

**TUGAS AKHIR - TM184835**

**STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE  
LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN  
*BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE  
CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN  
300 mm**

**Faiz Hanan Susanto**  
NRP 02111840000171

**DOSEN PEMBIMBING**  
**Nur Ikhwan S.T., M.Eng.**  
NIP 196709151995121001

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



**TUGAS AKHIR - TM184835**

**STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE  
LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN  
*BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE  
CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN  
300 mm**

**Faiz Hanan Susanto**  
NRP 02111840000171

DOSEN PEMBIMBING  
**Nur Ikhwan S.T., M.Eng.**  
NIP 196709151995121001

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022



**FINAL PROJECT - TM184835**

**NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND  
TURBINE PERFORMANCE AT TWO-DIMENSIONAL  
FLOW AND STATIC BLADE CONDITIONS FOR THE  
NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD LENGTH 180  
mm and TURBINE DIAMETER 300 mm**

**Faiz Hanan Susanto**  
NRP 02111840000171

ADVISOR  
**Nur Ikhwan S.T., M.Eng.**  
NIP 196709151995121001

**Mechanical Engineering Undergraduate Program**  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2022

## LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA  
KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI dan *BLADE* STATIS UNTUK  
JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm dan *DIAMETER*  
TURBIN 300 mm**

### TUGAS AKHIR

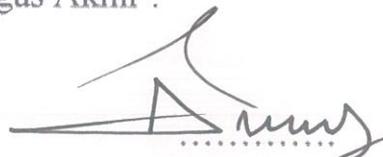
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

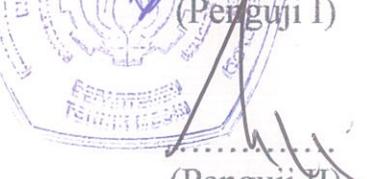
Oleh: **FAIZ HANAN SUSANTO**  
NRP. 02111840000171

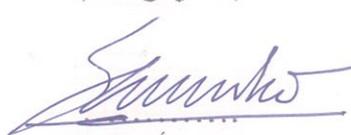
Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.  
NIP. 196709151995121001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 196412281990031002
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.  
NIP. 196001291987011001
4. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko  
NIP. 196010041986011001

  
.....  
(Pembimbing)

  
.....  
(Penguji I)

  
.....  
(Penguji II)

  
.....  
(Penguji III)

**SURABAYA**  
**Juli, 2022**

## APPROVAL SHEET

**NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE  
PERFORMANCE AT TWO-DIMENSIONAL FLOW AND STATIC  
BLADE CONDITIONS FOR THE NUMBER OF BLADE 3, BLADE  
CHORD LENGTH 180 mm and TURBINE DIAMETER 300 mm**

### FINAL PROJECT

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

By: **FAIZ HANAN SUSANTO**  
NRP. 02111840000171

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng.  
NIP. 196709151995121001

  
(Advisor)

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

  
(Examiner I)

3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.  
NIP. 196001291987011001

  
(Examiner II)

4. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko  
NIP. 196010041986011001

  
(Examiner III)

**SURABAYA**  
**July, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Faiz Hanan Susanto / 02111840000171  
Departemen : Teknik Mesin  
Dosen Pembimbing / NIP : Nur Ikhwan, S.T., M.Eng / 196709151995121001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI dan *BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm dan DIAMETER TURBIN 300 mm” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 21 Juli 2022

Mengetahui,

Dosen Pembimbing



( Nur Ikhwan, S.T., M.Eng )

NIP. 196709151995121001

Mahasiswa



(Faiz Hanan Susanto)

NRP. 02111840000171

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Faiz Hanan Susanto / 02111840000171  
Departement : Mechanical Engineering  
Advisor / NIP : Nur Ikhwan, S.T., M.Eng / 196709151995121001

hereby declare that the Final Project with the title of "NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE PERFORMANCE AT TWO-DIMENSIONAL FLOW AND STATIC BLADE CONDITIONS FOR THE NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD LENGTH 180 mm and TURBINE DIAMETER 300 mm" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, July 21<sup>st</sup> 2022

Acknowledged,

Advisor

Student



( Nur Ikhwan, S.T., M.Eng )

NIP. 196709151995121001



(Faiz Hanan Susanto)

NRP. 02111840000171

# STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN *BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN 300 mm.

Nama Mahasiswa : Faiz Hanan Susanto  
NRP : 02111840000171  
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Nur Ikhwan ST, M.Eng.

## Abstrak

Aktifitas manusia tidak pernah lepas dari penggunaan energi listrik. Terlebih, peningkatan konsumsi energi listrik berbanding lurus dengan peningkatan jumlah penduduk di Indonesia. Berdasarkan data dari kementerian energi dan sumber daya mineral (ESDM), pada akhir tahun 2021 konsumsi listrik per kapita di Indonesia mengalami peningkatan sebesar tiga persen, menjadi sebesar 1,123 MWh, dimana pemasok energi dari konsumsi listrik di Indonesia mayoritas didominasi oleh minyak bumi, gas bumi, dan batu bara, yang berasal dari bahan bakar fosil yang jumlahnya terbatas dan memiliki kadar emisi CO<sub>2</sub> yang tinggi. Hal ini tentunya mendorong peningkatan peran energi baru terbarukan (EBT). Mengingat potensi angin di Indonesia yang dinilai ideal untuk dimanfaatkan menjadi sebuah EBT, maka untuk dapat memanfaatkan potensi tersebut dengan baik, dibutuhkan turbin angin dengan tipe yang sesuai, yaitu turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2. Turbin angin tipe Lenz 2 dapat beroperasi pada kondisi kecepatan angin rendah, sesuai dengan karakteristik kecepatan angin di Indonesia, yaitu 4 – 6 m/s dan turbin angin tipe Lenz 2 juga memiliki efisiensi yang relatif tinggi.

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi menggunakan *software ANSYS Fluent* 19.2 dengan tiga tahapan, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*, serta menggunakan model geometri dua dimensi dari turbin angin tipe Lenz 2 dengan variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model turbulensi *Standard k-ε*. *Boundary condition* yang digunakan untuk *blade* turbin adalah *wall*, untuk *inlet* menggunakan *velocity inlet*, untuk *outlet* menggunakan *pressure outlet*, dan untuk kedua dinding bagian samping menggunakan *symmetry*.

Didapat hasil melalui penelitian ini, berupa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap gaya *drag*, *lift*, serta torsi statis, dimana semakin tinggi kecepatan angin, maka nilai gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis akan semakin meningkat. Untuk penelitian ini nilai gaya *drag*, *lift*, serta torsi statis tertinggi didapat pada kecepatan angin 6 m/s, dengan nilai torsi statis sebesar 0,906 Nm pada sudut putar turbin 180°. Kemudian nilai koefisien torsi statis (C<sub>TS</sub>) hasil simulasi memiliki *trend* grafik yang sama dengan C<sub>TS</sub> hasil eksperimen, dimana nilai C<sub>TS</sub> tertinggi didapat pada sudut putar turbin 180° dan terendah didapat ketika turbin berada pada sudut putar turbin 0°.

**Kata kunci:** *Turbin angin, simulasi, kecepatan angin, sudut putar turbin, koefisien torsi statis*

# NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE PERFORMANCE AT TWO-DIMENSIONAL FLOW AND STATIC BLADE CONDITIONS FOR THE NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD LENGTH 180 mm AND TURBINE DIAMETER 300 mm.

Student's Name : Faiz Hanan Susanto  
NRP : 02111840000171  
Department : Mechanical engineering FTIRS-ITS  
Advisor : Nur Ikhwan ST, M.Eng.

## Abstract

Human activities can never be separated from the use of electrical energy. Moreover, the increase in the use of electrical energy is directly proportional to the increase in the population in Indonesia. Based on data released by the ministry of energy and mineral resources (ESDM), at the end of 2021 electricity consumption per capita in Indonesia has increased by three percent, to 1,123 MWh, where the majority of energy suppliers from electricity consumption in Indonesia are dominated by petroleum energy, natural gas, and coal, which come from fossil fuels that are starting to decrease in terms of production and have a bad impact, namely high CO<sub>2</sub> emissions. This certainly encourages the increasing role of new and renewable energy (EBT). Considering the wind potential in Indonesia which is considered ideal to be used as a renewable energy source, then to be able to utilize this potential properly, a wind turbine with the appropriate type is needed, namely a vertical axis wind turbine Lenz 2 type. A wind turbine Lenz 2 type can operate at low wind speed conditions, in accordance with the characteristics of wind speed in Indonesia, namely 4 – 6 m/s and the Lenz 2 type wind turbine also has a relatively high efficiency.

This research was conducted using a simulation method using ANSYS Fluent 19.2 software with three stages, namely pre-processing, processing, and post processing, and using a two-dimensional geometric model of a Lenz 2 type wind turbine with variations in wind speed and turbine rotation angle. This research was conducted using the Standard k- $\epsilon$  turbulence model. Boundary conditions used for turbine blades are wall, velocity inlet for inlet, pressure outlet for outlet, and symmetry for both side walls.

The results obtained through research that has been carried out in the form of the effect of variations in wind speed on drag and lift forces and static torque, where the higher the wind speed, the value of drag and lift forces, and static torque will increase. For this study, the value of drag and lift forces, as well as the highest static torque was obtained at a wind speed of 6 m/s, with a value of static torque 0,906 Nm at a turbine rotation angle of 180°. Then the value of the simulation static torque coefficient ( $C_{TS}$ ) has the same graphic trend as the experimental static torque coefficient ( $C_{TS}$ ), where the highest  $C_{TS}$  value was obtained at a turbine rotation angle of 180° and the lowest was obtained when the turbine was at a turbine rotation angle of 0°.

**Keyword:** *Wind turbine, simulation, wind speed, turbine rotation angle, static torque coefficient*

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur ditujukan kepada kehadirat Allah SWT atas karunia, nikmat, dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir ini. Shalawat serta salam tak lupa dijunjungkan kepada Nabi Muhammad SAW dan semoga kita semua mendapatkan syafa'atnya pada akhir zaman kelak. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebanya-banyaknya kepada pihak-pihak yang telah mendukung penulis, baik secara moril maupun materiil dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Kedua orangtua penulis yang selalu mendoakan serta memfasilitasi penulis yaitu Bapak Heri Susanto dan Ibu Siti Nuraini serta kedua adik penulis yang selalu mendukung penulis.
2. Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing dalam tugas akhir yang telah senantiasa memberikan saran, masukan dan bimbingan yang sangat bermanfaat kepada penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., dan Bapak Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko selaku dosen penguji tugas akhir yang senantiasa memberikan saran dan masukan guna membuat penelitian tugas akhir ini menjadi lebih baik lagi dan bermanfaat kedepannya.
4. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, selaku dosen wali yang selalu membimbing dan memberi masukan kepada penulis dalam proses perkuliahan.
5. Anggota kos KTT II No. 81 yang selalu menemani dan mendukung penulis dalam keadaan suka maupun duka.
6. Kelompok seperbimbingan tugas akhir penulis antara lain Abel, Aldi dan Qadri yang selalu bersama suka duka dalam proses pengerjaan tugas akhir.
7. Teman-teman seperjuangan tugas akhir dari Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida yang telah membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
8. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat selama penulis berkuliah disini.
9. Teman seangkatan M61 yang telah memberikan pengalaman sangat berharga kepada penulis selama menjalani proses perkuliahan.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis.

Penulis menyadari bahwa masih ada kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini sehingga saran dan masukan sangat diperlukan bagi penulis untuk menyempurnakan tugas akhir ini. Penulis berharap agar tugas akhir ini memberikan manfaat yang baik, serta membuka kesempatan lain untuk dilakukannya penyempurnaan dengan topik yang serupa.

Surabaya, 27 Juli 2022



**Faiz Hanan Susanto**

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
APPROVAL SHEET.....	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
STATEMENT OF ORIGINALITY.....	iv
Abstrak.....	v
Abstract.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Turbin Angin.....	5
2.1.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i> .....	5
2.1.2 <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i> .....	6
2.2 Turbin Angin Tipe Darrieus.....	7
2.3 Turbin Angin Tipe Savonius.....	7
2.4 Turbin Angin Tipe Lenz 2.....	8
2.5 Bilangan Reynolds.....	8
2.6 Pemodelan Turbulensi.....	9
2.6.1 Sifat-sifat Turbulensi.....	9
2.6.2 <i>Two-equation Model</i> .....	10
2.7 Gaya Drag dan Gaya Lift.....	11
2.8 Torsi Statis.....	12
2.9 <i>Solidity</i> .....	12
2.10 <i>Aspect Ratio (AR)</i> .....	13
2.11 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i> .....	13
2.12 Penelitian Terdahulu.....	13

2.12.1	Abu-El-Yazied et al, 2015 .....	13
2.12.2	Taufiqurrahman & Suphandani, 2017 .....	17
2.12.3	Feng et al, 2021 .....	22
<b>BAB III</b>	<b>METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>27</b>
3.1	Tahapan Simulasi .....	27
3.2	Tahap <i>Pre-Processing</i> .....	27
3.2.1	Pembuatan Geometri .....	27
3.2.2	Penentuan <i>Boundary Condition</i> .....	28
3.2.3	Pembuatan <i>Mesh</i> .....	28
3.3	Tahap <i>Processing</i> .....	29
3.4	Tahap <i>Post Processing</i> .....	30
3.5	Data yang Digunakan .....	31
3.5.1	<i>Free Body Diagram</i> .....	31
3.6	<i>Grid Independency Test</i> .....	32
3.7	<i>Flowchart</i> .....	32
3.7.1	<i>Flowchart</i> Penelitian .....	33
3.7.2	<i>Flowchart</i> Simulasi .....	35
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>37</b>
4.1	Contoh Perhitungan .....	37
4.1.1	Perhitungan Gaya <i>Drag</i> dan Gaya <i>Lift</i> pada Tiap <i>Blade</i> .....	37
4.1.2	Perhitungan Torsi Statis .....	38
4.1.3	Perhitungan Koefisien <i>Drag</i> dan Koefisien <i>Lift</i> .....	38
4.1.4	Perhitungan Koefisien Torsi Statis .....	39
4.2	Perbandingan Data Hasil Simulasi dengan Eksperimen .....	39
4.3	Analisa Fenomena Aliran.....	40
4.3.1	Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 4 m/s .....	41
4.3.2	Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 5 m/s .....	43
4.3.3	Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 6 m/s .....	46
4.4	Analisa Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Tiap <i>Blade</i> .....	49
4.4.1	Analisa Koefisien serta Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> pada <i>Blade 1</i> untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin.....	49
4.4.2	Analisa Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> pada <i>Blade 2</i> untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin .....	53
4.4.3	Analisa Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> pada <i>Blade 3</i> untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin .....	55
4.5	Analisa Perbandingan Nilai Torsi Statis pada Setiap <i>Blade</i> .....	57

4.6	Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis dan Torsi statis pada Setiap Variasi Kecepatan dan Sudut Putar Turbin .....	58
4.7	Analisa Perbandingan Koefisien Torsi Statis dan Koefisien <i>Bending</i> .....	60
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>61</b>
5.1	Kesimpulan.....	61
5.2	Saran .....	61
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>62</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>63</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>		<b>67</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b> Instalasi turbin angin ( <b>Onshore and Offshore Wind Energy, 2012</b> ) .....	5
<b>Gambar 2. 2</b> Komponen pada HAWT ( <b>Wind energy explained, 2009</b> ) .....	5
<b>Gambar 2. 3</b> Jenis <i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (a) tipe Savonius (b) tipe Darrieus (c) tipe H-Darrieus ( <b>A.P.Schaffarczyk, Introduction to Wind Turbine Aerodynamics, 2014</b> ).....	6
<b>Gambar 2. 4</b> Geometri Vertical Axis Wind Turbine tipe Darrieus ( <b>Tiju, et al 2015</b> ).....	7
<b>Gambar 2. 5</b> Geometri Vertical Axis Wind Turbine tipe Savonius .....	8
<b>Gambar 2. 6</b> Ilustrasi bentuk VAWT tipe Lenz 2 ( <b>Nishioka, et al 2018</b> ) .....	8
<b>Gambar 2. 7</b> Skema VAWT tipe lenz 2 (a) 2 dimensi (b) 3 dimensi.....	9
<b>Gambar 2. 8</b> Ilustrasi domain model geometri dan boundary condition yang digunakan .....	14
<b>Gambar 2. 9</b> Sampel diskretisasi mesh 2D pada model geometri ( <b>Abu-El-Yazied et al, 2015</b> ) .....	15
<b>Gambar 2. 10</b> Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas untuk model dengan chord length 85,8 mm ( <b>Abu-El-Yazied et al, 2015</b> ) .....	16
<b>Gambar 2. 11</b> Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas untuk model dengan chord length 170 mm ( <b>Abu-El-Yazied et al, 2015</b> ) .....	16
<b>Gambar 2. 12</b> Grafik perbandingan koefisien daya maksimum terhadap jumlah blade dan chord length pada nilai solidity yang sama ( <b>Abu-El-Yazied et al, 2015</b> ) .....	16
<b>Gambar 2. 13</b> Tahap pembuatan geometri dan meshing (a) domain statis (b) rotating domain (c) mesh static domain (d) mesh rotating domain ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> )	17
<b>Gambar 2. 14</b> Boundary condition turbin angin Darrieus tiga blade (a) static domain (b) rotating domain ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ) .....	18
<b>Gambar 2. 15</b> Contour kecepatan angin 15 m/s pada berbagai sudut putar (a) tiga blade (b) empat blade ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ) .....	18
<b>Gambar 2. 16</b> Contour kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga blade dengan sudut putar 90° (b) empat blade dengan sudut putar 0° ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ).....	19
<b>Gambar 2. 17</b> Contour tekanan turbin angin Darrieus pada kecepatan angin 15 m/s (a) tiga blade (b) empat blade ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ).....	20
<b>Gambar 2. 18</b> Grafik torsi pada turbin angin tipe Darrieus tiga blade (a) terhadap sudut putar blade 1, 2, 3 pada kecepatan freestream 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan freestream ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ) .....	20
<b>Gambar 2. 19</b> Grafik torsi pada turbin angin tipe Darrieus empat blade (a) terhadap sudut putar blade 1, 2, 3 dan 4 pada kecepatan freestream 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan freestream ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ).....	21
<b>Gambar 2. 20</b> Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin Darrieus tiga blade dan empat blade. ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ) .....	21
<b>Gambar 2. 21</b> Geometri turbin yang digunakan (a) parameter struktural (b) sudut putar blade ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	22
<b>Gambar 2. 22</b> Analisis gaya pada LDCS empat blade ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	23
<b>Gambar 2. 23</b> Domain komputasi yang digunakan ( <b>Feng et al, 2021</b> ) .....	23
<b>Gambar 2. 24</b> Meshing pada blade LDCS ( <b>Feng et al, 2021</b> ) .....	23
<b>Gambar 2. 25</b> Kurva GIT pada LDCS dua blade dengan sudut 20° ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	24
<b>Gambar 2. 26</b> Kontur kecepatan pada LDCS tiga blade (a) sudut 30° (b) sudut 100° .....	24
<b>Gambar 2. 27</b> Kurva $C_{ts}$ pada seluruh variasi blade (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	25
<b>Gambar 2. 28</b> Kurva $C_{ts}$ hasil eksperimen pada LDCS tiga blade (a) kecepatan angin 6 m/s (b) kecepatan angin 10 m/s ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	26

<b>Gambar 3. 1</b> Model geometri turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	28
<b>Gambar 3. 2</b> Boundary condition pada simulasi penelitian (a) domain keseluruhan (b) detail boundary pada blade .....	28
<b>Gambar 3. 3</b> Hasil meshing turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 (a) meshing keseluruhan (b) meshing sekitar rotor (c) meshing dekat blade .....	29
<b>Gambar 3. 4</b> Free body diagram (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	31
<b>Gambar 3. 5</b> Grafik perbandingan antara jumlah cell pada mesh terhadap torsi statis hasil simulasi.....	32
<b>Gambar 3. 6</b> Flowchart Penelitian .....	34
<b>Gambar 3. 7</b> Flowchart Simulasi .....	36
<b>Gambar 4. 1</b> Free body diagram vektor gaya pada setiap blade untuk sudut putar turbin 180° .....	37
<b>Gambar 4. 2</b> Grafik perbandingan koefisien torsi statis hasil simulasi dan eksperimen terhadap sudut putar turbin pada kecepatan angin 6 m/s.....	39
<b>Gambar 4. 3</b> Kontur tekanan pada kecepatan angin 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	41
<b>Gambar 4. 4</b> Display vektor kecepatan pada kecepatan angin 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	42
<b>Gambar 4. 5</b> Kontur tekaanan pada kecepatan angin 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	44
<b>Gambar 4. 6</b> Display vektor kecepatan pada kecepatan angin 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	45
<b>Gambar 4. 7</b> Kontur tekanan pada kecepatan angin 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	46
<b>Gambar 4. 8</b> Display vektor kecepatan pada kecepatan angin 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° .....	48
<b>Gambar 4. 9</b> Grafik perbandingan koefisien drag pada blade 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	49
<b>Gambar 4. 10</b> Grafik perbandingan gaya drag pada blade 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	50
<b>Gambar 4. 11</b> Grafik nilai koefisien lift pada blade 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin .....	51
<b>Gambar 4. 12</b> Grafik nilai gaya lift pada blade 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin .....	52
<b>Gambar 4. 13</b> Grafik perbandingan koefisien drag pada blade 2 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	53
<b>Gambar 4. 14</b> Grafik perbandingan koefisien lift pada blade 2 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	54
<b>Gambar 4. 15</b> Grafik perbandingan koefisien drag pada blade 3 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	55
<b>Gambar 4. 16</b> Grafik perbandingan koefisien lift pada blade 3 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin .....	56
<b>Gambar 4. 17</b> Grafik nilai torsi statis pada setiap blade untuk setiap variasi sudut putar turbin pada kecepatan 6 m/s.....	57
<b>Gambar 4. 18</b> Grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis total untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin.....	58

<b>Gambar 4. 19</b> Grafik perbandingan nilai torsi statis total untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin.....	59
<b>Gambar 4. 20</b> Grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis dan koefisien bending terhadap variasi sudut putar turbin pada setiap variasi kecepatan .....	60

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2. 1</b> Nilai koefisien drag untuk beberapa bentuk bidang permukaan pada $Re \geq 1000$ ..	11
<b>Tabel 2. 2</b> Detail nilai parameter penelitian ( <b>Abu-El-Yazied et al, 2015</b> ) .....	14
<b>Tabel 2. 3</b> Detail nilai hasil simulasi untuk beberapa parameter pada model yang diuji .....	15
<b>Tabel 2. 4</b> Detail nilai putaran turbin dan tip speed ratio pada tiap kecepatan angin ( <b>Taufiqurrahman &amp; Suphandani, 2017</b> ) .....	18
<b>Tabel 2. 5</b> Detail parameter yang digunakan pada penelitian ( <b>Feng et al, 2021</b> ).....	22
<b>Tabel 3. 1</b> Detail ukuran variasi turbin angin tipe Lenz 2 .....	27
<b>Tabel 3. 2</b> Detail input nilai pada beberapa parameter .....	30
<b>Tabel 3. 3</b> Grid independency test pada turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 dengan sudut putar turbin $0^\circ$ dan kecepatan angin 6 m/s .....	32

## DAFTAR SIMBOL

$A$	: Luas sapuan turbin yang bersinggungan dengan angin ( $m^2$ )
$AR$	: <i>Aspect Ratio</i>
$c$	: <i>Blade chord length</i> (m)
$C_D$	: Koefisien <i>drag</i>
$C_L$	: Koefisien <i>lift</i>
$C_{TS}$	: Koefisien torsi statis
$D$	: Diameter turbin (m)
$F_D$	: Gaya <i>drag</i> (N)
$F_L$	: Gaya <i>lift</i> (N)
$H$	: <i>Blade span</i> (m)
$L$	: Panjang karakteristik aliran angin (m)
$N$	: Jumlah <i>blade</i> turbin angin
$R$	: Jari-jari turbin Lenz 2 (m)
$r$	: <i>Blade radius leading edge</i> (m)
$Re$	: Bilangan reynolds
$T_s$	: Torsi statis (N.m)
$v$	: Kecepatan aliran fluida (m/s)
$\rho$	: Densitas fluida ( $kg/m^3$ )
$\mu$	: Viskositas fluida ( $N.s/m^2$ )
$\theta$	: Sudut putar turbin ( $^\circ$ )

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Pada era modern ini, aktifitas manusia tentunya tidak pernah lepas dari penggunaan energi listrik. Terlebih, peningkatan penggunaan energi listrik berbanding lurus dengan peningkatan jumlah penduduk dunia secara umum, dan Indonesia secara khusus. Dilansir dari buku statistik ketenagalistrikan tahun 2020 yang diterbitkan oleh kementerian energi dan sumberdaya mineral (ESDM), dinyatakan bahwa sampai dengan akhir tahun 2020 kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik di Indonesia mencapai 72.750,72 MW yang terdiri dari pembangkit PLN sebesar 43.186,53 MW dan Non-PLN sebesar 29.564,19 MW, dimana pada tahun 2020 jumlah penduduk Indonesia sebanyak 269.603.400 jiwa dan konsumsi tenaga listrik per kapita pada tahun tersebut sebesar 1,0885 MWh. Sedangkan, pada akhir tahun 2021 konsumsi listrik per kapita di Indonesia mengalami peningkatan sebesar tiga persen, sehingga konsumsi listrik pada akhir tahun 2021 menjadi sebesar 1,123 MWh dengan jumlah penduduk sebanyak 273.879.750 jiwa.

Kementerian ESDM juga menjelaskan bahwa, kapasitas pembangkit tenaga listrik yang terpasang di Indonesia pada tahun 2020, yaitu sebesar 72.750,72 MW terdiri dari beberapa pemasok energi, antara lain sebesar 35,36 persen energi berasal dari batu bara, kemudian 19,36 persen berasal dari gas bumi, dan 34,38 persen dari minyak bumi, serta EBT sebesar 10,9 persen. Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa sebagian besar pemasok energi untuk pembangkit listrik di Indonesia merupakan batu bara dan minyak bumi, dimana kedua energi tersebut berasal dari fosil dan untuk energi minyak bumi sendiri, Indonesia pada tahun 2020 hanya memiliki cadangan minyak bumi sebanyak 417 miliar *barrel*, dimana jika penggunaan minyak bumi dilakukan secara terus menerus, maka cadangan tersebut tidak akan dapat bertahan lama. Terlebih, kedua sumber daya tersebut memiliki tingkat emisi CO<sub>2</sub> yang relatif tinggi. Menteri ESDM menjelaskan, emisi CO<sub>2</sub> sektor energi Indonesia pada tahun 2021 sebesar 530 juta ton dan diperkirakan puncak emisi terjadi sekitar tahun 2039 sebesar 706 juta ton CO<sub>2</sub>.

Hal ini tentunya menjadi sebuah perhatian tersendiri bagi Indonesia mengingat berkurangnya produksi energi fosil terutama minyak bumi dan dampak buruk bagi lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan energi tersebut, serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas rumah kaca, yang akhirnya mendorong pemerintah untuk meningkatkan peran energi baru dan terbarukan secara terus menerus sebagai bagian dalam menjaga ketahanan dan kemandirian energi, dimana target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Indonesia sendiri mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target tersebut, dimana dilansir dari Capaian kinerja sektor ESDM tahun 2021 & rencana 2022 total kapasitas terpasang pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT) sampai dengan tahun 2021 sebesar 11.152 MW, yang terdiri dari 154,3 MW pembangkit listrik tenaga bayu, 195,4 MW tenaga surya, 1.920,4 MW tenaga bioenergi, 2.276,9 MW tenaga panas bumi, 6.601,9 MW tenaga air, dan 3,6 MW tenaga *hybrid*. Berdasarkan data tersebut, dapat dilihat bahwa pemanfaatan energi bayu/angin masih relatif kecil dan belum maksimal jika dibandingkan energi terbarukan lainnya. Padahal, berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), pada tahun 2021 potensi energi angin di Indonesia menempati urutan ketiga tertinggi setelah energi surya dan energi air, dengan nilai potensi sebesar 60.647 MW.

Hal ini menandakan diperlukannya pemanfaatan lebih terhadap potensi energi angin yang ada di Indonesia, karena berdasarkan data yang dikeluarkan oleh BMKG, Indonesia memiliki karakteristik kecepatan angin berkisar antara 4 – 6 m/s, dimana nilai ini ideal untuk skala

perumahan di dataran rendah. Pemanfaatan energi angin tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan jenis turbin angin yang memiliki performa yang cukup baik yang sesuai dengan karakteristik angin di Indonesia guna meningkatkan kapasitas energi listrik yang dihasilkan dan mengurangi biaya operasional. Salah satu opsi jenis turbin angin yang dapat dimanfaatkan adalah turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz ditemukan oleh **Edwin Lenz** pada tahun 2007, dimana turbin angin tipe ini diharapkan dapat beroperasi pada kondisi kecepatan angin rendah, sehingga dapat menyelesaikan permasalahan *self-starting* pada turbin angin tipe Darrieus, serta memiliki efisiensi yang tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin tipe Savonius. Turbin angin tipe Lenz menggabungkan prinsip kerja turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Darrieus yang memanfaatkan gaya *lift* dan turbin angin tipe Savonius yang memanfaatkan gaya *drag*, serta merupakan model yang sesuai untuk pembangkit listrik skala kecil untuk keperluan rumah tangga.

Beberapa penelitian telah dilakukan dengan menggunakan metode simulasi CFD terkait pengaruh beberapa parameter terhadap performa turbin angin sumbu vertikal (VAWT). Salah satu penelitian tersebut adalah penelitian yang dilakukan oleh **Abu-El-Yazied et al (2015)**. Penelitian tersebut dilakukan dengan metode analisis simulasi CFD dua dimensi pada turbin angin tipe *straight-bladed* Darrieus guna mempelajari pengaruh perubahan pada beberapa parameter desain, seperti jumlah *blade*, *blade chord length*, dan *solidity* turbin terhadap performa turbin angin tipe H-Darrieus dengan tidak merubah *pitch angle*. Penelitian ini dilakukan menggunakan beberapa parameter, yaitu jumlah *blade* dan *blade chord length*, yang akan memengaruhi efisiensi dari turbin angin tipe Darrieus yang digunakan. Untuk memvalidasi hal tersebut, penelitian ini menggunakan dua belas model dengan jumlah *blade* dan variasi *blade chord length* serta *solidity* yang berbeda, dan dengan model *blade airfoil* NACA 0021. Pada penelitian ini, digunakan kecepatan angin konstan sebesar 9 m/s dan jumlah *blade* 2, 3, 4, dan 6 yang beroperasi pada angular yang berbeda. Melalui penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa koefisien daya yang diharapkan secara numerik turun bersamaan dengan meningkatnya nilai soliditas rotor, hal yang sama berlaku juga pada nilai *tip speed ratio* untuk koefisien daya maksimum. Pada nilai soliditas yang sama, peningkatan *blade chord length* dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan koefisien daya.

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani (2017)** dengan tujuan untuk mendapatkan desain turbin angin yang mampu memanfaatkan tenaga angin seoptimal mungkin berdasarkan nilai torsi dan koefisien daya yang didapat. Pada penelitian ini, digunakan metode penelitian numerik dua dimensi dengan analisis aliran *unsteady* menggunakan *software* STAR CCM+ 9.02.007-R8. Model turbin angin yang digunakan pada penelitian ini adalah turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil blade* sesuai NACA 0024 dengan jumlah *blade* 3 dan 4. Pada penelitian ini juga dilakukan variasi terhadap nilai kecepatan angin *freestream* yang akan disimulasikan agar mendapatkan nilai torsi dan koefisien daya yang optimal, yaitu sebesar 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Dapat disimpulkan melalui simulasi penelitian yang telah dilakukan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan, tetapi semakin banyak jumlah *blade* yang digunakan, maka nilai torsi yang dihasilkan akan semakin rendah. Selain itu, koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi. Kemudian, semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu *blade*, maka semakin besar pula gaya *lift* yang dihasilkan oleh *blade* tersebut dan nilai resultan dari gaya *lift* dan gaya *drag* akan bertambah. Pertambahan nilai resultan gaya ini berbanding lurus dengan pertambahan nilai torsi. Kemudian, semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu *blade*, maka semakin tinggi pula kecepatan pada *blade* tersebut.

Penelitian lainnya dilakukan oleh **Feng et al (2021)** guna melakukan optimasi terhadap karakteristik *starting* dari *lift-type* VAWT dengan menggunakan *lift-drag combined starter* (LDCS), yaitu menggunakan *semi-elliptical drag blades* dan *lift blades* yang dilengkapi pada

bagian tengah dan belakang di luar *starter*, strukturnya dicirikan oleh kombinasi gaya *lift-drag*. Penelitian ini dilakukan dengan berfokus pada karakteristik statis LDCS dengan variasi kecepatan angin dan variasi jumlah *blade* yaitu 2, 3, dan 4 *blade* dan dengan menggunakan dua metode, yakni simulasi numerik dan uji *wind tunnel*. Pada penelitian ini, digunakan ANSYS 19.0 untuk melakukan simulasi numerik dan analisa dinamika fluida pada komputasi dua dimensi. Melalui penelitian ini, didapat kesimpulan yaitu pada ketiga *blade* perubahan nilai  $C_{ts}$  relatif sama pada seluruh variasi kecepatan angin. Nilai  $C_{ts}$  pada kecepatan angin 10 m/s lebih besar dibandingkan dengan pada kecepatan angin 6 m/s. Hal ini menandakan bahwa peningkatan kecepatan angin dapat meningkatkan nilai  $C_{ts}$  pada LDCS. Kemudian Perbedaan tekanan yang besar dapat dihasilkan di kedua sisi dari LDCS tiga *blade*, menghasilkan *forward torque* yang besar dan *reverse torque* yang kecil, yang memungkinkan LDCS memiliki torsi awal yang lebih besar, dengan demikian, ia berkinerja baik pada kecepatan angin rendah. Pada sudut tertentu, *lift blade* LDCS memiliki karakteristik aerodinamis, yang mendorong peningkatan torsi gabungan gaya *lift-drag*.

Dengan mengacu pada beberapa penelitian yang telah dilakukan, maka penelitian Tugas Akhir ini akan dilakukan dengan metode simulasi pada turbin angin tipe Lenz 2 menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 19.2. Penelitian tugas akhir ini berfokus pada pengaruh variasi kecepatan aliran udara ( $v$ ) dan sudut putar turbin ( $\theta$ ) terhadap performa turbin angin Lenz 2 berdasarkan nilai koefisien torsi statis, gaya *drag* dan gaya *lift*, serta fenomena aliran, kemudian membandingkan nilai tersebut dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 merupakan jenis turbin angin yang menggabungkan prinsip kerja turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Darrieus yang bekerja dengan memanfaatkan gaya *lift* dan turbin angin tipe Savonius yang memanfaatkan gaya *drag*. Gagasan ini tercipta dikarenakan adanya permasalahan yang terdapat pada turbin Darrieus, yaitu kemampuan *self-start* dan pada turbin Savonius dengan efisiensinya yang tidak terlalu baik.

Mengingat turbin angin tipe Lenz 2 merupakan desain yang masih tergolong baru dan belum banyak studi penelitian baik secara eksperimen maupun simulasi, dan sehubungan dengan telah dilakukannya eksperimen pada penelitian sebelumnya, maka penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan metode simulasi menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 19.2 guna membandingkan hasil nilai eksperimen dengan simulasi yang dilakukan dan melihat fenomena aliran yang terjadi pada turbin angin tipe Lenz 2 yang diuji. Penelitian ini akan berfokus pada pengaruh variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ) dan kecepatan angin ( $v$ ) yang digunakan, terhadap fenomena aliran dan performa turbin angin tipe Lenz 2 berdasarkan besar nilai gaya *drag* dan gaya *lift*, serta torsi statis dan koefisien torsi statis dari turbin angin tipe Lenz 2 dengan hipotesa awal pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Semakin tinggi kecepatan angin yang masuk pada turbin, maka torsi statis pada turbin tersebut akan menjadi semakin besar.
2. Semakin besar gaya *drag* yang bekerja pada *blade* turbin, maka nilai torsi statis pada turbin tersebut akan semakin besar.
3. Hasil nilai perhitungan koefisien torsi statis dengan metode eksperimen akan lebih kecil dibandingkan dengan hasil nilai perhitungan koefisien torsi statis dengan metode simulasi numerik.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini, yaitu sebagai berikut:

1. Analisa aliran menggunakan *external flow*.
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *incompressible flow*, *steady flow*, dan *uniform flow*.
3. Simulasi dilakukan dengan model geometri berupa dua dimensi dengan menggunakan *software ANSYS Fluent 19.2*.
4. Variasi kecepatan angin ( $v$ ) yang digunakan 4; 5; dan 6 m/s.
5. Analisa dilakukan pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 dengan konfigurasi jumlah *blade* ( $N$ ) = 3 buah, Diameter turbin ( $D$ ) = 300 mm, *Blade diameter leading edge* ( $d$ ) = 75 mm, *chord length* = 180 mm, dan *solidity* = 1,8.
6. Variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ) yang digunakan sebesar  $0^\circ$ ;  $100^\circ$ ;  $180^\circ$ ; dan  $280^\circ$ .
7. Rotor dianalisa dalam keadaan diam atau statis.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh variasi sudut turbin ( $\theta$ ) dan kecepatan angin ( $v$ ) terhadap performa dan fenomena aliran yang terjadi pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 pada skala simulasi dengan *software ANSYS Fluent*. Variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ) yang digunakan sebesar  $0^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $280^\circ$ ; pada kecepatan angin 4; 5; dan 6 (m/s). Performansi turbin angin tipe Lenz 2 dapat ditentukan dengan melakukan beberapa hal berikut:

1. Mendapatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* pada turbin angin Lenz 2 hasil simulasi.
2. Membandingkan koefisien torsi statis turbin angin Lenz 2 hasil simulasi dengan hasil eksperimen.
3. Menganalisa fenomena aliran pada turbin angin tipe Lenz 2 berdasarkan simulasi yang dilakukan disebabkan oleh variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan solusi pemanfaatan turbin angin tipe vertikal dengan skala kecil yang sesuai untuk diterapkan di Indonesia.
2. Memberikan penjelasan tentang pengaruh variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ) dan kecepatan angin ( $v$ ) terhadap kontur dan vektor aliran, torsi statis, koefisien torsi statis, gaya *drag* dan gaya *lift* dari turbin angin Lenz 2.
3. Informasi dari kondisi operasi turbin ini nantinya akan berpengaruh terhadap dasar pemilihan dari desain turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 yang optimum apabila dilakukan penelitian selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Turbin Angin

Turbin angin merupakan sebuah mesin yang dapat mengubah energi angin menjadi tenaga listrik. Turbin angin terhubung ke beberapa jaringan listrik, seperti sirkuit pengisian baterai, sistem tenaga skala perumahan, jaringan terisolasi atau pulau, dan jaringan utilitas besar. Dalam turbin angin modern, proses konversi aktual menggunakan gaya *lift* aerodinamis dasar untuk menghasilkan torsi positif bersih pada poros yang berputar, yang pertama-tama menghasilkan tenaga mekanik dan kemudian mengubahnya menjadi listrik di generator. Turbin angin sendiri secara luas diklasifikasikan ke dalam turbin tipe *drag* dan turbin tipe *lift*.

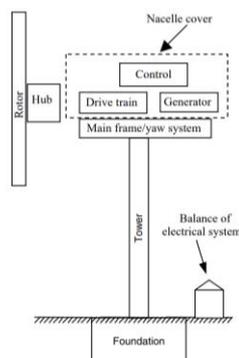


**Gambar 2. 1** Instalasi turbin angin (*Onshore and Offshore Wind Energy, 2012*)

Turbin tipe *drag* mencapai kinerja maksimum pada *tip speed ratio* yang lebih rendah dan juga *blade* bergerak lebih lambat dari kecepatan angin sementara turbin tipe *lift* mencapai kinerja optimalnya pada *tip speed ratio* yang lebih tinggi dan kecepatan *blade* selalu lebih besar dari kecepatan angin sehingga bergerak lebih cepat. *Blade* turbin tipe *lift* biasanya memiliki profil *aerofoil*, sedangkan *blade* turbin tipe *drag* tidak. Turbin tipe *drag* sebagian besar digunakan pada saat daya yang rendah diperlukan, seperti memompa air untuk irigasi dan penggunaan lainnya, sementara turbin tipe *lift* disesuaikan untuk pembangkit listrik.

#### 2.1.1 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

*Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) merupakan tipe turbin angin yang umumnya beroperasi pada kecepatan tinggi, dimana turbin angin tipe ini terdapat dua macam, yaitu *two-bladed* HAWT dan *three-bladed* HAWT. HAWT mempunyai sumbu putar yang terletak sejajar dengan permukaan tanah dan sumbu putar rotor yang searah dengan arah angin, serta arah putaran rotor yang tegak lurus dengan arah angin. Berdasarkan letak rotor terhadap arah angin, turbin angin tipe ini dibedakan menjadi dua macam, yaitu *upwind* dan *downwind*. Turbin angin jenis *upwind* memiliki rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan turbin angin jenis *downwind* memiliki rotor yang membelakangi arah datang angin.



**Gambar 2. 2** Komponen pada HAWT (*Wind energy explained, 2009*)

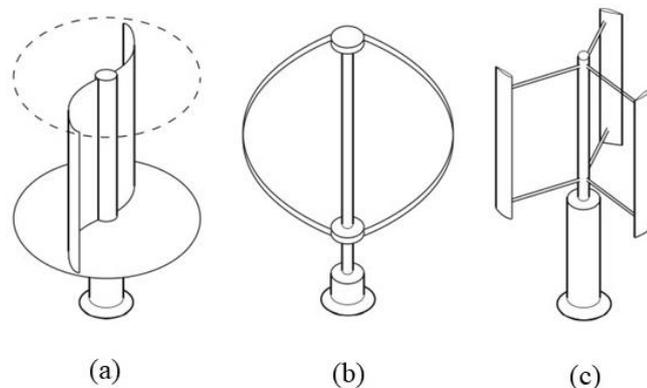
Prinsip kerja turbin angin HAWT ialah mengubah energi kinetik dari gerakan angin menjadi energi mekanik melalui putaran rotor. Setelah itu, energi yang diubah ini dapat ditransmisikan melalui poros & rangkaian roda gigi menuju generator, yang kemudian oleh generator energi akan diubah dari mekanik menjadi energi listrik untuk menghasilkan listrik. Turbin angin dapat berputar karena ada perbedaan tekanan antara dua sisi rotor *blade*, sehingga mampu berputar terhadap pusat rotornya (*Rotor Hub*). Selain itu, turbin angin HAWT dapat berputar akibat adanya vektor dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan dari desain aerodinamis atau geometri penampang *blade* itu sendiri.

HAWT memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan VAWT, salah satunya adalah HAWT memiliki efisiensi yang lebih besar daripada VAWT saat mengekstrak energi dari gaya angin karena desainnya yang memungkinkan untuk mengekstrak energi melalui putaran penuh *blade* ketika ditempatkan di bawah aliran angin yang konsisten. Namun, HAWT memiliki kelemahan, yaitu turbin angin HAWT harus selalu diarahkan ke arah angin untuk bekerja secara efisien. Dengan arah angin yang tidak dapat diprediksi, diperlukan mekanisme ekstra untuk memastikan *blade* akan selalu menghadap ke arah angin untuk mengekstrak output daya maksimum.

### 2.1.2 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

VAWT merupakan jenis turbin angin di mana poros rotor utama diatur melintang terhadap arah angin. Salah satu keunggulan turbin angin tipe ini adalah letak generator dan *gearbox* yang dapat diletakkan dekat dengan tanah guna membantu masalah perawatan. Aspek positif lainnya yakni terkait dengan *omnidirectionally*, yang berarti tidak diperlukannya pelacakan arah angin tidak seperti HAWT, dan kemungkinan beroperasi pada kecepatan rendah atau dengan kondisi angin yang bervariasi. Hal lain yang menguntungkan adalah biaya fabrikasi yang rendah dan kemampuan untuk meningkatkan daya yang dihasilkan per unit luas lahan. VAWT hadir dengan dua tipe dasar, yaitu turbin angin Darrieus dan turbin angin Savonius yang memiliki keunggulan masing-masing pada tiap tipenya.

Dikarenakan kemampuan berputar pada kecepatan angin yang rendah ini, proses *self-start* turbin VAWT dapat bekerja pada kecepatan angin yang juga lebih rendah dibandingkan HAWT, sehingga relatif lebih sulit. Secara konstruksi dan desain, turbin ini lebih praktis serta tidak perlu dibangun dengan struktur yang tinggi sehingga secara biaya akan lebih murah. Namun, secara kekurangan, turbin VAWT memiliki efisiensi yang lebih rendah. Selain itu, VAWT juga memproduksi *bending moment* pada poros yang lebih besar dibanding HAWT akibat beban yang besar pada poros dan *bearingnya* sehingga memungkinkan terjadinya kegagalan.

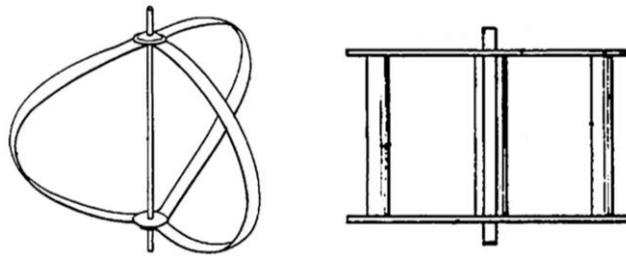


**Gambar 2. 3** Jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (a) tipe Savonius (b) tipe Darrieus (c) tipe H-Darrieus (A.P.Schaffarczyk, *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*, 2014)

## 2.2 Turbin Angin Tipe Darrieus

Turbin Darrieus merupakan salah satu jenis turbin angin yang tergolong dalam turbin angin sumbu vertikal atau VAWT. Turbin tipe Darrieus pertama kali diperkenalkan di Prancis sekitar tahun 1925 oleh G.J.M Darrieus. Turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus mempunyai bentuk *blade* yang disusun dalam posisi simetris terhadap poros. Dengan pengaturan seperti itu, turbin tipe ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin. Turbin angin tipe Darrieus memiliki efisiensi yang baik, namun menghasilkan tekanan yang berulang terusmenerus pada suatu bagian yang seringkali menyebabkan sebuah material mengalami *fatigue* pada menaranya. Dorongan eksternal dibutuhkan untuk memutar turbin Darrieus, dikarenakan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus memiliki torsi awal yang sangat rendah. Turbin angin tipe Darrieus mengadopsi penampang *airfoil* pada penampang *blade* nya, dimana turbin ini memiliki dua jenis geometri *blade*, yaitu *curved-blade* dan *straight-blade*.

Turbin angin tipe Darrieus ini menggunakan prinsip kerja, yaitu dengan memanfaatkan gaya angkat/*lift* untuk memutar rotor. Keuntungan dari turbin Darrieus adalah, efisiensi turbin angin tipe Darrieus sama besarnya dengan efisiensi turbin angin jenis horizontal (HAWT), serta harga yang relatif murah. Keuntungan lain dari penggunaan turbin angin tipe Darrieus adalah jika dibandingkan dengan turbin angin tipe savonius, turbin ini memiliki efisiensi yang relatif lebih tinggi, namun turbin tipe Darrieus hanya dapat beroperasi pada kecepatan angin tinggi. Hal ini dikarenakan, turbin angin tipe Darrieus tidak memiliki mekanisme *self-start*, sehingga membutuhkan *self-starting assist mechanism*.

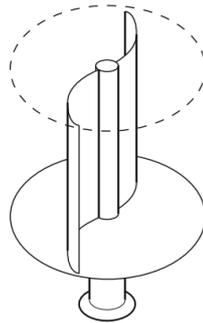


Gambar 2. 4 Geometri Vertical Axis Wind Turbine tipe Darrieus (Tiju, et al 2015)

## 2.3 Turbin Angin Tipe Savonius

Turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Savonius, pertama kali ditemukan oleh Sigurd J. Savonius sekitar tahun 1920. Turbin angin sumbu vertikal ini adalah jenis turbin angin vertikal paling sederhana dan menjadi versi besar dari anemometer. Turbin angin tipe Savonius merupakan turbin angin sumbu vertikal yang terdiri dari dua *blade* yang berbentuk setengah silinder atau elips dan disusun dalam bentuk “S”, dimana bentuk *blade* cembung di satu sisi, namun di sisi yang menghadap langsung ke arah angin berbentuk cekung. Turbin angin tipe ini menggunakan gaya *drag* untuk memutar rotor. Koefisien *drag* permukaan cekung lebih besar dari pada permukaan cembung. Oleh karena itu, setengah silinder cekung yang menghadap angin akan mengalami gaya *drag* yang lebih besar daripada yang cembung, sehingga memaksa rotor untuk berputar. Turbin angin tipe Savonius memiliki efisiensi sebesar 31%.

Turbin angin tipe Savonius memiliki beberapa kelebihan, salah satunya adalah turbin tipe ini memiliki kemampuan untuk *self-start*. Kemampuan untuk *self-start* merupakan salah satu faktor kritis untuk turbin angin, sehingga turbin angin tipe Savonius dapat bekerja di tempat yang memiliki kecepatan angin rendah dan bervariasi dari waktu ke waktu. Keuntungan lain dari penggunaan turbin angin tipe Savonius adalah biaya pembangunan yang relatif lebih murah jika dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal tipe lainnya. Kemudian turbin angin tipe Savonius memiliki torsi awal yang tinggi, serta turbin tipe ini kurang terpengaruh oleh turbulensi udara. Namun, turbin angin tipe Savonius memiliki efisiensi yang relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin angin sumbu vertikal tipe Darrieus.



**Gambar 2. 5** Geometri *Vertical Axis Wind Turbine* tipe Savonius (A.P.Schaffarczyk, *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*, 2014)

## 2.4 Turbin Angin Tipe Lenz 2

Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz ditemukan oleh Edwin Lenz pada tahun 2007, dimana turbin angin tipe ini diharapkan dapat beroperasi pada kondisi kecepatan angin rendah dan pola aliran turbulen, serta memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin angin tipe Darrieus dan Savonius, yaitu sekitar 40%. Desain turbin angin tipe Lenz dibentuk karena adanya permasalahan perihal *self-starting* pada turbin Darrieus, dan efisiensi yang kurang baik pada turbin tipe Savonius. Turbin angin tipe Lenz menggabungkan prinsip kerja turbin angin sumbu vertikal (VAWT) tipe Darrieus yang memanfaatkan pada gaya *lift* dan turbin angin tipe Savonius yang memanfaatkan gaya *drag*, serta merupakan model yang sesuai untuk pembangkit listrik skala kecil untuk keperluan rumah tangga. Keuntungan turbin angin tipe Lenz ini berkaitan dengan rendahnya biaya fabrikasi karena kesederhanaannya, ketahanannya, keandalannya, dan kemungkinan bekerja pada kondisi angin dengan kecepatan rendah, sehingga *self-starting* yang dimiliki turbin angin tipe Lenz lebih mudah, serta tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan Savonius. Berikut merupakan ilustrasi desain VAWT tipe lenz 2:



**Gambar 2. 6** Ilustrasi bentuk VAWT tipe Lenz 2 (Nishioka, et al 2018)

## 2.5 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan rasio gaya inersia terhadap gaya *viscous*, yang mana bilangan reynolds itu sendiri ialah bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengkategorikan sistem fluida di mana pengaruh viskositas penting dalam mengendalikan kecepatan atau pola aliran suatu fluida. Secara umum, jenis aliran pada fluida terbagi menjadi tiga macam yaitu aliran laminar, aliran transisi, dan aliran turbulen.

Berdasarkan rekomendasi API 13D, diasumsikan bahwa bilangan Reynolds kurang dari atau sama dengan 2100 menunjukkan aliran laminar, dan bilangan Reynolds lebih besar dari 2100 menunjukkan aliran turbulen, sedangkan aliran transisi, pada aplikasinya jarang digunakan sehingga aliran fluida lebih sering diklasifikasikan menjadi dua aliran saja, yakni laminar dan turbulen. Secara matematis, bilangan Reynolds didefinisikan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana:

- Re : Bilangan Reynolds
- $\rho$  : Densitas fluida ( $\text{Kg/m}^3$ )
- $v$  : Kecepatan aliran fluida (m/s)
- $L$  : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m)
- $\mu$  : Viskositas absolut fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

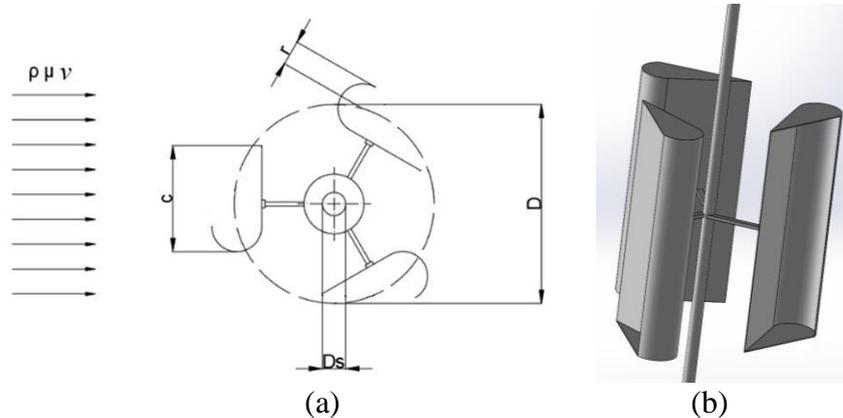
Pada kasus penelitian tugas akhir ini, nilai panjang karakteristik ( $L$ ) benda uji dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$L = D + 2r \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

- $r$  : Blade radius leading edge (m)
- $D$  : Diameter turbin (m)

Pada penelitian ini, nilai panjang karakteristik ( $L$ ) yang digunakan dideskripsikan pada gambar berikut:



**Gambar 2. 7** Skema VAWT tipe lenz 2 (a) 2 dimensi (b) 3 dimensi

## 2.6 Pemodelan Turbulensi

Aliran turbulen merupakan salah satu fenomena fisik dimana suatu aliran memiliki pola yang tidak beraturan dan menghasilkan pusaran yang bersifat acak. Umumnya aliran turbulen mengandung *eddy* dan *swirl* didalamnya. *Eddy* sendiri ialah pusaran yang ditunjukkan oleh suatu aliran turbulen saat aliran tersebut diinjeksi oleh suatu fluida. *Eddie* memiliki dua jenis ukuran, yaitu *large scale Eddy* dan *small scale Eddy*. Munculnya *large scale Eddy* pada suatu aliran menandakan bahwa aliran tersebut merupakan aliran turbulen.

### 2.6.1 Sifat-sifat Turbulensi

Tennekes dan Lumley menyatakan bahwa suatu aliran turbulen tidak dapat didefinisikan, namun dapat diidentifikasi berdasarkan sifat-sifat turbulensi, antarlain ketidak beraturannya suatu aliran, kemudian sifat dispersif atau menyebar pada suatu aliran, dimana aliran turbulen cenderung akan memiliki sifat dispersif. Selanjutnya tingginya nilai bilangan Reynolds dalam suatu aliran juga menjadi salah satu sifat turbulensi, yangmana aliran turbulen selalu memiliki bilangan Reynolds yang tinggi. Nilai absolut dari bilangan Reynolds untuk turbulen selalu relatif terhadap konfigurasi aliran. Sebagai contoh, aliran eksternal akan memiliki bilangan Reynolds yang lebih tinggi daripada aliran internal. Tetapi nilai relatif bilangan Reynolds aliran turbulen selalu lebih tinggi daripada aliran laminar. Selain itu, vortisitas tiga dimensi juga merupakan salah satu sifat turbulensi, dimana Apapun konfigurasinya, aliran turbulen selalu memiliki vortisitas/ pusaran tiga dimensi.

### 2.6.2 Two-equation Model

*Reynolds Average Navier Stokes (RANS) based model* terdiri dari beberapa model turbulensi yang biasa digunakan untuk mensimulasikan peristiwa fluida pada analisis CFD, yaitu *one-equation model*, *two-equation model*, *V2F model*. *Two-equation model* sendiri merupakan salah satu jenis model yang mengekspresikan *eddy viscosity* dalam bentuk *specific turbulent kinetic energi (k)* dan menggunakan dua persamaan tambahan agar *Reynolds Stress Tensor* dapat diselesaikan. Beberapa persamaan tambahan yang digunakan dapat berupa *k-ε* atau *k-ω*. Persamaan tersebut menjadi model turbulensi yang termasuk dalam *two-equation model*, dimana model turbulensi tersebut memiliki jenis/tipe masing-masing yang tentunya digunakan sesuai kebutuhan simulasi yang akan dilakukan.

*K-ε model* memiliki beberapa jenis model turbulensi yang akan digunakan sesuai dengan kondisi aliran dan batasan saat dilakukan simulasi. Model tersebut antaralain *standard k-ε model*, *RNG k-ε model*, dan *realizable k-ε model*. *Standard k-ε model* merupakan model turbulensi yang umumnya banyak digunakan dalam pengaplikasian di dunia industri. Hal ini dikarenakan model turbulensi ini, memiliki keakuratan yang tinggi dalam memodelkan suatu peristiwa turbulensi dan mampu mensimulasikan berbagai kasus aliran dengan baik. Pada model turbulensi *standard k-ε* juga terdapat *submodel* untuk kompresibilitas, daya apung, pembakaran, dan masih banyak lagi. *Standard k-ε model* juga merupakan model yang dapat menunjukkan konvergensi yang baik. Namun, *standard k-ε model* hanya valid untuk digunakan pada aliran *fully turbulent*, dan kurang akurat untuk aliran kompleks yang melibatkan gradien tekanan yang tinggi, aliran separasi, kelengkungan *streamline* yang kuat.

Model turbulensi lain yang termasuk dalam *k-ε model* ialah *Renormalization Group (RNG) k-ε model*. *RNG k-ε model* umumnya lebih akurat dibandingkan dengan *standard k-ε model*, terutama untuk aliran yang berputar. Model turbulensi ini juga memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan *standard k-ε model* untuk aliran *shear* yang lebih kompleks, aliran dengan vortisitas, aliran dengan *strain rates*, *swirl*, dan separasi yang tinggi, seperti misalnya separasi *boundary layer*. Model turbulensi ini juga sesuai untuk simulasi udara di dalam ruangan. Namun, *RNG k-ε model* kurang akurat untuk evolusi *vortex*, dan tidak stabil untuk solusi *steady-state*, serta model turbulensi ini membutuhkan waktu operasi pada CPU yang lebih lama dibandingkan dengan *standard k-ε model*.

Selain *RNG k-ε model*, *Realizable k-ε model*, juga merupakan salah satu jenis model turbulensi yang termasuk dalam *k-ε model*. *Realizable k-ε model* memiliki kinerja yang sangat baik untuk aliran yang mengandung rotasi, *boundary layers* dibawah gradien tekanan yang tinggi, aliran separasi, dan resirkulasi. Model turbulensi *Realizable k-ε model* juga cenderung lebih akurat untuk memprediksi tingkat penyebaran *planar* dan *round jets*. Model turbulensi ini juga relatif lebih akurat dan lebih mudah untuk dikonvergensi dibandingkan dengan *RNG k-ε model*.

Bukan hanya *k-ε model*, *k-ω model* juga memiliki dua jenis model turbulensi yang dapat digunakan sesuai dengan kondisi aliran yang akan disimulasikan. Model tersebut diantaranya adalah *standard k-ω model* dan *SST k-ω model*. Model *k-ω*, dapat diintegrasikan ke *wall* tanpa perlu menggunakan fungsi *wall* dan model ini akurat dan kuat untuk berbagai aliran *boundary layer* dengan gradien tekanan. *Standard k-ω model* merupakan model turbulensi yang umumnya digunakan/diadopsi oleh komunitas *aerospace* dan *turbomachinery*. Model ini memiliki beberapa *submodel*/opsi, yaitu efek kompresibilitas, aliran transisi, dan koreksi *shear-flow*. *Standard k-ω model* juga menunjukkan kinerja yang sangat baik untuk aliran yang dibatasi *wall* dan memiliki bilangan Reynolds rendah dan model ini seringkali akurat pada suatu kondisi dimana model *k-ε* mengalami kegagalan. Namun, *Standard k-ω model* tidak akurat untuk gradien tekanan yang merugikan, kelengkungan yang kuat, dan *jet flow*, serta model ini terlalu sensitif terhadap sifat turbulensi aliran *freestream*.

Model turbulensi lain yang termasuk dalam *k- $\omega$  model* ialah *Shear Stress Transport (SST)* *k- $\omega$  model*. *SST k- $\omega$  model* memiliki kelebihan yang sama seperti *standard k- $\omega$  model* dan memiliki kinerja yang akurat jika perhitungan/fenomena terjadi didekat *wall*. Namun, ketergantungan pada jarak *wall* membuat model turbulensi *SST k- $\omega$*  kurang cocok untuk mensimulasikan aliran *free shear*, terlebih model turbulensi ini membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai konvergen. Selain itu, model turbulensi *SST k- $\omega$*  juga melebih-lebihkan fenomena turbulensi pada daerah dengan regangan normal yang tinggi, walaupun sebenarnya hal ini masih lebih baik dibandingkan jika digunakan model dari *k- $\epsilon$* .

## 2.7 Gaya Drag dan Gaya Lift

Gaya *drag* merupakan gaya yang bekerja berlawanan dengan gerak relatif benda apapun yang bergerak terhadap fluida di sekitarnya. Alasan utama berkembangnya gaya *drag* adalah pemisahan aliran. Pemisahan aliran menyebabkan penurunan tekanan pada permukaan yang menghasilkan gaya *drag*. Persamaan untuk gaya *drag* dapat dituliskan sebagai berikut:

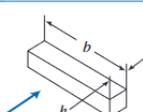
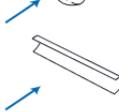
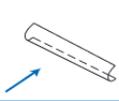
$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana:

- $F_D$  : Gaya *drag* (N)
- $C_D$  : Koefisien *drag*
- $\rho$  : Densitas fluida (Kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : Luas sapuan turbin yang bersinggungan dengan angin (m<sup>2</sup>)
- $v$  : Kecepatan aliran fluida (m/s)

Sedangkan, Koefisien *drag* ialah besaran tak berdimensi yang menunjukkan tingkat mudahnya suatu benda dipengaruhi oleh gaya *drag*. Koefisien ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti bentuk, situasi gerak, dan medium aliran. Koefisien *drag* memberikan kontribusi efek linier terhadap gaya *drag* udara yang dihasilkan. Dalam definisi sederhana, koefisien *drag* adalah rasio gaya *drag* dan tekanan benda. Nilai koefisien *drag* dapat dilihat pada tabel berikut:

**Tabel 2. 1** Nilai koefisien drag untuk beberapa bentuk bidang permukaan pada  $Re \geq 1000$  (Pitchard et al, 2011)

Drag Coefficient Data for Selected Objects ( $Re \approx 10^3$ ) <sup>a</sup>			
Object	Diagram		$C_D(Re \approx 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$	2.05
		$b/h = 1$	1.05
Disk			1.17
Ring			1.20 <sup>b</sup>
Hemisphere (open end facing flow)			1.42
Hemisphere (open end facing downstream)			0.38
C-section (open side facing flow)			2.30
C-section (open side facing downstream)			1.20

<sup>a</sup>Data from Hoerner [16].

<sup>b</sup>Based on ring area.

Gaya *lift* merupakan gaya yang terjadi karena adanya perbedaan kecepatan dan tekanan udara pada *airfoil* bagian atas dan bawah yang besarnya bergantung pada geometri *airfoil*, kondisi operasi, dan kecepatan udara disekitarnya. Gaya *lift* yang dihasilkan oleh *airfoil* inilah yang kemudian dimanfaatkan pada berbagai aplikasi teknik. Secara matematis, persamaan gaya *lift* dapat ditulis sebagai berikut:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

- $F_L$  : Gaya *lift* (N)
- $C_L$  : Koefisien *lift*
- $\rho$  : Densitas fluida (Kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : Luas sapuan turbin yang bersinggungan dengan angin (m<sup>2</sup>)
- $v$  : Kecepatan aliran fluida (m/s)

## 2.8 Torsi Statis

Torsi statis merupakan nilai dari gaya yang menyebabkan suatu benda mengalami rotasi. Besarnya nilai torsi yang terjadi pada turbin angin Lenz 2 dalam hal ini menggunakan perhitungan dengan bergantung pada gaya *drag* angin. Untuk gaya torsi statis tersebut dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$T_s = F_D \cdot R \dots\dots\dots(2.5)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan untuk mencari gaya *drag*, maka didapatkan persamaan:

$$T_s = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

- $T_s$  : Torsi statis yang dihasilkan oleh putaran poros (Nm)
- $R$  : Jari-jari turbin Lenz 2 (m)

Dengan nilai luas sapuan turbin yang bersinggungan dengan angin ( $A$ ) didapat melalui persamaan berikut:

$$A = L \cdot H \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana:

- $H$  : *Blade Span* (m)

Sedangkan nilai *Coefficient of Static Torque* ( $C_{TS}$ ) adalah perbandingan antara torsi statis terhadap torsi teoritis atau dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$C_{TS} = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R} = \frac{4 \cdot T_s}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot D} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana:

- $C_{TS}$  : Koefisien torsi statis

## 2.9 Solidity

Soliditas dan jumlah *blade* merupakan dua parameter yang secara signifikan mempengaruhi kinerja aerodinamis VAWT. Soliditas menunjukkan rasio luas keseluruhan *blade* terhadap luas sapuan turbin dan didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{D} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana:

- N : Jumlah *blade*
- c : *Chord length* pada *blade* (m)
- D : Diameter turbin (m)

Nilai *solidity* mempengaruhi kecepatan putar turbin angin dimana, semakin kecil nilai *solidity* maka kecepatan putar turbin angin akan semakin meningkat, dan sebaliknya.

### 2.10 Aspect Ratio (AR)

*Aspect ratio* merupakan perbandingan antara *blade span* dengan panjang diameter turbin. Semakin kecil nilai *aspect ratio* maka performa rotor akan semakin kecil pula. Bentuk *blade* yang panjang dan ramping (*airfoil*) dengan nilai *aspect ratio* yang tinggi sangat disarankan untuk turbin angin Darrieus tipe H-rotor. Nilai *Aspect ratio* dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$\text{Aspect Ratio (AR)} = \frac{\text{Blade Span}}{\text{Diameter Turbin}} = \frac{H}{D} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana:

- H : *Blade span* (m)
- D : Diameter turbin (m)

### 2.11 Computational Fluid Dynamics (CFD)

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan metode yang menggunakan teknik dari fisika, matematika terapan dan ilmu komputer untuk memodelkan, memprediksi dan memvisualisasikan bagaimana fluida, yaitu gas atau cairan, mengalir. Sebuah prediksi kualitatif dan kuantitatif dapat disatukan dengan bantuan CFD yang menggunakan alat pemodelan matematika, perhitungan numerik dan *software* untuk merancang, memahami, membangun dan memprediksi skenario yang diperlukan. CFD juga merupakan metode perhitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volum dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap elemen pembagiannya. Prinsip dari CFD ialah suatu ruang yang berisi fluida yang akan dilakukan penghitungan dibagi menjadi beberapa bagian, hal ini sering disebut dengan sel dan prosesnya dinamakan *meshing*. Bagian-bagian yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol penghitungan yang akan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software*. Nantinya, pada setiap titik kontrol perhitungan akan dilakukan menggunakan *software* dengan batasan *domain* dan *boundary condition* yang telah ditentukan. Prinsip inilah yang banyak digunakan pada proses perhitungan dengan menggunakan bantuan komputasi komputer.

### 2.12 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa sumber referensi yang dapat mendukung dan menjadi acuan dalam penelitian ini berupa penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik yang sedang dibahas dalam penelitian ini, yaitu simulasi performa turbin angin tipe VAWT. Berikut merupakan beberapa penelitian terdahulu yang akan dijelaskan guna mendukung penelitian ini:

#### 2.12.1 Abu-El-Yazied et al, 2015

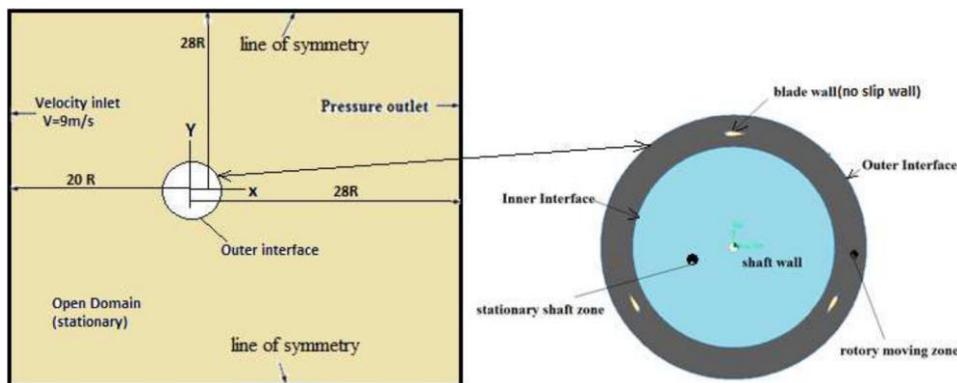
Penelitian ini dilakukan oleh Abu-El-Yazied et al pada tahun 2015, dengan metode analisis simulasi komputasi fluida (CFD) dua dimensi pada ANSYS Fluent 14.5 terhadap turbin angin tipe *straight-bladed* Darrieus guna mempelajari pengaruh perubahan pada beberapa parameter desain, seperti jumlah *blade*, *blade chord length*, dan *solidity* turbin terhadap performa turbin angin tipe H-Darrieus dengan tidak merubah *pitch angle*. Penelitian ini

dilakukan menggunakan beberapa parameter, yaitu jumlah *blade* dan *blade chord length*, yang akan memengaruhi efisiensi dari turbin angin tipe Darrieus yang digunakan. Untuk memvalidasi hal tersebut, penelitian ini menggunakan dua belas model dengan jumlah *blade* dan variasi *blade chord length* serta *solidity* yang berbeda, dan dengan model *blade airfoil* NACA 0021. Pada penelitian ini, digunakan kecepatan angin konstan sebesar 9 m/s dan jumlah *blade* 2, 3, 4, dan 6 yang beroperasi pada angular yang berbeda. Berikut merupakan detail nilai parameter yang digunakan pada setiap model dalam penelitian ini:

**Tabel 2. 2** Detail nilai parameter penelitian (Abu-El-Yazied et al, 2015)

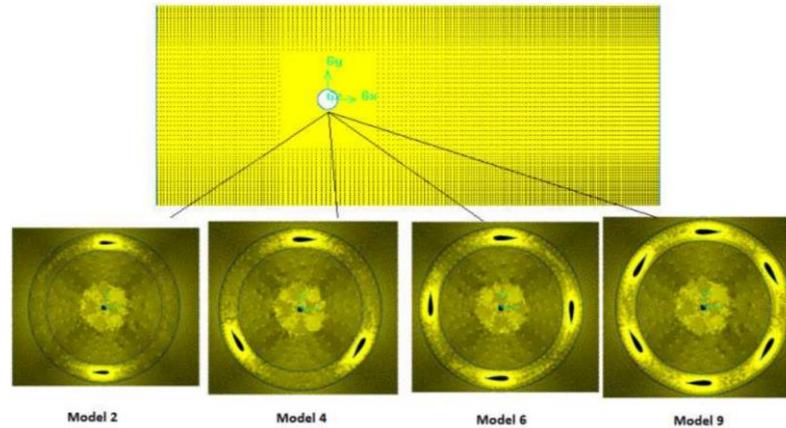
Features	Models											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Drotor (mm)	1030											
Hrotor (m)	1											
Blade profile	NACA 0021											
<i>c</i> (mm)	85,8	128,7	85,8	170	85,8	170	64,35	85,8	170	42,9	250	300
Solidity ( $\sigma$ )	0,17	0,25	0,25	0,5	0,33	0,66	0,25	0,5	0,99	0,25	0,48	0,87
Number of blades (n)	2	2	3	3	4	4	4	6	6	6	2	3

Model geometri yang digunakan pada penelitian ini memiliki beberapa *boundary condition*, yaitu *inlet* yang ditetapkan sebagai *velocity inlet* dengan profil kecepatan konstan 9 m/s, kemudian *outlet* ditetapkan sebagai *pressure outlet*, dan dua *boundary condition symmetry* untuk dua dinding samping. Berikut merupakan ilustrasi domain model geometri yang digunakan pada penelitian ini:



**Gambar 2. 8** Ilustrasi domain model geometri dan *boundary condition* yang digunakan (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Proses selanjutnya adalah pembuatan *mesh*, dimana seluruh *mesh* yang digunakan pada simulasi dalam penelitian ini memiliki ukuran *grid* dan *growth factor* yang sama dengan tipe *hexahedral*. Pada penelitian ini digunakan model turbulensi *realizable k-ε* dengan *standard wall function*. Setelah dilakukan simulasi dengan *software*, ditemukan bahwa nilai  $y^+$  yang terletak dekat semua *wall* adalah sekitar empat puluh. Nilai tersebut masih masuk dalam kisaran nilai yang direkomendasikan, yaitu  $30 < y^+ < 300$ . Berikut merupakan sampel diskretisasi *mesh* 2D dari model yang diuji:



**Gambar 2. 9** Sampel diskretisasi *mesh* 2D pada model geometri (Abu-El-Yazied et al, 2015)

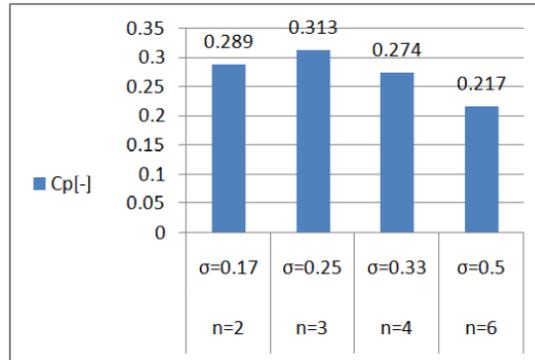
Penggunaan model turbulensi *realizable k-ε* direkomendasikan untuk *body* yang berputar. Model *realizable k-ε* umumnya memberikan hasil yang lebih baik untuk aliran *swirl* dan aliran yang melibatkan pemisahan jika dibandingkan dengan model *k-ε standard*. Pada penelitian ini juga dipilih *near wall treatment* menggunakan *standard wall function*. Penelitian ini melibatkan penerapan skema SIMPLE. Gradien dengan metode *least squares cell based* dan dengan *standard pressure*, serta skema *momentum second order upwind* dipilih karena dinilai sesuai untuk penelitian ini. Simulasi dimulai dengan melanjutkan menggunakan *second order*, dan di antara beberapa formulasi *transient* yang tersedia, *second order implicit* dinilai sesuai untuk diterapkan pada simulasi yang dilakukan. Kriteria konvergensi untuk solusi yang ditetapkan sebesar  $10^{-5}$ . Data hasil simulasi yang dilakukan, diolah untuk menentukan gaya yang bekerja pada masing-masing *airfoil* yang berputar dan untuk mendapatkan nilai *tip speed ratio* optimum yang memberikan *output* daya maksimum ketika angin melewati turbin pada kecepatan 9 m/s.

Hasil berikut menunjukkan nilai koefisien daya dari model yang dianalisis yang disebutkan dalam Tabel 2.2 sebagai fungsi *tip speed ratio*, untuk kecepatan angin 9 m/s. Analisis numerik dilakukan untuk memahami pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap perilaku *straight-bladed* turbin angin sumbu vertikal. Hasil yang diperoleh adalah bahwa, koefisien daya maksimum meningkat seiring dengan meningkatnya soliditas dan jumlah *blade* untuk jumlah *blade* yang lebih rendah dari tiga dan sebaliknya, sebagaimana yang tertera pada tabel berikut:

**Tabel 2. 3** Detail nilai hasil simulasi untuk beberapa parameter pada model yang diuji (Abu-El-Yazied et al, 2015)

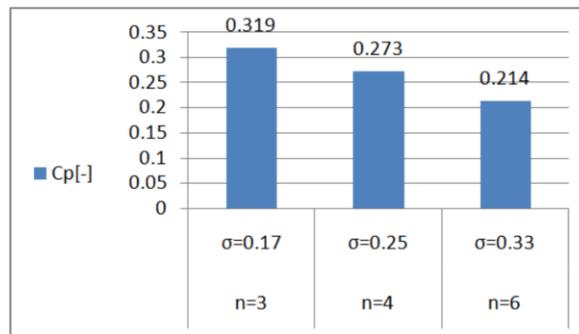
Model no.	n	$\lambda_{C_p,max}$	$C_{p,max}$	$\sigma$	% $C_{p,max}$	% $\lambda_{C_p,max}$
1	2	3,5	0,289	0,17	-7,67	33,59
2	2	2,62	0,3235	0,25	3,35	0
3	3	2,62	0,313	0,25	0	0
4	3	2,03	0,319	0,5	1,92	-22,52
5	4	2,62	0,274	0,33	-12,46	0
6	4	1,67	0,273	0,66	-12,78	-36,26
7	4	2,8	0,205	0,25	-34,5	6,87
8	6	2,32	0,217	0,5	-30,67	-11,45
9	6	1,67	0,214	0,99	-31,63	-36,26
10	6	2,8	0,022	0,25	-92,97	6,87
11	2	2,03	0,29	0,48	-7	-22,52
12	3	1,43	0,249	0,87	-20,45	-45,41

Berdasarkan data hasil simulasi juga didapatkan bahwa, nilai koefisien daya menurun seiring dengan meningkatnya soliditas dan jumlah *blade*. Analisis ini diperoleh pada nilai *blade chord length* sebesar 85,8 mm. Berikut merupakan grafik hasil pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap koefisien daya:



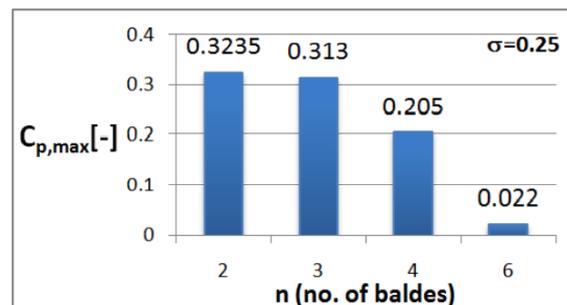
**Gambar 2. 10** Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas untuk model dengan *chord length* 85,8 mm (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Selain itu, simulasi yang sama dilakukan pada *blade* dengan nilai *chord length* sebesar 170 mm, dan didapat hasil yang sama seperti pada *blade* dengan *chord length* sebesar 85,8 mm yang tergambar pada grafik sebagai berikut:



**Gambar 2. 11** Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas untuk model dengan *chord length* 170 mm (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Berdasarkan pada tabel 2.3, juga didapat pengaruh *blade chord length* terhadap koefisien daya maksimum, yaitu pada nilai *solidity* yang sama, maka nilai koefisien daya maksimum meningkat seiring dengan peningkatan nilai *chord length* pada *blade*, dan seiring dengan berkurangnya nilai *chord length* pada *blade*, maka nilai hasil koefisien daya yang didapat pun akan semakin menurun/semakin kecil seperti yang ditunjukkan oleh grafik berikut:

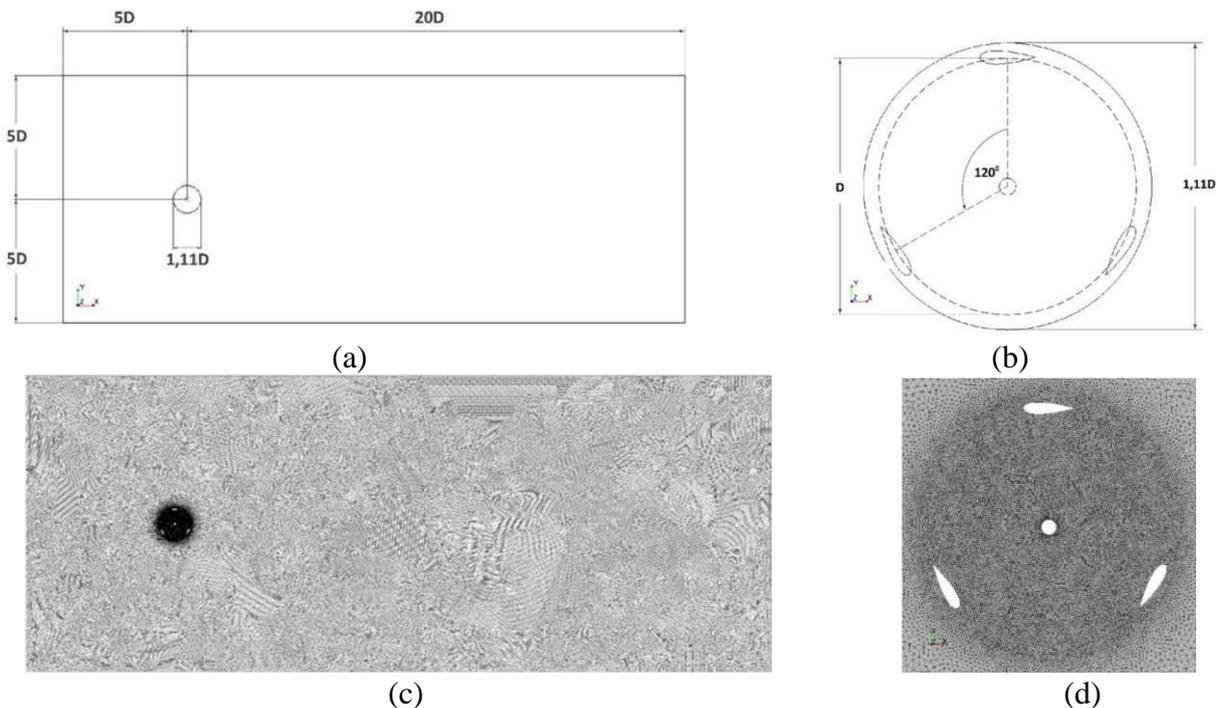


**Gambar 2. 12** Grafik perbandingan koefisien daya maksimum terhadap jumlah *blade* dan *chord length* pada nilai *solidity* yang sama (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Dapat disimpulkan melalui hasil penelitian ini bahwa, koefisien daya yang diharapkan secara numerik turun bersamaan dengan meningkatnya nilai soliditas rotor. Pada nilai soliditas yang sama, peningkatan *blade chord length* dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan koefisien daya.

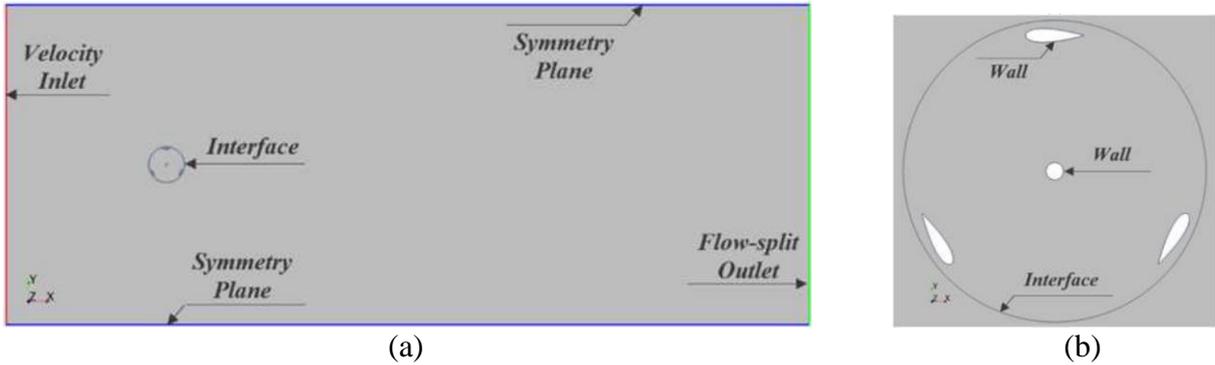
### 2.12.2 Taufiqurrahman & Suphandani, 2017

Penelitian ini dilakukan oleh Taufiqurrahman et al pada tahun 2017 dengan tujuan untuk mendapatkan desain turbin angin yang mampu memanfaatkan tenaga angin seoptimal mungkin berdasarkan nilai torsi dan koefisien daya yang didapat. Pada penelitian ini, digunakan metode penelitian numerik dua dimensi dengan analisis aliran *unsteady* menggunakan *software* STAR CCM+ 9.02.007-R8. Model turbin angin yang digunakan pada penelitian ini adalah turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil blade* sesuai dengan NACA 0024 dengan jumlah *blade* 3 dan 4. Pada penelitian ini digunakan variasi terhadap nilai kecepatan angin *freestream* yang akan disimulasikan agar mendapatkan nilai torsi dan koefisien daya yang optimal, yaitu sebesar 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s. Penelitian ini menggunakan metode *meshing*, *automated mesh* dengan tipe *tetrahedral mesh*. Pada simulasi yang akan dilakukan untuk memenuhi tujuan penelitian ini, digunakan *turbulence model* berupa *k-ε realizable*. Penelitian dilakukan dengan melalui tiga tahapan utama, yaitu tahap *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Tahap *pre-processing* mencakup pembuatan geometri, dan pembuatan *meshing* yang ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 2. 13** Tahap pembuatan geometri dan *meshing* (a) *domain* statis (b) *rotating domain* (c) *mesh* static domain (d) *mesh* rotating domain (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada tahap *pre-processing* juga dilakukan penetapan *boundary condition*, dimana *boundary condition* yang digunakan pada *inlet* adalah *velocity inlet* dengan nilai kecepatan *freestream* yang melaluinya yaitu 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 m/s, sedangkan pada *outlet* digunakan *flow-split outlet*, pada setiap *blade* dan poros digunakan *wall* dengan *rotation motion*, batas atas dan bawah sebagai *symmetry plane* dan pada pertemuan antar dua *domain* didefinisikan sebagai *interface*, seperti pada gambar berikut:

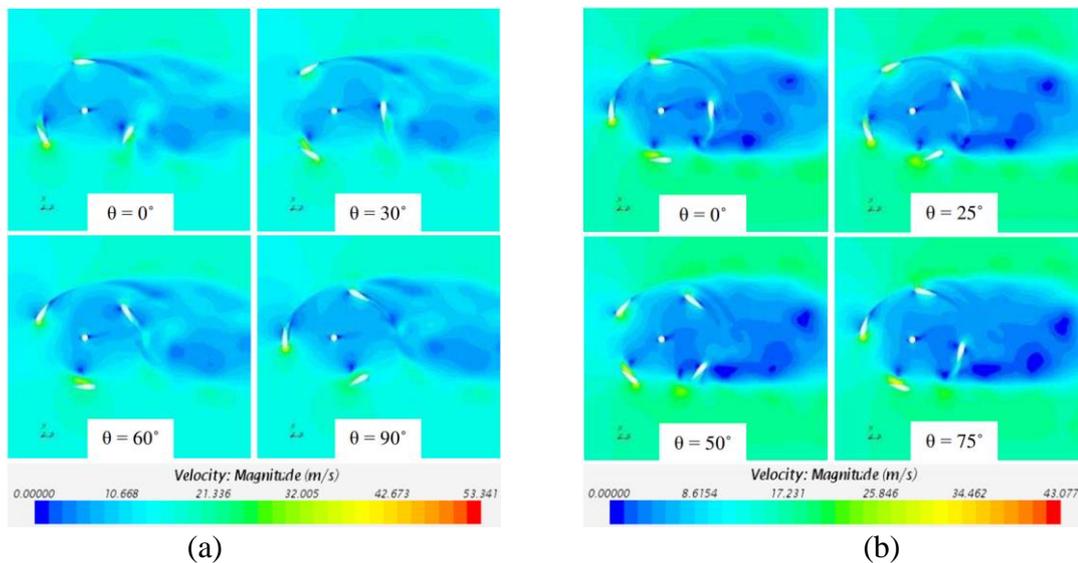


**Gambar 2. 14** Boundary condition turbin angin Darrieus tiga blade (a) static domain (b) rotating domain (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Fluida kerja yang digunakan pada simulasi ini adalah udara dengan nilai densitas  $1,18415 \text{ kg/m}^3$  (constant) dan dengan nilai *dynamic viscosity* sebesar  $1,85508 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$  (constant). Kriteria konvergensi yang ditentukan adalah  $10^{-5}$ . Kemudian, berdasarkan hasil perhitungan didapat nilai putaran turbin dan *tip speed ratio* untuk setiap kecepatan *freestream* seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut:

**Tabel 2. 4** Detail nilai putaran turbin dan *tip speed ratio* pada tiap kecepatan angin (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Kecepatan Angin (m/s)	Putaran Turbin (rpm)	Tip Speed Ratio
5	440	1,08
7	666	1,17
9	892	1,21
11	1119	1,25
13	1345	1,27
15	1572	1,28

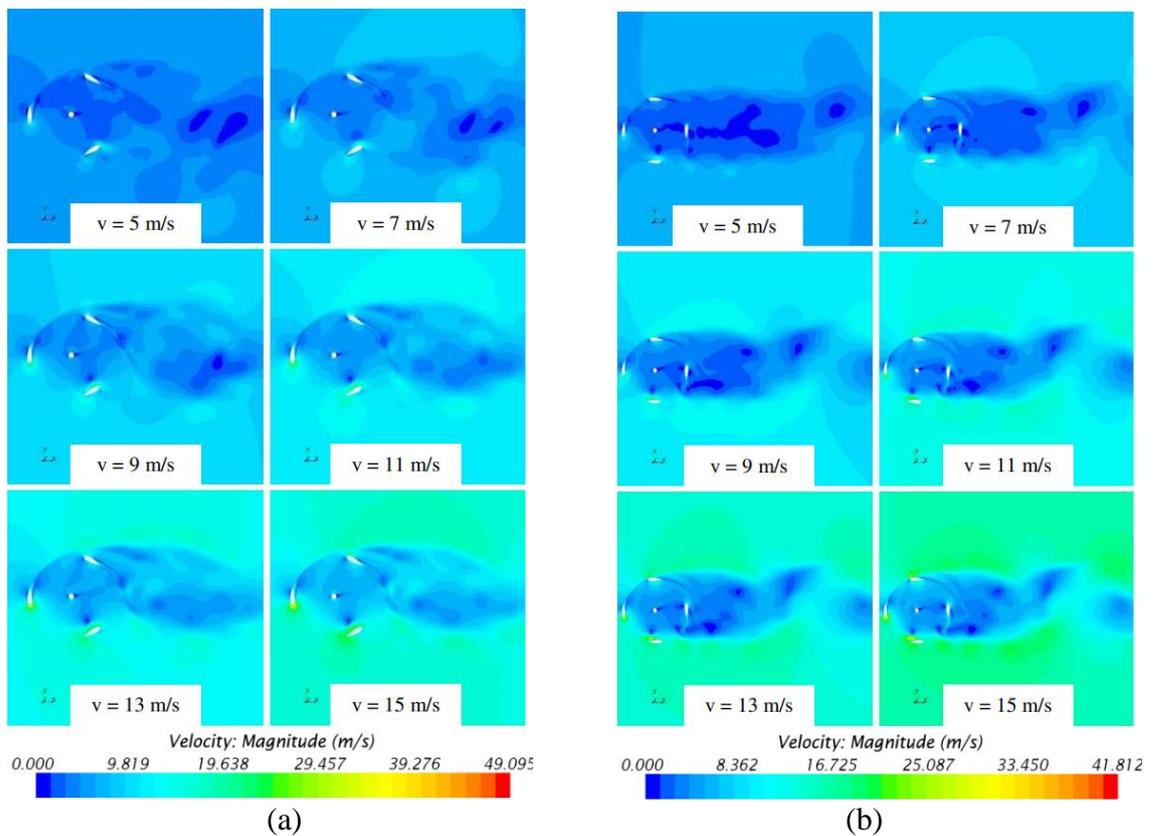


**Gambar 2. 15** Contour kecepatan angin 15 m/s pada berbagai sudut putar (a) tiga blade (b) empat blade (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

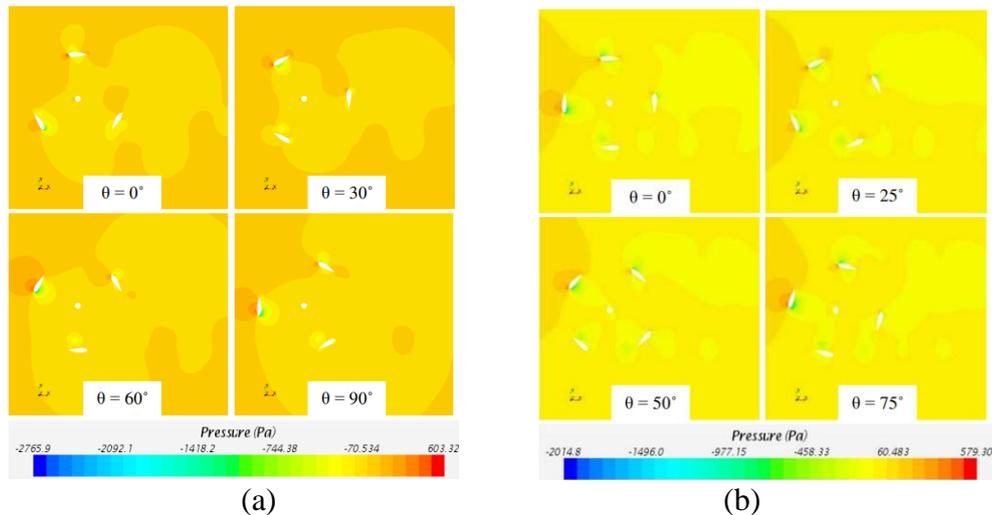
Berdasarkan gambar 2.15, pada sudut putar  $90^\circ$  mulai muncul *vortex* yang menyebabkan kecepatannya pun menurun. *Blade* turbin angin yang telah melalui sudut putar  $90^\circ$  mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai sudut putar  $360^\circ$ , dikarenakan adanya pengaruh dari *vortex* yang terbentuk dan kondisi kecepatan angin yang mengalir pada daerah

*downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*. Pada gambar *contour* kecepatan tersebut pertambahan sudut putar akan menambah nilai *angle of attack* dan mempengaruhi gaya *lift* yang terjadi. Ketika turbin angin mencapai sudut putar  $90^\circ$ , gaya *lift* yang terbentuk lebih besar daripada posisi sudut putar sebelumnya dikarenakan perbedaan tekanan antara sisi terluar dan sisi terdalam *blade*. Turbin angin Darrieus empat *blade* (gambar 2.15 (b)) memiliki kemampuan menghasilkan gaya *lift* dan torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin Darrieus tiga *blade*, dikarenakan banyaknya *blade* di daerah *downstream* yang menjadi penghambat *blade* di daerah *upstream*. Oleh karena itu, kecepatan maksimum pada *blade* turbin angin Darrieus empat *blade* tidak setinggi kecepatan maksimum pada *blade* turbin angin Darrieus tiga *blade*, begitu juga dengan nilai koefisien daya yang dihasilkannya.

Gambar 2.16, memperlihatkan *contour* kecepatan pada turbin angin tipe Darrieus dengan tiga *blade* dan empat *blade*, dimana kecepatan putar tertinggi turbin angin, terjadi ketika nilai kecepatan angin sebesar 15 m/s. Hal ini dikarenakan kenaikan kecepatan putar turbin berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan angin yang melalui turbin angin. Pada gambar kontur kecepatan tersebut pertambahan sudut putar akan menambah nilai *angle of attack* dan mempengaruhi gaya *lift* yang terjadi.



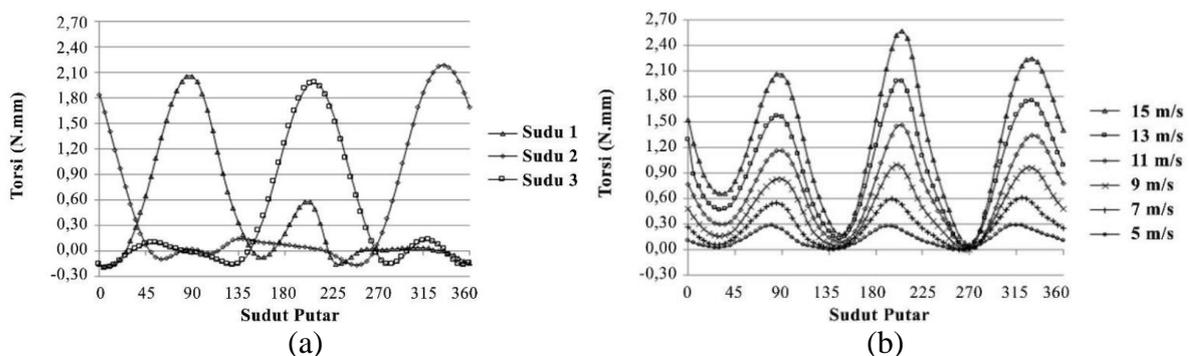
**Gambar 2. 16** *Contour* kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga *blade* dengan sudut putar  $90^\circ$  (b) empat *blade* dengan sudut putar  $0^\circ$  (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)



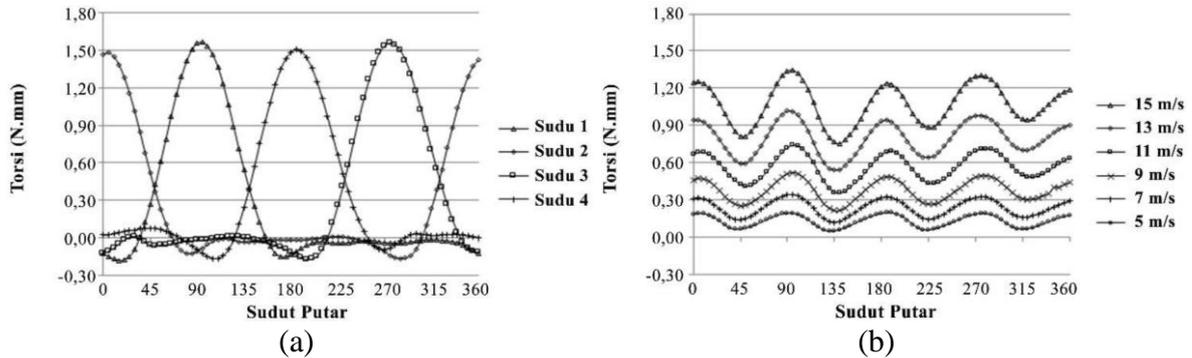
**Gambar 2. 17** Contour tekanan turbin angin Darrieus pada kecepatan angin 15 m/s (a) tiga blade (b) empat blade (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.17, dapat dilihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada blade yang tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini dikarenakan sisi terluar blade yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam blade tidak dikenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanannya rendah. Hal ini menyebabkan terjadinya gaya lift yang lebih tinggi dari posisi blade lainnya. Sedangkan pada blade lainnya tidak memiliki perbedaan tekanan yang tidak terlalu besar, karena dipengaruhi oleh vortex dan posisi blade tersebut berada.

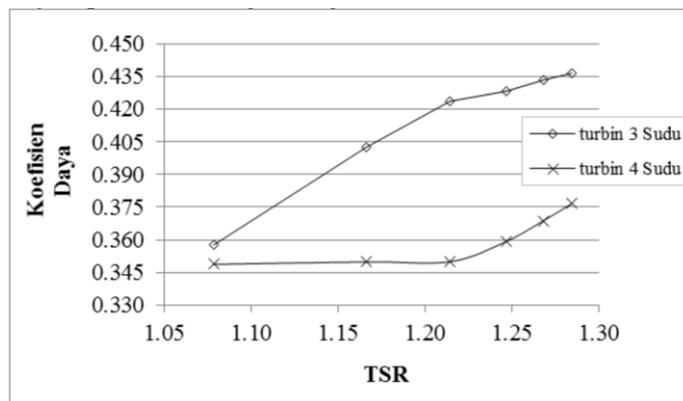
Gambar berikut merupakan gambar grafik perbandingan sudut putar blade terhadap torsi dengan variasi kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus dengan tiga dan empat blade. Pada gambar 2.18 (a) dan gambar 2.19 (a), dapat dilihat bahwa nilai torsi tertinggi dicapai ketika suatu blade tegak lurus dengan arah aliran angin pada sudut putar tertentu, sedangkan blade lainnya bernilai rendah karena berada di daerah downstream. Hal ini menunjukkan bahwa turbin tetap mampu berputar dan menghasilkan torsi total dengan nilai yang baik seperti pada gambar 2.18 (b) dan gambar 2.19 (b) dikarenakan salah satu blade memiliki nilai torsi yang tinggi, meskipun torsi blade lainnya bernilai rendah. Nilai torsi total semakin tinggi seiring bertambahnya kecepatan angin, dan nilai torsi total maksimal turbin tiga blade lebih besar dibandingkan dengan turbin empat blade, akan tetapi profil grafik torsi total turbin empat blade lebih stabil. Hal ini terjadi karena semakin banyak blade yang digunakan pada turbin angin Darrieus ini, maka semakin banyak pula blade “penghambat” dengan nilai torsi kecil atau minus yang akan mengurangi kinerja turbin angin.



**Gambar 2. 18** Grafik torsi pada turbin angin tipe Darrieus tiga blade (a) terhadap sudut putar blade 1, 2, 3 pada kecepatan freestream 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan freestream (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)



**Gambar 2. 19** Grafik torsi pada turbin angin tipe Darrieus empat *blade* (a) terhadap sudut putar *blade* 1, 2, 3 dan 4 pada kecepatan *freestream* 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan *freestream* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)



**Gambar 2. 20** Grafik koefisien daya terhadap *TSR* turbin angin Darrieus tiga *blade* dan empat *blade*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Dapat dilihat pada gambar grafik 2.20 bahwa koefisien daya turbin angin Darrieus tiga *blade* dan empat *blade* mencapai nilai tertinggi pada 0,4366 dan 0,3766 pada *tip speed ratio* 1,28. Pada rentang *TSR* 1,08-1,28, turbin angin Darrieus tiga *blade* memiliki nilai koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin Darrieus empat *blade*. Hal ini dikarenakan semakin banyak *blade* yang digunakan pada turbin angin maka semakin banyak pula *blade* yang berada pada daerah *downstream* yang menghasilkan gaya *drag* tambahan, sehingga nilai torsi yang dihasilkan sangat kecil bahkan bernilai minus dan hal ini berpengaruh pula terhadap koefisien daya yang dihasilkan. Semakin besar nilai *TSR*, maka nilai koefisien daya pun akan semakin meningkat hingga nilai *TSR* tertentu, sebelum akhirnya nilai koefisien daya tersebut menurun.

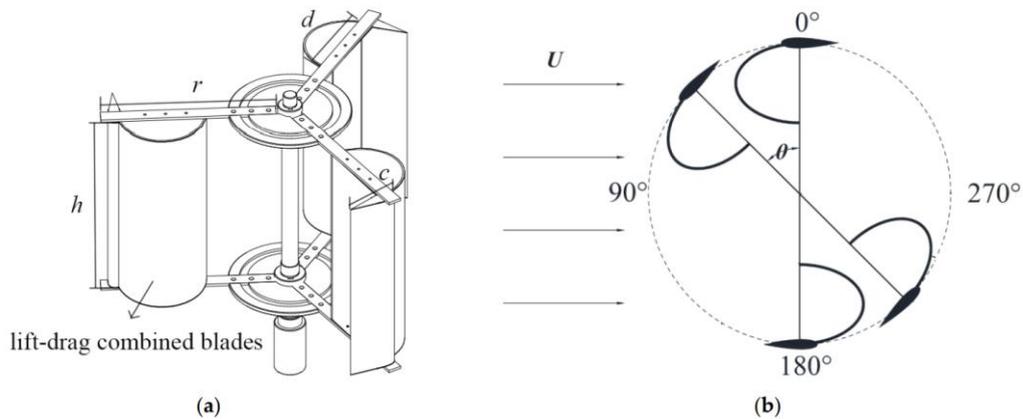
Melalui penelitian ini, dapat diambil kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan, tetapi semakin banyak jumlah *blade* yang digunakan, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah. Kemudian, torsi pada *blade* di daerah *upstream* lebih tinggi dibandingkan dengan torsi pada *blade* di bagian *downstream*. Selain itu, koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi. Kemudian, semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu *blade*, maka semakin besar pula gaya *lift* yang dihasilkan oleh *blade* tersebut dan nilai resultan dari gaya *lift* dan gaya *drag* akan bertambah. Pertambahan nilai resultan gaya ini berbanding lurus dengan pertambahan nilai torsi. Kemudian, semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu *blade*, maka semakin tinggi pula kecepatan pada *blade* tersebut.

### 2.12.3 Feng et al, 2021

Penelitian ini dilakukan oleh feng et al pada tahun 2021, guna melakukan optimasi terhadap karaktersitik *starting* dari *lift-type* VAWT dengan menggunakan *lift-drag combined starter* (LDCS), yaitu menggunakan *semi-elliptical drag blades* dan *lift blades* yang dilengkapi pada bagian tengah dan belakang di luar *starter*, strukturnya dicirikan oleh kombinasi gaya *lift-drag*. Penelitian ini dilakukan dengan berfokus pada karakteristik statis LDCS dengan variasi kecepatan angin dan variasi jumlah *blade* yaitu 2, 3, dan 4 *blade* dan dengan menggunakan dua metode, yakni simulasi numerik dan uji *wind tunnel*. Berikut merupakan tabel detail parameter dan gambar geometri *blade* yang digunakan pada penelitian ini:

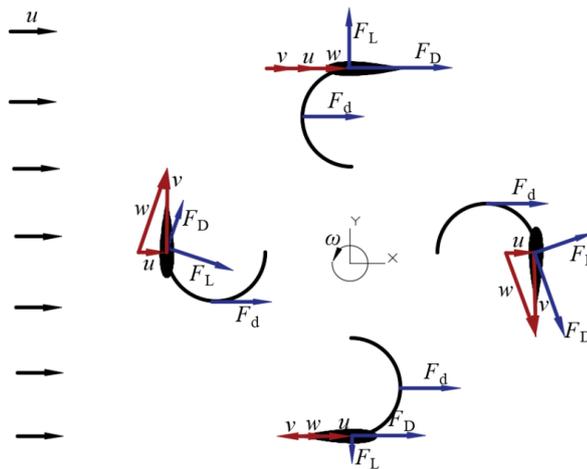
**Tabel 2. 5** Detail parameter yang digunakan pada penelitian (Feng et al, 2021)

Parameter Name	Symbol	Value
Opening diameter of lift-drag combined blade	$d$	150 mm
Height of LDCS	$h$	300 mm
Rotation radius	$r$	280 mm
Lift blade airfoil	-	NACA0018
Lift blade chord length	$c$	100 mm
Number of lift-drag combined blades	$n$	2, 3, 4
Rotation azimuth	$\theta$	$0^\circ-360^\circ$



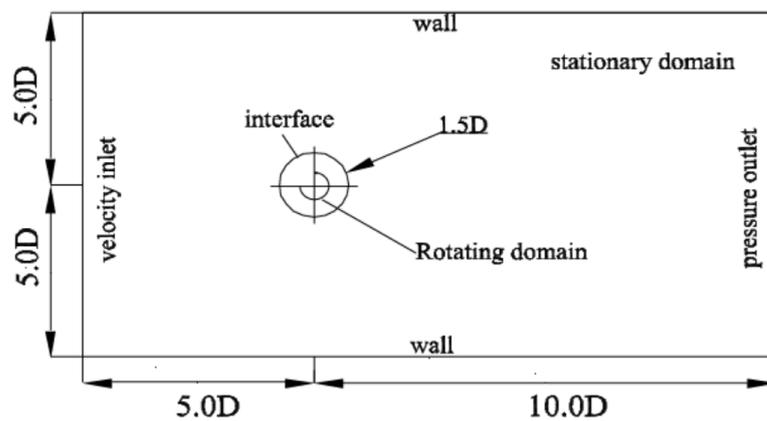
**Gambar 2. 21** Geometri turbin yang digunakan (a) parameter struktural (b) sudut putar *blade* (Feng et al, 2021)

Analisa gaya dilakukan pada LDCS empat *blade* dengan sudut  $0^\circ$ , dimana  $U$  adalah arah datangnya angin,  $v$  adalah kecepatan relatif angin,  $w$  adalah kecepatan angular LDCS,  $F_L$  menunjukan *blade* terangkat,  $F_D$  menunjukan *blade* hambat, dan  $f_d$  merupakan gaya *drag* yang bekerja pada *blade*. gaya *drag* yang terbentuk pada *blade drag* terjadi selama satu putaran ketika aliran masuk melewatinya. Gaya *drag* lebih besar pada saat sudut  $0^\circ$  dan  $180^\circ$ , namun momen yang dihasilkan kecil pada sudut  $90^\circ$  dan  $270^\circ$ . Ketika aliran melawati *blade lift*, gaya aerodinamis terbentuk dan momen yang dihasilkan oleh gaya aerodinamis ditandai dengan perubahan periodik. Momen yang dihasilkan relatif kecil pada sudut  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  dan besar pada sudut  $90^\circ$  dan  $270^\circ$ . Momen aerodinamis yang besar selalu dapat dihasilkan selama satu putaran dari *blade* LDCS. Gambar 2. 22 berikut merupakan analisis gaya pada turbin angin tipe LDCS.



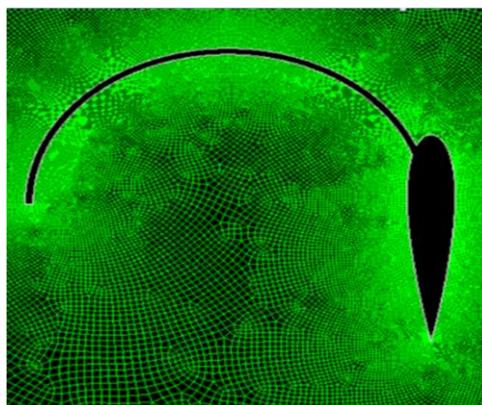
**Gambar 2. 22** Analisis gaya pada LDCS empat *blade* (Feng et al, 2021)

Pada penelitian ini, digunakan ANSYS *Fluent* 19.0 untuk melakukan simulasi numerik dan analisa dinamika fluida pada komputasi dua dimensi. Berikut merupakan gambar *domain* yang digunakan pada penelitian ini:



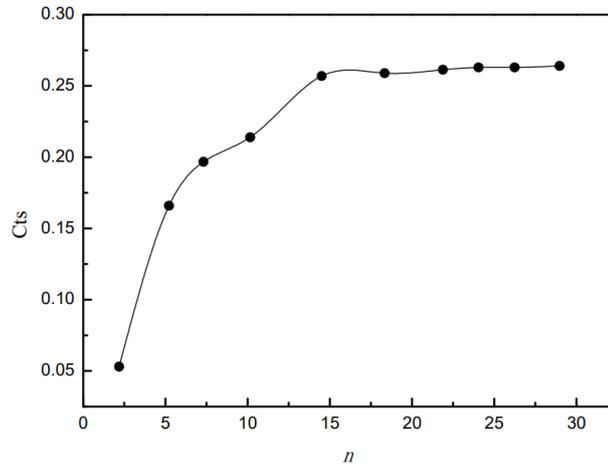
**Gambar 2. 23** *Domain* komputasi yang digunakan (Feng et al, 2021)

Pada penelitian ini, digunakan penggabungan *grid* dinamis dan statis untuk melakukan simulasi numerik, dimana area tersebut diatur *swept* selama rotasi LDCS sebagai area *mesh* dinamis dan meng-*encrypt mesh* di area ini. *interface* antara area *mesh* dinamis dan statis ditetapkan sebagai permukaan *slip*, yang digunakan untuk mentransfer energi area *mesh* dinamis dan statis. Berikut merupakan gambar *mesh* yang digunakan pada penelitian ini:



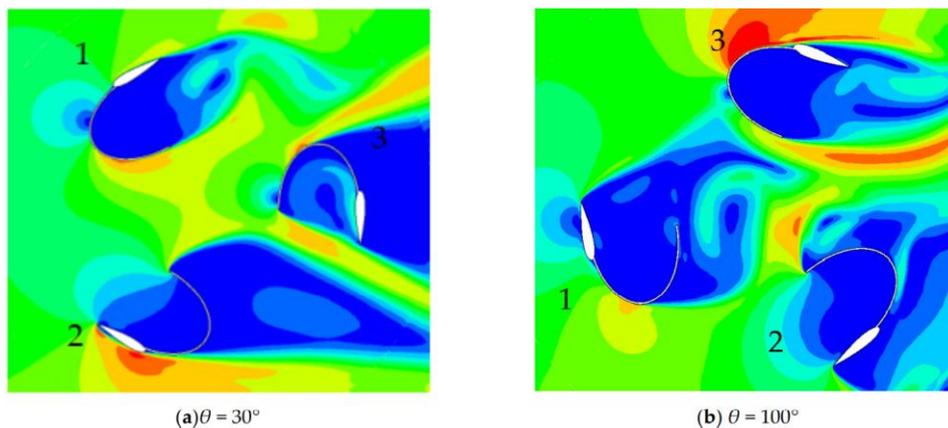
**Gambar 2. 24** *Meshing* pada *blade* LDCS (Feng et al, 2021)

Setelah dilakukan perbandingan dan analisis terhadap pengaruh jumlah *grid* yang berbeda pada hasil simulasi numerik nilai koefisien torsi statis dengan menggunakan LDCS dua *blade* pada sudut  $20^\circ$ , digunakan jumlah *grid* yang berkisar antara 250.000 sampai 280.000 dikarenakan pada jumlah *grid* tersebut, nilai koefisien torsi statis sudah mulai stabil seperti pada gambar kurva berikut:



**Gambar 2. 25** Kurva GIT pada LDCS dua *blade* dengan sudut  $20^\circ$  (Feng et al, 2021)

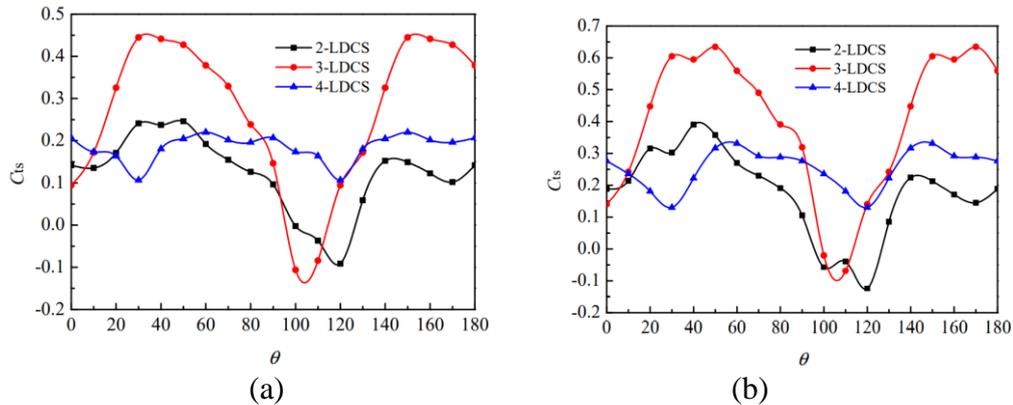
Model simulasi numerik yang diterapkan pada penelitian ini adalah aliran *incompressible*, dengan *inlet boundary* berupa *velocity inlet* dengan nilai 6 m/s dan 10 m/s. Kondisi *outlet boundary* adalah *pressure outlet* yang nilainya sama dengan tekanan atmosfer normal, yaitu sebesar  $1 \times 10^{-5}$  Pa. Batas atas dan bawah dari domain simulasi numerik ditetapkan ke permukaan dinding. *Impermeable wall boundaries* digunakan untuk membatasi arah aliran fluida. Dalam pengaturan statis, *pressure-based solver* digunakan pada aliran masuk yang stabil. Model turbulensi menggunakan model *double standard k- $\epsilon$* , dan *pressure-velocity coupling* menggunakan algoritma SIMPLEC. Kriteria konvergensi residual ditetapkan pada nilai  $1 \times 10^{-5}$ , menggunakan interpolasi *second-order upswing*.



**Gambar 2. 26** Kontur kecepatan pada LDCS tiga *blade* (a) sudut  $30^\circ$  (b) sudut  $100^\circ$  (Feng et al, 2021)

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. 26 (a), ruang antara *blade* besar ketika  $\theta = 30^\circ$ , *blade* 1 dan 3 memiliki bagian cembung yang menerima angin yang datang. Perbedaan tekanan yang besar dapat dicapai di dalam dan di luar *blade*, sehingga meningkatkan torsi. Perlu dicatat bahwa *downstream blade* 2 memiliki permukaan cekung yang menghadap ke arah aliran angin, sehingga menghasilkan torsi positif yang besar. Hal ini menyebabkan peningkatan gaya *lift* yang signifikan di bawah pengaruh karakteristik aerodinamis *blade*, yang selanjutnya

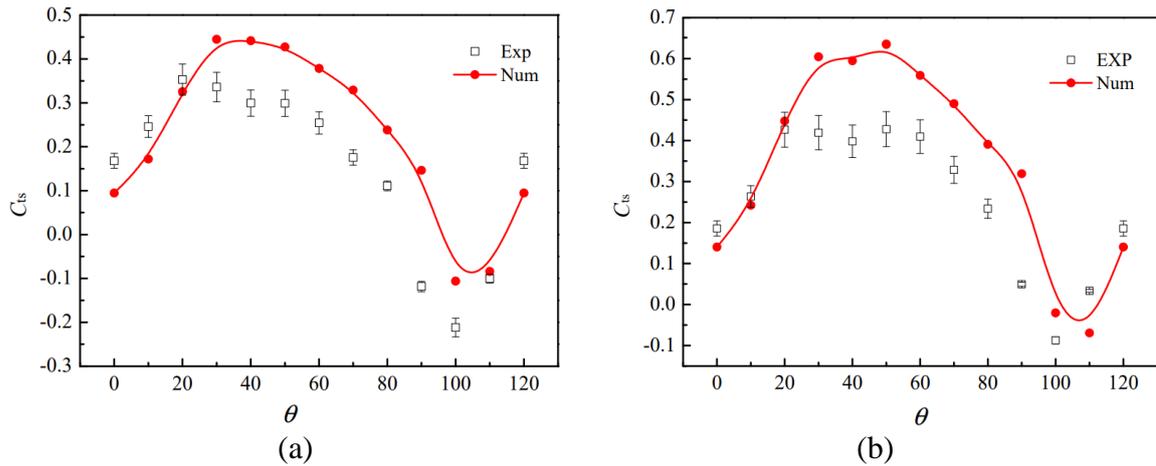
mendorong peningkatan torsi pada sudut ini. Dengan demikian nilai  $C_{ts-max}$  dari LDCS tiga *blade* muncul ketika  $\theta = 30^\circ$ . Dapat diamati dari gambar 2. 26 (b) bahwa ruang aliran udara berkurang ketika  $\theta = 100^\circ$ , dan ketiga *blade* hanya memiliki permukaan cembung di bagian *upstream*, serta ketiga *blade* memiliki kecepatan permukaan yang lebih rendah. Terlebih, perbedaan tekanan internal dan eksternal kecil, sehingga tidak ada torsi besar yang dihasilkan. Oleh karena itu, nilai  $C_{ts}$  dari LDCS sangat rendah pada sudut ini.



**Gambar 2. 27** Kurva  $C_{ts}$  pada seluruh variasi *blade* (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s (Feng et al, 2021)

Seperti ditunjukkan pada gambar 2. 27 (a),  $C_{ts}$  dari tiga variasi *blade* LDCS dalam satu periode rotasi memiliki *trend* distribusi yang sangat berbeda ketika  $U = 6$  m/s.  $C_{ts}$  dari LDCS tiga *blade* menunjukkan *trend* satu puncak tinggi dan lembah rendah, dan nilainya lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya, dimana puncak pada  $\theta = 30^\circ$  dicapai  $C_{ts}$  sekitar 0,45. Dapat dilihat bahwa  $C_{ts}$  LDCS dua *blade* jauh lebih kecil dibandingkan dengan nilai  $C_{ts}$  dari LDCS tiga *blade*, yaitu 0,45. Oleh karena itu, LDCS tiga *blade* memiliki karakteristik awal yang paling baik pada kecepatan angin yang lebih rendah. Namun, nilai  $C_{ts}$  terendah dari LDCS tiga *blade* adalah -0,15 dalam kisaran  $100^\circ-110^\circ$ , yang menunjukkan bahwa ada wilayah torsi negatif awal untuk LDCS tiga *blade*, yang lebih kecil dari wilayah torsi negatif awal dari LDCS dua *blade*  $100^\circ-130^\circ$ . Hal ini tidak berlaku untuk LDCS empat *blade* yang menunjukkan bahwa torsi statis menjadi lebih stabil dengan bertambahnya jumlah *blade* LDCS. Namun, dari rata-rata  $C_{ts}$  LDCS dua, tiga, dan empat *blade*, LDCS tiga *blade* menunjukkan karakteristik aerodinamis terbaik. Kemudian seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. 27 (b), distribusi  $C_{ts}$  dari tiga variasi jumlah *blade* LDCS dalam satu periode rotasi pada dasarnya sama dengan pada gambar ketika  $U = 10$  m/s.  $C_{ts}$  dari LDCS tiga *blade* menunjukkan *trend* satu puncak tinggi dan lembah rendah yang nilainya lebih tinggi, mencapai puncak 0,65 pada  $\theta = 50^\circ$ . Dapat juga dilihat bahwa rata-rata  $C_{ts}$  dari LDCS tiga bilah adalah yang tertinggi.

Setelah dilakukan simulasi numerik, dilakukan pula eksperimen *wind tunnel* pada LDCS dengan tiga *blade*. Didapatkan hasil nilai  $C_{ts}$ , dimana *trend* fluktuasi yang terbentuk pada satu putaran *blade* menunjukkan kemiripan dengan hasil simulasi, namun hasil simulasi numerik dan eksperimen *wind tunnel* secara numerik berbeda. Nilai yang didapat melalui eksperimen sangat rendah dibandingkan dengan simulasi, seperti yang ditunjukkan pada kurva berikut:



**Gambar 2. 28** Kurva  $C_{ts}$  hasil eksperimen pada LDCS tiga *blade* (a) kecepatan angin 6 m/s (b) kecepatan angin 10 m/s (Feng et al, 2021)

Melalui penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu pada LDCS tiga *blade* perubahan nilai  $C_{ts}$  relatif sama pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan 10 m/s. Nilai  $C_{ts}$  pada kecepatan angin 10 m/s jelas lebih besar dibandingkan dengan pada kecepatan angin 6 m/s. Hal ini menandakan bahwa peningkatan kecepatan angin dapat meningkatkan nilai  $C_{ts}$  pada LDCS. Kemudian perbedaan tekanan yang besar dapat dihasilkan di kedua sisi dari LDCS tiga *blade*, menghasilkan *forward torque* yang besar dan *reversed torque* yang kecil, yang memungkinkan LDCS memiliki torsi awal yang lebih besar, dengan demikian, LDCS tiga *blade* memiliki kinerja baik pada kecepatan angin rendah. Pada sudut tertentu, *lift blade* LDCS memiliki karakteristik aerodinamis, yang mendorong peningkatan torsi gabungan gaya *lift-drag*.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Simulasi

Penelitian tugas akhir ini dilakukan menggunakan *software* GAMBIT untuk proses pembuatan geometri dan *meshing*, serta menggunakan *software* ANSYS Fluent 19.2 untuk proses simulasi aliran udara pada *blade*. Penelitian ini dilakukan dengan cara simulasi dan analisa numerik dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD), guna membandingkan pengaruh variasi kecepatan angin ( $v$ ) dan variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ) terhadap performa *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2. Metode simulasi digunakan pada penelitian ini, karena kemampuannya untuk memperoleh parameter dan hasil pengujian tanpa harus dilakukan penelitian secara aktual. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dalam keadaan *blade* statis, sehingga analisa guna melihat detail aliran yang menghasilkan torsi statis menjadi lebih sederhana dan mudah. Terdapat tiga tahap yang harus dilalui dalam melakukan simulasi pada penelitian ini, yaitu tahap *pre-processing*, tahap *processing*, dan tahap *post processing*.

### 3.2 Tahap Pre-Processing

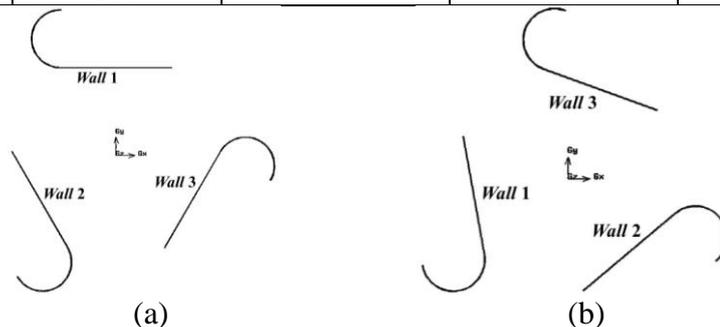
Tahap *pre-processing* merupakan tahap awal pada penelitian ini yang harus dilalui untuk nantinya dapat dilakukan simulasi dan studi numerik. Pada tahap ini, dilakukan pembuatan model geometri dari turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2, pembuatan domain aliran, dan juga dilakukannya proses *meshing* terhadap domain pada model geometri tersebut. Seluruh proses dalam tahap *pre-processing* ini dilakukan menggunakan *software* GAMBIT.

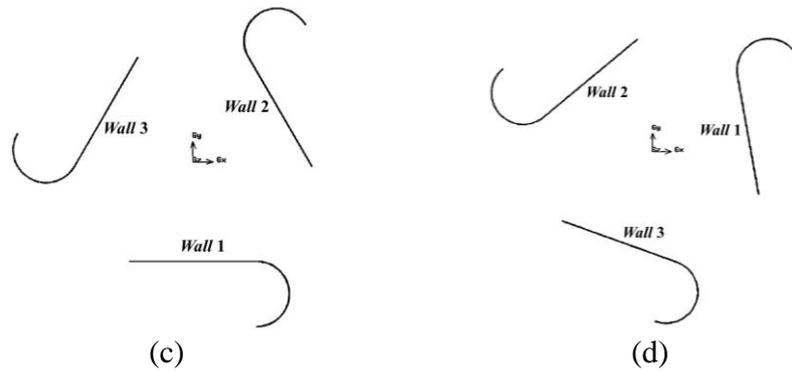
#### 3.2.1 Pembuatan Geometri

Pada tahap *pre-processing* ini, dilakukan pembuatan model geometri dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 berupa dua dimensi yang nantinya akan digunakan untuk simulasi dan dilakukan analisa numerik. Penelitian ini mencakup dua jenis variasi, yaitu kecepatan angin ( $v$ ) dan variasi sudut putar turbin ( $\theta$ ). Penelitian ini hanya memiliki satu domain saja, yaitu *static domain*. *Static domain* merupakan *domain* yang dilewati fluida dan tidak bergerak. *Domain* ini ditunjukkan dengan bentuk persegi panjang pada *meshing*. Berikut merupakan tabel dan gambar yang menunjukkan detail ukuran model geometri beserta variasi konfigurasi sudut putar turbin yang telah dibuat dengan menggunakan *software* GAMBIT:

**Tabel 3. 1** Detail ukuran variasi turbin angin tipe Lenz 2

Jumlah <i>blade</i>	<i>Chord length</i> (mm)	Diameter turbin (mm)	<i>Blade diameter leading edge</i> (mm)	Sudut putar turbin (°)
3	180	300	75	0
3	180	300	75	100
3	180	300	75	180
3	180	300	75	280

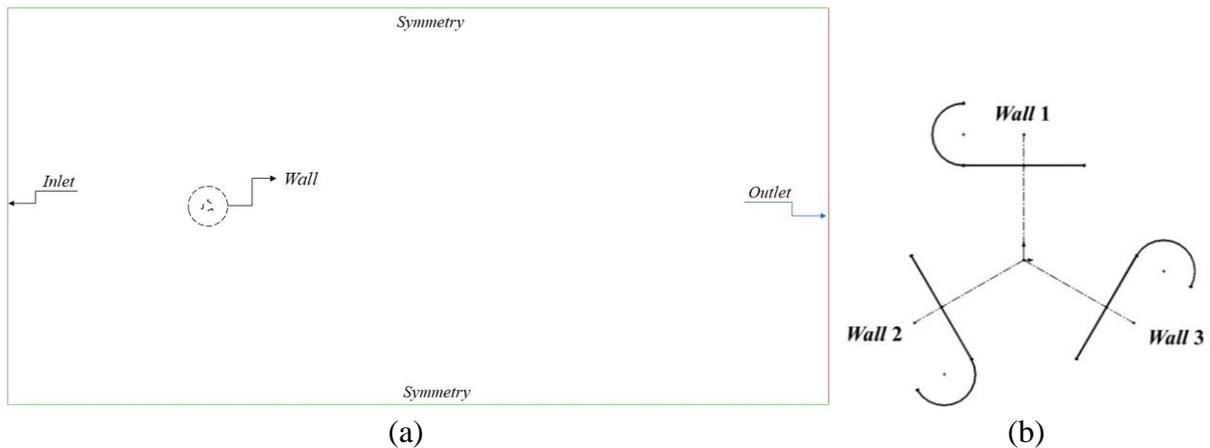




**Gambar 3. 1** Model geometri turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

### 3.2.2 Penentuan *Boundary Condition*

Penentuan *boundary condition* dilakukan sebelum pembuatan *meshing* pada *software* GAMBIT. Pada penelitian ini, terdapat beberapa *boundary* yang akan diteliti, yaitu *inlet*, *outlet*, *symmetry*, *wall 1*, *wall 2*, dan *wall 3*, dimana *wall 1*, *wall 2*, dan *wall 3* merepresentasikan *blade* turbin. *Boundary condition* yang digunakan untuk *inlet* ialah *velocity inlet*, dimana *boundary inlet* itu sendiri merupakan tempat atau daerah yang dilalui oleh aliran udara/angin saat akan masuk kedalam sistem, kemudian untuk *outlet* ialah *pressure outlet*. Kemudian untuk *boundary condition* yang merepresentasikan *blade* turbin (*wall 1*, *wall 2*, dan *wall 3*) adalah *wall*, dan untuk kedua dinding pembatas bagian samping adalah *symmetry*.

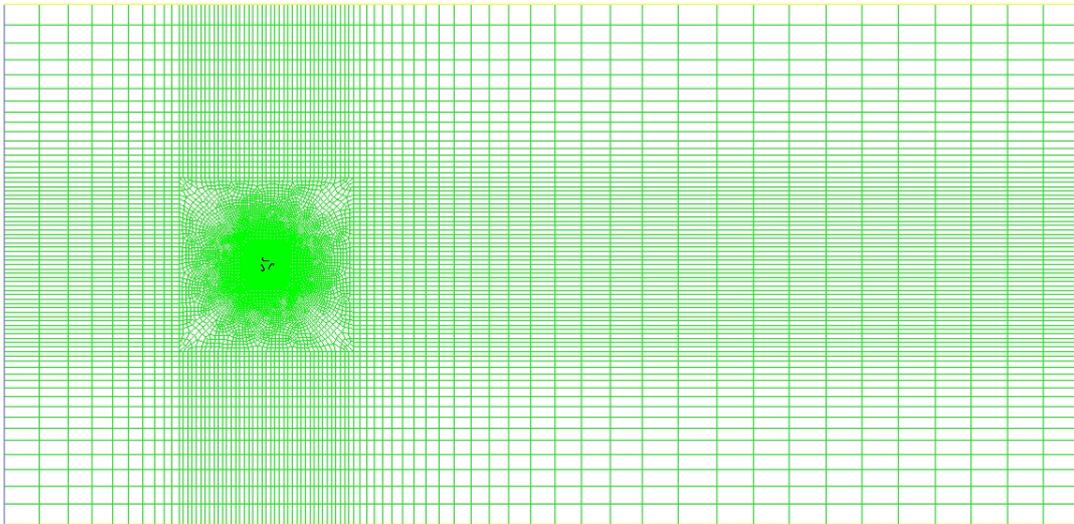


**Gambar 3. 2** *Boundary condition* pada simulasi penelitian (a) *domain* keseluruhan (b) detail *boundary* pada *blade*

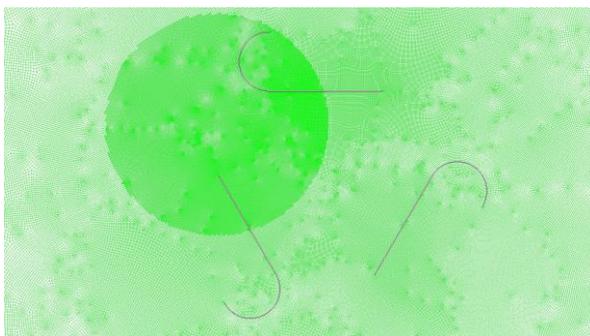
### 3.2.3 Pembuatan *Mesh*

Setelah pembuatan model geometri dilakukan sesuai dengan detail ukuran dan variasi yang telah ditentukan, langkah selanjutnya ialah membuat *mesh* pada *domain* model geometri tersebut. *Meshing* sendiri ialah proses pembagian komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit. Secara umum, penentuan jenis *mesh* yang akan digunakan dan banyaknya sel pada *mesh* tersebut berpengaruh terhadap keakuratan hasil dari simulasi. Terdapat beberapa jenis elemen *mesh* yang umum digunakan dalam metode CFD, bergantung pada dimensi dari model geometri yang digunakan. Jika model geometri berupa dua dimensi, maka jenis elemen *mesh* yang umum digunakan ialah *triangle* dan *quadrilateral*, sedangkan jika model geometri berupa tiga dimensi, maka jenis elemen *mesh* yang umum digunakan adalah *tetrahedron*, *pyramid*, *triangular prism*, dan *hexahedron*. Pada penelitian ini, jenis elemen *meshing* yang digunakan adalah jenis *quadrilateral*, dikarenakan *domain* geometri

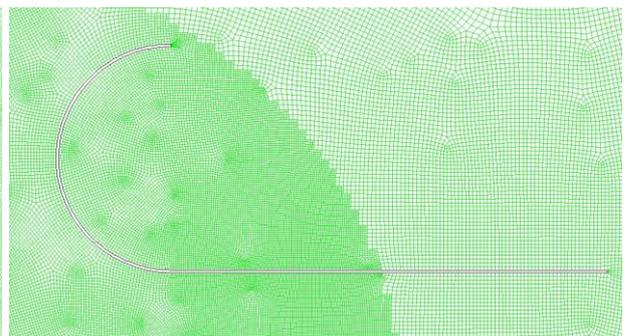
berupa dua dimensi, kemudian tipe elemen yang digunakan pada *meshing* untuk penelitian ini ialah tipe *pave* agar dapat menyesuaikan dengan bentuk geometri *blade* yang telah dibuat. Berikut merupakan gambar hasil *meshing* yang telah dilakukan menggunakan *software* GAMBIT:



(a)



(b)



(c)

**Gambar 3. 3** Hasil *meshing* turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 (a) *meshing* keseluruhan (b) *meshing* sekitar rotor (c) *meshing* dekat *blade*

### 3.3 Tahap *Processing*

Tahap *processing* merupakan tahap kedua setelah dilakukannya pembuatan model geometri dan *meshing* untuk *domain* model geometri yang telah dibuat. Pada tahap *processing*, dilakukan penentuan dan *input* nilai pada seluruh aspek yang dibutuhkan untuk menjalankan suatu simulasi. Saat melakukan *import* file *meshing*, hal pertama yang harus dilakukan adalah mengatur *scale* untuk *meshing* tersebut. Dikarenakan *meshing* dibuat dalam satuan milimeter, sehingga harus dilakukan *scaling* agar *meshing* tersebut dapat direpresentasikan dalam satuan meter. Pada tahap ini pula, dilakukan input terhadap beberapa parameter yang berpengaruh pada keakuratan hasil dari simulasi yang dilakukan. Berikut merupakan detail nilai *input* parameter yang telah digunakan pada simulasi untuk penelitian ini:

**Tabel 3. 2** Detail *input* nilai pada beberapa parameter

Parameter	Nilai
<b>Tipe solver</b>	<i>Pressure-based</i>
<b>Models</b>	<i>Standard k-ε</i>
<b>Materials</b>	Udara dan aluminum
<b>Skema pressure-velocity coupling</b>	<i>SIMPLE</i>
<b>Gradient</b>	<i>Least square cell based</i>
<b>Pressure</b>	<i>Second order</i>
<b>Momentum</b>	<i>Second order upwind</i>
<b>Turbulent kinetic energy</b>	<i>Second order upwind</i>
<b>Turbulent dissipation rate</b>	<i>Second order upwind</i>
<b>Kriteria konvergensi</b>	$1 \times 10^{-6}$
<b>Metode inisialisasi</b>	<i>Hybrid initialization</i>

Berdasarkan tabel detail *input* nilai pada beberapa parameter diatas, Pada penelitian ini, digunakan *solver* dengan tipe *pressure-based* dan *velocity formulation absolute*. Kemudian untuk aspek waktu, penelitian ini menggunakan waktu *steady* dan aspek 2D *space* berupa *planar*. Untuk jenis aliran yang terjadi dan yang ingin disimulasikan pada penelitian tugas akhir ini adalah berupa aliran turbulen. Penelitian ini menggunakan *viscous model* (model turbulensi) berupa *standard k-ε*. Pada penelitian tugas akhir ini, terdapat dua jenis material yang digunakan, yaitu *fluid* yang berupa udara untuk merepresentasikan aliran udara pada *blade* dengan *density* sebesar  $1,225 \text{ kg/m}^3$  dan *viscosity* sebesar  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ , serta material solid yang berupa *aluminum* untuk merepresentasikan jenis material yang digunakan oleh ketiga *blade* yang akan diteliti, yangmana memiliki *density* dengan nilai sebesar  $2719 \text{ kg/m}^3$ .

*Input* detail nilai dari parameter yang terdapat pada masing-masing *boundary condition* dilakukan pada saat sebelum simulasi di *software ANSYS Fluent 19.2*. Pada *inlet* yang berupa *velocity inlet*, terdapat nilai *velocity magnitude* pada *boundary inlet* diubah berdasarkan variasi kecepatan angin yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu 4, 5, dan 6 m/s. Sedangkan untuk detail *turbulence, specification method* yang digunakan ialah *intensity and length scale*, dimana nilai *turbulent intensity* sebesar sepuluh persen dan nilai *turbulent length scale* sebesar 0,2 meter.

Pada penelitian ini, digunakan skema *pressure-velocity coupling* dengan jenis *SIMPLE*. Sedangkan untuk detail *spatial discretization* yang digunakan, antarlain *gradient* dengan *least squares cell based*, *pressure* menggunakan *second order*, *momentum* menggunakan *second order upwind*, kemudian untuk *turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate* digunakan metode *second order upwind*. Untuk kriteria konvergensi pada penelitian ini digunakan kriteria absolut dengan nilai *continuity, x-velocity, y-velocity, k*, dan epsilon masing-masing sebesar  $1 \times 10^{-6}$ . Metode yang digunakan untuk menginisialisasi perhitungan pada penelitian ini ialah *hybrid initialization*. Setelah dilakukan inisialisasi, simulasi dijalankan dan akan berhenti pada saat mencapai kondisi konvergen.

### 3.4 Tahap *Post Processing*

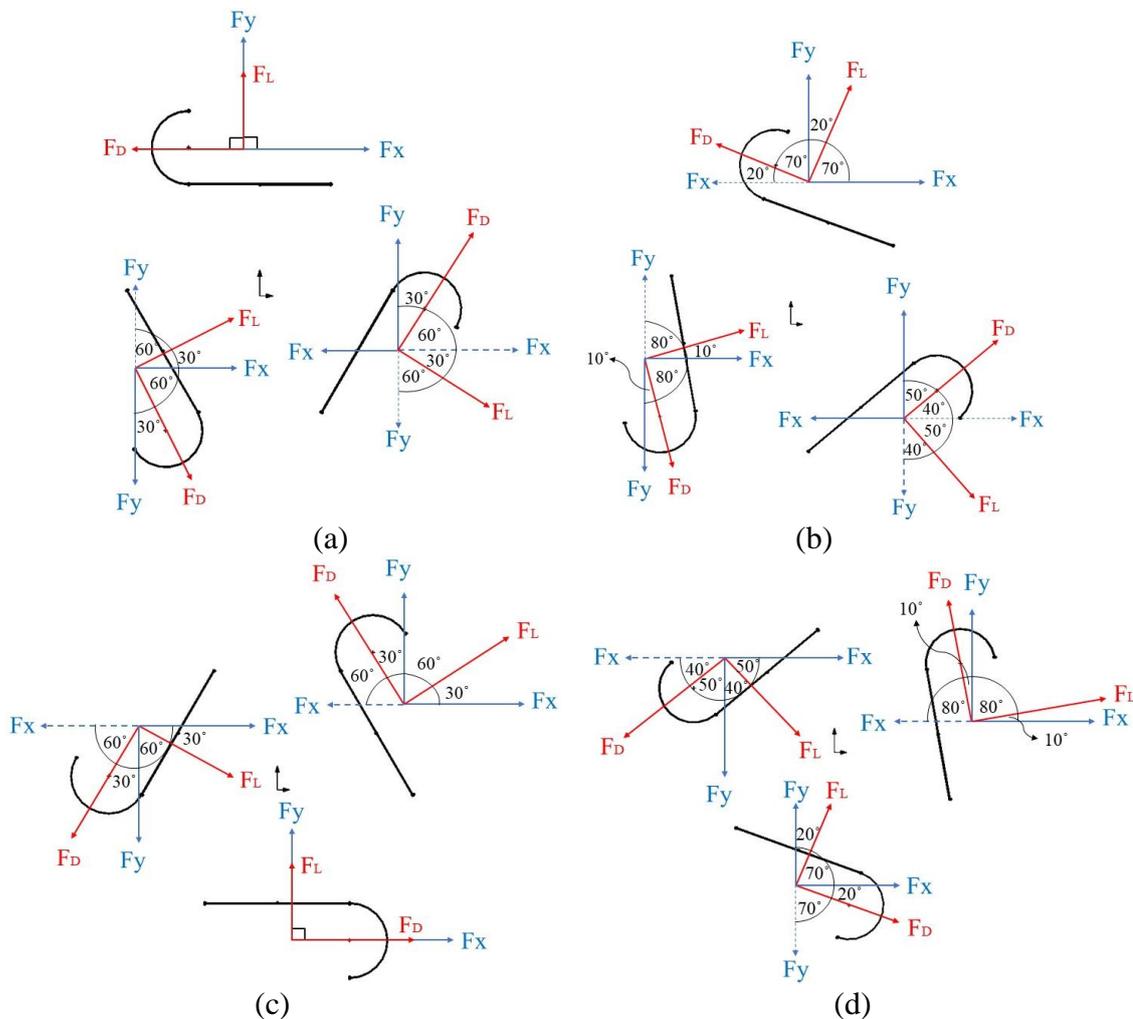
Tahap ini merupakan tahap akhir dalam proses simulasi. Pada tahap ini, dilakukan pengolahan data hasil simulasi dan menampilkan data tersebut menjadi sebuah *graphic*, baik berupa *contour, vector, pathline*, maupun *particle tracks* yang nantinya dapat dianalisa secara numerik. Pada penelitian ini, akan ditampilkan kontur dan vektor aliran, dimana kontur aliran yang ditampilkan berupa kontur tekanan, dan vektor aliran yang ditampilkan ialah vektor kecepatan.

### 3.5 Data yang Digunakan

Pada penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa data hasil simulasi menggunakan *Fluent* 19.2 berupa nilai  $F_x$  dan  $F_y$ , yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift*, torsi statis, serta koefisien torsi statis melalui proses perhitungan, dimana nantinya nilai koefisien torsi statis tersebut akan dibandingkan dalam bentuk grafik dengan data koefisien torsi statis hasil eksperimen yang telah didapat melalui perhitungan sesuai dengan persamaan 2.8 yang mencakup beberapa parameter seperti nilai torsi statis yang didapat melalui percobaan turbin angin tipe Lenz 2 dengan menggunakan *axial fan* dan *torquemeter*, kecepatan angin, *swept area*, massa jenis angin, dan diameter turbin.

#### 3.5.1 Free Body Diagram

Berikut merupakan *free body diagram* dari gaya yang bekerja pada setiap *blade* untuk setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan dalam penelitian ini, dimana analisa arah  $F_D$  dan  $F_L$  didasarkan pada orientasi *blade*, dan bukan pada orientasi turbin, sehingga arah  $F_D$  (gaya yang memutar *blade*) dan  $F_L$  (gaya yang mendorong *blade*) diasumsikan sama dengan arah gaya tangensial dan gaya normal pada *blade* tersebut:



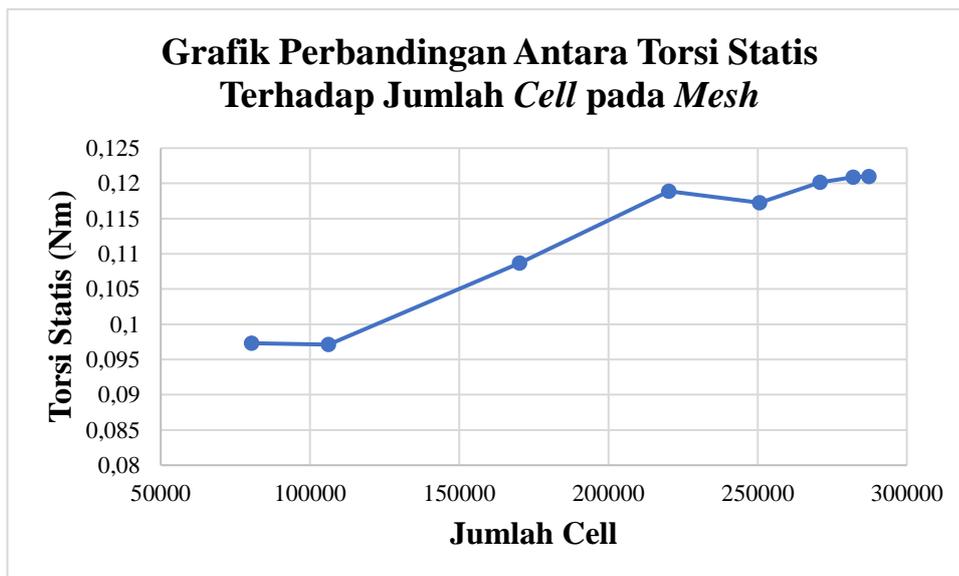
**Gambar 3. 4** *Free body diagram* (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

### 3.6 Grid Independency Test

*Grid independency test* sendiri merupakan proses yang digunakan untuk mencari kondisi *grid* yang optimal yang memiliki jumlah *grid* terkecil tanpa menghasilkan perbedaan hasil numerik berdasarkan evaluasi dari berbagai kondisi *grid*. Namun, tidak ada metode atau prosedur pengujian standar untuk penerapannya. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan antar *moment* yang dihasilkan pada setiap variasi jumlah *cell* dalam *mesh*, sehingga diperoleh hasil berupa torsi statis. Berikut merupakan tabel detail nilai torsi statis pada setiap variasi jumlah *cell*:

**Tabel 3. 3** *Grid independency test* pada turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 dengan sudut putar turbin 0° dan kecepatan angin 6 m/s

No.	Jumlah <i>cell</i>	R <i>grid refinement</i> (m)	Torsi Statis (Nm)	Error Relatif (%)
1	80505	0	0,0973	
2	106218	0,1	0,0971	0,197
3	170259	0,2	0,108	11,930
4	220314	0,3	0,119	9,358
5	250707	0,4	0,117	1,374
6	270996	0,5	0,120	2,485
7	282105	0,6	0,1208	0,581
8	287355	0,7	0,1209	0,099



**Gambar 3. 5** Grafik perbandingan antara jumlah *cell* pada *mesh* terhadap torsi statis hasil simulasi

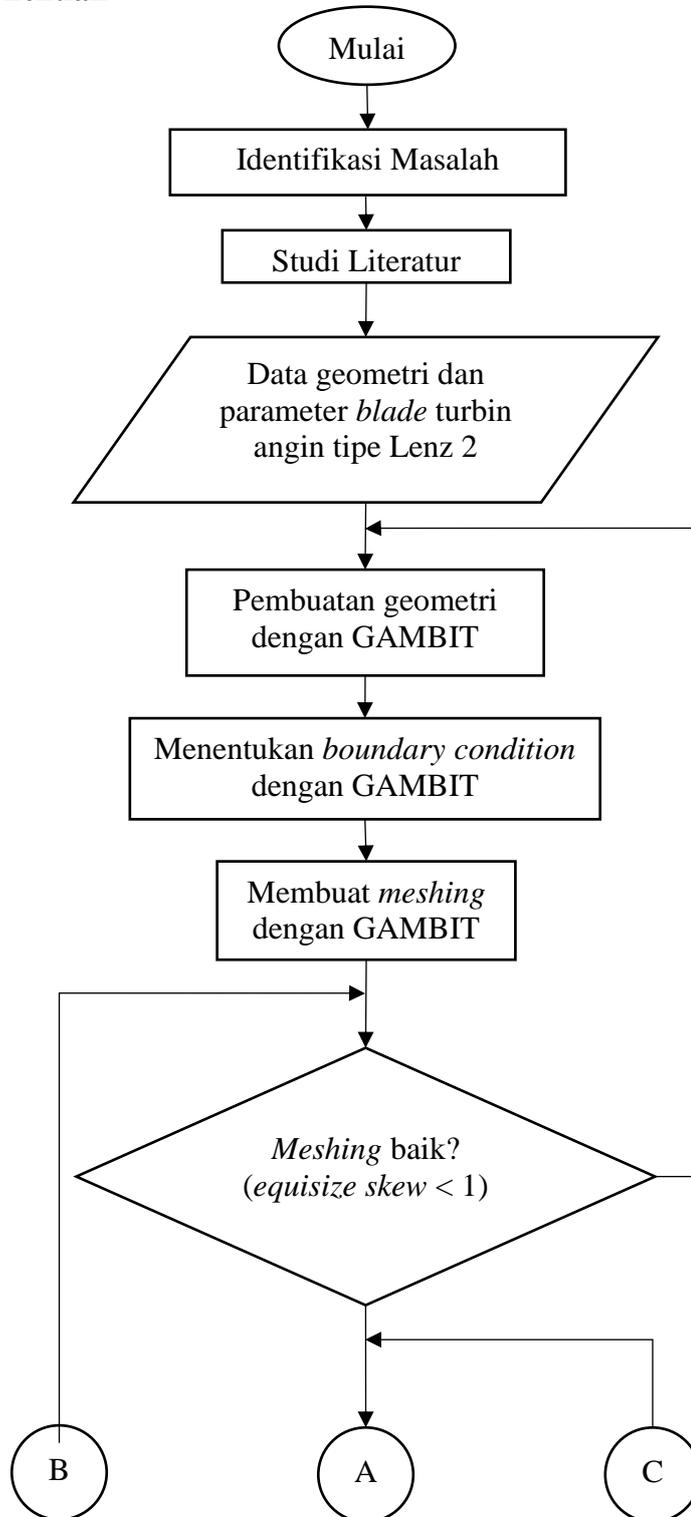
Berdasarkan definisi dari GIT itu sendiri, dan dengan mengacu pada pada tabel 3.3, serta gambar grafik 3.5 yang berisi detail nilai torsi statis dan jumlah *cell* pada *mesh*, maka digunakan model geometri dengan jumlah *cell* pada *mesh* sebanyak 282105 dan dengan radius *grid refinement* sebesar 0,6 m. Hal ini dikarenakan, pada jumlah *cell* tersebut didapat nilai torsi statis yaitu sebesar 0,121 Nm yang dinilai sudah stabil dan dapat mewakili nilai torsi statis pada GIT setelahnya.

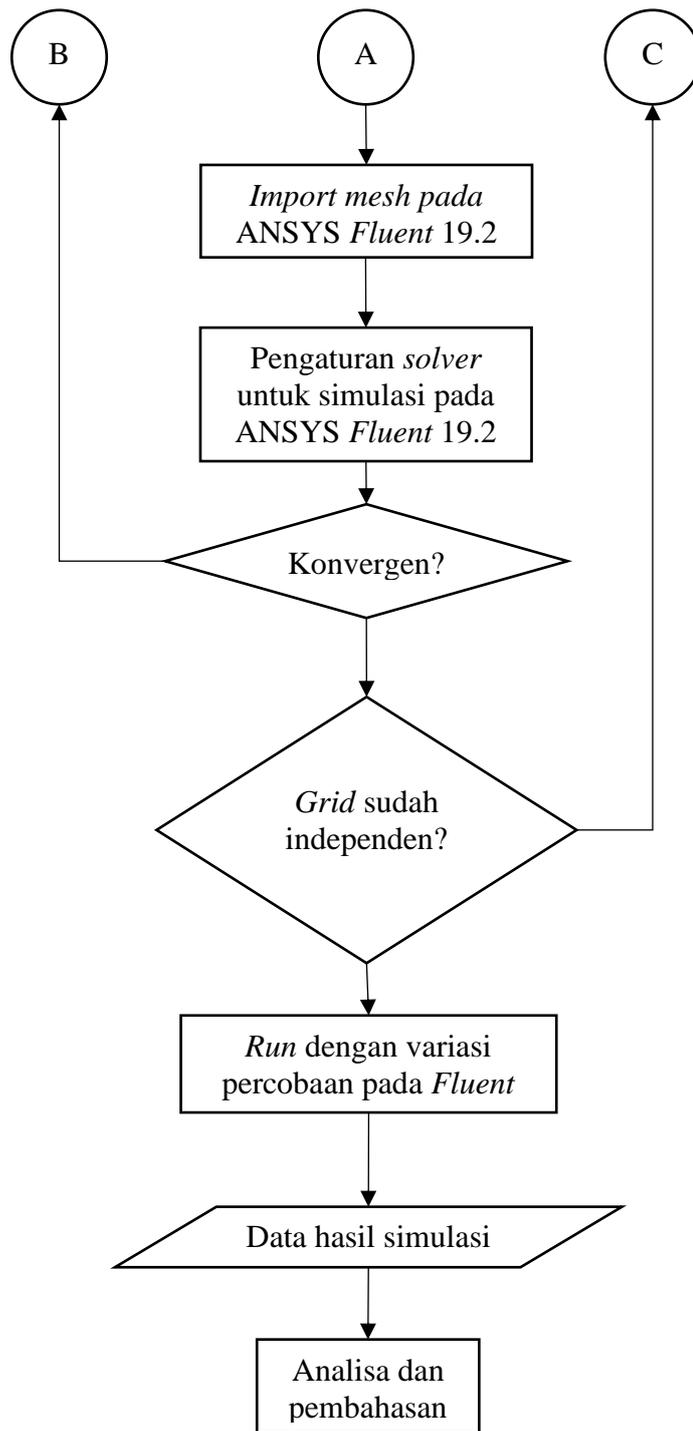
### 3.7 Flowchart

Berikut merupakan *flowchart* pada penelitian ini, dimana terdapat dua *flowchart*, yaitu penelitian yang menerangkan tahap terbentuknya laporan penelitian tugas akhir ini dan simulasi

yang menerangkan detail tahap simulasi yang dilakukan untuk mendapatkan data yang digunakan untuk analisa numerik nantinya:

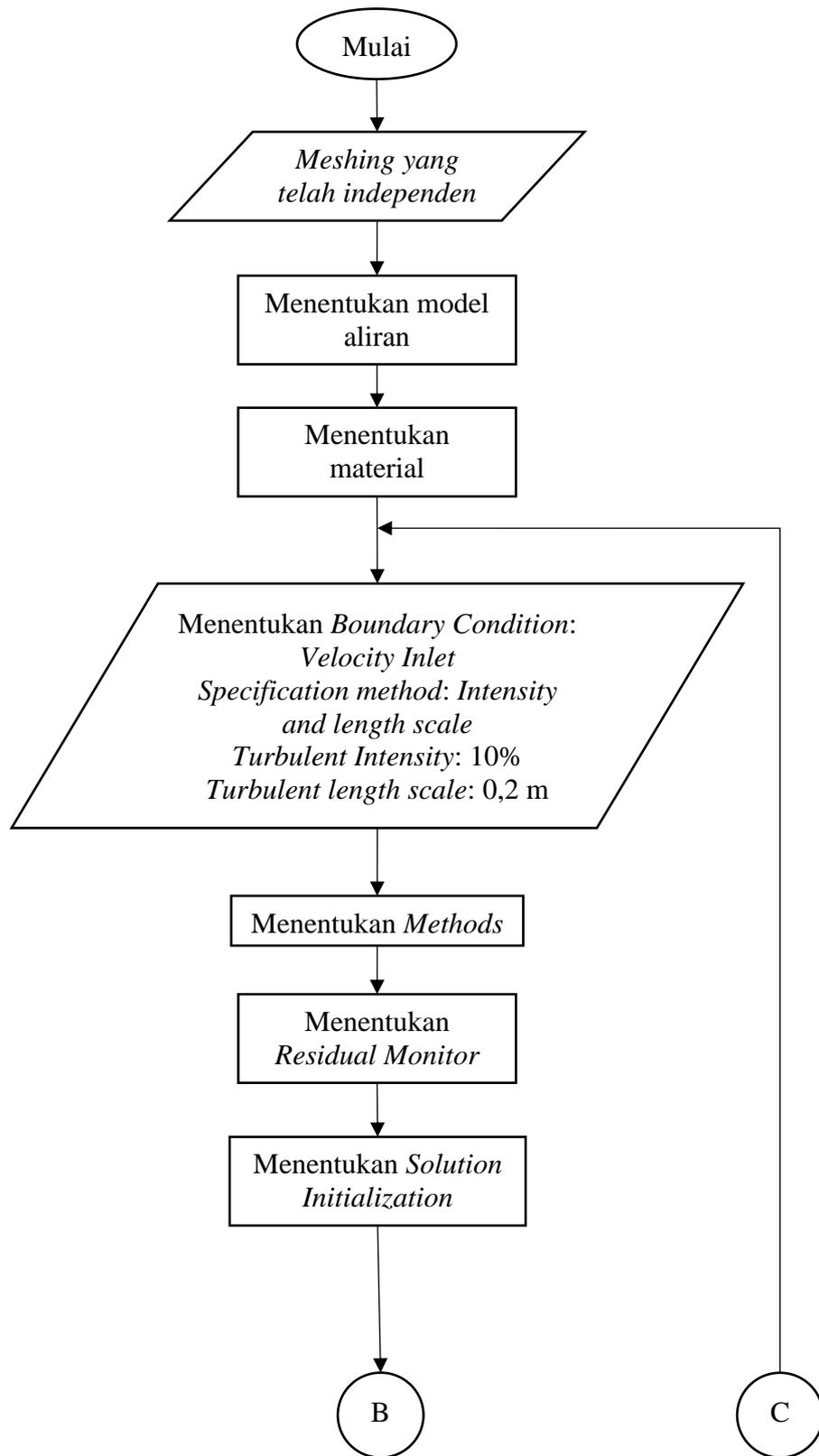
### 3.7.1 Flowchart Penelitian

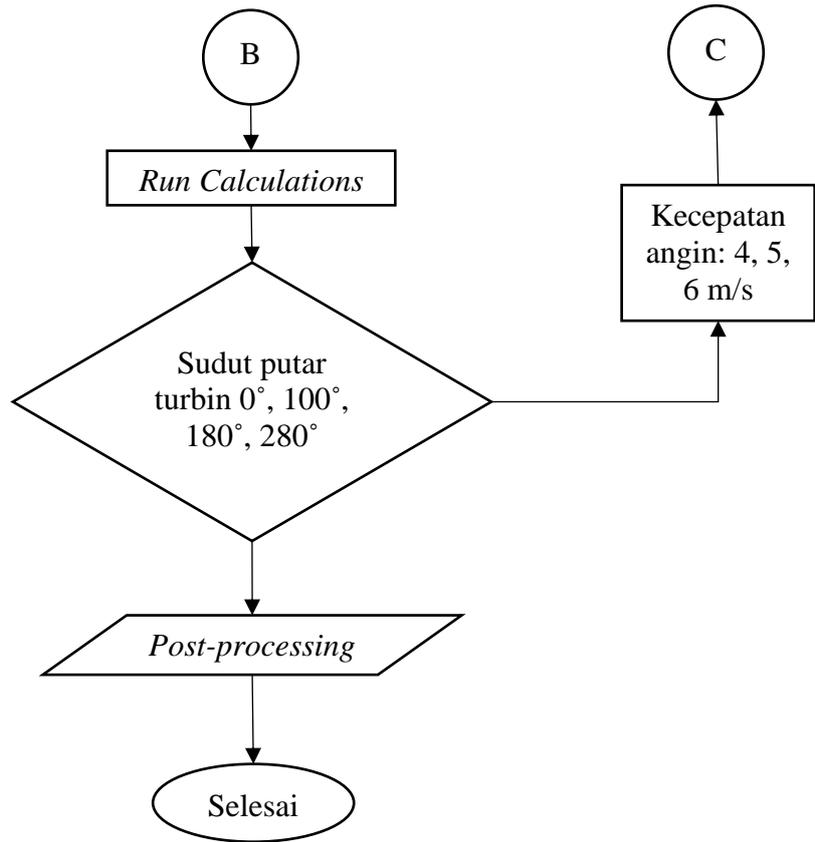




**Gambar 3. 6** *Flowchart* Penelitian

### 3.7.2 Flowchart Simulasi





**Gambar 3. 7** *Flowchart* Simulasi

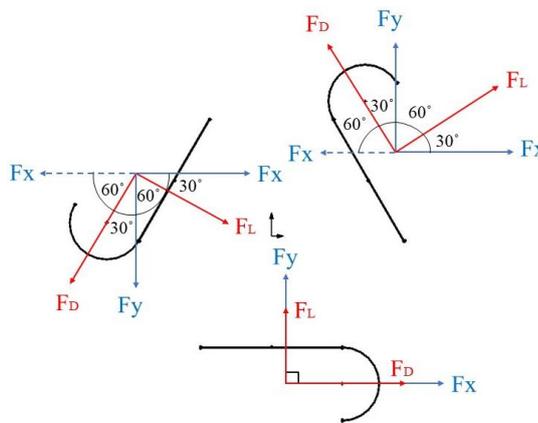
## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Contoh Perhitungan

Proses pengolahan data hasil simulasi diawali dengan dilakukannya perhitungan terhadap nilai  $F_x$  dan  $F_y$  yang diperoleh melalui simulasi yang telah dilakukan menggunakan *software* Fluent 19.2. Proses perhitungan ini dilakukan guna mendapat nilai gaya *drag*, gaya *lift*, torsi statis, koefisien *drag* dan *lift*, serta koefisien torsi statis yang nantinya akan dianalisa dalam bentuk grafik perbandingan.

#### 4.1.1 Perhitungan Gaya *Drag* dan Gaya *Lift* pada Tiap *Blade*

Contoh perhitungan dilakukan pada setiap *blade* dengan sudut putar turbin  $180^\circ$  dan pada kecepatan 6 m/s, dengan menggunakan *free body diagram* sebagai berikut:



**Gambar 4. 1** *Free body diagram* vektor gaya pada setiap *blade* untuk sudut putar turbin  $180^\circ$

Untuk perhitungan gaya *drag* dan *lift* pada *blade* 1, digunakan nilai dari  $F_x$  dan  $F_y$ , dikarenakan arah dari gaya *drag* dan *lift* pada *blade* 1 sama dengan arah dari  $F_x$  dan  $F_y$ , sehingga persamaan menjadi:

$$F_D = F_x = 3,605 \text{ N}$$

$$F_L = F_y = 7,801 \text{ N}$$

Sedangkan untuk perhitungan pada *blade* 2, digunakan perumusan  $\cos$  dan  $\sin$ , dikarenakan terdapat sudut kemiringan yang berlaku pada saat penentuan arah gaya *drag* dan *lift*, sehingga persamaan menjadi sebagai berikut:

$$F_D = F_y \cdot \sin 60^\circ - F_x \cdot \sin 30^\circ$$

$$F_D = 0,83927316 \times \sin 60^\circ - 0,8016704 \times \sin 30^\circ$$

$$F_D = 0,326 \text{ N}$$

$$F_L = F_x \cdot \cos 30^\circ + F_y \cdot \cos 60^\circ$$

$$F_L = 0,8016704 \times \cos 30^\circ + 0,83927316 \times \cos 60^\circ$$

$$F_L = 1,114 \text{ N}$$

Perhitungan gaya *drag* dan *lift* pada *blade* 3, menggunakan cara yang sama seperti perhitungan pada *blade* 2, sebagai berikut:

$$F_D = F_y \cdot \sin 60^\circ - F_x \cdot \sin 30^\circ$$

$$F_D = 4,5068074 \times \sin 60^\circ - 3,589843 \times \sin 30^\circ$$

$$F_D = 2,108 \text{ N}$$

$$F_L = F_x \cdot \cos 30^\circ + F_y \cdot \cos 60^\circ$$

$$F_L = 3,589843 \times \cos 30^\circ + 4,5068074 \times \cos 60^\circ$$

$$F_L = 5,362 \text{ N}$$

Sehingga, gaya *drag* dan gaya *lift* total yang didapat pada turbin sudut  $180^\circ$  dan kecepatan 6 m/s adalah sebagai berikut:

$$F_D = 3,605 \text{ N} + 0,326 \text{ N} + 2,108 \text{ N}$$

$$F_D = 6,039 \text{ N}$$

$$F_L = 7,801 \text{ N} + 1,114 \text{ N} + 5,362 \text{ N}$$

$$F_L = 14,277 \text{ N}$$

#### 4.1.2 Perhitungan Torsi Statis

Untuk menghitung nilai torsi statis ( $T_s$ ), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.5 dengan contoh perhitungan untuk kecepatan 6 m/s pada *blade* dengan sudut putar turbin  $180^\circ$  sebagai berikut:

$$T_s = F_D \cdot R$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka didapatkan nilai torsi statis sebagai berikut:

$$T_s = 6,04 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$T_s = 0,906 \text{ Nm}$$

#### 4.1.3 Perhitungan Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift*

Untuk menghitung nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.3 dengan contoh perhitungan dilakukan pada kecepatan 6 m/s untuk *blade* 1 dengan sudut putar turbin  $180^\circ$  sebagai berikut:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka didapatkan nilai koefisien *drag* sebagai berikut:

$$C_D = \frac{2 \times 3,606 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 0,375 \text{ m}^2}$$

$$C_D = 0,436$$

Kemudian untuk menghitung nilai koefisien *lift* ( $C_L$ ), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.4 dengan contoh perhitungan pada kecepatan 6 m/s untuk *blade* 1 dengan sudut putar turbin  $180^\circ$  sebagai berikut:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka didapatkan nilai koefisien *lift* sebagai berikut:

$$C_L = \frac{2 \times 7,801 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 0,375 \text{ m}^2}$$

$$C_L = 0,943$$

#### 4.1.4 Perhitungan Koefisien Torsi Statis

Untuk menghitung nilai koefisien torsi statis ( $C_{TS}$ ), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.8 dengan contoh perhitungan untuk kecepatan 6 m/s dengan sudut putar turbin  $180^\circ$  sebagai berikut:

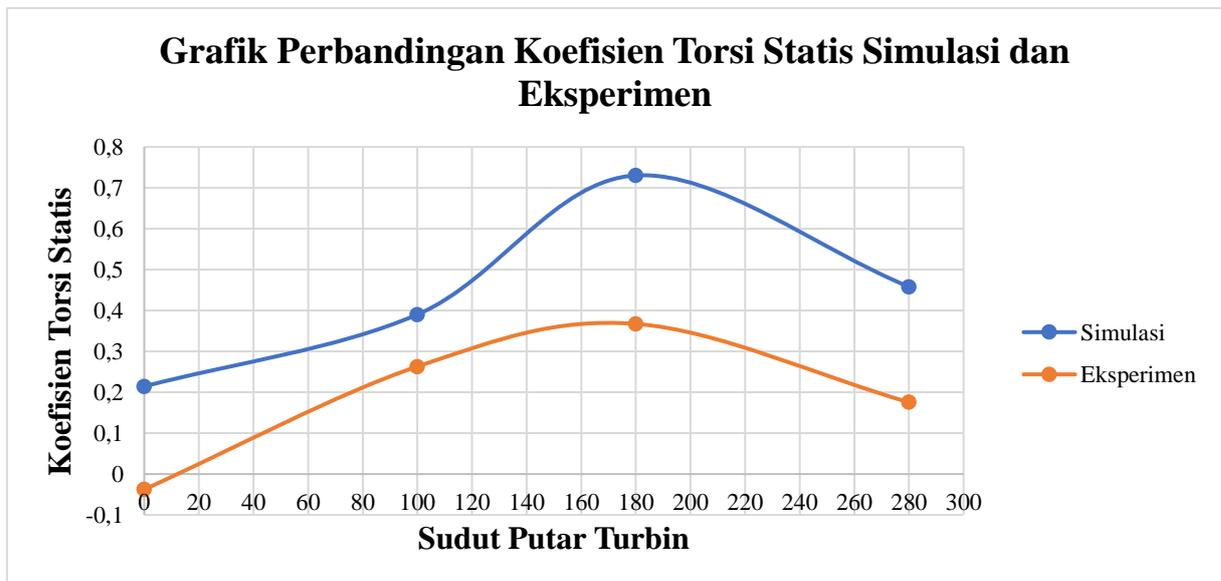
$$C_{TS} = \frac{4 \cdot T_s}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot D}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka didapatkan nilai koefisien torsi statis sebagai berikut:

$$C_{TS} = \frac{4 \times 0,906 \text{ Nm}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,375 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 0,3 \text{ m}}$$

$$C_{TS} = 0,730$$

#### 4.2 Perbandingan Data Hasil Simulasi dengan Eksperimen



**Gambar 4. 2** Grafik perbandingan koefisien torsi statis hasil simulasi dan eksperimen terhadap sudut putar turbin pada kecepatan angin 6 m/s

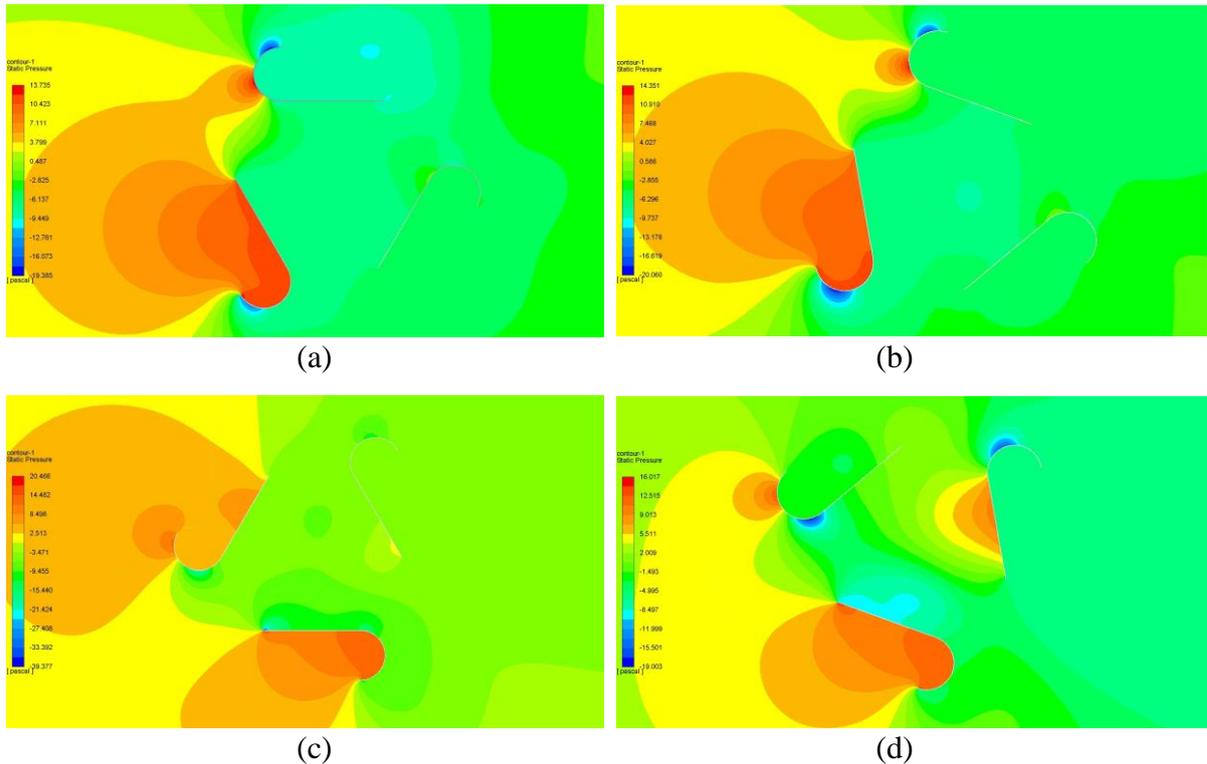
Dapat dilihat pada gambar 4. 2 yang menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis ( $C_{TS}$ ) hasil simulasi dan eksperimen, dapat dilihat bahwa nilai koefisien torsi statis hasil simulasi lebih besar dibandingkan dengan nilai koefisien torsi statis ( $C_{TS}$ ) hasil eksperimen yang dilakukan oleh **Daniel & Ikhwan, 2021**, dimana nilai koefisien torsi statis hasil simulasi pada sudut putar turbin  $0^\circ$  sebesar 0,214, sedangkan untuk hasil eksperimen sebesar -0,037. Kemudian untuk nilai koefisien torsi statis hasil simulasi pada sudut putar turbin  $100^\circ$  adalah 0,390, dimana nilai ini juga lebih besar dibandingkan dengan nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen sebesar 0,263. Selanjutnya untuk sudut putar turbin  $180^\circ$ , nilai koefisien torsi statis hasil simulasi adalah sebesar 0,730, dimana nilai ini tetap lebih besar dibandingkan

dengan nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen yaitu sebesar 0,367. Lalu untuk sudut putar turbin  $280^\circ$ , nilai koefisien torsi statis hasil simulasi tetap lebih besar dibandingkan dengan nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen, dimana nilai koefisien torsi statis hasil simulasi yang didapat sebesar 0,458, sedangkan nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen yang didapat ialah sebesar 0,175. Kemudian, *trend* koefisien torsi statis yang dihasilkan oleh kedua metode, yakni simulasi dan eksperimen sama, dimana nilai  $C_{TS}$  terendah terdapat pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , lalu *trend* nilai  $C_{TS}$  mengalami peningkatan pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , hingga nilai  $C_{TS}$  tertinggi terletak pada sudut putar turbin  $180^\circ$ . Kemudian  $C_{TS}$  mengalami penurunan pada sudut putar turbin  $280^\circ$ . Hal ini sesuai dengan pernyataan hasil simulasi dan penelitian yang dilakukan oleh **Feng et al, 2021**, dimana nilai  $C_{TS}$  hasil eksperimen akan memiliki *trend* yang sama, namun dengan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai  $C_{TS}$  hasil simulasi. Perbedaan nilai koefisien torsi statis antara eksperimen dan simulasi dapat terjadi karena adanya beberapa aspek yang diabaikan saat melakukan simulasi dua dimensi, seperti efek pada ujung *blade*, serta pengaruh dari komponen turbin lainnya. Terlebih, saat dilakukan eksperimen, *bearing* yang digunakan untuk menahan poros turbin dalam kondisi yang kurang baik. Nilai  $C_{TS}$  terendah terletak pada sudut putar turbin  $0^\circ$  dikarenakan pada tersebut, terdapat torsi statis pada *blade* 1 yang memiliki arah *clock wise* (CW), sedangkan torsi statis pada *blade* 2 dan 3 mengarah ke *counter clock wise* (CCW), sehingga mengakibatkan dihasilkannya torsi negatif pada *blade* 1 tersebut. Selain itu, kondisi *blade* 3 yang berada pada daerah *downstream* turbin yang terhalang oleh *blade* 2 dan mengakibatkan aliran angin yang diterima oleh *blade* 3 tidak optimum/sudah mengalami penurunan kecepatan, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* tersebut tidak terlalu besar. Sedangkan pada sudut putar turbin  $180^\circ$ , aliran angin secara langsung mengenai bagian dalam/cekung permukaan *blade* 1 dan 3 yang berada pada daerah *upstream*, sehingga mengakibatkan perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* tersebut dalam kondisi optimum. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** yang menyatakan bahwa *blade* yang berada pada daerah *upstream* akan menerima gaya aerodinamis yang besar dan menghasilkan torsi yang besar pula. Selain itu, torsi statis yang dihasilkan oleh setiap *blade* pada sudut putar turbin  $180^\circ$  mengarah ke CCW, sehingga tidak dihasilkan torsi negatif.

### 4.3 Analisa Fenomena Aliran

Terdapat beberapa fenomena aliran fluida yang dapat terlihat pada kontur dan vektor dari suatu hasil simulasi, seperti *wake*, *vortex*, daerah separasi, dan lainnya yang nantinya dapat dianalisa secara visual untuk mendapatkan penyebab dari besar-kecilnya nilai/hasil data yang didapat. Pada penelitian ini, ditampilkan kontur tekanan dan vektor kecepatan guna melihat dan menganalisa fenomena fluida yang terjadi di sekitar *blade* turbin angin tipe Lenz 2 dengan diameter 300 mm yang sedang diteliti agar dapat diketahui penyebab dari besar atau kecil nilai gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* dan torsi yang dihasilkan *blade* tersebut.

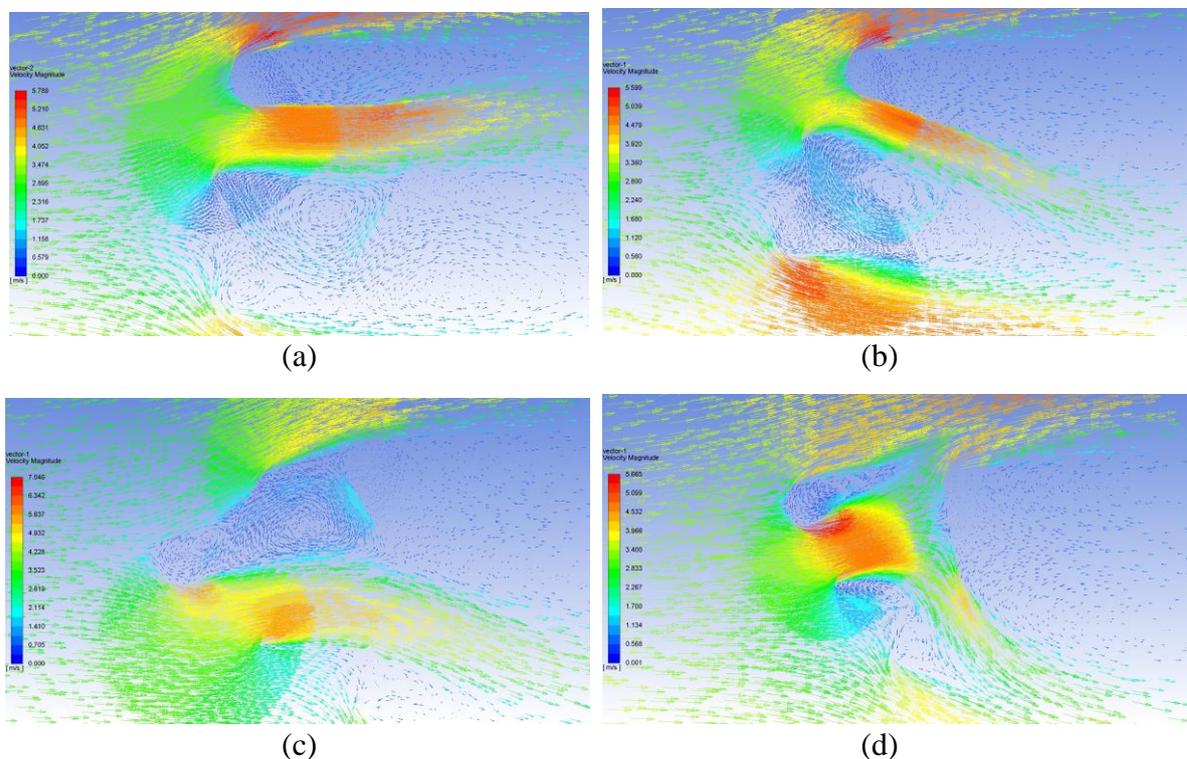
### 4.3.1 Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 4 m/s



**Gambar 4. 3** Kontur tekanan pada kecepatan angin 4 m/s (a) sudut putar turbin  $0^\circ$  (b) sudut putar turbin  $100^\circ$  (c) sudut putar turbin  $180^\circ$  (d) sudut putar turbin  $280^\circ$

Gambar 4. 3 merupakan *display* kontur tekanan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 4 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 3 (a), dapat dilihat bahwa pada sudut putar turbin  $0^\circ$  perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade 2* yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini terjadi dikarenakan bagian depan *blade* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan bagian belakang *blade* tidak dikenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Fenomena ini menyebabkan dihasilkannya gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi *blade* lainnya dengan arah *counter clock wise* (CCW). Sedangkan pada *blade 1* juga bekerja gaya *drag* dan *lift* dengan perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut cukup besar pula. Namun, arah gaya dan torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut adalah *clock wise* (CW), yang berlawanan dengan arah gaya dan torsi statis *blade 2*, sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh *blade 1* bernilai negatif. Kemudian pada *blade 3* tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar dikarenakan *blade* tersebut berada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade 3* sangat kecil. Sedangkan jika dilihat pada sudut putar turbin  $100^\circ$  seperti pada gambar 4. 3 (b), terlihat kontur yang tidak jauh berbeda dengan sudut putar turbin  $0^\circ$ , namun perbedaan tekanan yang sangat besar terjadi pada *blade 1* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin, dan terjadi perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade 3*, serta perbedaan tekanan yang sangat kecil pada *blade 2* di daerah *downstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis terbesar bekerja pada *blade 1* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dengan arah CCW, kemudian pada *blade 3* bekerja gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan pada *blade 1* dan dengan arah CW. Untuk *blade 2* yang berada

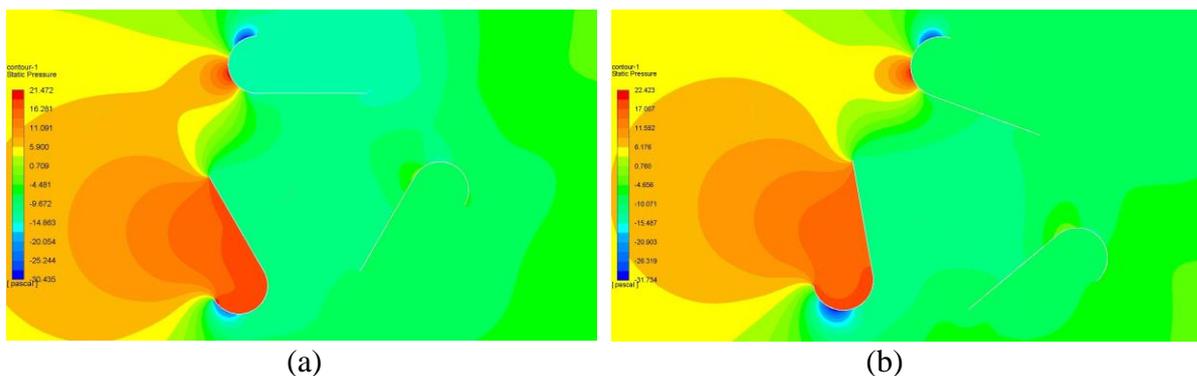
pada daerah *downstream*, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja sangat kecil, karena perbedaan tekanan pada sisi luar dan dalam *blade* tersebut sangat kecil pula, sehingga torsi statis yang dihasilkan pun sangat kecil dengan arah CW. Kemudian pada sudut putar turbin  $180^\circ$  seperti pada gambar 4. 3 (c), distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade* 1 dan 3 yang menyebabkan gaya *drag* dan *lift* pada *blade* tersebut bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik oleh kedua *blade* untuk menghasilkan torsi statis yang cukup besar dengan arah CCW, terlebih pada *blade* 2 juga dihasilkan torsi statis dengan arah yang sama dengan *blade* 1 dan 3, namun tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan posisi *blade* yang berada pada daerah *downstream* sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut tidak optimal dan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut tidak terlalu besar. Distribusi tekanan yang cukup merata terlihat pada kontur tekanan untuk sudut putar turbin  $280^\circ$ , seperti pada gambar 4. 3 (d). Jika dilihat pada posisi ketiga *blade*, terdapat ruang yang cukup besar antar *blade* (bagian tengah rotor) yang memungkinkan aliran angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan cukup besar. Dengan begitu perbedaan tekanan antara sisi luar dan dalam *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* cukup besar, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 1 cukup besar pula dengan arah CCW. Begitu juga dengan *blade* 3 dengan posisinya yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi *blade* yang hampir sama dengan *blade* 1 pada sudut putar turbin  $180^\circ$ . Hal ini mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* 3 sangat besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut juga sangat besar dengan arah CCW. Akan tetapi hal yang berbeda terjadi pada *blade* 2, yang berada pada daerah *upstream*, namun tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 2 tidak cukup besar dengan arah CCW.

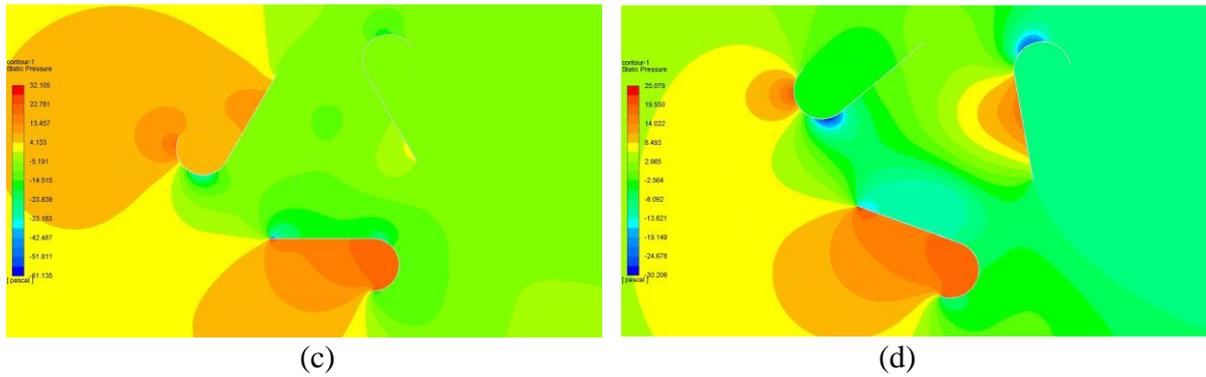


**Gambar 4. 4** Display vektor kecepatan pada kecepatan angin 4 m/s (a) sudut putar turbin  $0^\circ$  (b) sudut putar turbin  $100^\circ$  (c) sudut putar turbin  $180^\circ$  (d) sudut putar turbin  $280^\circ$

Gambar 4. 4 merupakan *display* vektor kecepatan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 4 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 4 (a), dapat dilihat bahwa pada saat turbin berada pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , dihasilkan *wake/vortex* pada daerah separasi yang cukup besar di bagian belakang *blade* 2, sehingga kecepatan angin yang melewati *blade* 3 mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada *blade* 3 tidak terlalu berpengaruh pada gaya *lift* dan *drag* turbin secara keseluruhan, dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *downstream*. Sama halnya dengan sudut putar turbin  $0^\circ$ , pada *blade* yang terletak di daerah *downstream* untuk sudut putar turbin  $100^\circ$ , yaitu *blade* 2 seperti pada gambar 4. 4 (b) tidak dilewati aliran angin dengan kecepatan yang maksimal, melainkan aliran angin telah kehilangan kecepatannya akibat posisi dari *blade* 2 yang terhalang oleh *blade* 1 yang berada pada daerah *upstream* dan *wake* serta *vortex* yang terjadi pada daerah separasi yang terbentuk di bagian belakang *blade* 1, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 sangatlah kecil. Berbeda dengan gaya yang bekerja pada *blade* 1 dan 3, dimana posisinya yang berada pada daerah *upstream* memungkinkan *blade* 1 dan 3 untuk dilewati oleh angin dengan kecepatan yang maksimal/belum mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1 dan 3 cukup besar. Hal serupa terjadi pada *blade* 2 untuk sudut putar turbin  $180^\circ$  seperti pada gambar 4. 4 (c), dimana pada bagian belakang *blade* 3 yang berada pada posisi *upstream*, terbentuk *wake* dan *vortex* pada daerah separasi yang cukup besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 kecil, dikarenakan angin yang melewati *blade* 2 sudah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* 2 yang terhalang oleh *blade* 3. Namun, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1 dan 3 cukup besar dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *upstream*, sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut masih memiliki kecepatan maksimal dikarenakan tidak terhalang oleh *blade* manapun. Gambaran yang berbeda terjadi pada setiap *blade* dengan sudut putar turbin  $280^\circ$ , seperti pada gambar 4. 4 (d). Dapat dilihat bahwasanya ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, sehingga memungkinkan aliran angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan akibat terhalang oleh *blade* lainnya. Hal ini mengakibatkan *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* memiliki gaya *drag* dan *lift* yang cukup besar, hampir sama seperti gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 dan 3 yang berada pada daerah *upstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1, 2, dan 3 akan berpengaruh terhadap gaya *lift* dan *drag* keseluruhan turbin yang nantinya akan berpengaruh terhadap nilai torsi statis keseluruhan pada turbin tersebut. Terlebih, *wake* dan *vortex*, serta daerah separasi yang cukup besar terbentuk di bagian dalam/belakang *blade* 1, bukan di ruang yang terbentuk antar *blade*, sehingga *wake* dan *vortex* tersebut tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap kecepatan aliran angin yang melewati seluruh *blade* pada sudut putar turbin  $280^\circ$ .

### 4.3.2 Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 5 m/s

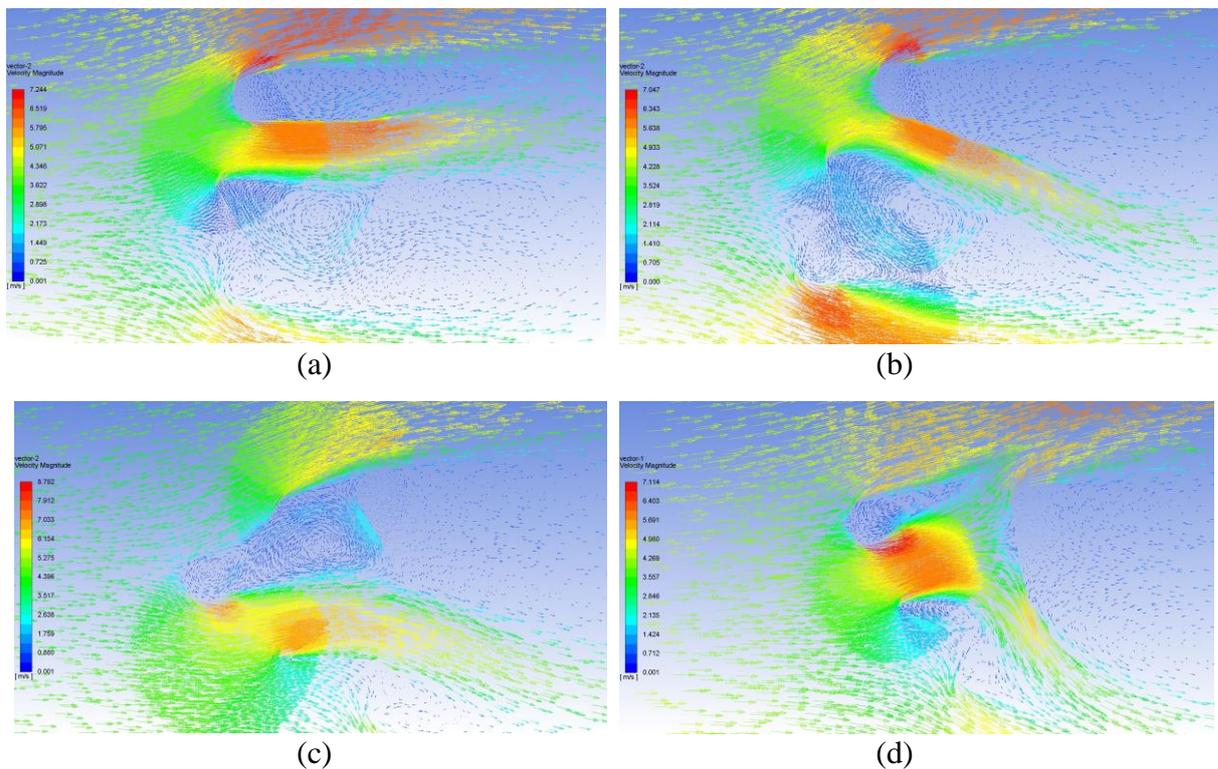




**Gambar 4. 5** Kontur tekanan pada kecepatan angin 5 m/s (a) sudut putar turbin  $0^\circ$  (b) sudut putar turbin  $100^\circ$  (c) sudut putar turbin  $180^\circ$  (d) sudut putar turbin  $280^\circ$

Gambar 4. 5 merupakan *display* kontur tekanan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 5 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 5 (a), dapat dilihat bahwa pada sudut putar turbin  $0^\circ$  perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade 2* yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini terjadi dikarenakan bagian depan *blade* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan bagian belakang *blade* tidak dikenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Fenomena ini menyebabkan dihasilkannya gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi *blade* lainnya dengan arah *counter clock wise* (CCW). Sedangkan pada *blade 1* juga bekerja gaya *drag* dan *lift* dengan perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut cukup besar pula. Namun, arah gaya dan torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut adalah *clock wise* (CW), yang berlawanan dengan arah gaya dan torsi statis *blade 2*, sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh *blade 1* bernilai negatif. Kemudian pada *blade 3* tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar dikarenakan *blade* tersebut berada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade 3* sangat kecil. Sedangkan jika dilihat pada sudut putar turbin  $100^\circ$  seperti pada gambar 4. 5 (b), terlihat kontur yang tidak jauh berbeda dengan sudut putar turbin  $0^\circ$ , namun perbedaan tekanan yang sangat besar terjadi pada *blade 1* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin, dan terjadi perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade 3*, serta perbedaan tekanan yang sangat kecil pada *blade 2* di daerah *downstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis terbesar bekerja pada *blade 1* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dengan arah CCW, kemudian pada *blade 3* bekerja gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan pada *blade 1* dan dengan arah CW. Untuk *blade 2* yang berada pada daerah *downstream*, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja sangat kecil, karena perbedaan tekanan pada sisi luar dan dalam *blade* tersebut sangat kecil pula, sehingga torsi statis yang dihasilkan pun sangat kecil dengan arah CW. Kemudian pada sudut putar turbin  $180^\circ$  seperti pada gambar 4. 5 (c), distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade 1* dan *3* yang menyebabkan gaya *drag* dan *lift* pada *blade* tersebut bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik oleh kedua *blade* untuk menghasilkan torsi statis yang cukup besar dengan arah CCW, terlebih pada *blade 2* juga dihasilkan torsi statis dengan arah yang sama dengan *blade 1* dan *3*, namun tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan posisi *blade* yang berada pada daerah *downstream* sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut tidak optimal dan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut tidak terlalu besar. Distribusi tekanan yang cukup merata terlihat pada kontur tekanan untuk sudut putar turbin  $280^\circ$ , seperti pada gambar 4. 5 (d). Jika dilihat pada posisi ketiga *blade*, terdapat

ruang yang cukup besar antar *blade* (bagian tengah rotor) yang memungkinkan aliran angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan cukup besar. Dengan begitu perbedaan tekanan antara sisi luar dan dalam *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* cukup besar, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 1 cukup besar pula dengan arah CCW. Begitu juga dengan *blade* 3 dengan posisinya yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi *blade* yang hampir sama dengan *blade* 1 pada sudut putar turbin 180°. Hal ini mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* 3 sangat besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut juga sangat besar dengan arah CCW. Akan tetapi hal yang berbeda terjadi pada *blade* 2, yang berada pada daerah *upstream*, namun tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 2 tidak cukup besar dengan arah CCW.

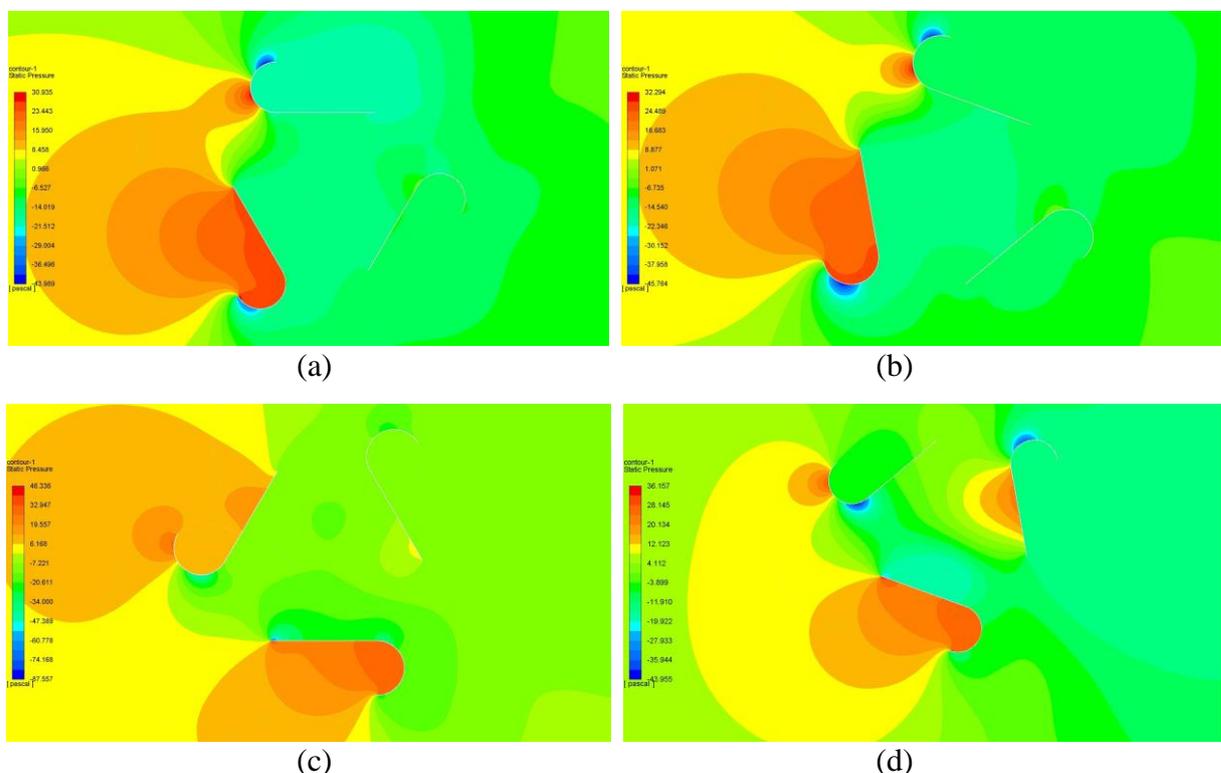


**Gambar 4. 6** *Display* vektor kecepatan pada kecepatan angin 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Gambar 4. 6 merupakan *display* vektor kecepatan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 5 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 6 (a), dapat dilihat bahwa pada saat turbin berada pada sudut putar turbin 0°, dihasilkan *wake/vortex* pada daerah separasi yang cukup besar di bagian belakang *blade* 2, sehingga kecepatan angin yang melewati *blade* 3 mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada *blade* 3 tidak terlalu berpengaruh pada gaya *lift* dan *drag* turbin secara keseluruhan, dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *downstream*. Sama halnya dengan sudut putar turbin 0°, pada *blade* yang terletak di daerah *downstream* untuk sudut putar turbin 100°, yaitu *blade* 2 seperti pada gambar 4. 6 (b) tidak dilewati aliran angin dengan kecepatan yang maksimal, melainkan aliran angin telah kehilangan kecepatannya akibat posisi dari *blade* 2 yang terhalang oleh *blade* 1 yang berada pada daerah *upstream* dan *wake* serta *vortex* yang terjadi pada daerah separasi yang terbentuk di bagian belakang *blade* 1, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 sangatlah kecil. Berbeda dengan gaya yang bekerja

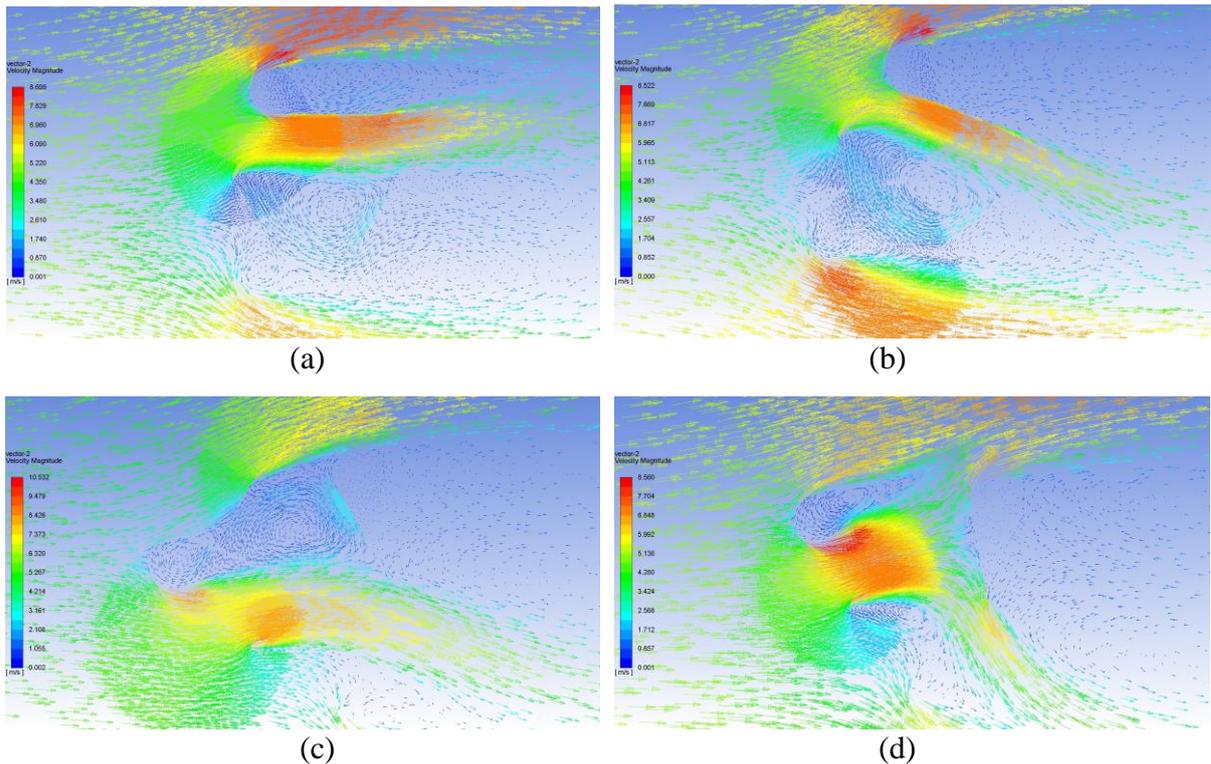
pada *blade* 1 dan 3, dimana posisinya yang berada pada daerah *upstream* memungkinkan *blade* 1 dan 3 untuk dilewati oleh angin dengan kecepatan yang maksimal/belum mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1 dan 3 cukup besar. Hal serupa terjadi pada *blade* 2 untuk sudut putar turbin  $180^\circ$  seperti pada gambar 4. 6 (c), dimana pada bagian belakang *blade* 3 yang berada pada posisi *upstream*, terbentuk *wake* dan *vortex* pada daerah separasi yang cukup besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 kecil, dikarenakan angin yang melewati *blade* 2 sudah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* 2 yang terhalang oleh *blade* 3. Namun, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1 dan 3 cukup besar dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *upstream*, sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut masih memiliki kecepatan maksimal dikarenakan tidak terhalang oleh *blade* manapun. Gambaran yang berbeda terjadi pada setiap *blade* dengan sudut putar turbin  $280^\circ$ , seperti pada gambar 4. 6 (d). Dapat dilihat bahwasanya ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, sehingga memungkinkan aliran angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan akibat terhalang oleh *blade* lainnya. Hal ini mengakibatkan *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* memiliki gaya *drag* dan *lift* yang cukup besar, yang hampir sama seperti gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 dan 3 yang berada pada daerah *upstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1, 2, dan 3 akan berpengaruh terhadap gaya *lift* dan *drag* keseluruhan turbin yang nantinya akan berpengaruh terhadap nilai torsi statis keseluruhan pada turbin tersebut. Terlebih, *wake* dan *vortex*, serta daerah separasi yang cukup besar terbentuk di bagian dalam/belakang *blade* 1, bukan di ruang yang terbentuk antar *blade*, sehingga *wake* dan *vortex* tersebut tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap kecepatan aliran angin yang melewati seluruh *blade* pada sudut putar turbin  $280^\circ$ .

### 4.3.3 Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada 6 m/s



**Gambar 4. 7** Kontur tekanan pada kecepatan angin 6 m/s (a) sudut putar turbin  $0^\circ$  (b) sudut putar turbin  $100^\circ$  (c) sudut putar turbin  $180^\circ$  (d) sudut putar turbin  $280^\circ$

Gambar 4. 7 merupakan *display* kontur tekanan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 6 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 7 (a), dapat dilihat bahwa pada sudut putar turbin  $0^\circ$  perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* 2 yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini terjadi dikarenakan bagian depan *blade* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan bagian belakang *blade* tidak dikenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Fenomena ini menyebabkan dihasilkannya gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang lebih tinggi dibandingkan dengan posisi *blade* lainnya dengan arah *counter clock wise* (CCW). Sedangkan pada *blade* 1 juga bekerja gaya *drag* dan *lift* dengan perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut cukup besar pula. Namun, arah gaya dan torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut adalah *clock wise* (CW), yang berlawanan dengan arah gaya dan torsi statis *blade* 2, sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* 1 bernilai negatif. Kemudian pada *blade* 3 tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar dikarenakan *blade* tersebut berada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* 3 sangat kecil. Sedangkan jika dilihat pada sudut putar turbin  $100^\circ$  seperti pada gambar 4. 7 (b), terlihat kontur yang tidak jauh berbeda dengan sudut putar turbin  $0^\circ$ , namun perbedaan tekanan yang sangat besar terjadi pada *blade* 1 yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin, dan terjadi perbedaan tekanan yang cukup besar pada *blade* 3, serta perbedaan tekanan yang sangat kecil pada *blade* 2 di daerah *downstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis terbesar bekerja pada *blade* 1 yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dengan arah CCW, kemudian pada *blade* 3 bekerja gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan pada *blade* 1 dan dengan arah CW. Untuk *blade* 2 yang berada pada daerah *downstream*, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja sangat kecil, karena perbedaan tekanan pada sisi luar dan dalam *blade* tersebut sangat kecil pula, sehingga torsi statis yang dihasilkan pun sangat kecil dengan arah CW. Kemudian pada sudut putar turbin  $180^\circ$  seperti pada gambar 4. 7 (c), distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade* 1 dan 3 yang menyebabkan gaya *drag* dan *lift* pada *blade* tersebut bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik oleh kedua *blade* untuk menghasilkan torsi statis yang cukup besar dengan arah CCW, terlebih pada *blade* 2 juga dihasilkan torsi statis dengan arah yang sama dengan *blade* 1 dan 3, namun tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan posisi *blade* yang berada pada daerah *downstream* sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut tidak optimal dan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut tidak terlalu besar. Distribusi tekanan yang cukup merata terlihat pada kontur tekanan untuk sudut putar turbin  $280^\circ$ , seperti pada gambar 4. 7 (d). Jika dilihat pada posisi ketiga *blade*, terdapat ruang yang cukup besar antar *blade* (bagian tengah rotor) yang memungkinkan aliran angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan cukup besar. Dengan begitu perbedaan tekanan antara sisi luar dan dalam *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* cukup besar, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 1 cukup besar pula dengan arah CCW. Begitu juga dengan *blade* 3 dengan posisinya yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi *blade* yang hampir sama dengan *blade* 1 pada sudut putar turbin  $180^\circ$ . Hal ini mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* 3 sangat besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang bekerja pada *blade* tersebut juga sangat besar dengan arah CCW. Akan tetapi hal yang berbeda terjadi pada *blade* 2, yang berada pada daerah *upstream*, namun tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut, sehingga gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis yang dihasilkan pada *blade* 2 tidak cukup besar dengan arah CCW.



**Gambar 4. 8** *Display* vektor kecepatan pada kecepatan angin 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Gambar 4. 8 merupakan *display* vektor kecepatan pada setiap variasi sudut putar turbin yang digunakan pada penelitian ini untuk kecepatan 6 m/s, dimana jika mengacu pada gambar 4. 8 (a), dapat dilihat bahwa pada saat turbin berada pada sudut putar turbin 0°, dihasilkan *wake/vortex* pada daerah separasi yang cukup besar di bagian belakang *blade 2*, sehingga kecepatan angin yang melewati *blade 3* mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* dan *drag* yang bekerja pada *blade 3* tidak terlalu berpengaruh pada gaya *lift* dan *drag* turbin secara keseluruhan, dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *downstream*. Sama halnya dengan sudut putar turbin 0°, pada *blade* yang terletak di daerah *downstream* untuk sudut putar turbin 100°, yaitu *blade 2* seperti pada gambar 4. 8 (b) tidak dilewati aliran angin dengan kecepatan yang maksimal, melainkan aliran angin telah kehilangan kecepatannya akibat posisi dari *blade 2* yang terhalang oleh *blade 1* yang berada pada daerah *upstream* dan *wake* serta *vortex* yang terjadi pada daerah separasi yang terbentuk di bagian belakang *blade 1*, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade 2* sangatlah kecil. Berbeda dengan gaya yang bekerja pada *blade 1* dan 3, dimana posisinya yang berada pada daerah *upstream* memungkinkan *blade 1* dan 3 untuk dilewati oleh angin dengan kecepatan yang maksimal/belum mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade 1* dan 3 cukup besar. Hal serupa terjadi pada *blade 2* untuk sudut putar turbin 180° seperti pada gambar 4. 8 (c), dimana pada bagian belakang *blade 3* yang berada pada posisi *upstream*, terbentuk *wake* dan *vortex* pada daerah separasi yang cukup besar, yang mengakibatkan gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade 2* kecil, dikarenakan angin yang melewati *blade 2* sudah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade 2* yang terhalang oleh *blade 3*. Namun, gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade 1* dan 3 cukup besar dikarenakan posisinya yang berada pada daerah *upstream*, sehingga aliran angin yang melewati *blade* tersebut masih memiliki kecepatan maksimal dikarenakan tidak terhalang oleh *blade* manapun. Gambaran yang berbeda terjadi pada setiap *blade* dengan sudut putar turbin 280°, seperti pada gambar 4. 8 (d). Dapat dilihat bahwasanya ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, sehingga memungkinkan aliran

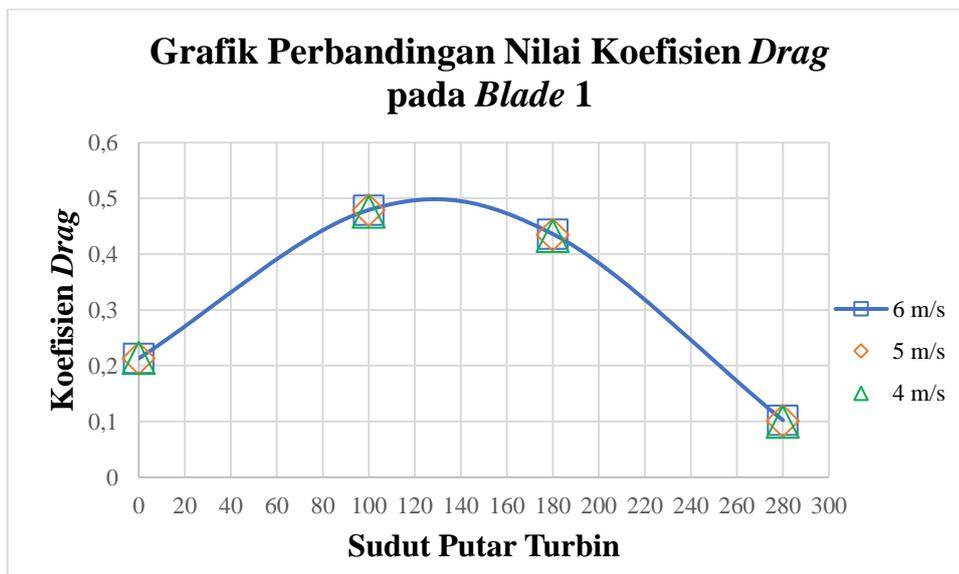
angin untuk masuk dan mengenai *blade* yang berada pada daerah *downstream* dengan kecepatan yang belum mengalami penurunan akibat terhalang oleh *blade* lainnya. Hal ini mengakibatkan *blade* 1 yang berada pada daerah *downstream* memiliki gaya *drag* dan *lift* yang cukup besar, yang hampir sama seperti gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 2 dan 3 yang berada pada daerah *upstream*, sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* 1, 2, dan 3 akan berpengaruh terhadap gaya *lift* dan *drag* keseluruhan turbin yang nantinya akan berpengaruh terhadap nilai torsi statis keseluruhan pada turbin tersebut. Terlebih, *wake* dan *vortex*, serta daerah separasi yang cukup besar terbentuk di bagian dalam/belakang *blade* 1, bukan di ruang yang terbentuk antar *blade*, sehingga *wake* dan *vortex* tersebut tidak terlalu besar pengaruhnya terhadap kecepatan aliran angin yang melewati seluruh *blade* pada sudut putar turbin 280°.

#### 4.4 Analisa Koefisien Drag dan Lift Tiap Blade

Analisa koefisien *drag* dan *lift* dilakukan pada setiap *blade* turbin angin tipe Lenz 2 untuk setiap variasi sudut putar turbin dengan variasi kecepatan angin 4, 5, dan 6 m/s. Hal ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap besar nilai gaya *drag* dan gaya *lift* serta menganalisa posisi sudut putar turbin yang memiliki nilai koefisien *drag* dan *lift*, baik yang tertinggi maupun yang terendah.

##### 4.4.1 Analisa Koefisien serta Gaya Drag dan Lift pada Blade 1 untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin

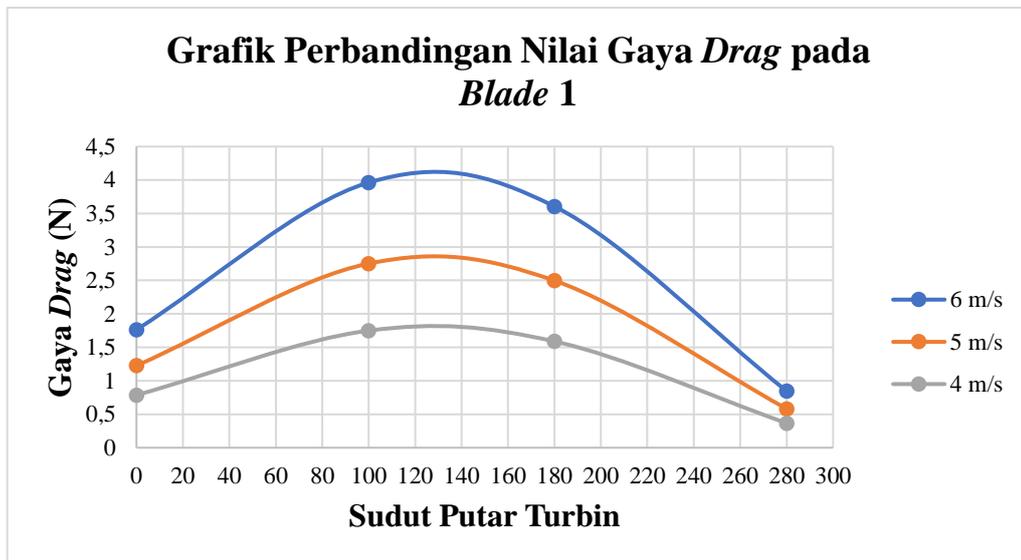
Berikut merupakan grafik perbandingan nilai koefisien serta gaya *drag* dan *lift* pada *blade* 1 untuk setiap variasi kecepatan dan variasi sudut putar turbin, dimana posisi *blade* 1 pada sudut putar turbin 0°, terletak pada sudut 0°, kemudian untuk sudut putar turbin 100° *blade* 1 memiliki posisi pada sudut 100°, untuk sudut putar turbin 180°, *blade* 1 terletak pada posisi sudut 180°, dan untuk variasi sudut putar turbin sebesar 280°, *blade* 1 berada pada posisi sudut 280°.



**Gambar 4.9** Grafik perbandingan koefisien *drag* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4.9 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *drag* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *drag* yang bekerja pada *blade* 1 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana pada sudut putar turbin 0° nilai

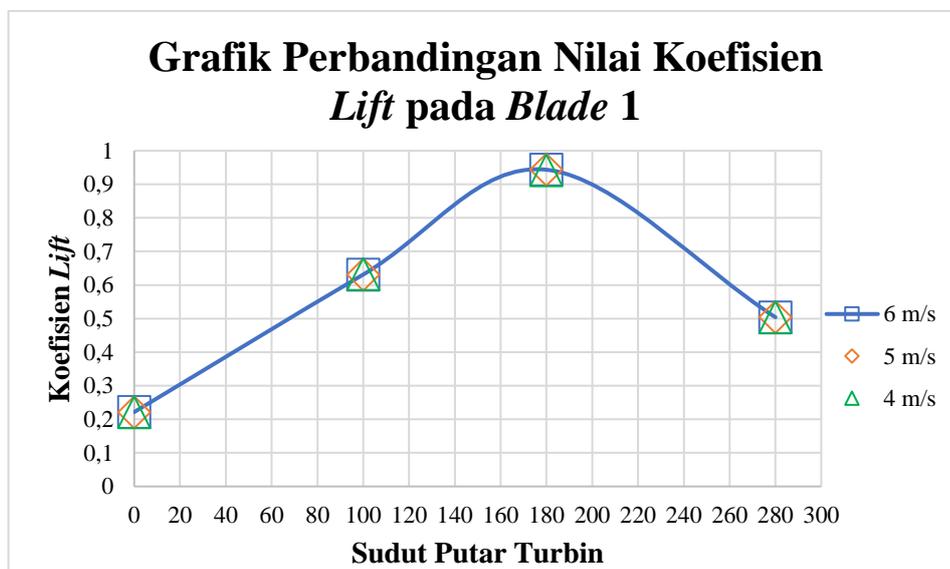
koefisien *drag* yang didapat cukup rendah, kemudian nilai koefisien *drag* menunjukkan peningkatan *trend* saat *blade* 1 berada pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , dimana nilai tersebut merupakan nilai koefisien *drag* tertinggi jika dibandingkan dengan nilai koefisien *drag* pada variasi sudut putar turbin lainnya. Hal ini dikarenakan, jika mengacu pada posisi dari *blade* 1, *blade* tersebut berada pada posisi hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dan berada pada daerah *upstream*. Hal tersebut memungkinkan terjadinya perbedaan tekanan yang tinggi pada *blade* 1, sehingga gaya *drag* pada *blade* 1 untuk sudut putar turbin  $100^\circ$  sangatlah besar, dimana hal tersebut mengakibatkan koefisien *drag* yang diperoleh dari *blade* 1 pada sudut putar turbin  $100^\circ$  memiliki nilai yang tertinggi pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *drag* kembali menunjukkan penurunan nilai pada sudut putar turbin  $180^\circ$  hingga nilai koefisien *drag* terendah diperoleh pada sudut putar turbin  $280^\circ$ . Hal ini dikarenakan, jika mengacu pada posisi *blade* 1 saat sudut putar turbin sebesar  $280^\circ$ , *blade* 1 berada pada daerah *downstream* yang mengakibatkan aliran angin yang akan melewati *blade* tersebut sudah mengalami penurunan kecepatan akibat pengaruh dari *wake/vortex* yang terjadi. Hal ini mengakibatkan nilai gaya dan koefisien *drag* yang diperoleh saat *blade* 1 berada pada posisi sudut putar turbin  $280^\circ$  rendah. Untuk melihat lebih jelas mengenai pengaruh dari kecepatan aliran angin terhadap gaya *drag* pada suatu *blade*, dapat dilihat pada grafik perbandingan gaya *drag* berikut:



**Gambar 4. 10** Grafik perbandingan gaya *drag* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 10 menunjukkan grafik perbandingan nilai gaya *drag* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana untuk sudut putar turbin  $0^\circ$ , nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 dengan kecepatan angin 4 m/s ialah sebesar 0,786 N, sedangkan untuk kecepatan 5 m/s nilai gaya *drag* yang bekerja sebesar 1,226 N dan pada kecepatan 6 m/s, nilai gaya *drag* yang bekerja adalah sebesar 1,763 N. Kemudian *trend* grafik nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 mengalami kenaikan pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , dengan nilai gaya *drag* sebesar 1,749 N untuk kecepatan 4 m/s, 2,751 N untuk kecepatan 5 m/s, dan untuk kecepatan 6 m/s nilai gaya *drag* yang bekerja adalah sebesar 3,962 N. Pada sudut putar turbin  $180^\circ$ , *trend* mengalami penurunan, dimana nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 adalah sebesar 1,589 N untuk kecepatan 4 m/s, sedangkan untuk kecepatan 5 m/s nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 sebesar 2,497 N, dan untuk kecepatan 6 m/s nilai gaya *drag* yang bekerja sebesar 3,606 N. Kemudian *trend* nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 1 kembali

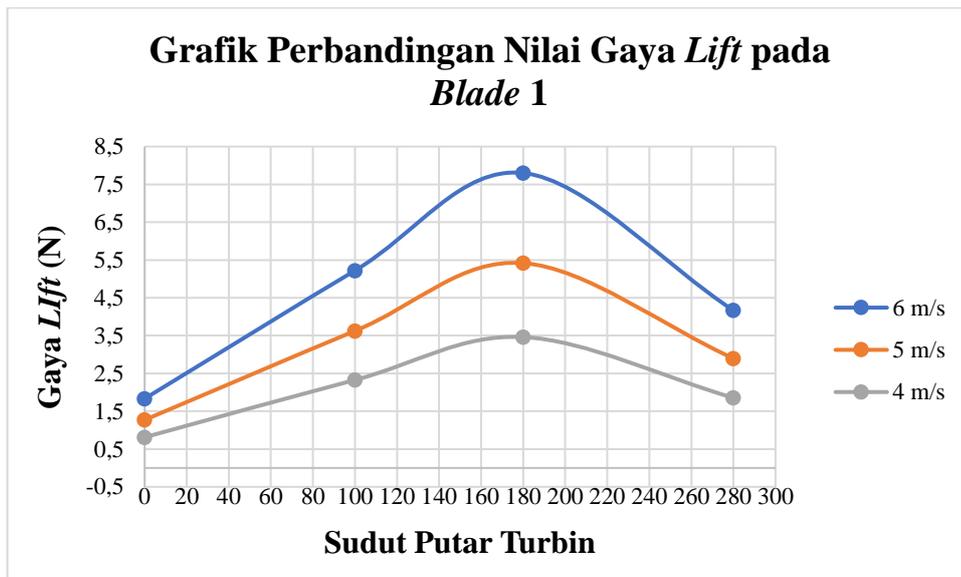
menunjukkan penurunan saat *blade* berada pada sudut putar turbin  $280^\circ$ , dimana nilai gaya *drag* yang bekerja sebesar 0,367 N untuk kecepatan 4 m/s, dan 0,581 N untuk kecepatan 5 m/s, serta sebesar 0,846 N untuk kecepatan 6 m/s. Berdasarkan data hasil simulasi yang didapat, dan jika dilihat dari grafik pada gambar 4. 8, nilai gaya *drag* terbesar yang bekerja pada *blade* 1 terletak pada saat *blade* berada pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$ . Hal ini dikarenakan, jika dilihat dari posisi *blade* 1 pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , *blade* tersebut berada hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dan berada pada daerah *upstream*, dimana hal tersebut memungkinkan aliran angin untuk langsung melewati *blade* 1 dengan kecepatan maksimalnya, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian depan *blade* dengan bagian belakang *blade*, dimana hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* pada *blade* 1 untuk sudut putar turbin  $100^\circ$  lebih besar dibandingkan dengan gaya *drag* pada variasi sudut putar turbin lainnya. Kemudian jika kembali mengacu pada grafik dan data hasil simulasi, dapat dilihat bahwa nilai gaya *drag* terbesar untuk seluruh variasi sudut putar turbin bekerja pada *blade* 1 saat kecepatan angin yang melewati *blade* 1 memiliki nilai yang besar pula, dalam hal ini pada kecepatan 6 m/s, dan sebaliknya nilai gaya *drag* terendah yang bekerja pada *blade* 1 untuk seluruh variasi sudut putar turbin didapat pada saat *blade* 1 dilewati oleh aliran angin dengan kecepatan yang paling rendah dalam penelitian ini, yaitu 4 m/s. Hal ini dapat dibuktikan melalui persamaan gaya *drag* yang ditunjukkan oleh persamaan 2.3 yang menyatakan bahwa kecepatan aliran angin memengaruhi besar atau kecilnya gaya *drag*, dimana semakin tinggi kecepatan angin yang melewati sebuah *blade* maka gaya *drag* yang bekerja pada *blade* tersebut akan menjadi semakin besar, sebaliknya semakin kecil kecepatan aliran angin yang melewati sebuah *blade*, maka gaya *drag* yang bekerja pada *blade* tersebut akan menjadi semakin kecil pula. Adapun grafik yang menunjukkan nilai koefisien *lift* pada *blade* 1 sebagai berikut:



**Gambar 4. 11** Grafik nilai koefisien *lift* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 11 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *lift* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *lift* yang bekerja pada *blade* 1 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana pada sudut putar turbin  $0^\circ$  nilai koefisien *lift* yang diperoleh merupakan nilai terendah, kemudian nilai koefisien *lift* menunjukkan peningkatan *trend* saat turbin berada pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , hingga mencapai nilai koefisien *lift* tertinggi pada saat *blade* 1 berada pada posisi sudut putar turbin  $180^\circ$ . Hal ini dikarenakan, pada sudut putar turbin  $180^\circ$ , *blade* 1 berada pada daerah *upstream*

yang dilewati langsung oleh aliran angin dengan kecepatan maksimalnya, terlebih aliran angin mengenai bagian cekung/dalam permukaan *blade* tersebut, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang tinggi antara bagian dalam dan luar atas *blade*. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 sangat besar, sehingga nilai koefisien *lift* yang diperoleh pada saat *blade* 1 berada pada posisi sudut putar turbin  $180^\circ$  merupakan nilai koefisien *lift* tertinggi jika dibandingkan dengan nilai koefisien *lift* pada variasi sudut putar turbin lainnya. Kemudian *trend* nilai koefisien *lift* kembali menunjukkan penurunan nilai pada sudut putar turbin  $280^\circ$ . Untuk melihat lebih jelas mengenai pengaruh dari kecepatan aliran angin terhadap gaya *lift* pada suatu *blade*, dapat dilihat pada grafik perbandingan gaya *lift* berikut:



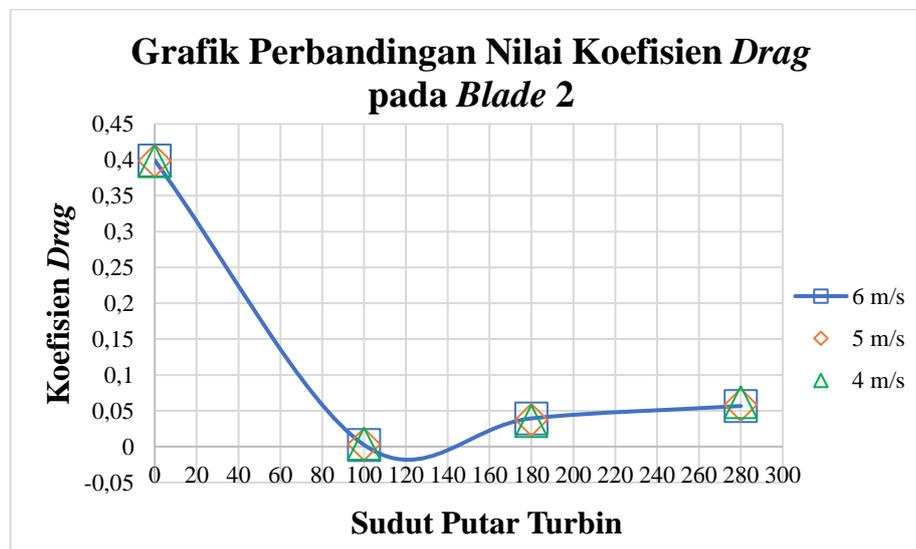
**Gambar 4. 12** Grafik nilai gaya *lift* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 12 menunjukkan grafik perbandingan nilai gaya *lift* pada *blade* 1 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana untuk sudut putar turbin  $0^\circ$ , nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 dengan kecepatan angin 4 m/s ialah sebesar 0,812 N, sedangkan untuk kecepatan 5 m/s nilai gaya *lift* yang bekerja sebesar 1,271 N dan pada kecepatan 6 m/s, nilai gaya *lift* adalah sebesar 1,833 N. Kemudian *trend* grafik nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 mengalami kenaikan pada sudut putar turbin  $100^\circ$ , dengan nilai gaya *lift* sebesar 2,327 N untuk kecepatan 4 m/s, 3,624 N untuk kecepatan 5 m/s, dan sebesar 5,219 N untuk kecepatan 6 m/s. Pada sudut putar turbin  $180^\circ$ , *trend* nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 kembali menunjukkan kenaikan, dimana nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 adalah sebesar 3,462 N untuk kecepatan 4 m/s, sedangkan untuk kecepatan 5 m/s nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 sebesar 5,418 N, dan untuk kecepatan 6 m/s nilai gaya *lift* yang bekerja sebesar 7,801 N. Kemudian *trend* nilai gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 1 menunjukkan penurunan saat *blade* berada pada sudut putar turbin  $280^\circ$ , dimana nilai gaya *lift* yang bekerja sebesar 1,855 N untuk kecepatan 4 m/s, dan 2,896 N untuk kecepatan 5 m/s, serta sebesar 4,167 N untuk kecepatan 6 m/s. Berdasarkan data hasil simulasi yang didapat, dan jika dilihat dari grafik pada gambar 4. 9, nilai gaya *lift* terbesar yang bekerja pada *blade* 1 terletak pada saat *blade* berada pada posisi sudut putar turbin  $180^\circ$ . Hal ini dikarenakan, jika dilihat dari posisi *blade* 1 pada sudut putar turbin  $180^\circ$ , aliran angin yang melewati *blade* 1 mengenai bagian dalam/cekung permukaan

*blade* secara langsung, terlebih *blade* tersebut berada pada daerah *upstream*, dimana hal tersebut memungkinkan aliran angin untuk langsung melewati *blade* 1 dengan kecepatan maksimalnya, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam *blade* 1 dengan bagian luar atas *blade* 1, dan mengakibatkan gaya *lift* pada *blade* 1 untuk sudut putar turbin  $180^\circ$  lebih besar dibandingkan dengan gaya *lift* pada variasi sudut putar turbin lainnya. Kemudian jika kembali mengacu pada grafik dan data hasil simulasi, dapat dilihat bahwa nilai gaya *lift* terbesar untuk seluruh variasi sudut putar turbin, bekerja pada *blade* 1 saat kecepatan angin yang melewati *blade* 1 memiliki nilai yang besar pula, dalam hal ini pada kecepatan 6 m/s, dan sebaliknya nilai gaya *lift* terendah yang bekerja pada *blade* 1 untuk seluruh variasi sudut putar turbin didapat pada saat *blade* 1 dilewati oleh aliran angin dengan kecepatan yang paling rendah dalam penelitian ini, yaitu 4 m/s. Hal ini dapat dibuktikan melalui persamaan gaya *lift* yang ditunjukkan oleh persamaan 2.4 yang menyatakan bahwa kecepatan aliran angin memengaruhi besar atau kecilnya gaya *lift*, dimana semakin tinggi kecepatan angin yang melewati sebuah *blade*, maka gaya *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut akan menjadi semakin besar, sebaliknya semakin kecil kecepatan aliran angin yang melewati sebuah *blade*, maka gaya *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut akan menjadi semakin kecil pula.

#### 4.4.2 Analisa Koefisien Drag dan Lift pada Blade 2 untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin

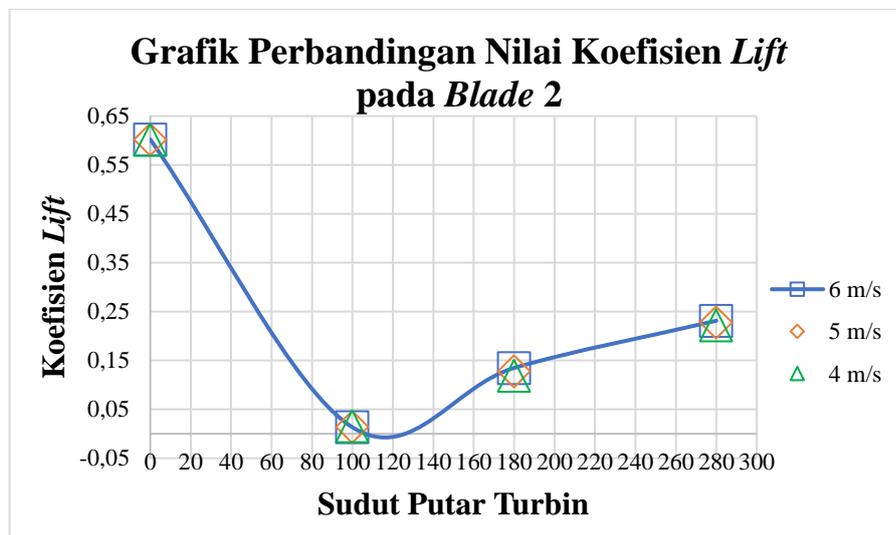
Berikut merupakan grafik perbandingan nilai koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada *blade* 2 untuk setiap variasi kecepatan dan variasi sudut putar turbin, dimana posisi *blade* 2 pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , terletak pada sudut  $120^\circ$ , kemudian untuk sudut putar turbin  $100^\circ$  *blade* 2 memiliki posisi pada sudut  $220^\circ$ , untuk sudut putar turbin  $180^\circ$ , *blade* 2 terletak pada posisi sudut  $300^\circ$ , dan untuk variasi sudut putar turbin sebesar  $280^\circ$ , *blade* 2 berada pada posisi sudut  $40^\circ$ .



**Gambar 4. 13** Grafik perbandingan koefisien *drag* pada *blade* 2 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 13 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *drag* pada *blade* 2 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *drag* yang bekerja pada *blade* 2 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana jika dilihat berdasarkan *trend* yang terbentuk, nilai koefisien *drag* tertinggi diperoleh saat *blade* 2 berada pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$ , *blade* 2 berada pada posisi

hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dan pada daerah *upstream*. Hal ini mengakibatkan *blade 2* dilewati oleh aliran angin dengan kecepatan maksimalnya, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian depan dan bagian belakang *blade 2*. Hal ini menyebabkan, gaya *drag* yang bekerja pada *blade 2* sangatlah besar dan koefisien *drag* yang diperoleh pada *blade 2* untuk sudut putar turbin  $0^\circ$  sangat besar pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *drag* menunjukkan penurunan drastis saat *blade 2* berada pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$ , dimana nilai koefisien *drag* ini merupakan nilai terendah. Hal ini dikarenakan, pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$  *blade 2* berada pada daerah *downstream*, sehingga jika mengacu pada vektor kecepatannya, aliran angin yang akan melewati *blade 2* telah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* yang terhalang oleh *blade* pada daerah *upstream* dan pengaruh *wake/vortex* yang terjadi. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* yang bekerja pada *blade 2* sangatlah kecil, sehingga koefisien *drag* yang diperoleh dari *blade 2* pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$  sangat kecil pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *drag* kembali menunjukkan kenaikan, namun tidak terlalu signifikan pada saat *blade 2* berada pada posisi sudut putar turbin  $180^\circ$  hingga sudut putar turbin  $280^\circ$ . Adapun grafik yang menunjukkan nilai koefisien *lift* pada *blade 2* sebagai berikut:



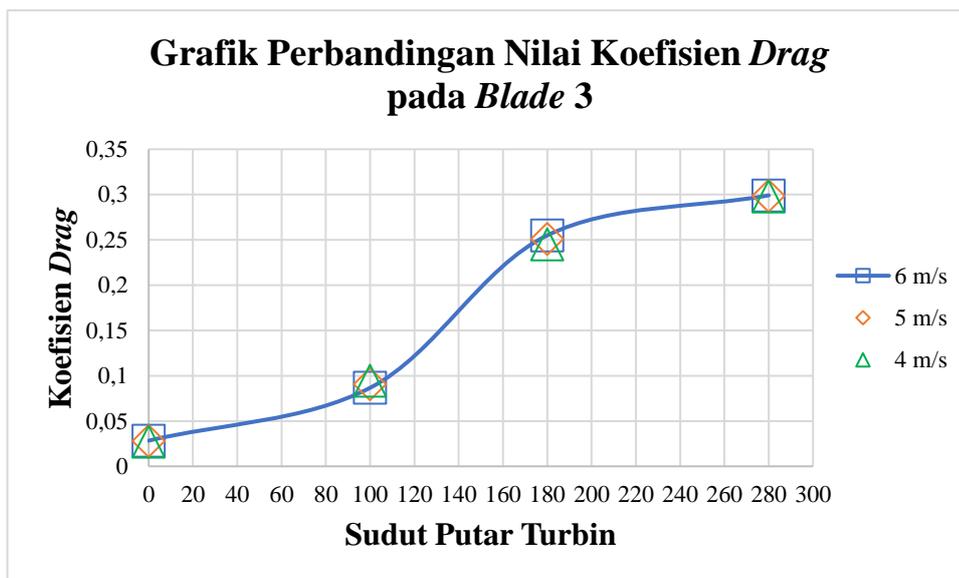
**Gambar 4. 14** Grafik perbandingan koefisien *lift* pada *blade 2* untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 14 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *lift* pada *blade 2* untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *lift* yang bekerja pada *blade 2* memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana jika dilihat berdasarkan *trend* yang terbentuk, nilai koefisien *lift* tertinggi diperoleh saat *blade 2* berada pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , *blade 2* berada pada posisi hampir tegak lurus dengan arah aliran angin dan pada daerah *upstream*. Hal ini mengakibatkan *blade 2* dilewati oleh aliran angin dengan kecepatan maksimalnya, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian depan dan bagian belakang *blade 2*. Hal ini menyebabkan, gaya *lift* yang bekerja pada *blade 2* sangatlah besar dan koefisien *lift* yang diperoleh pada *blade 2* untuk sudut putar turbin  $0^\circ$  sangat besar pula. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** yang menyatakan bahwa *blade* yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin, maka akan menerima gaya aerodinamis yang besar dan sebaliknya, *blade* yang berada pada daerah *downstream* akan menerima gaya aerodinamis

yang kecil, dikarenakan angin yang melewati *blade* tersebut telah kehilangan kecepatannya karena terhalang oleh *blade* pada daerah *upstream* dan pengaruh *wake/vortex* yang terjadi. Kemudian *trend* nilai koefisien *lift* menunjukkan penurunan nilai yang drastis saat *blade 2* berada pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$ . Nilai koefisien *lift* ini merupakan nilai terendah, dikarenakan, pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$  *blade 2* berada pada daerah *downstream*, sehingga jika mengacu pada vektor kecepatannya, aliran angin yang akan melewati *blade 2* telah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* yang terhalang oleh *blade* pada daerah *upstream* dan pengaruh *wake/vortex* yang terjadi. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* yang bekerja pada *blade 2* sangatlah kecil, sehingga koefisien *lift* yang diperoleh dari *blade 2* pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$  sangat kecil pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *lift* kembali menunjukkan kenaikan, namun tidak terlalu signifikan pada saat *blade 2* berada pada posisi sudut putar turbin  $180^\circ$  hingga sudut putar turbin  $280^\circ$ .

#### 4.4.3 Analisa Koefisien *Drag* dan *Lift* pada *Blade 3* untuk Setiap Variasi Kecepatan Angin

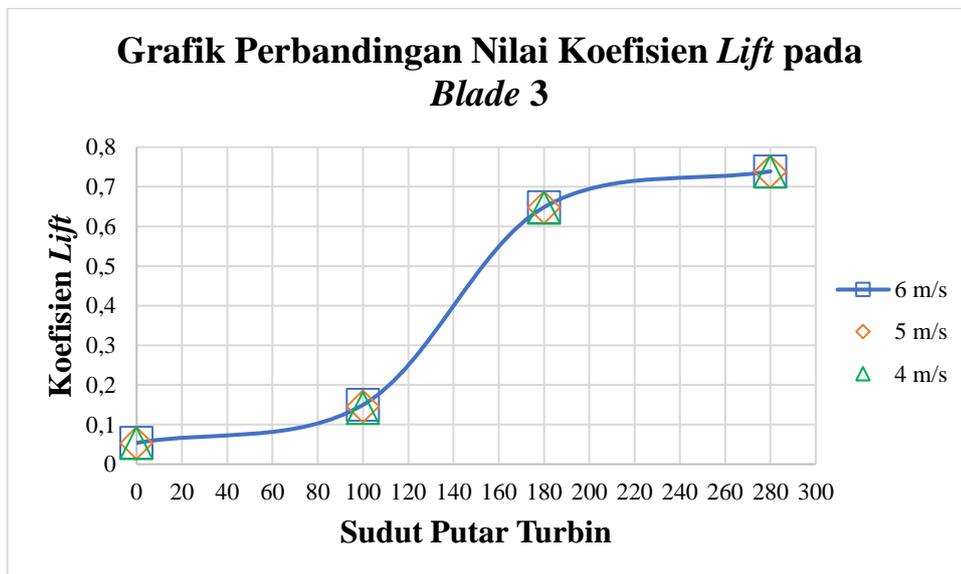
Berikut merupakan grafik perbandingan nilai koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada *blade 3* untuk setiap variasi kecepatan dan variasi sudut putar turbin, dimana posisi *blade 3* pada variasi sudut putar turbin  $0^\circ$ , terletak pada sudut  $240^\circ$ , kemudian untuk sudut putar turbin  $100^\circ$  *blade 3* memiliki posisi pada sudut  $340^\circ$ , untuk sudut putar turbin  $180^\circ$ , *blade 3* terletak pada posisi sudut  $60^\circ$ , dan untuk variasi sudut putar turbin sebesar  $280^\circ$ , *blade 3* berada pada posisi sudut  $160^\circ$ .



**Gambar 4. 15** Grafik perbandingan koefisien *drag* pada *blade 3* untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 15 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *drag* pada *blade 3* untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *drag* yang bekerja pada *blade 3* memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana jika dilihat berdasarkan *trend* yang terbentuk, nilai koefisien *drag* terendah diperoleh saat *blade 3* berada pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , *blade 3* berada pada daerah *downstream*, sehingga jika mengacu pada vektor kecepatannya, aliran angin yang akan melewati *blade 3* telah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* yang terhalang oleh *blade* pada daerah *upstream* dan pengaruh *wake/vortex* yang terjadi. Hal ini mengakibatkan jika

mengacu pada kontur tekanannya, tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam dan luar permukaan pada *blade* 3, yang menyebabkan gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 3 sangatlah kecil, sehingga koefisien *drag* yang diperoleh dari *blade* 3 pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$  sangat kecil pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *drag* menunjukkan kenaikan pada saat *blade* 3 berada pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$ . *Trend* nilai koefisien *drag* pada *blade* 3 terus menunjukkan kenaikan hingga mencapai nilai tertinggi, yakni pada saat *blade* 3 berada pada posisi sudut putar turbin  $280^\circ$ . Hal ini dikarenakan, jika mengacu pada posisi dari *blade* 3 saat sudut putar turbin berada pada  $280^\circ$ , *blade* tersebut berada pada daerah *upstream* yang memungkinkan aliran angin yang melewati *blade* 3 masih memiliki kecepatan maksimalnya. Terlebih, aliran angin yang melewati *blade* 3 mengenai bagian dalam/cekung permukaan *blade* 3, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam dan bagian luar permukaan *blade* 3. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* yang bekerja pada *blade* 3 besar, sehingga koefisien *drag* yang diperoleh dari *blade* 3 pada posisi sudut putar turbin  $280^\circ$  besar pula. Adapun grafik yang menunjukkan nilai koefisien *lift* pada *blade* 3 sebagai berikut:

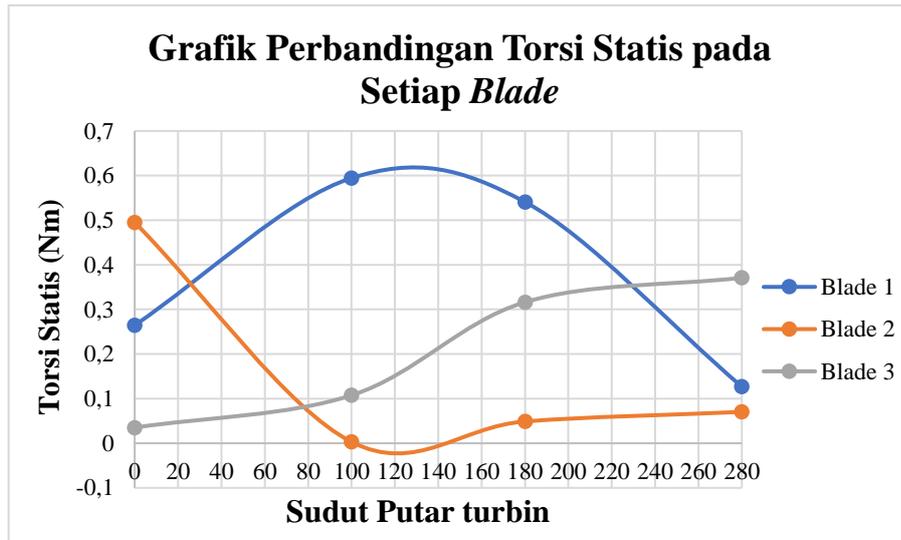


**Gambar 4. 16** Grafik perbandingan koefisien *lift* pada *blade* 3 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan pada setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 16 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien *lift* pada *blade* 3 untuk setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin, dimana jika dilihat berdasarkan bentuk dari grafik tersebut, grafik nilai koefisien *lift* yang bekerja pada *blade* 3 memiliki *trend* yang sama dari seluruh variasi kecepatan yang digunakan, dimana jika dilihat berdasarkan *trend* yang terbentuk, nilai koefisien *lift* terendah diperoleh saat *blade* 3 berada pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin  $0^\circ$ , *blade* 3 berada pada daerah *downstream*, sehingga jika mengacu pada vektor kecepatannya, aliran angin yang akan melewati *blade* 3 telah kehilangan kecepatannya akibat posisi *blade* yang terhalang oleh *blade* pada daerah *upstream* dan pengaruh *wake/vortex* yang terjadi. Hal ini mengakibatkan, jika mengacu pada kontur tekanannya, tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam dan luar permukaan pada *blade* 3, yang menyebabkan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 3 sangatlah kecil, sehingga koefisien *lift* yang diperoleh dari *blade* 3 pada posisi sudut putar turbin  $0^\circ$  sangat kecil pula. Kemudian *trend* nilai koefisien *lift* menunjukkan kenaikan pada saat *blade* 3 berada pada posisi sudut putar turbin  $100^\circ$ . *Trend* nilai koefisien *lift* pada *blade* 3 terus menunjukkan kenaikan hingga mencapai nilai tertinggi, yakni pada saat *blade* 3 berada pada

posisi sudut putar turbin  $280^\circ$ . Hal ini dikarenakan, jika mengacu pada posisi dari *blade* 3 saat sudut putar turbin berada pada  $280^\circ$ , *blade* tersebut berada pada daerah *upstream* yang memungkinkan aliran angin yang melewati *blade* 3 masih memiliki kecepatan maksimalnya. Terlebih, aliran angin yang melewati *blade* 3 mengenai bagian dalam/cekung permukaan *blade* 3, sehingga jika mengacu pada kontur tekanannya, terjadi perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam dan bagian luar permukaan *blade* 3. Hal ini mengakibatkan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* 3 besar, sehingga koefisien *lift* yang diperoleh dari *blade* 3 pada posisi sudut putar turbin  $280^\circ$  besar pula.

#### 4.5 Analisa Perbandingan Nilai Torsi Statis pada Setiap *Blade*

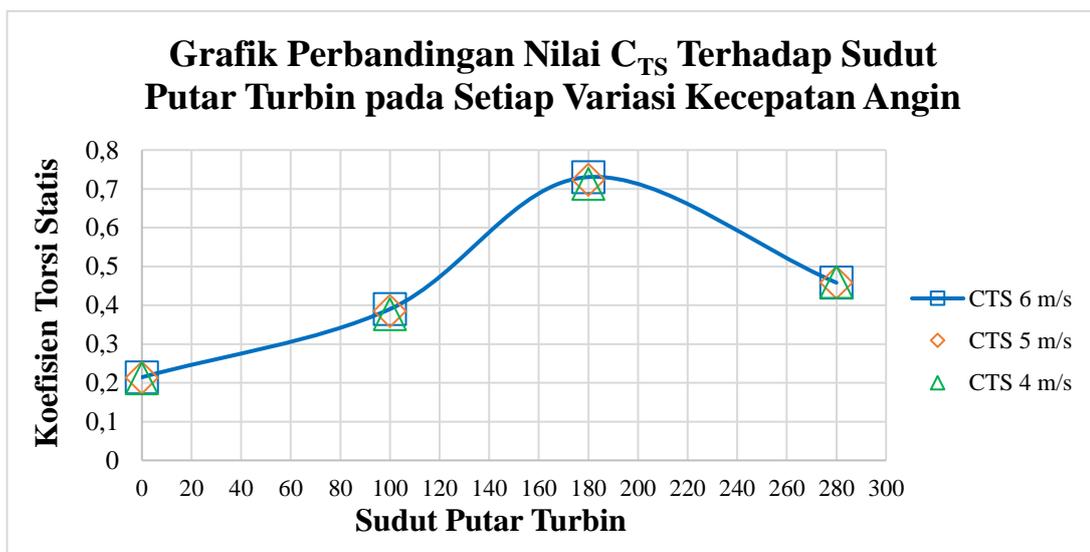


**Gambar 4. 17** Grafik nilai torsi statis pada setiap *blade* untuk setiap variasi sudut putar turbin pada kecepatan 6 m/s

Gambar 4. 17 menunjukkan grafik perbandingan nilai torsi statis pada setiap *blade* untuk kecepatan 6 m/s dan pada seluruh variasi sudut putar turbin, dimana jika mengacu pada grafik tersebut, pada sudut putar turbin  $0^\circ$  *blade* dengan nilai torsi tertinggi ialah *blade* 2 dengan nilai torsi statis sebesar 0,495 Nm, dimana jika dilihat dari posisi *blade* tersebut, *blade* 2 berada pada daerah *upstream* dengan posisi yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin, sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* 2 sangatlah besar. Kemudian untuk sudut putar turbin  $0^\circ$ , nilai torsi statis terbesar kedua dihasilkan oleh *blade* 1 dengan nilai 0,264 Nm, sedangkan untuk nilai torsi statis terendah pada sudut putar turbin  $0^\circ$  dihasilkan oleh *blade* 3 dengan nilai 0,035 Nm, dimana jika dilihat dari posisinya, *blade* 3 berada pada daerah *downstream*, sehingga aliran angin yang akan melewati *blade* 3 telah mengalami penurunan kecepatan akibat pengaruh dari *wake/vortex* yang terjadi dan posisi *blade* 3 yang terhalang oleh posisi dari *blade* 2. Lalu untuk sudut putar turbin  $100^\circ$  derajat, *blade* yang menghasilkan nilai torsi statis tertinggi ialah *blade* 1 dengan nilai sebesar 0,594 Nm, karena jika dilihat dari posisi *blade* tersebut, *blade* 1 berada pada daerah *upstream* dengan posisi yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin yang mengakibatkan torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* 1 sangatlah besar. Sedangkan nilai torsi statis terbesar selanjutnya dihasilkan oleh *blade* 3 dengan nilai sebesar 0,107 Nm, lalu untuk nilai torsi statis terendah dihasilkan oleh *blade* 2 dengan nilai sebesar 0,003 Nm. Hal ini dikarenakan jika dilihat dari posisinya, *blade* 2 berada pada daerah *downstream*, sehingga aliran angin yang akan melewati *blade* 2 telah mengalami penurunan kecepatan akibat pengaruh dari *wake/vortex* yang terjadi dan posisi *blade* 2 yang terhalang oleh posisi dari *blade* 1. Kemudian untuk sudut putar turbin  $180^\circ$ , *blade* yang menghasilkan torsi statis tertinggi ialah *blade* 1 dengan nilai sebesar 0,541 Nm, karena jika dilihat dari posisi *blade* 1, berada pada daerah

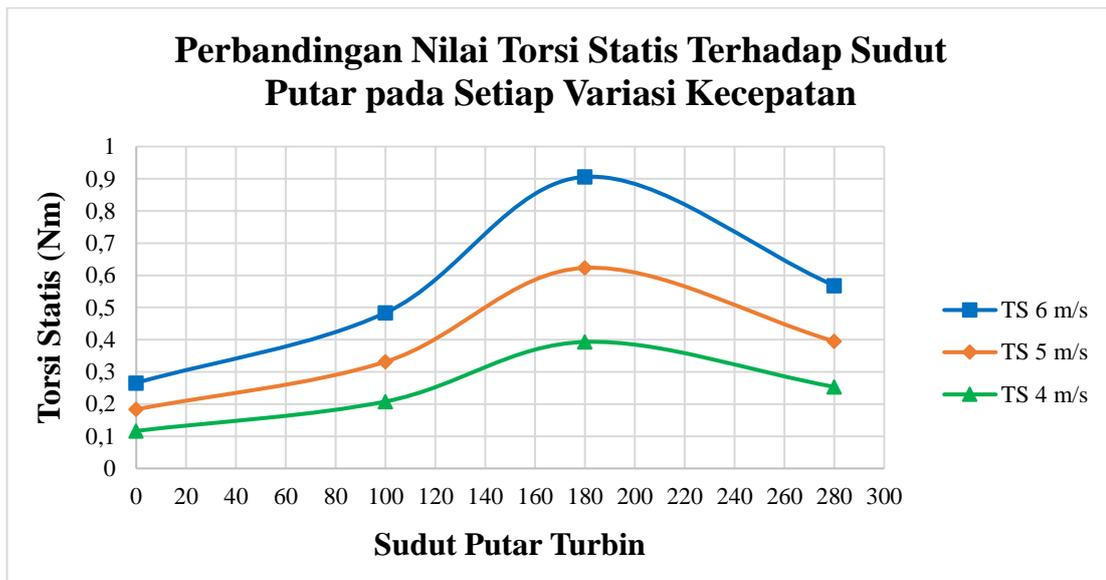
*upstream* dan aliran angin mengenai bagian dalam permukaan/bagian cekung permukaan *blade* 1. Kemudian untuk nilai torsi statis terbesar selanjutnya dihasilkan oleh *blade* 3 dengan nilai sebesar 0,316 Nm, dimana jika dilihat dari posisi *blade* 3 berada, *blade* 3 terletak di daerah *upstream* dengan posisi hampir tegak lurus dengan arah aliran angin. Sedangkan untuk nilai torsi statis terendah yang dihasilkan pada sudut putar turbin 180°, dihasilkan oleh *blade* 2 dengan nilai sebesar 0,049 Nm, dikarenakan posisi *blade* 2 yang berada pada daerah *downstream* yang terhalang oleh posisi dari *blade* 3 yang terletak pada daerah *upstream*. Selanjutnya, untuk sudut putar turbin 280°, torsi statis tertinggi dihasilkan oleh *blade* 3 dengan nilai sebesar 0,371 Nm, dikarenakan jika dilihat dari posisi *blade* tersebut, *blade* 3 terletak pada daerah *upstream* dan dengan posisi yang hampir sama seperti posisi *blade* 1 untuk sudut putar turbin 180°, sehingga aliran angin mengenai bagian dalam permukaan/bagian cekung permukaan *blade* 3. Kemudian torsi statis terbesar selanjutnya dihasilkan oleh *blade* 1 dengan nilai sebesar 0,127 Nm, dikarenakan walaupun posisinya yang berada pada daerah *downstream*, namun akibat dari ruang yang cukup besar yang terbentuk antar *blade*, aliran angin tetap dapat mengenai *blade* 1, sehingga torsi statis yang dihasilkan oleh *blade* tersebut cukup besar. Terlebih posisi dari *blade* 1 hampir tegak lurus dengan arah datang aliran angin. Sedangkan torsi statis terendah dihasilkan oleh *blade* 2 dengan nilai sebesar 0,0703 Nm. Jika dilihat dari posisi beberapa *blade* pada beberapa variasi sudut putar turbin, dapat dianalisa bahwa torsi statis tertinggi dihasilkan ketika posisi *blade* berada tegak lurus atau hampir tegak lurus dengan arah datangnya aliran angin atau dikenai langsung oleh aliran angin pada bagian dalam permukaan/bagian cekung pada permukaan *blade* tersebut. Sebaliknya, nilai torsi terendah dihasilkan oleh *blade* dengan posisi yang berada pada daerah *downstream*. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** yang menyatakan bahwa *blade* yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi yang tegak lurus dengan arah aliran angin, maka akan menerima gaya aerodinamis yang besar dan menghasilkan torsi yang besar pula dan sebaliknya, *blade* yang berada pada daerah *downstream* akan menghasilkan torsi statis yang rendah, dikarenakan angin yang melewati *blade* tersebut telah kehilangan kecepatannya karena terhalang oleh *blade* yang berada pada daerah *upstream* dan pengaruh dari *wake/vortex* yang terjadi.

#### 4.6 Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis dan Torsi statis pada Setiap Variasi Kecepatan dan Sudut Putar Turbin



**Gambar 4. 18** Grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis total untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 18 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis total pada setiap variasi kecepatan dan pada seluruh variasi sudut putar turbin, dimana jika mengacu pada grafik tersebut *trend* nilai koefisien torsi statis yang terbentuk pada setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan sama, dimana nilai torsi statis terendah terletak pada sudut putar turbin  $0^\circ$  untuk setiap variasi kecepataannya, kemudian *trend* grafik nilai torsi statis mengalami kenaikan pada sudut putar turbin  $100^\circ$  yang terus berlanjut hingga nilai koefisien torsi statis terbesar dihasilkan oleh turbin pada sudut putar turbin  $180^\circ$  dari setiap variasi kecepataannya. Setelah itu *trend* nilai koefisien torsi statis menunjukkan penurunan pada sudut putar turbin  $280^\circ$ . Untuk secara lebih detail menganalisa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap nilai torsi statis pada turbin, dapat dilihat pada grafik perbandingan nilai torsi statis berikut:

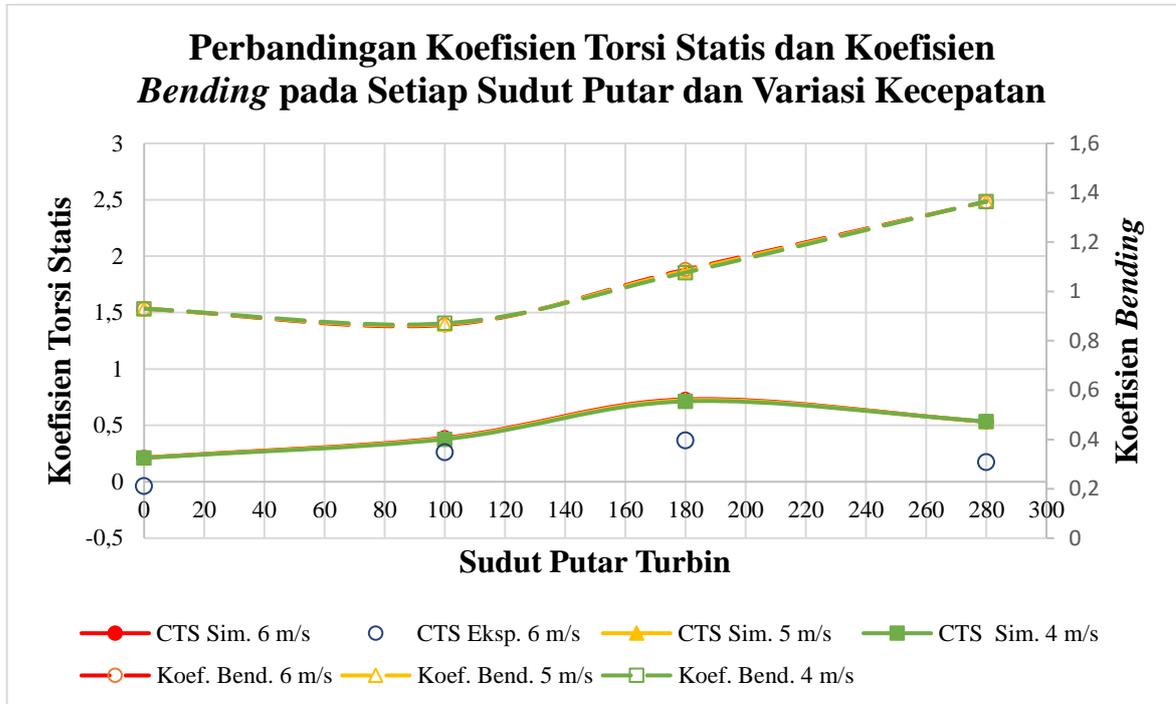


**Gambar 4. 19** Grafik perbandingan nilai torsi statis total untuk setiap variasi sudut putar turbin dan setiap variasi kecepatan aliran angin

Gambar 4. 19 menunjukkan grafik perbandingan nilai torsi statis total pada setiap variasi kecepatan dan pada seluruh variasi sudut putar turbin, dimana jika mengacu pada grafik tersebut, nilai torsi statis terbesar dihasilkan oleh turbin pada sudut putar turbin  $180^\circ$  dari setiap variasi kecepataannya, dengan nilai 0,906 Nm untuk kecepatan 6 m/s, 0,623 Nm untuk kecepatan 5 m/s, dan 0,393 Nm untuk kecepatan 4 m/s. *Trend* nilai torsi statis yang terbentuk pada setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan pun sama, dimana nilai torsi statis terendah terletak pada sudut putar turbin  $0^\circ$  untuk setiap variasi kecepataannya dengan nilai 0,266 Nm untuk kecepatan 6 m/s, 0,183 Nm untuk kecepatan 5 m/s, dan 0,116 Nm untuk kecepatan 4 m/s, kemudian *trend* grafik nilai torsi statis mengalami kenaikan pada sudut putar turbin  $100^\circ$  dengan nilai 0,484 Nm untuk kecepatan 6 m/s, 0,331 Nm untuk kecepatan 5 m/s, dan 0,208 Nm untuk kecepatan 4 m/s. kenaikan nilai torsi statis terus berlanjut hingga nilai torsi statis tertinggi dihasilkan pada saat turbin berada pada sudut putar turbin  $180^\circ$ . Setelah itu *trend* nilai torsi statis menunjukkan penurunan pada sudut putar turbin  $280^\circ$  dengan nilai torsi statis sebesar 0,568 Nm untuk kecepatan 6 m/s, 0,395 Nm untuk kecepatan 5 m/s, dan 0,253 Nm untuk kecepatan 4 m/s. Dapat dilihat juga pada gambar grafik 4. 19, saat turbin dilewati oleh angin dengan kecepatan tertinggi, yaitu kecepatan 6 m/s nilai torsi statis yang dihasilkan pada setiap sudut putar turbinnya pun tertinggi pula. Sedangkan nilai torsi statis terendah berada pada saat turbin dilewati oleh angin dengan kecepatan 4 m/s. Hal ini menandakan bahwa, kecepatan angin dapat memengaruhi nilai torsi statis pada suatu turbin, dimana semakin tinggi nilai kecepatan angin yang melewati suatu turbin, maka torsi statis yang dihasilkan oleh turbin tersebut akan

semakin besar pula. Hasil nilai torsi statis ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** dan **Feng et al, 2021**, serta persamaan 2.6 yang menyatakan bahwa semakin tinggi kecepatan angin yang melewati sebuah turbin, maka torsi/torsi statis yang dihasilkan oleh turbin tersebut akan semakin besar.

#### 4.7 Analisa Perbandingan Koefisien Torsi Statis dan Koefisien *Bending*



**Gambar 4. 20** Grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis dan koefisien *bending* terhadap variasi sudut putar turbin pada setiap variasi kecepatan

Gambar 4. 20 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis dan koefisien *bending* untuk seluruh variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin, dimana jika mengacu pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa nilai koefisien torsi statis simulasi maupun eksperimen dan koefisien *bending* total turbin pada setiap variasi sudut putar turbin menunjukkan *trend* yang berbeda, dimana nilai koefisien *bending* total turbin tertinggi diperoleh pada saat turbin berada pada posisi sudut putar turbin 280° untuk setiap variasi kecepatannya, sedangkan nilai tertinggi koefisien torsi statis, baik simulasi maupun eksperimen dihasilkan oleh turbin pada saat turbin berada pada posisi sudut putar turbin 180° untuk setiap variasi kecepatannya. Dapat dilihat juga pada grafik gambar 4. 20, bahwa nilai koefisien *bending* yang bekerja pada turbin lebih besar dibandingkan nilai koefisien torsi statis yang dihasilkan oleh turbin, sehingga dibutuhkan struktur turbin yang cukup kuat untuk menahan koefisien *bending* yang bekerja pada turbin agar tidak terjadi kegagalan pada saat turbin beroperasi yang mengakibatkan ketidakmaksimalan performa turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Penelitian telah dilakukan guna mengetahui pengaruh variasi kecepatan aliran angin dengan nilai 4, 5, dan 6 m/s terhadap performa turbin angin tipe Lenz 2 dengan jumlah *blade* 3 dan diameter turbin 300 mm dan telah didapat hasil data simulasi yang dibutuhkan. Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah didapat, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi kecepatan angin memengaruhi besar nilai gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada suatu *blade*/turbin, dimana semakin tinggi kecepatan angin yang melewati suatu *blade*/turbin maka gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade*/turbin tersebut akan semakin besar pula.
2. Variasi kecepatan angin memengaruhi besar nilai torsi statis yang dihasilkan oleh suatu *blade*/turbin, dimana semakin tinggi kecepatan angin yang melewati suatu *blade*/turbin maka torsi statis yang dihasilkan pada *blade*/turbin tersebut akan semakin besar pula. Dengan nilai torsi statis maksimum didapat ketika turbin dilewati oleh angin dengan kecepatan 6 m/s pada sudut putar turbin 180° sebesar 0,906 Nm.
3. Sesuai dengan pernyataan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh **Feng et al, 2021**, bahwa nilai koefisien torsi statis hasil simulasi akan memiliki *trend* yang relatif sama dengan eksperimen, namun nilai koefisien torsi statis hasil simulasi akan lebih besar dibandingkan dengan nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa aspek yang diabaikan saat dilakukan simulasi. Pada penelitian ini, didapat nilai  $C_{TS}$  maksimum hasil simulasi dan eksperimen berturut-turut sebesar 0,730 dan 0,367 pada sudut putar turbin 180°.

### 5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan agar penelitian berikutnya lebih baik dibandingkan dengan penelitian saat ini adalah sebagai berikut:

1. Dilakukan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) lebih lanjut perihal torsi dinamis, CoP, dan  $C_M$ , guna memperkuat uji performa pada turbin angin tipe Lenz 2 yang digunakan dengan menggunakan model tiga dimensi dan *rotating* agar didapat data yang lebih detail, sehingga analisa yang dilakukan akan menjadi lebih baik.
2. Dilakukan Analisa simulasi CFD lebih lanjut pada turbin angin Lenz 2 dengan model turbulensi lainnya, seperti  $K-\omega$  (*standard* atau SST).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abu-El-Yazied, T. G., Ali, A. M., Al-Ajmi, M. S., Hassan, I. M. (2015). Effect of number of blades and blade chord length on the performance of darrieus wind turbine. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2(1): 16-25.
- Feng, F., Tong, G., Ma, Y., Li, Y. (2021) Numerical Simulation and Wind Tunnel Investigation on Static Characteristics of VAWT Rotor Starter with Lift-Drag Combined Structure. Basel: MDPI. Vol-14.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2022). Capaian kinerja sektor ESDM tahun 2021 & rencana 2022. Jakarta, Indonesia.
- Lee, M., Park, G., Park, C., Kim, C. (2020). Improvement of grid independence test for computational fluid dynamics model of building based on grid resolution. Seoul: Hindawi.
- Lynn, A. P., (2012). *Onshore and Offshore Wind Energy*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 9781119954606.
- Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained theory, design and application second edition*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Mao, Z., & Bai, J. (2018). Numerical investigation of a small water turbine used for the power supply of underwater vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6). <https://doi.org/10.1177/1687814018783654>
- Nishioka, A. H., Almeida, O. D. (2018). Study, design and test of a lenz-type wind turbine. *international journal of advanced engineering research and science*. Vol-5, Issue-3, ISSN: 2349-6495(P).
- Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi & Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2021). *Perspektif teknologi energi indonesia: Tenaga surya untuk penyediaan energi charging station*. Jakarta, Indonesia.
- Rahman, L. F., Daniel, G., & Ikhwan, N. (2021). Experimental Study of The Effect of Blade Chord Lenth (C) and Turbine Diameter (D) Differences on Performance and Optimum Operating Condition of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) Type Lenz 2 on Laboratory Scale. *Jurnal Teknik Mesin ITS*.
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., Blocken, B. (2018). *Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades*. Eindhoven: Elsevier Ltd.
- Schaffarczyk, A. P., (2014). *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. Kiel: Springer. ISSN 1865-3537.
- Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2020). *Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020*. Jakarta: Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. Edisi No. 34.
- Taufiqurrahman, R., & Suphandani, V. (2017). Penelitian numerik turbin angin darrieus dengan variasi jumlah sudu dan kecepatan angin. *Jurnal Teknik ITS* Vol. 6, No. 1, ISSN: 2337-3539.
- Thabet, S., Thabit, H. T. (2018). *Computational fluid dynamics: Science of the future*. *international journal of jeresch and engineering*, Vol. 5 No. 6, ISSN: 2348-7860 (O).
- Tiju, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., Sopian, K. (2015). *Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations*. Selangor: Elsevier Ltd.
- Zwierzchowski, J., Laski, P. A., Blasiak, S., Takosoglu, J. A., Pietrala, D. S., Bracha, G. F., Nowakowski, L. (2017). *Model tests of wind turbine with a vertical axis of rotation type Lenz 2*. Polandia: EDP Sciences.

## LAMPIRAN

### A. Data Hasil Simulasi Koefisien serta Gaya *Drag* dan *Lift* pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 Untuk Jumlah *Blade* 3, *Blade Chord Length* 180 mm, dan Diameter Turbin 300 mm dengan Variasi Kecepatan 4, 5, dan 6 m/s

Tabel A.1 Data nilai koefisien serta gaya *drag* dan *lift* hasil simulasi pada kecepatan 4 m/s

Kecepatan 4 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien <i>Drag</i>	Koefisien <i>Lift</i>
Sudut 0 Derajat	1	0,78627978	0,81170319	-0,78627978	0,81170319	-0,213953682	0,220871616
	2	2,6469848	0,16236204	1,46410205	2,21117506	0,398395116	0,601680288
	3	0,11936434	0,18403785	0,09969928	-0,19539148	0,027129057	-0,053167749
Sudut 100 Derajat	1	2,5954933	1,3188787	1,74954465	2,32704104	0,476066572	0,633208447
	2	0,02560044	0,054515832	0,01543103	-0,0582172	0,004198919	-0,015841414
	3	0,50573888	0,37308107	-0,34763785	0,52355441	-0,094595334	0,142463786
Sudut 180 Derajat	1	1,5892104	3,4616271	1,5892104	3,4616271	0,432438204	0,941939347
	2	0,31157123	0,33109416	0,13095034	0,43537568	0,035632745	0,118469573
	3	1,6098222	1,9688521	0,90016483	2,37857297	0,244942812	0,64723074
Sudut 280 Derajat	1	1,7628339	0,68328598	0,36679244	1,85470386	0,099807466	0,504681322
	2	0,69810458	0,47781211	-0,22764743	0,81475829	-0,061944879	0,221702935
	3	1,9567098	2,1738692	1,0951987	2,71200301	0,298013253	0,737960003

Tabel A.2 Data nilai koefisien serta gaya *drag* dan *lift* hasil simulasi pada kecepatan 5 m/s

Kecepatan 5 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien <i>Drag</i>	Koefisien <i>Lift</i>
Sudut 0 Derajat	1	1,226246	1,2707209	-1,226246	1,2707209	-0,213550324	0,221295613
	2	4,1387215	0,25542324	2,29056376	3,45652634	0,3989009	0,601952886
	3	0,18674278	0,29249443	0,15993622	-0,30797121	0,027852838	-0,053633081
Sudut 100 Derajat	1	4,0465572	2,0802327	2,75130657	3,62385229	0,479139104	0,631092643
	2	0,03919492	0,076397374	0,01908224	-0,08371779	0,003323165	-0,014579425
	3	0,77730412	0,61157283	-0,52125672	0,84054414	-0,09077668	0,146380476
Sudut 180 Derajat	1	2,4969332	5,4184338	2,4969332	5,4184338	0,434840067	0,943618403
	2	0,52733353	0,55377474	0,21591623	0,7335716	0,037601738	0,127751245
	3	2,5034842	3,1098068	1,44142959	3,72298432	0,251024473	0,648356452
Sudut 280 Derajat	1	2,7511276	1,0755588	0,58149035	2,89610062	0,101266347	0,504354937
	2	1,0978003	0,78425051	-0,33685731	1,30642318	-0,058663586	0,227513152
	3	3,061754	3,3987796	1,71465655	4,24098965	0,298606856	0,738566905

Tabel A.3 Data nilai koefisien serta gaya *drag* dan *lift* hasil simulasi pada kecepatan 6 m/s

Kecepatan 6 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien Drag	Koefisien Lift
Sudut 0 Derajat	1	1,7632777	1,8329615	-1,7632777	1,8329615	-0,21324598	0,221673348
	2	5,9617375	0,37009024	3,3013763	4,97797101	0,399259416	0,602022193
	3	0,26967988	0,42626423	0,23431571	-0,44668174	0,028337501	-0,054020468
Sudut 100 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien Drag	Koefisien Lift
	1	5,8280669	2,9960561	3,96257247	5,21926579	0,479222672	0,631203723
	2	0,0552546	0,097165252	0,02012914	-0,10994988	0,002434363	-0,013297037
Sudut 180 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien Drag	Koefisien Lift
	1	3,6055329	7,8011769	3,6055329	7,8011769	0,436043283	0,943452989
	2	0,8016704	0,83927316	0,32599668	1,11390351	0,039425146	0,134712443
Sudut 280 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien Drag	Koefisien Lift
	1	3,9567841	1,5572551	0,84650855	4,16708617	0,102374428	0,503955999
	2	1,5881509	1,1634173	-0,46876395	1,91207308	-0,056691029	0,231240886
Sudut 280 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Koefisien Drag	Koefisien Lift
	3	4,413835	4,8961588	2,47306324	6,11050477	0,299085502	0,738987728

**B. Data Hasil Simulasi Torsi Statis dan Koefisien Torsi statis pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 Untuk Jumlah Blade 3, Blade Chord Length 180 mm, dan Diameter Turbin 300 mm dengan Variasi Kecepatan 4, 5, dan 6 m/s**

Tabel B.1 Data nilai torsi statis dan koefisien torsi statis hasil simulasi pada kecepatan 4 m/s

Kecepatan 4 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
Sudut 0 Derajat	1	0,78627978	0,81170319	-0,78627978	-0,117941967	0,116628233	0,211570491
	2	2,6469848	0,16236204	1,464102051	0,219615308		
	3	0,11936434	0,18403785	0,099699283	0,014954893		
Sudut 100 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	2,5954933	1,3188787	1,749544651	0,262431698	0,207971366	0,377272319
	2	0,025600441	0,054515832	0,015431026	-0,002314654		
3	0,50573888	0,37308107	-0,347637853	-0,052145678			
Sudut 180 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	1,5892104	3,4616271	1,5892104	0,23838156	0,393048836	0,713013761
	2	0,31157123	0,33109416	0,130950339	0,019642551		
3	1,6098222	1,9688521	0,900164835	0,135024725			
Sudut 280 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	1,7628339	0,68328598	0,366792436	0,055018865	0,253445786	0,459765598
	2	0,69810458	0,47781211	-0,22764743	0,034147115		
3	1,9567098	2,1738692	1,095198705	0,164279806			

Tabel B.2 Data nilai torsi statis dan koefisien torsi statis hasil simulasi pada kecepatan 5 m/s

Kecepatan 5 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
Sudut 0 Derajat	1	1,226246	1,2707209	-1,226246	-0,1839369	0,183638097	0,213203414
	2	4,1387215	0,25542324	2,290563765	0,343584565		
	3	0,18674278	0,29249443	0,159936217	0,023990433		
Sudut 100 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	4,0465572	2,0802327	2,751306575	0,412695986	0,331645143	0,385039259
	2	0,039194916	0,076397374	0,019082238	-0,002862336		
3	0,77730412	0,61157283	-0,521256719	-0,078188508			
Sudut 180 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	2,4969332	5,4184338	2,4969332	0,37453998	0,623141853	0,723466278
	2	0,52733353	0,55377474	0,215916228	0,032387434		
3	2,5034842	3,1098068	1,44142959	0,216214438			
Sudut 280 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	2,7511276	1,0755588	0,581490351	0,087223553	0,394950632	0,458536788
	2	1,0978003	0,78425051	-0,336857309	0,050528596		
3	3,061754	3,3987796	1,714656555	0,257198483			

Tabel B.3 Data nilai torsi statis dan koefisien torsi statis hasil simulasi pada kecepatan 6 m/s

Kecepatan 6 m/s							
	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
Sudut 0 Derajat	1	1,7632777	1,8329615	-1,7632777	-0,264491655	0,265862147	0,214350937
	2	5,9617375	0,37009024	3,3013763	0,495206445		
	3	0,26967988	0,42626423	0,234315712	0,035147357		
Sudut 100 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	5,8280669	2,9960561	3,962572472	0,594385871	0,483843747	0,390098259
	2	0,055254604	0,097165252	0,020129138	-0,003019371		
3	1,0977321	0,92015749	-0,716818357	-0,107522754			
Sudut 180 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	3,6055329	7,8011769	3,6055329	0,540829935	0,905942666	0,730414848
	2	0,8016704	0,83927316	0,325996677	0,048899502		
3	3,589843	4,5068074	2,108088198	0,31621323			
Sudut 280 Derajat	Blade	Fx	Fy	FD	Torsi Statis	Torsi Statis Total	CTS Simulasi
	1	3,9567841	1,5572551	0,846508548	0,126976282	0,568250361	0,458150959
	2	1,5881509	1,1634173	-0,468763946	0,070314592		
3	4,413835	4,8961588	2,473063244	0,370959487			

**C. Data Nilai Koefisien Torsi Statis Hasil Simulasi pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 Untuk Jumlah Blade 3, Blade Chord Length 180 mm, dan Diameter Turbin 300 mm dengan Variasi Kecepatan 6 m/s**

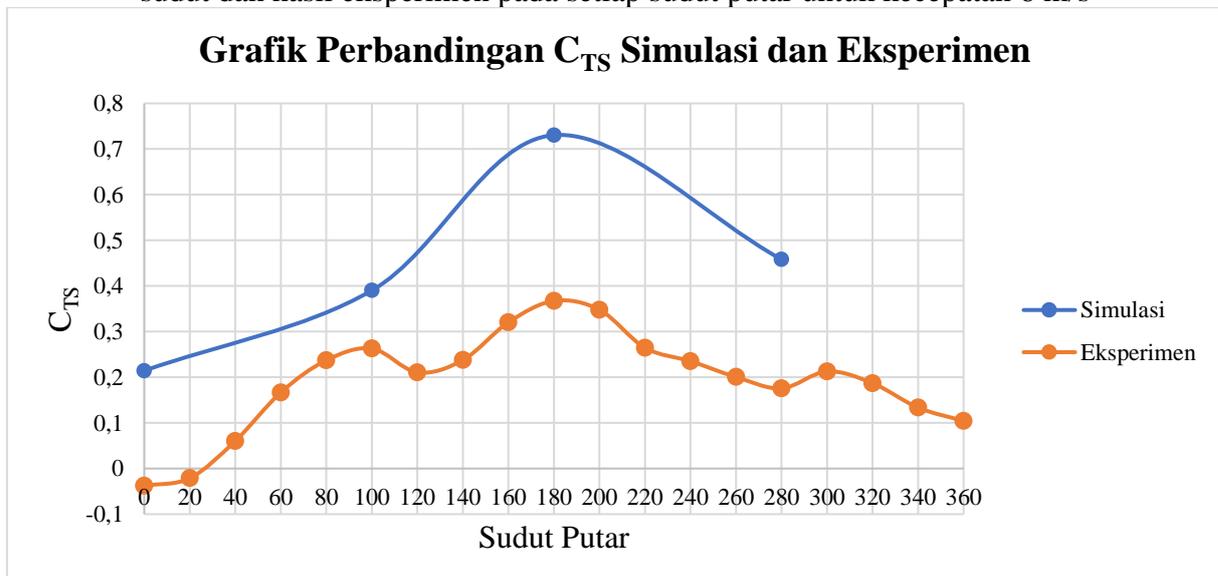
Tabel C.1 Data nilai koefisien torsi statis hasil simulasi pada kecepatan 6 m/s

Kecepatan 6 m/s			
Sudut	Torsi Statis	CTS Simulasi	CTS Eksperimen
0°	0,265862147	0,214350937	-0,03756463
100°	0,483843747	0,390098259	0,262952411
180°	0,905942666	0,730414848	0,367204812
280°	0,568250361	0,458150959	0,17558299

Tabel C.2 Data nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen pada kecepatan 6 m/s

Turbine Diameter = 300 mm							
U = 6 m/s							
sudut	1	2	3	4	5	Rata-rata	Cts
0	-0,9	-2,1	-1,8	-1,7	-2,4	-1,78	-0,03756463
20	-1	-2	-1,7	-1,5	1,2	-1	-0,021103725
40	2	1,8	2,2	3,8	4,5	2,86	0,060356653
60	9	8,6	7,2	6,9	7,8	7,9	0,166719426
80	12	11,5	10,8	11,7	10,2	11,24	0,237205867
100	12,3	12,1	13,4	12,9	11,6	12,46	0,262952411
120	9,4	10,3	10,9	9,6	9,7	9,98	0,210615174
140	10,8	13,6	10,7	11,9	9,3	11,26	0,237627941
160	14,8	13,7	16,4	15	16	15,18	0,320354543
180	17,6	16,8	16,2	19	18,9	17,4	0,367204812
200	16,3	17,1	14,9	18,3	15,8	16,48	0,347789385
220	11,3	12,6	12,8	13,1	12,9	12,54	0,264640709
240	10,1	10,7	11,7	12,2	11	11,14	0,235095494
260	9,7	10,3	9,6	8,9	9	9,5	0,200485386
280	9,3	8,8	8	7,9	7,6	8,32	0,17558299
300	9,8	9	9,7	10,8	11,1	10,08	0,212725546
320	9,2	8,5	7,3	9,7	9,6	8,86	0,186979002
340	7,7	7,1	6,4	4,9	5,5	6,32	0,133375541
360	4,3	3,9	6,2	4,8	5,5	4,94	0,104252401

Grafik C.3 Perbandingan Data nilai koefisien torsi statis hasil simulasi pada setiap variasi sudut dan hasil eksperimen pada setiap sudut putar untuk kecepatan 6 m/s



## BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Faiz Hanan Susanto, dilahirkan di Magetan, pada tanggal 30 Oktober 2000. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Heri Susanto dan Ibu Siti Nuraini. Penulis memulai jenjang pendidikan formal di TK Al-Zahra Pamulang pada tahun 2004 – 2006 dan sekolah dasar di SD Al-Zahra Pamulang pada tahun 2006 – 2012. Kemudian penulis melanjutkan pendidikannya di SMPI Al-Azhar 03 Bintaro pada tahun 2012 – 2015. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SMAS AL-Izhar Pondok Labu pada tahun 2015 – 2018 untuk pendidikan di jenjang berikutnya. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan pendidikan tinggi tingkat sarjana di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan terdaftar dengan NRP 02111840000171.

Dalam proses menuntut ilmu di tingkat sarjana, penulis tergolong aktif baik dalam kegiatan akademik maupun non-akademik. Dalam kegiatan non-akademik, penulis bergabung sebagai staf organisasi di Departemen Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Mesin FTIRS-ITS, dan kepala biro pengabdian masyarakat di Departemen Karya Himpunan Mahasiswa Mesin FTIRS-ITS. Pada bidang akademik, penulis diamanahi untuk mengemban tanggung jawab sebagai asisten praktikum pada mata kuliah mekanika fluida I pada tahun 2020.

Sehubungan dengan hasil penelitian Tugas Akhir ini, besar harapan penulis agar dapat bermanfaat kedepannya. Apabila terdapat berbagai kritik maupun saran pada Tugas Akhir ini dapat disampaikan ke penulis melalui e-mail: [faizhanansusanto@gmail.com](mailto:faizhanansusanto@gmail.com).