerik dan eksperimen.



Gambar 4. 4 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) Turbin Angin Savonius Terhadap Kecepatan Angin

Pada gambar 4.4 diatas dapat dilihat nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius sebagai fungsi kecepatan angin. Dari gambar tersebut dapat dilihat nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin pada kecepatan angin 3 m/s adalah sebesar 0.31. Pada kecepatan angin

4 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.28. Pada kecepatan angin 5 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.35. Pada kecepatan angin 6 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.37. Pada kecepatan angin 7 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.34. Pada kecepatan angin 8 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.28. Pada kecepatan angin 9 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.18. Dari gambar tersebut dapat dilihat juga nilai C_m yang dihasilkan oleh turbin pada kecepatan angin 2.27 m/s adalah sebesar 0.015. Pada kecepatan angin 2.55 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.025. Pada kecepatan angin 3.01 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.048. Pada kecepatan angin 3.78 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.037. Pada kecepatan angin 4.87 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.019. Pada kecepatan angin 5.01 m/s nilai C_m turbin sebesar 0.031.

Nilai C_m maksimal dari turbin hasil studi numerik adalah sebesar 0.37 pada kecepatan 6 m/s dan nilai C_m minimum dari turbin sebesar 0.18 pada kecepatan 9 m/s, sedangkan untuk nilai C_m maksimal dari turbin hasil studi eksperimen adalah sebesar 0.048 pada kecepatan 3.01 m/s dan nilai C_m minimum dari turbin sebesar 0.015 pada kecepatan 2.27 m/s. Berdasarkan grafik diatas dapat dilihat bahwa *trendline* grafik cenderung meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin hingga titik optimalnya, namun pada suatu titik, *trendline* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan kemampuan turbin angin Savonius pada kecepatan angin tinggi kurang baik.

Dari gambar 4.4 juga dapat dilihat bahwa nilai rata-rata C_m hasil eksperimen hanya sebesar 9.75% dari nilai C_m rata-rata hasil studi numerik, hal tersebut juga disebabkan oleh hal yang sama yang menyebabkan C_p yang dihasilkan oleh turbin hasil studi eksperimen lebih rendah dibandingkan dengan hasil dari studi numerik, yaitu adanya gesekan pada *bearing*, adanya getaran pada turbin, perbedaan kondisi aliran angin antara studi numerik dan eksperimen, perbedaan densitas udara antara studi numerik dan eksperimen, fluktuasi kecepatan angin pada studi eksperimen, dan kesalahan dalam pengukuran data studi eksperimen. Selain itu, *misalignment* pada pemasangan shaft turbin terhadap *generator* juga menyebabkan hambatan pada turbin yang menurunkan efisiensi dari turbin.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan analisa data yang telah dilakukan mengenai analisis kinerja aerodinamik turbin angin Savonius dengan metode CFD dan studi eksperimental, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar kecepatan angin, semakin besar juga nilai daya yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius, namun nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius tidak selalu meningkat dengan semakin besarnya kecepatan angin yang melewati turbin. Nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin akan meningkat pada kecepatan awal, namun pada suatu titik, nilai torsi yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius akan menurun ketika melebihi titik optimalnya.
2. Nilai daya maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi numerik berturut-turut adalah sebesar 48.5 watt dan 0.31 watt. Untuk nilai daya maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi eksperimen berturut-turut adalah sebesar 0.75 watt dan 0.032 watt.
3. Nilai torsi maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi numerik berturut-turut adalah sebesar 0.83 Nm dan 0.13 Nm. Untuk nilai torsi maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi eksperimen berturut-turut adalah sebesar 0.038 Nm dan 0.003 Nm.
4. Nilai *Coefficient of Power* (C_p) maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi numerik berturut-turut adalah sebesar 0.48 dan 0.06. Untuk nilai *Coefficient of Power* (C_p) maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi eksperimen berturut-turut adalah sebesar 0.053 dan 0.015.
5. Nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi numerik berturut-turut adalah sebesar 0.37 dan 0.18. Untuk nilai *Coefficient of Moment* (C_m) maksimum dan minimum yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dari studi eksperimen berturut-turut adalah sebesar 0.048 dan 0.015.
6. Performa turbin angin Savonius hasil studi eksperimen lebih kecil dibandingkan dengan performa turbin hasil studi numerik. Perbedaan performa turbin ini disebabkan karena adanya perbedaan kondisi angin antara studi numerik dan eksperimen, gesekan pada *bearing*, *misalignment* pada *shaft* turbin, getaran dari turbin, dan kurang akuratnya pengukuran data pada studi eksperimen. Faktor-faktor tersebut merupakan penyebab terjadinya perbedaan performa turbin angin Savonius antara studi numerik dan eksperimen.

5.2 Saran

Adapun saran mengenai penelitian yang telah dilakukan agar penelitian kedepannya menjadi lebih baik adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan studi literatur lebih lanjut untuk proses CFD agar *meshing* dan *setup* studi numerik lebih bagus dan mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Studi numerik perlu dilakukan dalam waktu atau *time step* yang lebih lama agar turbin mencapai kondisi *steady*.
3. Diperlukan alat yang lebih sesuai untuk manufaktur turbin agar hasil manufaktur turbin dapat lebih rapih dan akurat.

4. Dibutuhkan alat ukur untuk lab agar melakukan pengukuran dapat lebih mudah dan cepat tanpa menunggu orang lain yang masih menggunakan alat ukurnya.
5. Metode pengukuran pada studi eksperimen perlu diperbaiki lagi agar hasil pengukuran lebih akurat dan *valid*.
6. Diperlukan sarana yang lebih sesuai agar pengukuran dapat lebih aman.
7. Diperlukan peralatan pendukung agar pengukuran kecepatan angin dapat lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS. (2015, February 10). *Arah Terbanyak, Kecepatan Rata-rata dan Kecepatan Maksimum Angin di Perak 1 Per Bulan*. Retrieved from Badan Pusat Statistik Surabaya: <https://surabayakota.bps.go.id/statictable/2015/02/10/27/arrah-terbanyak-kecepatan-rata-rata-dan-kecepatan-maksimum-angin-di-perak-i-per-bulan.html>
- Dwiyantoro, B. A. (2015). *Studi Eksperimental tentang Karakteristik Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus-Savonius*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
- Fridayana, E. N. (2018). *2.1.4 Analisis Kinerja Aerodinamik Dari Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Darrieus Tipe H-Rotor Dengan Pendekatan Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan FTK-ITS.
- GlobalCarbonProject. (2021). *Global Carbon Project CO2 Emissions*. Retrieved from Global Carbon Project: https://www.globalcarbonproject.org/global/images/carbonbudget/Infographic_Emissions2021.pdf
- KementrianESDM. (2015). *Pembangunan Sektor Energi, Bekal Awal Kekuatan Mendunia*. Retrieved from Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral: <http://www.esdm.go.id/berita/listrik/39-listrik/7461-menteri-esdm--sekitar-60-dana-program-35000-mw-sudah-tersedia.html>
- Nafi'ah, L. '. (2018). *Studi Eksperimen Pengaruh Silinder Pengganggu Terhadap Performa Turbin Angin Savonius "Studi Kasus $d/D = 0,5$; Jarak $S/D = 1,4$; Reynolds Number = $9,7 \times 10^4$; $14,5 \times 10^4$; $17,8 \times 10^4$; dengan $y/D = 0,0$; $0,25$; $0,5$ "*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
- 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
- Prakoso, R. W. (2016). *STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGANGGU DI DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS "Studi kasus untuk Rasio Panjang Plat Pengganggu Relatif Terhadap Diameter Sudu Turbin (L/D) = 1,1547 "*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
- R. Gupta, A. B. (2008). Comparative study of a three-bucket Savonius rotor with a combined three-bucket Savonius and three-bladed Darrieus rotor. *Renewable Energy for Developing Countries* (pp. 1974-1981). Assam: Department. of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Silchar.
- R. Gupta, R. D. (2006). EXPERIMENTAL STUDY OF A SAVONIUS- DARRIEUS WIND MACHINE . *Renewable Energy for Developing Countries*. Assam: Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Silchar.
- Reve. (2014). *Wind power in 2013*. Retrieved from Reve: <https://www.evwind.es/2014/06/05/wind-power-in-2013/45734>

- Setyawan, R. E. (2018). *2.1.5 Analisis dan Pemodelan Savonius Vertical Axis Wind Turbine Dengan Variasi Blade Terhadap Aliran Udara Dengan Metode CFD (Computational fluid Dynamic)*. Surabaya: Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
- Sukanta Roy, A. D. (2016). Unsteady Analysis on The Instantaneous Forces and Moment Arms Acting on a Novel Savonius-style Wind Turbine. *Elsevier*, 281-296.
- Teja, D. P. (2017). *Studi Numerik Turbin Angin Darrieus – Savonius Dengan Penambahan Stage Rotor Darrieus*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.

LAMPIRAN

A. Data Hasil Studi Numerik

Tabel A. 1 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 3 m/s

Time Step	Teta (deg)	Kecepatan 3 m/s												Torsi Total (Nm)
		Teta (rad)	Fx Blade 1 (N)	Fy Blade 1 (N)	Fz Blade 1 (N)	Fx Blade 2 (N)	Fy Blade 2 (N)	Fz Blade 2 (N)	Radius (m)	Torsi Blade 1 (Nf)	Torsi Blade 2 (Nf)	Torsi Total (Nm)		
1	15	0.261799388	-1.254164772	-1.540105094	0.390696616	0.83690338	0.252	0.252	-0.282407121	0.320297231	0.037890109	0.037890109		
2	30	0.523598776	-0.55987084	-1.174141008	0.859818827	0.840758824	0.252	0.252	-0.013804498	0.150307084	0.136502587	0.136502587		
3	45	0.785398163	-0.155708172	-0.741918244	0.667257146	0.472527715	0.252	0.252	0.091153377	0.048002944	0.139156321	0.139156321		
4	60	1.047197551	-0.048168305	-0.442460046	-0.059795969	-0.291734933	0.252	0.252	-0.019189983	0.119417731	0.100298748	0.100298748		
5	75	1.308996339	-0.198218884	-0.437209218	-0.654621972	-1.087492827	0.252	0.252	-0.172272011	0.293226061	0.12095405	0.12095405		
6	90	1.570796327	-0.408338717	-0.651078865	-0.639757157	-1.636927286	0.252	0.252	-0.161218804	0.412505677	0.251286873	0.251286873		
7	105	1.832595715	-0.543800386	-0.805017623	0.009775835	-1.696894306	0.252	0.252	0.037847534	0.360541477	0.398389011	0.398389011		
8	120	2.094395102	-0.632156138	-0.942685601	0.372292048	-1.564440745	0.252	0.252	0.160900095	0.222642663	0.383542758	0.383542758		
9	135	2.35619449	-0.738707905	-1.362801119	0.579806281	-1.267587578	0.252	0.252	0.234947241	-0.016366186	0.217981055	0.217981055		
10	150	2.617993878	-0.798261042	-1.680160666	0.898787707	-0.77014385	0.252	0.252	0.262258465	-0.269637452	-0.007378987	-0.007378987		
11	165	2.879793266	-0.799619599	-1.555261231	0.715445608	-0.270244852	0.252	0.252	0.241301131	-0.360945263	-0.119644132	-0.119644132		
12	180	3.141592654	-0.838209556	-1.218028915	0.63576434	0.157489381	0.252	0.252	0.211228808	-0.306943287	-0.095714479	-0.095714479		
13	195	3.403392041	-0.813865926	-0.825030907	0.517335932	0.41793001	0.252	0.252	0.164363907	-0.173565105	-0.009201198	-0.009201198		
14	210	3.665191429	-0.670885604	-0.418590295	-0.317979171	0.406496192	0.252	0.252	0.106347626	-0.040133957	0.066213669	0.066213669		
15	225	3.926990817	-0.478741532	-0.110599395	-0.050499347	0.092971893	0.252	0.252	0.094305913	-0.003141061	0.091164852	0.091164852		
16	240	4.188790205	-0.364140789	-0.033537886	-0.568185897	-0.369536499	0.252	0.252	0.169881721	-0.085099628	0.084782093	0.084782093		
17	255	4.450589593	-0.397788233	-0.186731708	-1.10094172	-0.586553506	0.252	0.252	0.293929569	-0.154954019	0.13897455	0.13897455		
18	270	4.71238898	-0.560946835	-0.385625501	-1.463863065	-0.280335074	0.252	0.252	0.368895004	-0.070644439	0.298250566	0.298250566		
19	285	4.974188368	-0.718816245	-0.527451101	-1.511017534	0.271200941	0.252	0.252	0.320918867	0.100415544	0.421334401	0.421334401		
20	300	5.235987756	-0.879846305	-0.623789021	-1.416996354	0.489698994	0.252	0.252	0.198164147	0.18546853	0.383632677	0.383632677		
21	315	5.497787144	-1.339330684	-0.741328997	-1.136863172	0.632925824	0.252	0.252	-0.036077866	0.244879715	0.208801849	0.208801849		
22	330	5.759586532	-1.566747586	-0.818444559	-0.640782397	0.72462314	0.252	0.252	-0.261185831	0.263918548	0.008732717	0.008732717		
23	345	6.021385919	-1.404562041	-0.840546824	-0.159570353	0.730403543	0.252	0.252	-0.331481532	0.252236955	-0.079242576	-0.079242576		
24	360	6.283185307	-1.092208483	-0.862665868	0.250136997	0.647308729	0.252	0.252	-0.275236538	0.217389985	-0.057946553	-0.057946553		
	w (rpm)		22.74795									Torsi Avg	0.12995254	
	w (rad/s)		2.382159751									Daya Aktual (W)	0.30956771	
	v udara (m/s)		3									Daya Teoritis	5.00094	
	rho udara (kg/m ³)		1.225									Cp	0.061801905	
	Jari2 Turbin (m)		0.252									Cm	0.309509523	
	Tinggi Turbin (m)		0.6											
	Swept Area Turbin (m ²)		0.3024											
	TSR		0.2											

Tabel A. 2 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 4 m/s

Kecepatan 4 m/s													
Time Step	Teta (deg)	Teta (rad)	Fx Blade 1 (N)	Fy Blade 1 (N)	Fz Blade 1 (N)	Fx Blade 2 (N)	Fy Blade 2 (N)	Fz Blade 2 (N)	Radius (m)	Torsi Blade 1 (Nm)	Torsi Blade 2 (Nm)	Torsi Total (Nm)	
1	15	0.261793388	-2.435128638	-1.749210717	-2.508674299	-1.749210717	0.620566239	0.620566239	0.252	-0.706830438	0.570169762	-0.136660676	
2	30	0.523586776	-1.518380664	-2.257569337	-0.407147847	0.609013273	0.609013273	0.609013273	0.252	-0.382663953	0.41636266	0.033283067	
3	45	0.785380163	-0.728155058	-1.880628683	0.127164418	0.392744138	0.392744138	0.392744138	0.252	-0.107091068	0.265127501	0.158036433	
4	60	1.047197551	-0.194127108	-1.406336505	-0.198041303	-0.0443239522	-0.0443239522	-0.0443239522	0.252	0.018760202	0.186872805	0.205633007	
5	75	1.308996939	-0.057402857	-0.994130251	-0.043418957	-0.759850907	-0.759850907	-0.759850907	0.252	-0.014312947	0.249797384	0.235484437	
6	90	1.570796327	-0.390853072	-0.866277784	-0.342641883	-1.703767018	-1.703767018	-1.703767018	0.252	-0.086345754	0.429349289	0.343003535	
7	105	1.832595715	-0.973896135	-1.162149818	-0.406574016	-2.578332069	-2.578332069	-2.578332069	0.252	-0.035445684	0.551802141	0.516356457	
8	120	2.094395102	-1.496689115	-1.712570935	-0.145332382	-2.942222613	-2.942222613	-2.942222613	0.252	0.166865722	0.426322793	0.583188515	
9	135	2.356194449	-1.905980607	-2.160138738	0.214915967	-2.86917881	-2.86917881	-2.86917881	0.252	0.377924498	0.126344498	0.504268986	
10	150	2.617993878	-2.189906069	-2.527202832	0.55694255	-2.57482891	-2.57482891	-2.57482891	0.252	0.548096362	-0.22752586	0.320570502	
11	165	2.879793266	-2.231964731	-2.912779597	0.93595726	-1.883306621	-1.883306621	-1.883306621	0.252	0.604335237	-0.586136405	0.018198892	
12	180	3.141592654	-2.060718516	-2.36421216	1.144500064	-0.904689614	-0.904689614	-0.904689614	0.252	0.519301066	-0.746981226	-0.22768016	
13	195	3.403392041	-1.857914029	-2.453602632	0.999956004	-0.053537287	-0.053537287	-0.053537287	0.252	0.38702147	-0.600731865	-0.213709894	
14	210	3.665191429	-1.648025834	-1.68484981	0.615695106	0.373025841	0.373025841	0.373025841	0.252	0.282084941	-0.320697675	-0.038612734	
15	225	3.926990817	-1.370330577	-0.996389873	0.065530872	0.369480022	0.369480022	0.369480022	0.252	0.232503445	-0.111709637	0.120793808	
16	240	4.188790205	-1.067320469	-0.563339313	-0.653903354	0.049918455	0.049918455	0.049918455	0.252	0.277189202	-0.060115333	0.217073869	
17	255	4.450589593	-0.873956717	-0.475748212	-1.495960694	-0.434134217	-0.434134217	-0.434134217	0.252	0.421138295	-0.136703486	0.284434809	
18	270	4.71238898	-0.33498383	-0.709106685	-2.344252186	-0.810844724	-0.810844724	-0.810844724	0.252	0.590751551	-0.204332871	0.38641868	
19	285	4.974188368	-1.28566379	-1.06928075	-0.853605966	-0.853605966	-0.853605966	-0.853605966	0.252	0.632402116	-0.135582548	0.496819567	
20	300	5.235987756	-1.71136995	-1.470287767	-3.049731995	-4.486533011	-4.486533011	-4.486533011	0.252	0.449936023	0.07907607	0.529012093	
21	315	5.497787144	-1.968130181	-1.709586886	-2.848043163	0.140343468	0.140343468	0.140343468	0.252	0.166792494	0.32964077	0.486433264	
22	330	5.759586532	-2.226388248	-1.873565331	-2.513383724	0.676432813	0.676432813	0.676432813	0.252	-0.169121484	0.494114412	0.324992949	
23	345	6.021385919	-2.607904637	-2.006640387	-1.829528891	1.000692709	1.000692709	1.000692709	0.252	-0.516472431	0.553710555	0.038238124	
24	360	6.283185307	-2.637709219	-2.003334917	-0.30766107	1.153464243	1.153464243	1.153464243	0.252	-0.664702723	0.5048404	-0.159862323	
Torsi Avg													
0.2094048													
w (rpm)	75.82651												
w (rad/s)	7.94053355												
v udara (m/s)	4												
rho udara (kg/m ³)	1.225												
Jari2 Turbin (m)	0.252												
Tinggi Turbin (m)	0.6												
Swept Area Turbin (m ²)	0.3024												
TSR	0.5												
Daya Aktual (W)	1662785842												
Daya Teoritis	1185408												
Cp	0.14027184												
Cm	0.280542359												

Tabel A. 4 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 6 m/s

Kecepatan 6 m/s													
Time Step	Teta (deg)	Teta (rad)	Fx Blade 1 [N]	Fx Blade 2 [N]	Fz Blade 1 [N]	Fz Blade 2 [N]	Radius (m)	Torsi Blade 1 [N]	Torsi Blade 2 [N]	Torsi Total [Nm]	Torsi Total [Nm]	Torsi Total [Nm]	
1	15	0.261793388	-2.267704193	-3.878836327	-9.213747644	-2.923030405	0.252	-1.152932095	1.134807583	-0.018124512			
2	30	0.523588776	-0.166883496	-2.896744047	-7.598671106	-4.526887759	0.252	-0.993852947	1.202443906	0.208590996			
3	45	0.785398163	0.314523215	-3.009278095	-7.557850624	-6.338622867	0.252	-1.2930634025	1.665710966	0.375016341			
4	60	1.047197551	-0.733227373	-3.853565829	-7.842373527	-8.009784593	0.252	-1.803933714	2.208391882	0.404438168			
5	75	1.308996339	-2.489228387	-4.567270624	-7.705256615	-9.35226639	0.252	-2.037915451	2.574354538	0.536433146			
6	90	1.570796327	-4.188630819	-5.661203331	-7.183442756	-10.22579506	0.252	-1.810227575	2.57690036	0.766672785			
7	105	1.832595715	-5.757444713	-6.920236672	-6.162613251	-10.39416525	0.252	-1.12454772	2.078723719	0.954175939			
8	120	2.094395102	-7.076183222	-8.072677955	-4.515217204	-9.513214	0.252	-0.0937947	1.058991207	0.965196507			
9	135	2.35619449	-7.934071988	-8.602881536	-2.427515949	-7.629160556	0.252	0.981218225	-0.173508216	0.807710009			
10	150	2.617993878	-8.27889104	-8.255348227	-0.341557056	-5.373302693	0.252	1.763735555	-1.124597855	0.6391377			
11	165	2.879793266	-8.225071785	-7.303895656	1.290128368	-3.289853444	0.252	2.086237201	-1.563283528	0.522953673			
12	180	3.141592654	-7.864010004	-5.954166513	2.196448429	-1.559165062	0.252	1.981730521	-1.50044936	0.481260561			
13	195	3.403392041	-7.203550323	-4.235766748	2.318995903	-0.432063087	0.252	1.602189538	-1.059222189	0.542967349			
14	210	3.665191429	-6.324220796	-2.415146304	1.670096367	-0.121587654	0.252	1.169755697	-0.542397715	0.627357982			
15	225	3.926990817	-5.365929132	-0.939297343	0.375483458	-0.567259965	0.252	0.89925205	-0.268454816	0.620797234			
16	240	4.188790205	-4.520738236	-0.226390942	-1.42147151	-1.493539162	0.252	0.879832688	-0.354870056	0.524962632			
17	255	4.450589593	-4.06146134	-0.494026723	-3.460892566	-2.480665047	0.252	1.107325562	-0.636048494	0.471277069			
18	270	4.71238898	-4.195288577	-1.599084709	-5.299462808	-3.090440505	0.252	1.335464628	-0.778791009	0.556673619			
19	285	4.974188368	-4.887793427	-3.161552917	-6.399231568	-3.108006356	0.252	1.238864511	-0.550326046	0.688538466			
20	300	5.235987756	-5.701253242	-4.747256667	-6.268606341	-2.514950642	0.252	0.64969272	0.049295527	0.698988247			
21	315	5.497787144	-5.966650724	-6.063833873	-4.964155735	-1.510072411	0.252	-0.179635493	0.812508034	0.633872541			
22	330	5.759586532	-5.351187888	-6.978412505	-3.170726721	-0.244044442	0.252	-0.768323125	1.492207989	0.723884864			
23	345	6.021385919	-4.109372191	-7.341638098	-1.522617512	1.050837286	0.252	-0.900967112	1.85560515	0.954638038			
24	360	6.283185307	-2.577372514	-7.077664522	-0.279779637	1.952854303	0.252	-0.649497873	1.783571461	1.134073588			
											Torsi Avg		0.617565815
											Data Aktual [w]		16.18254795
											Data Teoritis		40.00752
											Cp		0.404487855
											Cm		0.36771605
											TSR		1.1
											w (rpm)		250.2275
											w (rad/s)		26.20376249
											v udara (m/s)		6
											rho udara (kg/m ³)		1.225
											Jari2 Turbin (m)		0.252
											Tinggi Turbin (m)		0.6
											Swept Area Turbin (m ²)		0.3024

Tabel A. 5 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 7 m/s

Kecepatan 7 m/s													
Time Step	Teta (deg)	Teta (rad)	Fx Blade 1 (N)	Fy Blade 1 (N)	Fz Blade 1 (N)	Fx Blade 2 (N)	Fy Blade 2 (N)	Fz Blade 2 (N)	Radius (m)	Torsi Blade 1 (Nm)	Torsi Blade 2 (Nm)	Torsi Total (Nm)	
1	15	0.261789338	-0.622543493	-4.165553545	-15.51947204	-6.804446885	0.252	-1.163752575	0.252	-1.457753523	1.457753523	0.294000948	
2	30	0.523598776	2.633425478	-2.405716676	-14.620350883	-10.23440931	0.252	-1.267443637	0.252	1.814555328	1.814555328	0.547105691	
3	45	0.785398163	2.802634667	-3.032953937	-15.7422439	-13.95264734	0.252	-2.30572073	0.252	3.026679722	3.026679722	0.720958992	
4	60	1.047197551	0.124155474	-5.184156186	-17.049739	-17.09375897	0.252	-3.705264199	0.252	4.383718565	4.383718565	0.678454366	
5	75	1.308996939	-4.186453763	-8.137163304	-16.97896474	-19.03109575	0.252	-4.405956538	0.252	5.163147293	5.163147293	0.757190756	
6	90	1.570796327	-8.262122991	-11.40698353	-15.57939457	-19.53961617	0.252	-3.926007433	0.252	4.923983284	4.923983284	0.997975851	
7	105	1.832595715	-11.40698353	-14.04959406	-13.23998278	-18.49971391	0.252	-2.478797174	0.252	3.586726347	3.586726347	1.107931173	
8	120	2.094395102	-13.60281045	-15.97192537	-9.917323328	-15.86423045	0.252	-0.450388676	0.252	1.449721722	1.449721722	0.999335045	
9	135	2.35619449	-14.74327694	-16.47591333	-6.07418328	-12.04105046	0.252	1.544753679	0.252	-0.790252226	-0.790252226	0.754501453	
10	150	2.617993878	-14.80275738	-15.28324419	-2.48611156	-7.843758194	0.252	2.917280107	0.252	-2.34707724	-2.34707724	0.570202867	
11	165	2.879793266	-14.09225966	-12.70075835	0.332572637	-4.270120556	0.252	3.45193473	0.252	-2.813026091	-2.813026091	0.638908639	
12	180	3.141592654	-12.9612132	-9.309748632	2.00770794	-1.930462264	0.252	3.268225726	0.252	-2.348056654	-2.348056654	0.920169073	
13	195	3.403392041	-11.6275096	-5.652940795	2.397771958	-1.036248691	0.252	2.673902137	0.252	-1.443587647	-1.443587647	1.230314449	
14	210	3.665191429	-10.16072797	-2.301472117	1.563730414	-1.587856865	0.252	2.020431001	0.252	-0.702339561	-0.702339561	1.318091444	
15	225	3.926990817	-8.782269086	0.035266525	-0.304379012	-3.270810614	0.252	1.619158083	0.252	-0.576544454	-0.576544454	1.042613543	
16	240	4.188790205	-7.772686661	0.757878523	-2.852098685	-5.36055467	0.252	1.601795852	0.252	-1.074386187	-1.074386187	0.527409685	
17	255	4.450589593	-7.406709975	-0.245092471	-5.603688821	-7.088646153	0.252	1.84709583	0.252	-1.741456329	-1.741456329	0.105639502	
18	270	4.71238898	-7.833795436	-2.490450262	-7.892398117	-7.812600191	0.252	1.988884326	0.252	-1.96877525	-1.96877525	0.020109075	
19	285	4.974188368	-8.869482601	-5.219416964	-8.967001691	-7.395364296	0.252	1.60419861	0.252	-1.453853246	-1.453853246	0.144345365	
20	300	5.235987756	-9.84860437	-7.811949377	-8.320479981	-5.324075629	0.252	0.574924065	0.252	-0.308555184	-0.308555184	0.26636888	
21	315	5.497787144	-9.815712103	-8.807893616	-6.068518153	-3.66757883	0.252	-0.667715896	0.252	1.094148264	1.094148264	0.426432368	
22	330	5.759586532	-8.306363241	-11.06863659	-3.212654956	-1.226891536	0.252	-1.407372314	0.252	2.261013219	2.261013219	0.853040306	
23	345	6.021385919	-5.9993611	-11.62784513	-0.799880492	0.826282281	0.252	-1.311581073	0.252	2.884264362	2.884264362	1.572683288	
24	360	6.283185307	-2.386537928	-11.42281167	0.577632692	2.239461531	0.252	-0.601407558	0.252	2.878548543	2.878548543	2.277140985	
												Torsi Avg	0.782121823
												Daja Aktual (w)	30.43127652
												Daja Teoritis	63.53046
												Cp	0.47900293
												Cm	0.34214495
												w (rpm)	3715499
												w (rad/s)	38.9086145
												v udara (m/s)	7
												rho udara (kg/m ³)	1.225
												Jari2 Turbin (m)	0.252
												Tinggi Turbin (m)	0.6
												Swept Area Turbin (m)	0.3024
												TSR	1.4

Tabel A. 6 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 8 m/s

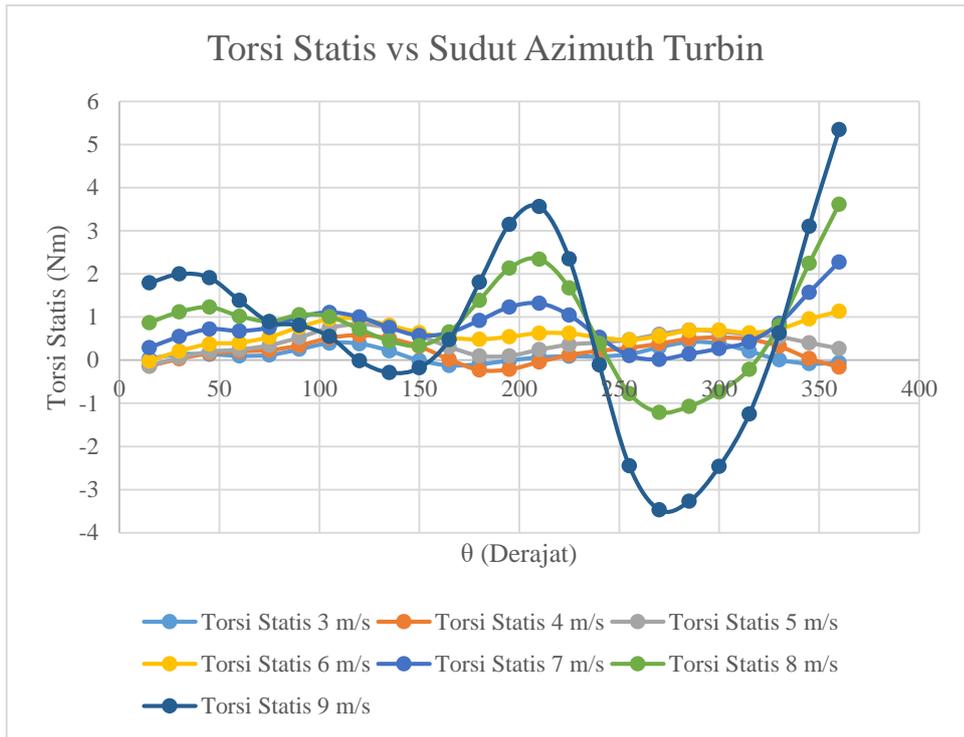
Kecepatan 8 m/s												
Time Step	Teta (deg)	Teta (rad)	Fx Blade 1 (N)	Fy Blade 1 (N)	Fz Blade 1 (N)	Fx Blade 2 (N)	Fy Blade 2 (N)	Fz Blade 2 (N)	Radius (m)	Torsi Blade 1 (Nm)	Torsi Blade 2 (Nm)	Torsi Total (Nm)
1	15	0.261799388	2.520696858	-4.125229248	-23.8378532	-23.8378532	-12.41682914	0.252	-0.943406382	1.813991077	0.870582696	
2	30	0.523598776	7.271402434	-1.354936284	-24.53477145	-24.53477145	-18.46619807	0.252	-1.504481957	2.622692072	1.18210115	
3	45	0.785398163	7.053102393	-2.589343785	-27.74289909	-27.74289909	-24.99208072	0.252	-3.686733516	4.914759086	1.22802557	
4	60	1.047197551	2.122720846	-6.917230667	-30.90294984	-30.90294984	-30.35402262	0.252	-6.476747556	7.495984439	1.019236882	
5	75	1.308996939	-5.879966044	-13.00222471	-31.46598435	-31.46598435	-33.24143626	0.252	-8.042744841	8.939444267	0.896698425	
6	90	1.570796327	-13.75747633	-18.35042596	-28.98889586	-28.98889586	-33.16133032	0.252	-7.305201756	8.356655258	1.051453502	
7	105	1.832595715	-19.6112531	-24.77024891	-24.72534299	-24.72534299	-30.25198417	0.252	-4.739392886	5.748160509	1.008767623	
8	120	2.094395102	-23.222958218	-28.10378236	-18.78589276	-18.78589276	-24.90027325	0.252	-1.172875857	1.893119295	0.720243438	
9	135	2.35619449	-24.72253043	-28.56730385	-11.72264952	-11.72264952	-18.06257878	0.252	2.316460595	-1.871846477	0.444614118	
10	150	2.617993878	-24.27275412	-26.07212309	-5.397688271	-5.397688271	-11.16941053	0.252	4.617138344	-4.282718725	0.334419619	
11	165	2.879793266	-22.59757773	-21.18693326	-0.893762431	-0.893762431	-5.625741603	0.252	5.442257823	-4.790262201	0.651895813	
12	180	3.141592654	-20.27221987	-14.76156176	1.724312842	1.724312842	-2.407218771	0.252	5.108593408	-3.71991356	1.388686848	
13	195	3.403392041	-17.83310478	-7.92044528	2.431740416	2.431740416	-1.878403933	0.252	4.182210885	-2.050448315	2.131762771	
14	210	3.665191429	-15.5297521	-1.801070053	1.283224258	1.283224258	-3.912427519	0.252	3.227502021	-0.886028515	2.341473506	
15	225	3.926990817	-13.66000735	2.200459	-1.34779613	-1.34779613	-7.816866864	0.252	2.674254143	-1.000792815	1.673461327	
16	240	4.188790205	-12.53775461	3.011581749	-4.879194336	-4.879194336	-12.09282596	0.252	2.844584655	-2.2596559703	0.384924952	
17	255	4.450589593	-12.45362607	0.618978832	-8.455517916	-8.455517916	-15.13302526	0.252	2.870440962	-3.643143232	-0.77270227	
18	270	4.71238898	-13.37672534	-3.722434895	-11.18328183	-11.18328183	-16.99276291	0.252	2.819699021	-4.03076257	-1.210477236	
19	285	4.974188368	-14.91682423	-8.497446216	-12.13206376	-12.13206376	-14.82429165	0.252	1.980199577	-3.054206052	-1.074006475	
20	300	5.235987756	-16.1501786	-12.72420737	-10.77053176	-10.77053176	-12.16445379	0.252	0.315621133	-1.05150084	-0.735879707	
21	315	5.497787144	-15.83205868	-15.82208498	-7.344941789	-7.344941789	-8.514957004	0.252	-1.512327072	1.30206376	-0.210263312	
22	330	5.759588532	-13.16868683	-17.53315445	-3.114425783	-3.114425783	-4.313182845	0.252	-2.481495518	3.282946555	0.801451037	
23	345	6.021385919	-8.561953036	-17.96973707	0.237611251	0.237611251	-0.466846548	0.252	-2.099590889	4.343624293	2.244033403	
24	360	6.283185307	-3.1510305	-17.50501439	1.737322939	1.737322939	2.169022533	0.252	-0.794059686	4.41263628	3.617203942	
												Torsi Avg
												0.830163191
w (rpm)				515.6203								
w (rad/s)				53.99563149								
v udara (m/s)				8								44.82518575
rho udara (kg/m ³)				1.225								94.83264
Jari2 Turbin (m)				0.252								0.472676768
Tinggi Turbin (m)				0.6								0.278045157
Swept Area Turbin (m)				0.3024								
TSR				1.7								
Daya Aktual (W)												
Daya Teoritis												
Cp												
Cm												

Tabel A. 7 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius pada Kecepatan Angin 9 m/s

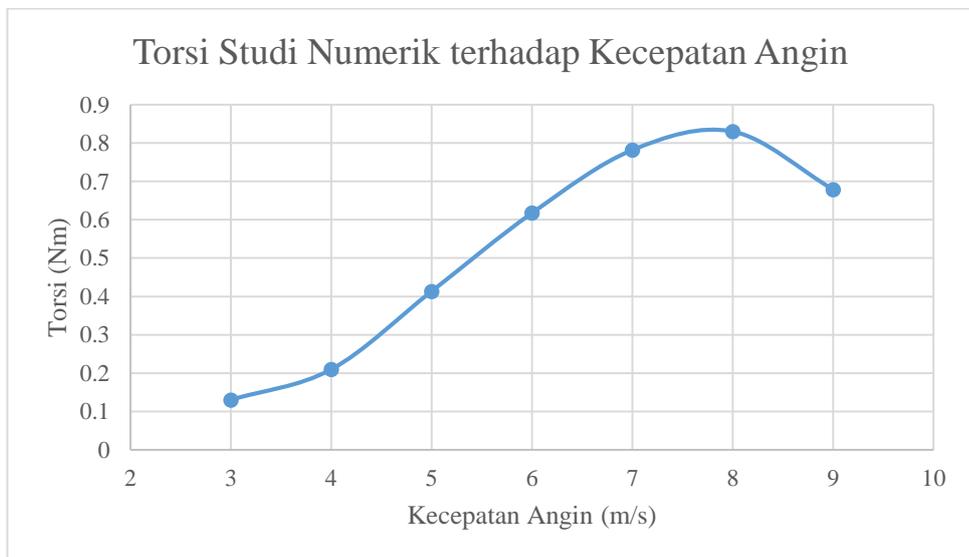
Time Step	Teta [deg]	Teta [rad]	Kecepatan 9 m/s												Torsi Total [Nm]
			Fx Blade 1 [N]	Fy Blade 1 [N]	Fz Blade 1 [N]	Fx Blade 2 [N]	Fy Blade 2 [N]	Fz Blade 2 [N]	Radius [m]	Torsi Blade 1 [Nm]	Torsi Blade 2 [Nm]	Torsi Avg			
1	15	0.261793388	7.825193501	-3.732466046	-34.53643097	-20.016559693	0.252	-0.420816648	2.21406237	1.793245722					
2	30	0.523598776	14.18165715	0.280633998	-37.77820969	-29.56469191	0.252	-1.68507223	3.663304733	1.998832503					
3	45	0.785398163	13.36743097	-1.670394521	-44.16742676	-39.87059497	0.252	-5.488279064	7.402226647	1.913947563					
4	60	1.047197551	5.415762418	-8.816004522	-50.2250906	-48.36435199	0.252	-10.27865744	11.66577543	1.387117998					
5	75	1.308996939	-7.538881077	-19.2191163	-52.178689	-52.69767245	0.252	-13.19269122	14.08083136	0.888140144					
6	90	1.570796327	-20.86365637	-30.16479132	-48.65719267	-51.87708216	0.252	-12.26161255	13.07302473	0.811412176					
7	105	1.832595715	-30.88484184	-39.44589652	-41.80237376	-46.35563044	0.252	-8.1608706	8.70821389	0.549950789					
8	120	2.094395102	-36.82972907	-45.10555679	-32.41960324	-37.14087107	0.252	-2.434655534	2.422264238	-0.012392296					
9	135	2.35619449	-38.83770924	-45.77143358	-20.67709343	-26.00680293	0.252	3.236066638	-3.521888145	-0.285631507					
10	150	2.617993878	-37.35717495	-41.48952868	-9.627041212	-15.3390702	0.252	6.939762962	-7.117520786	-0.177757824					
11	165	2.879793266	-34.03931529	-33.43225446	-2.201435568	-7.187574317	0.252	8.142039434	-7.669064802	0.472974631					
12	180	3.141592654	-30.07493653	-22.9131903	1.708370344	-2.848850711	0.252	7.578884007	-5.774105992	1.804778015					
13	195	3.403392041	-26.02833458	-11.56329663	2.745717093	-2.962285258	0.252	6.156560771	-3.005433505	3.151127266					
14	210	3.665191429	-22.5298832	-1.351555524	1.129475967	-7.303068355	0.252	4.774571729	-1.215147925	3.559423804					
15	225	3.926990817	-20.03653093	5.335681237	-2.523890117	-14.70746566	0.252	4.021131076	-1.663966677	2.351164306					
16	240	4.188790205	-18.89405919	6.574338551	-7.356668148	-22.59570327	0.252	3.986162885	-4.09415396	-0.107991075					
17	255	4.450589593	-19.3466541	2.345787211	-11.96187631	-27.82613162	0.252	4.173539428	-6.620252873	-2.446713445					
18	270	4.71238898	-21.0388461	-4.957362715	-15.14045141	-28.8896203	0.252	3.815393755	-7.280184319	-3.464730564					
19	285	4.974188368	-23.28610366	-12.60187333	-15.82478506	-26.39472367	0.252	2.33318773	-5.60290261	-3.26971488					
20	300	5.235987756	-24.77337384	-19.08943712	-13.52064127	-21.51830665	0.252	-0.170721962	-2.290977799	-2.461699761					
21	315	5.497787144	-24.03977416	-23.84079684	-8.749283738	-15.5541837	0.252	-2.724626384	1.476610743	-1.248015642					
22	330	5.759586532	-20.07148494	-26.55434802	-3.024897199	-9.25176886	0.252	-3.999231746	4.629455576	0.63022383					
23	345	6.021385919	-13.24512578	-27.23813179	1.394508151	-3.193250066	0.252	-3.314993053	6.421952328	3.106859276					
24	360	6.283185307	-5.061798193	-26.27158868	3.019707844	1.451712978	0.252	-1.275573145	6.620440349	5.344867205					
												Torsi Avg	0.678714927		
w [rpm]	682.4386														
w [rad/s]	71.46480299												Dajaja Aktual [W]	48.50422856	
v udara [m/s]	9												Dajaja Teoritis	135.02538	
rho udara [kg/m ³]	1.225												Cp	0.359223048	
Jari2 Turbin [m]	0.252												Cm	0.179611524	
Tinggi Turbin [m]	0.6														
Swept Area Turbin [m ²]	0.3024														
TSP	2														

Tabel A. 8 Data Hasil Studi Numerik Turbin Angin Savonius Overall

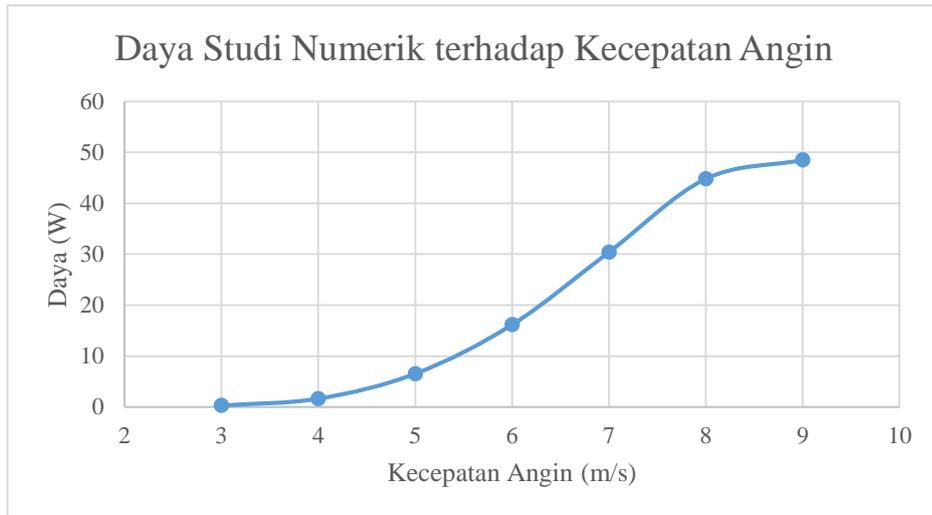
V (m/s)	TSR	w (rpm)	w (rad/s)	Torsi Avg (Nm)	Daya Aktual (W)	Daya Teoritis (W)	Cp	Cm
	3	0.2	22.74795	0.12995254	0.30956771	5.00094	0.061901905	0.309509523
	4	0.5	75.82651	0.2094048	1.662785842	11.85408	0.140271184	0.280542369
	5	0.8	151.653	0.413199277	6.562044572	23.1525	0.283427041	0.354283802
	6	1.1	250.2275	0.617565815	16.18254795	40.00752	0.404487655	0.36771605
	7	1.4	371.5499	0.782121823	30.43127652	63.53046	0.47900293	0.34214495
	8	1.7	515.6203	0.830163191	44.82518575	94.83264	0.472676768	0.278045157
	9	2	682.4386	0.678714927	48.50422856	135.02538	0.359223048	0.179611524



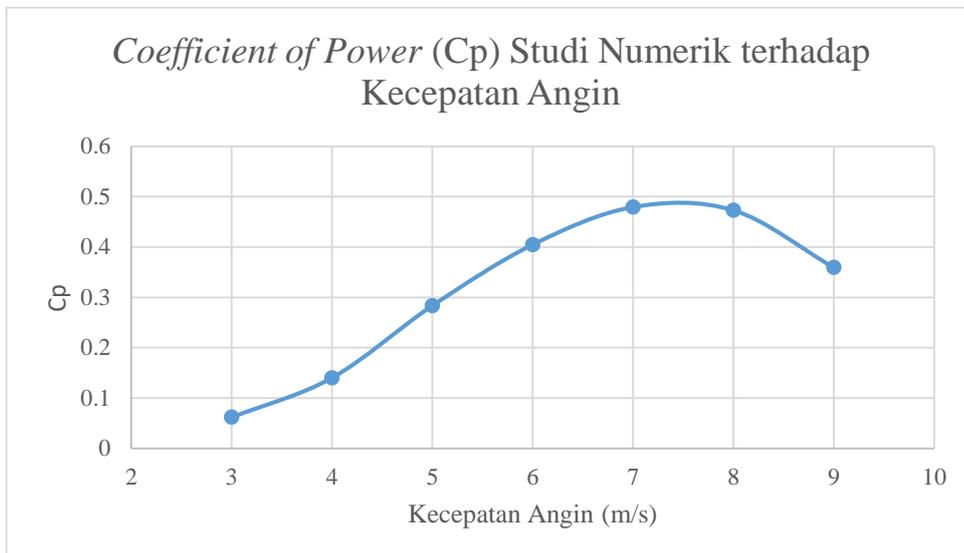
Gambar A. 1 Grafik Torsi Statis Turbin vs Sudut Azimuth Turbin



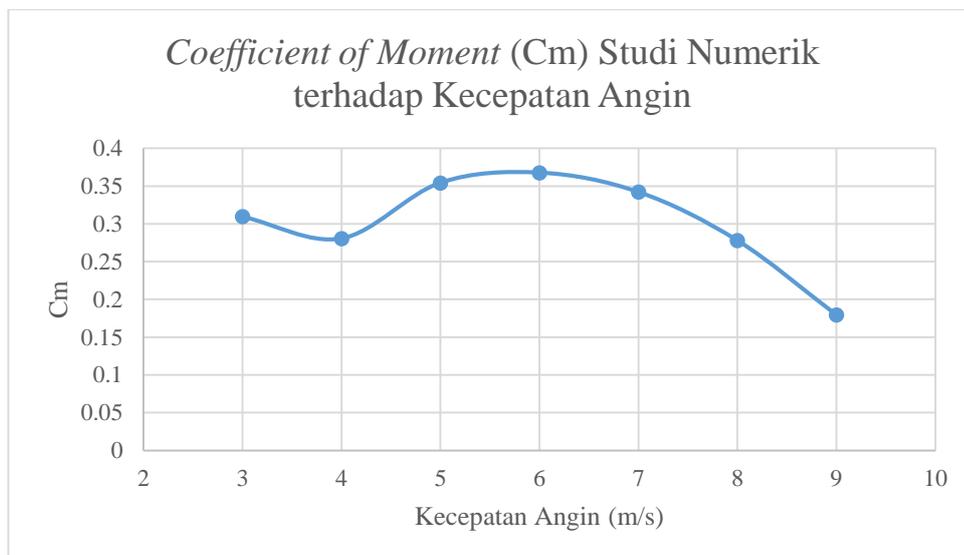
Gambar A. 2 Grafik Torsi Studi Numerik terhadap Kecepatan Angin



Gambar A. 3 Grafik Daya Studi Numerik terhadap Kecepatan Angin



Gambar A. 4 Grafik *Coefficient of Power* (C_p) Studi Numerik terhadap Kecepatan Angin



Gambar A. 5 Grafik *Coefficient of Moment* (C_m) Studi Numerik terhadap Kecepatan Angin

B. Data Hasil Studi Eksperimen

Tabel B. 1 Hasil Pengukuran Studi Eksperimen

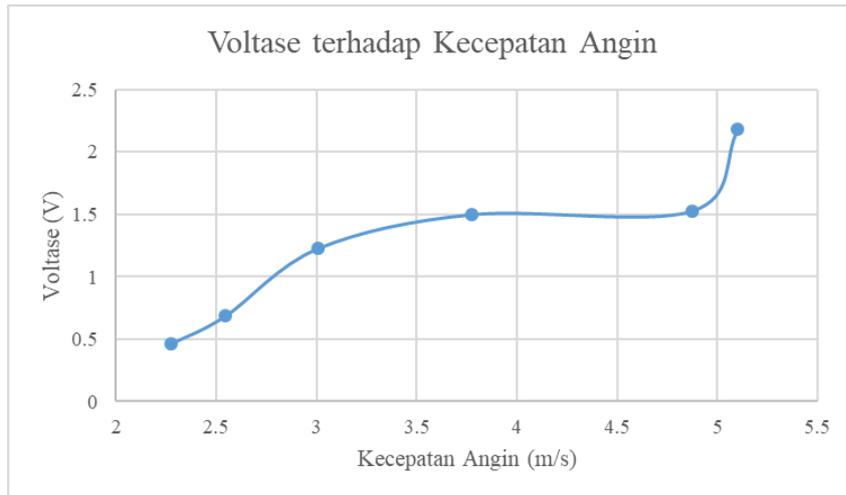
	u Rata-rata (m/s)	Voltase Rata-rata (V)	Kuat Arus Rata-rata (mA)	Kec. Sudut Rata-rata (rpm)	Waktu
Pengambilan Data 1	3.7745	1.500266667	256.4833333	151.2	Malam
Pengambilan Data 2	2.5445	0.6855	122.1833333	102.5	Pagi
Pengambilan Data 3	5.103166667	2.177933333	343.55	187.5	Siang
Pengambilan Data 4	3.010166667	1.229833333	217.1	125.3	Sore
Pengambilan Data 5	4.872833333	1.528133333	262.2466667	179.3	Malam
Pengambilan Data 6	2.272666667	0.4625	69.65	83.6	Pagi

Tabel B. 2 Hasil Pengolahan Data Studi Numerik

u (m/s)	Voltase (V)	Ampere (mA)	Kec. Sudut (rpm)	TSR	P Aktual (W)	Cp	Torsi (Nm)	Cm
2.273	0.4625	69.65	83.6	0.97059	0.032	0.015	0.0036552	0.01545451
2.545	0.6855	122.1833	102.5	1.062834	0.084	0.027	0.0078258	0.02540379
3.01	1.229	217.1	125.3	1.098535	0.267	0.053	0.0203485	0.04824609
3.775	1.5	256.48	151.2	1.056973	0.385	0.039	0.0243153	0.03689781
4.873	1.528	262.25	179.3	0.970986	0.4	0.019	0.0213035	0.01956774
5.103	2.18	343.55	187.5	0.969627	0.75	0.03	0.0381972	0.03093972



Gambar B. 1 Grafik Kecepatan Sudut Turbin terhadap Kecepatan Angin



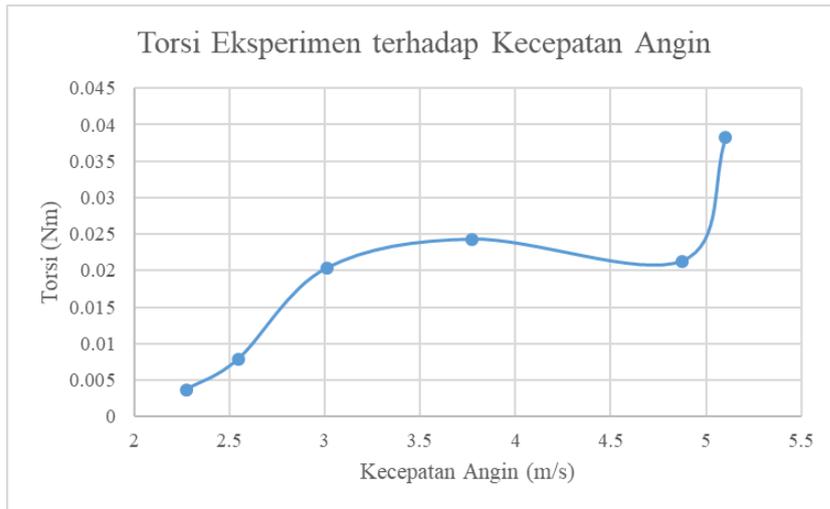
Gambar B. 2 Grafik Voltase terhadap Kecepatan Angin



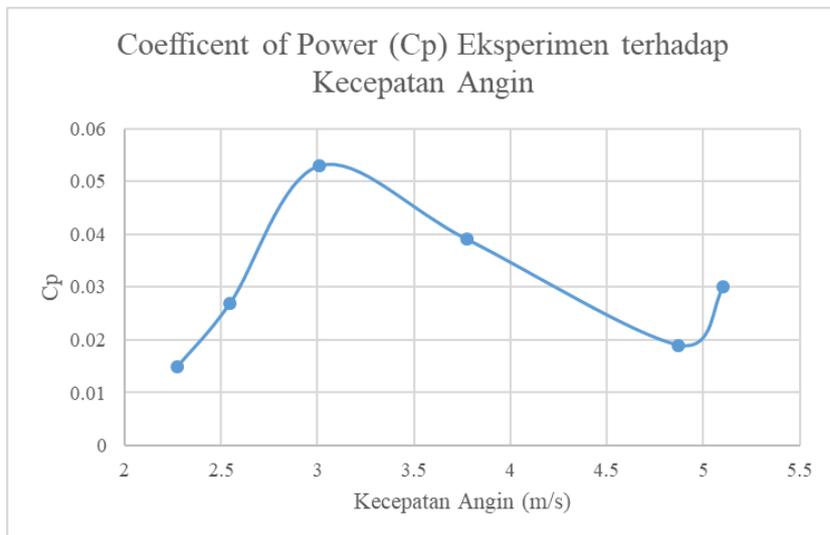
Gambar B. 3 Grafik Kuat Arus Listrik terhadap Kecepatan Angin



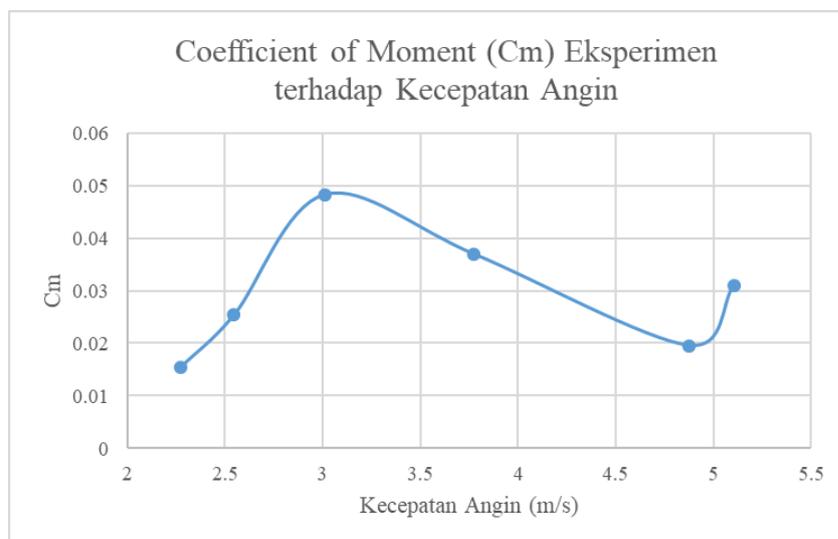
Gambar B. 4 Grafik Daya Studi Eksperimen terhadap Kecepatan Angin



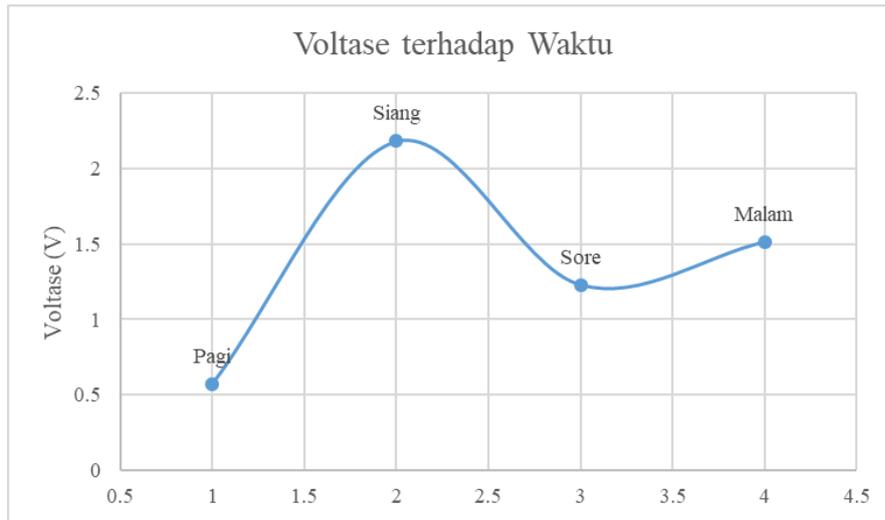
Gambar B. 5 Grafik Torsi Studi Eksperimen terhadap Kecepatan Angin



Gambar B. 6 Grafik *Coefficient of Power* (Cp) terhadap Kecepatan Angin



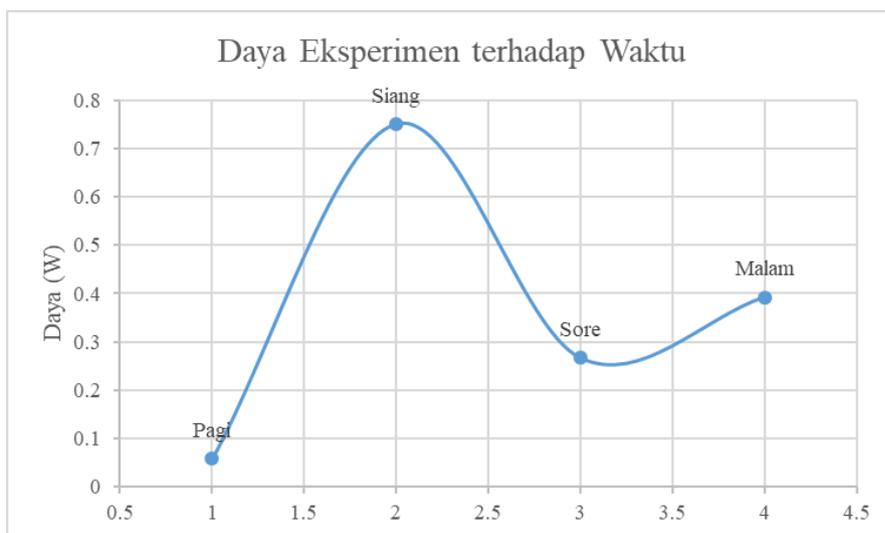
Gambar B. 7 Grafik *Coefficient of Moment* (Cm) terhadap Kecepatan Angin



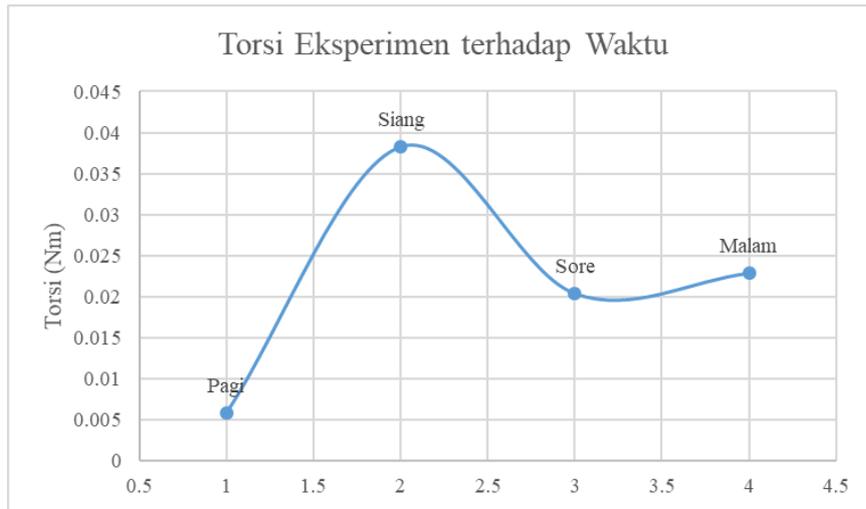
Gambar B. 8 Grafik Voltase terhadap Waktu



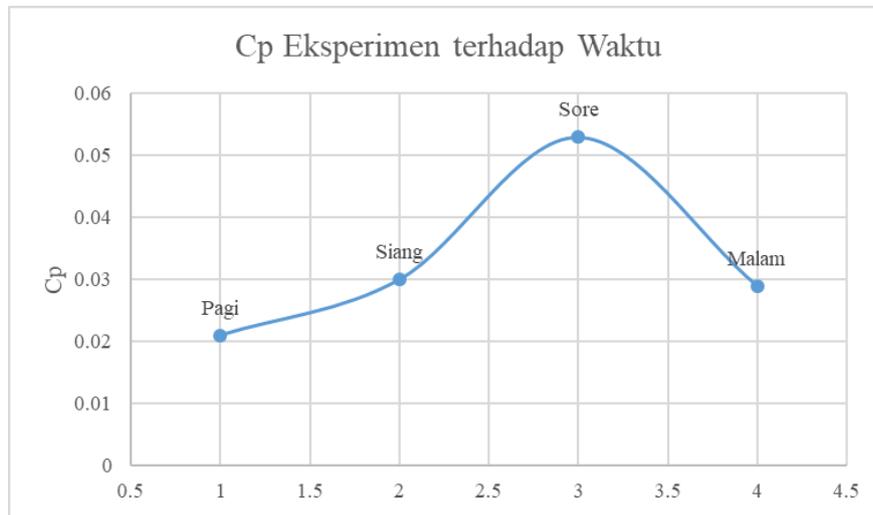
Gambar B. 9 Grafik Kuat Arus Listrik terhadap Waktu



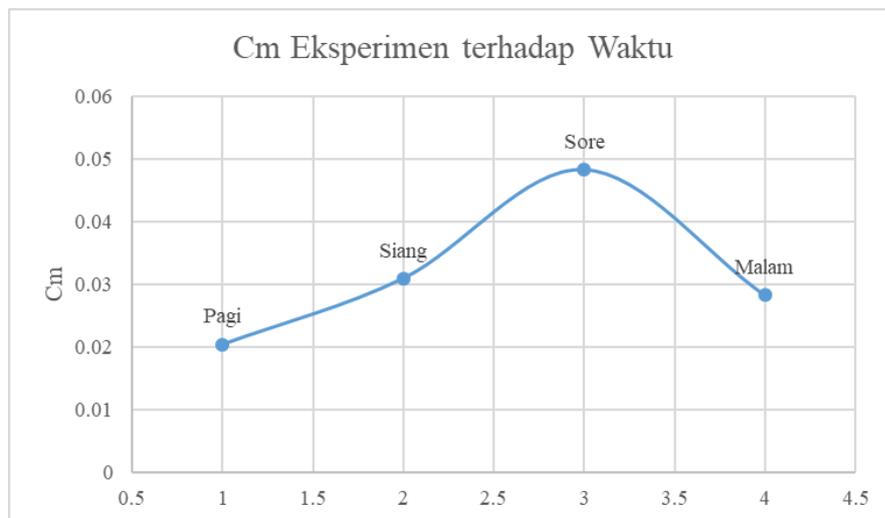
Gambar B. 10 Grafik Daya Studi Eksperimen terhadap Waktu



Gambar B. 11 Grafik Torsi Studi Eksperimen terhadap Waktu



Gambar B. 12 Grafik *Coefficient of Power (Cp)* terhadap waktu



Gambar B. 13 Grafik *Coefficient of Moment (Cm)* terhadap Waktu

C. Dokumentasi Manufaktur Turbin



Gambar C. 1 Proses Penempelan Sudu Turbin Savonius dengan *endplate*



Gambar C. 2 Proses Pengamplasan Turbin Savonius



Gambar C. 3 Proses Pemasangan *Tower* Turbin



Gambar C. 4 Proses Pengecatan Turbin Savonius



Gambar C. 5 Bentuk *assembly* turbin

BIODATA PENULIS



Penulis Diyantra Muhammad Pangestu merupakan anak kedua dari dua bersaudara yang lahir di Jakarta pada tanggal 17 Februari 2001. Penulis memulai pendidikannya di TK At-Taqwa 02 (2004 – 2006). Kemudian penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri Pejuang V Bekasi (2006-2009), SD Cinderamata (2009 – 2012), SMP Negeri 19 Bekasi (2012 – 2015), SMA Negeri 1 Bekasi (2015 – 2018). Setelah menyelesaikan pendidikan SMA pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri Institut Teknologi Sepuluh Nopember di Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin (2018 – 2022) melalui Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Saat ini penulis aktif mengikuti tim riset yaitu ITS Team Sapuangin dengan jabatan Kepala Divisi Engine and Drivetrain. Selama perkuliahan penulis menjadi Staff Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) Divisi HRD pada tahun 2019 – 2021 dan staff ITS Team

Sapuangin Divisi Engine and Drivetrain pada tahun 2020 – 2021. Pelatihan yang pernah penulis ikuti semasa kuliah Latihan Keterampilan Mahasiswa Wirausaha Tingkat Dasar (LKMW-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 diyantrap@gmail.com.