

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE
LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN
BLADE STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 4, *BLADE
CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN
300 mm**

Abellio Dhira Ryandi
NRP 02111840000151

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* 4, *BLADE
CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN
300 mm**

Abellio Dhira Ryandi
NRP 02111840000151

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 CONDITION FOR
NUMBER OF BLADE 4, BLADE CHORD LENGTH 180
mm AND TURBINE DIAMETER 300 mm**

Abellio Dhira Ryandi
NRP 02111840000151

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* 4, *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: **ABELLIO DHIRA RYANDI**
NRP. 02111840000151

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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


.....
(Pembimbing)

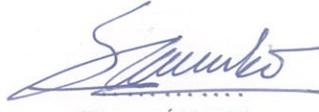
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
NIP. 196412281990031002


.....
(Penguji I)

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


.....
(Penguji II)

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


.....
(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 4, 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: **ABELLIO DHIRA RYANDI**
NRP. 02111840000151

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 : Abellio Dhira Ryandi / 02111840000151
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* 4, *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



(Abellio Dhira Ryandi)

NRP. 02111840000151

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Abellio Dhira Ryandi / 02111840000151
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Nur Ikhwan, S.T., M.Eng / 196709151995121001

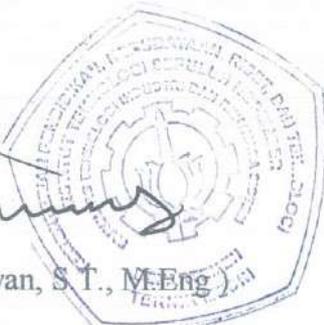
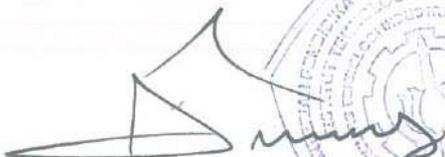
hereby declare that the Final Project with the title of "NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND, TURBINE PERFORMANCE AT TWO-DIMENSIONAL FLOW AND STATIC BLADE CONDITIONS FOR THE NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD LENGTH 180 mm and TURBINE DIAMETER 300 mm" is the result of my own work, is original, and is written 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 21st 2022

Acknowledged,

Advisor



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

NIP. 196709151995121001

Student



(Abellio Dhira Ryandi)

NRP. 02111840000151

STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN *BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 4, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm, DAN DIAMETER TURBIN 300 mm

Nama Mahasiswa : Abellio Dhira Ryandi
NRP : 0211184000151
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Ikhwan S.T.,M.Eng.

Abstrak

Energi listrik sangat dibutuhkan bagi kehidupan manusia untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga, transportasi, komersil, dan industri. Dengan bertambahnya penduduk di Indonesia konsumsi listrik juga semakin meningkat. Menurut kementerian energi dan sumber daya mineral tahun 2021 penggunaan listrik di Indonesia sebesar 1,12 MWH/kapita. Energi fosil tercatat masih menjadi penyumbang utama pembangkit listrik di Indonesia yang mencapai 60.485 MW atau setara dengan 85,31 persen dari total kapasitas di Indonesia. Energi fosil akan terus menurun seiring dengan penggunaan atau konsumsi energi yang terus meningkat di setiap tahunnya. Indonesia mulai mengembangkan energi terbarukan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang dimiliki. Salah satu potensi yang dapat dimanfaatkan adalah energi bayu atau angin. Energi angin dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin angin. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 dengan kelebihan *self starting* dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi baik digunakan untuk kondisi angin Indonesia yang terbilang cukup rendah yang berkisar 4 - 6 m/s.

Penelitian ini dilakukan dengan berbasis simulasi menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 18.1 dengan tiga tahapan, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Penelitian ini menggunakan model dua dimensi dengan variasi sudut putar turbin *blade* dan kecepatan angin. *Boundary condition* pada penelitian ini adalah *wall* untuk *blade* turbin, *velocity inlet* untuk *inlet*, *pressure outlet* untuk *outlet* dan *symmetry* sebagai batas dinding atas dan bawah. Penelitian ini menggunakan model turbulensi standard $k - \epsilon$.

Didapat hasil melalui penelitian yang telah dilakukan berupa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang terbukti sesuai dengan referensi penelitian sebelumnya, dimana semakin tinggi kecepatan angin, maka nilai gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis akan semakin meningkat. Untuk penelitian ini nilai gaya *drag* dan *lift*, serta torsi statis tertinggi didapat pada kecepatan angin 6 m/s, dengan nilai 0,704 Nm. Kemudian nilai koefisien torsi statis (CTS) hasil simulasi terbukti memiliki *trend* grafik yang relatif sama dengan koefisien torsi statis (CTS) hasil eksperimen, dimana nilai CTS tertinggi didapat pada sudut putar turbin 0° dan namun perbedaan terjadi pada CTS terendah dimana pada simulasi sudut putar turbin 20° memiliki nilai terendah, sedangkan pada eksperimen sudut putar turbin 40° terendah.

Kata kunci : *Turbin angin Lenz 2, simulasi, velocity inlet, sudut putar turbin blade, koefisien torsi statis*

**NUMERIC STUDY OF LENZ TYPE 2 WIND TURBINE
PERFORMANCE ON TWO DIMENSIONAL FLOW AND STATIC
BLADE CONDITIONS FOR NUMBER OF BLADE 4, BLADE CHORD
LENGTH 180 mm, and TURBINE DIAMETER 300 mm**

Student's Name : Abellio Dhira Ryandi
NRP : 0211184000151
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Nur Ikhwan S.T.,M.Eng.

Abstract

Electrical energy is needed for human life to meet household, transportation, commercial and industrial needs. With the increasing population in Indonesia, electricity consumption is also increasing. According to the ministry of energy and mineral resources in 2021, electricity use in Indonesia will be 1.12 MWH/capita. Fossil energy is recorded as the main contributor to electricity generation in Indonesia, which reaches 60,485 MW or equivalent to 85.31 percent of the total capacity in Indonesia. Fossil energy will continue to decline along with the use or consumption of energy that continues to increase every year. Indonesia has begun to develop renewable energy by utilizing its natural resources. One of the potentials that can be utilized is wind or wind energy. Wind energy is used to drive wind turbines. Lenz 2 type vertical axis wind turbine with the advantages of self starting and has a high enough efficiency is good for use in Indonesia which is quite low wind conditions ranging from 4 - 6 m/s.

This research was conducted based on simulation using ANSYS Fluent 18.1 software with three stages, namely pre-processing, processing, and post-processing. This study uses a two-dimensional model with variations in the turbine blade rotation angle and wind speed. Boundary conditions in this study are the wall for the turbine blade, velocity inlet for the inlet, pressure outlet for the outlet and symmetry as the upper and lower wall boundaries. This study uses the standard turbulence model $k - \epsilon$.

The results obtained through research that has been carried out in the form of the influence of wind speed variations on drag and lift forces and static torque which are proven to be in accordance with previous research references, 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 obtained at a wind speed of 6 m/s, with a value of 0.704 Nm. Then the value of the static torque coefficient (CTS) simulation results proved to have a graph trend that is relatively the same as the static torque coefficient (CTS) experimental results, where the highest CTS value was obtained at the turbine rotation angle of 0° and but the difference occurred at the lowest CTS where the rotation angle simulation turbine 20° has the lowest value, while in the experiment the turbine rotation angle is 40° the lowest.

Keywords: *Lenz 2 wind turbine, simulation, boundary conditions, velocity inlet, blade rotation angle*

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur ditujukan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas karunia dan berkat-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas tugas akhir ini. Penulis sangat berterimakasih kepada seluruh pihak yang senantiasa membantu penulis baik dalam suka maupun duka dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak, Ibu, Kakak dan seluruh keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa dan dukungan baik secara moral maupun material sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini.
2. Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing penulis dalam tugas akhir ini yang telah memberikan banyak ilmu, saran, dan pengalaman kepada penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini serta selalu sabar dalam memberikan bimbingan kepada penulis.
3. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. dan Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko selaku dosen penguji tugas akhir yang senantiasa memberikan masukan dan saran dalam penyempurnaan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. selaku dosen wali penulis yang membantu proses perkuliahan penulis dari awal kuliah hingga akhir kuliah.
5. Rekan seperbimbingan tugas akhir penulis antara lain Aldi, Faiz, dan Qadri yang selalu bersama-sama dalam mengarungi suka dan duka selama proses pengerjaan tugas akhir.
6. Teman-teman laboratorium Mekanika dan Mesin-mesin Fluida selaku sesama pejuang tugas akhir yang selalu menemani dan memberikan tempat bagi penulis dalam penyusunan tugas akhir.
7. Seluruh civitas akademika departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS yang telah banyak memberikan banyak hal selama perkuliahan.
8. Keluarga M61 yang telah banyak memberikan bantuan dan pengalaman kepada penulis selama masa perkuliahan.
9. Keluarga “KTT II 81.” Faiz, Qadri, Yusuf, Dhafa, Bagas, Daffa yang senantiasa selalu menghibur penulis selama berada di kosan.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis.

Penulis menyadari dalam penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat penting dalam penyempurnaan penulisan tugas akhir ini. Harapan kedepannya semoga penulisan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat. Amin

Surabaya, 27 Juli 2022



Abellio Dhira Ryandi

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.....	xiii
DAFTAR SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Turbin Angin.....	5
2.1.1 <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i>	5
2.1.2 <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</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 Pemodelan Turbulensi.....	9
2.5.1 <i>Klasifikasi Model Turbulensi CFD Pada Software Fluent</i>	9
2.6 <i>Gaya Drag</i>	10
2.7 <i>Gaya Lift</i>	11
2.8 <i>Bilangan Reynolds</i>	11
2.9 <i>Torsi Statis</i>	12
2.10 <i>Solidity</i>	12
2.11 <i>Aspect Ratio</i>	13
2.12 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	13
2.13 <i>Penelitian Terdahulu</i>	13

2.16.1	Taufiqurrahman & Suphandani (2017)	13
2.16.2	Abu-El-Yazied et al (2015)	18
2.16.3	Feng et al (2021)	21
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1	Tahapan Simulasi	26
3.2	Tahap <i>Pre – Processing</i>	26
3.2.1	Tahap Pembuatan Geometri	26
3.2.2	Penentuan <i>Boundary Condition</i>	27
3.2.3	Tahap Pembuatan <i>Meshing</i>	28
3.3	Tahap <i>Processing</i>	28
3.4	Tahap <i>Post – Processing</i>	29
3.5	Data yang Digunakan	30
3.5.1	<i>Free Body Diagram Blade</i>	30
3.6	<i>Grid Independency Test</i>	31
3.7	Diagram alir	32
3.7.1	Diagram alir Penelitian	32
3.7.2	Diagram alir Simulasi	33
BAB IV		36
ANALISA DAN PEMBAHASAN		36
4.1	Contoh Perhitungan	36
4.1.1	Perhitungan Gaya <i>Drag</i> dan Gaya <i>Lift</i> pada Tiap <i>Blade</i>	36
4.1.2	Perhitungan Torsi Statis	37
4.1.3	Perhitungan Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan Gaya <i>Lift</i>	38
4.1.4	Perhitungan Koefisien Torsi Statis	38
4.2	Perbandingan Data Hasil Simulasi dengan Eksperimen	39
4.3	Analisa Fenomena Aliran	40
4.3.1	Analisa Aliran <i>Kontur Tekanan</i> dan Vektor kecepatan pada kecepatan 4 m/s	40
4.3.2	Analisa Aliran <i>Kontur Tekanan</i> dan Vektor kecepatan pada kecepatan 5 m/s	42
4.3.3	Analisa Aliran <i>Kontur Tekanan</i> dan Vektor kecepatan pada kecepatan 6 m/s	45
4.4	Analisa Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i>	47
4.4.1	Analisa Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Untuk <i>Blade</i> Satu Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin	47
4.4.2	Analisa Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Untuk <i>Blade</i> Dua Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin	51

4.4.3	Analisa Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Untuk <i>Blade</i> Tiga Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin	53
4.4.4	Analisa Koefisien Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> Untuk <i>Blade</i> Empat Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin	54
4.5	Analisa Torsi Statis	56
4.5.1	Analisa Perbandingan Torsi Statis Pada Setiap <i>Blade</i>	56
4.5.1	Analisa Perbandingan Torsi Statis Pada Setiap Variasi Kecepatan	57
4.5.2	Analisa Perbandingan Koefisien Torsi Statis dan Koefisien <i>Bending</i>	59
KESIMPULAN DAN SARAN.....		60
5.1	Kesimpulan.....	60
5.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		61
LAMPIRAN		62
BIODATA PENULIS		66

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin Angin di PLTB Sidrap (www.kompasiana.com)	5
Gambar 2.2 Vertical Axis Wind Turbine (Purwono et al, 2019)	6
Gambar 2.3 Horizontal Axis Wind Turbine (Mathew, 2006)	7
Gambar 2.4 Vertical Axis Wind Turbine tipe Darrieus eggbeater (Aboufaires, 2015)	7
Gambar 2.5 Vertical Axis Wind Turbine tipe Savonius (Vanessa, 2016)	8
Gambar 2.6 Vertical Axis Wind Turbine Tipe Lenz 2 (Sivamani et al, 2017)	9
Gambar 2.7 Skema turbin Lenz 2 (a) dua dimensi (b) tiga dimensi	12
Gambar 2.8 Dimensi domain turbin angin Darrieus tiga blade (a) Dimensi static domain, (b) Dimensi rotating domain. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	14
Gambar 2.9 Mesh Turbin angin Darrieus tiga blade (a) Mesh static domain, (b) Mesh rotating domain. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	14
Gambar 2.10 Boundary conditions turbin angin Darrieus tiga blade (a) Boundary condition static domain, (b) Boundary condition rotating domain. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	14
Gambar 2.11 Kontur kecepatan turbin angin Darrieus pada (a) tiga blade pada sudut 90° dengan variasi kecepatan freestream, (b) empat blade pada sudut 0° dengan variasi kecepatan freestream. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	15
Gambar 2.12 Kontur kecepatan turbin angin Darrieus dari berbagai sudut putar turbin dengan kecepatan freestream 15 m/s (a) tiga blade, (b) empat blade. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	16
Gambar 2.13 Kontur tekanan turbin angin Darrieus dari berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s (a) tiga blade, (b) empat blade. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	17
Gambar 2.14 Grafik torsi pada turbin angin tiga blade (a) Grafik torsi terhadap sudut putar turbin blade 1, 2, 3 pada kecepatan freestream 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan freestream. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	17
Gambar 2.15 Grafik torsi pada turbin angin empat blade (a) Grafik torsi terhadap sudut putar turbin blade 1, 2, 3 pada kecepatan freestream 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan freestream. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	18
Gambar 2.16 Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin Darrieus tiga blade dan empat blade (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	18
Gambar 2.17 Skema rotor turbin dan domain VAWT 3 blade (Abu-El-Yazied et al, 2015)	19
Gambar 2.18 Hasil meshing 2D (a) Meshing 2D dengan beberapa model (b) Meshing blade NACA 0021 (Abu-El-Yazied et al)	20
Gambar 2.19 Grafik perbandingan dengan panjang chord 85,8 mm terhadap koefisien daya dengan solidity (Abu-El-Yazied et al, 2015)	21
Gambar 2.20 Grafik perbandingan koefisien daya maksimum terhadap jumlah blade pada nilai solidity yang sama (Abu-El-Yazied et al, 2015)	21
Gambar 2.21 Bentuk blade dan sudut azimuth turbin angin LDCS (Feng et al, 2021)	22
Gambar 2.22 Analisa gaya pada turbin empat blade sudut 0° (Feng et al, 2021)	22
Gambar 2.23 Domain turbin angin LDCS (Feng et al, 2021)	23
Gambar 2.24 Meshing pada blade turbin LDCS (Feng et al, 2021)	23
Gambar 2.25 Grafik Grid independency test turbin LDCS (Feng et al, 2021)	23
Gambar 2.26 Grafik kontur kecepatan pada (a) sudut 30° dan (b) sudut 60° (Feng et al, 2021)	24

Gambar 2.27 Perbandingan kurva torsi statis LDCS dari ketiga blade (a) kecepatan angin 6 m/s dan (b) kecepatan angin 10 m/s (Feng et al, 2021)	25
Gambar 2.28 Kurva hasil eksperimen di wind tunnel dengan jumlah blade tiga (a) kecepatan angin 6 m/s (b) kecepatan angin 10 m/s (Feng et al, 2021)	25
Gambar 3.1 Geometri Turbin tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin blade 0°, (b) sudut putar turbin blade 20°, (c) sudut putar turbin blade 40°, (d) sudut putar turbin blade 60°	27
Gambar 3.2 Boundary condition VAWT tipe Lenz 2 empat blade	27
Gambar 3.3 Hasil Meshing turbin Lenz 2 pada sudut putar turbin 0° (a) Meshing dekat blade (b) Meshing pada sekitar rotor (c) Keseluruhan Meshing	28
Gambar 3.4 Free body diagram pada setiap blade pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	30
Gambar 3.5 Grafik perbandingan jumlah cell pada mesh dengan torsi statis hasil simulasi ..	31
Gambar 3.6 Diagram alir penelitian	33
Gambar 3.7 Diagram alir simulasi	35
Gambar 4.1 Free body diagram pada sudut putar turbin 20°	36
Gambar 4.2 Grafik perbandingan koefisien torsi statis simulasi dengan hasil eksperimen....	39
Gambar 4.3 Display kontur tekanan 4 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	40
Gambar 4.4 Display vektor kecepatan 4 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	41
Gambar 4.5 Display kontur tekanan kecepatan 5 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	43
Gambar 4.6 Display vektor kecepatan 5 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	44
Gambar 4.7 Display kontur tekanan kecepatan 6 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	45
Gambar 4.8 Display vektor kecepatan 6 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°	46
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan nilai C_D pada blade satu	48
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan nilai F_D pada blade satu	48
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan nilai C_L pada blade satu	50
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan nilai F_L pada blade satu	50
Gambar 4.13 Grafik Perbandingan nilai C_D pada blade dua	52
Gambar 4.14 Grafik Perbandingan nilai C_L pada blade dua	52
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan nilai C_D pada blade tiga	53
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan nilai C_L pada blade tiga	54
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan nilai C_D pada blade empat	55
Gambar 4.18 Grafik Perbandingan nilai C_L pada blade empat	55
Gambar 4.19 Grafik perbandingan torsi statis pada setiap blade	56
Gambar 4.20 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada setiap variasi kecepatan	57
Gambar 4.21 Grafik perbandingan torsi statis pada setiap variasi kecepatan	58
Gambar 4.22 Grafik koefisien torsi statis dan gaya lift dari setiap variasi kecepatan angin ..	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Nilai koefisien drag untuk beberapa bentuk bidang permukaan pada $Re \geq 1000$ (Pitchard et al, 2011)	10
Tabel 2.2 Nilai putaran turbin dan TSR pada tiap kecepatan angin (freestream) (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)	15
Tabel 2.3 Parameter Penelitian (Abu-El-Yazied et al, 2015).....	19
Tabel 2.4 Hasil Simulasi penelitian (Abu-El-Yazied et al, 2015).....	20
Tabel 2.5 Parameter LDCS jumlah blade tiga (Feng et al, 2021).....	22
Tabel 3.1 Geometri vertical axis wind turbine tipe Lenz 2.....	26
Tabel 3.2 Tabel Variasi Penelitian.....	29
Tabel 3.3 Grid Independence Test pada vertical axis wind turbine tipe Lenz 2.....	31

DAFTAR SIMBOL

A	: Luas permukaan benda padat yang dialiri fluida (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	: Tinggi <i>blade</i> turbin angin (m)
L	: Panjang karakteristik aliran angin (m)
N	: Jumlah <i>blade</i> turbin angin
R	: Jari-jari turbin angin (m)
r	: Jari - jari <i>blade leading edge</i> (m)
Re	: Bilangan reynolds
T_s	: Torsi statis (N.m)
v	: Kecepatan aliran fluida (m/s)
ρ	: Densitas fluida (kg/m^3)
μ	: Viskositas fluida ($N.s/m^2$)
θ	: Sudut putar <i>blade</i> turbin angin ($^\circ$)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik sangat penting bagi kehidupan manusia karena energi listrik digunakan untuk berbagai kebutuhan seperti kebutuhan rumah tangga, transportasi, pembangkit, komersil, dan industri. Penggunaan energi listrik di Indonesia maupun di dunia sangat tinggi. Setiap tahunnya penggunaan listrik di Indonesia selalu mengalami kenaikan, hal ini dapat terjadi karena seiring meningkatnya jumlah penduduk di Indonesia. Pada tahun 2021 jumlah penduduk Indonesia sebanyak 273.879.750 juta jiwa, jumlah ini meningkat dari tahun sebelumnya sebesar 1,56 persen yaitu dengan jumlah penduduk sebesar 269.603.400. Konsumsi listrik Indonesia per kapita pada tahun 2021 sebesar 1,12 MWH/kapita. Konsumsi listrik naik 0,03 MWH/kapita dari tahun sebelumnya yang sebesar 1,09 MWH/kapita. Kapasitas yang terpasang pada pembangkit listrik Indonesia mengalami pada tahun 2021 sebesar 74 GW meningkat sebesar 1,62 persen dibandingkan tahun sebelumnya yang mencapai 72,8 GW. Pemanfaatan listrik terus berkembang seiring inovasi teknologi berbasis listrik. Kebutuhannya meningkat rata-rata sebesar 5,9% per tahun hingga di tahun 2050. Kementerian ESDM juga mencatat bahwa energi fosil masih menjadi penyumbang utama pembangkit listrik di Indonesia yang mencapai 60.485 MW atau setara dengan 85,31 persen dari total kapasitas di Indonesia. Energi fosil akan terus menurun seiring dengan penggunaan atau konsumsi energi yang terus meningkat di setiap tahunnya.

Berdasarkan Badan pengkajian dan penerapan teknologi cadangan minyak bumi nasional tahun 2019 adalah 2,5 milyar standard barel tangka menurun 0,21 persen dibanding tahun sebelumnya yang mencapai 3,2 milyar BSTB. Produksi minyak bumi sepuluh tahun terakhir dari rentang 2010 hingga 2020 cenderung menurun, dari 344 juta barel pada tahun 2010 menjadi 259 juta pada tahun 2020. Penurunan produksi minyak bumi disebabkan oleh sumur – sumur produksi utama minyak bumi sudah tua, sementara produksi sumur baru relatif terbatas. Berdasarkan kementerian energi dan sumber daya mineral batubara sendiri di Indonesia memiliki cadangan 39 miliar ton dan dapat diproduksi setiap tahunnya sebesar 600 juta ton per tahun. Jika dilihat dari jumlah produksi dan jumlah cadangan energi batubara, kemungkinan Indonesia akan kehabisan batu bara 65 tahun dari sekarang. Dengan menggunakan energi fosil juga menghasilkan emisi yang tinggi, pada tahun 2021 emisi CO₂ 530 juta ton dan diperkirakan akan mencapai puncaknya sekitar tahun 2039 sebesar 706 juta CO₂. Hal ini menjadi alasan untuk pengembangan energi alternatif terbarukan yang lebih ramah lingkungan yang dapat menggantikan energi fosil.

Semakin berkurangnya cadangan minyak bumi dan batubara, Indonesia mulai mengembangkan energi terbarukan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang dimiliki oleh Indonesia. Beberapa potensi energi yang ada di Indonesia adalah Hidro, energi surya panas bumi, bayu, dan bioenergi. Dari beberapa potensi tersebut energi bayu atau angin adalah salah satu energi yang memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan di Indonesia. Salah satu contoh pengembangan energi bayu adalah pada PLTB di Sidrap yang menghasilkan 75 MW dan PLTB Janeponto yang menghasilkan 60MW. Secara geografis Indonesia memiliki rata-rata kecepatan angin yang cukup rendah berkisar 4-6 m/s terutama pada daerah dataran rendah namun angin dapat tersedia setiap saat. Dengan kondisi kecepatan angin yang rendah maka turbin yang baik untuk memanfaatkan kecepatan angin rendah adalah turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2.

Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 merupakan turbin yang digagas oleh **Edwin Lenz** pada tahun 2007. Turbin ini adalah hasil penggabungan dari turbin Savonius dan turbin Darrieus. Turbin ini menggabungkan konsep kedua turbin tersebut yaitu memanfaatkan gaya

hambat dari turbin Savonius dan memanfaatkan gaya angkat aerodinamis dari turbin Darrieus. Karena penggabungan kedua turbin tersebut maka turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 memiliki beberapa kelebihan seperti dapat melakukan *self starting* yang merupakan kelebihan dari turbin Savonius dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi di banding Savonius yang merupakan kelebihan dari turbin Darrieus. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 ini memiliki torsi yang cukup walaupun kecepatan angin rendah. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 juga tergolong murah dan sederhana, karena tidak bergantung pada arah aliran angin. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 dapat menghasilkan efisiensi yang lebih besar 40% dibanding dengan turbin Savonius dan turbin Darrieus. Namun turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 memiliki kekurangan yaitu efisiensi Lenz 2 ini lebih kecil dibanding dengan turbin jenis *Horizontal Axis Wind Turbine*. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 ini masih tergolong sedikit sehingga diperlukan penelitian yang lebih lanjut mengenai peningkatan performa turbin angin sumbu vertikal Lenz 2, namun ada beberapa penelitian sebelumnya yang telah dilakukan. **Taufiqurrahman & Suphandani (2017)** melakukan penelitian agar didapat desain turbin angin terbaik yang mampu memanfaatkan tenaga angin seoptimal mungkin. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian numerik dua dimensi dengan analisis aliran *unsteady* menggunakan *software* STAR CCM+ 9.02.007 – R8. Pada penelitian ini turbin angin yang digunakan adalah turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil blade* sesuai dengan NACA 0024. Parameter yang digunakan yaitu jumlah *blade* dan kecepatan angin. *Blade* yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 3 dan 4, dan kecepatan angin yang di teliti adalah 5, 7, 9, 11, 13 dan 15 m/s. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi torsi yang dihasilkan, namun semakin banyak jumlah *blade*, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah. Semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu *blade*, maka semakin besar 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. Selain itu, semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu *blade*, maka semakin tinggi kecepatan pada *blade* tersebut dan koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **Abu-El-Yazied (2015)** untuk menguji beberapa parameter seperti jumlah *blade* dan *blade chord length* yang mempengaruhi efisiensi *straight Darrieus wind turbine*. Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari pengaruh perubahan parameter desain, jumlah *blade*, *blade chord length*, dan soliditas turbin pada performa *vertical axis wind turbine* tipe H-Darrieus dengan nilai sudut pitch yang tetap melalui simulasi CFD. Dua belas model dibuat dengan jumlah *blade* dan *blade chord length* yang berbeda untuk mempelajari pengaruhnya terhadap performa *Darrieus wind turbine*. *Computational fluid dynamics* (CFD) dengan dimensi 2D dilakukan pada *straight-bladed Darrieus-type rotor* dengan acuan karakteristik *airfoil* NACA 0021. Maka dapat disimpulkan melalui hasil penelitian yang telah dilakukan bahwa koefisien daya puncak yang diharapkan secara numerik turun seiring dengan meningkatnya nilai soliditas pada rotor dan nilai *tip speed ratio* untuk koefisien daya maksimum. Untuk peningkatan *blade chord length*, dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan koefisien daya pada nilai soliditas yang sama.

Penelitian terakhir dilakukan oleh **Feng et al (2021)** penelitian ini dilakukan oleh Feng et al secara analisa numerik melalui aplikasi ANSYS Fluent 19.0 dengan dimensi 2D pada *vertical axis wind turbine* tipe LDCS (*lift - drag combine starter*) karena cocok untuk digunakan pada *vertical axis wind turbine* tipe *lift* untuk membantu melakukan *self starting* dengan variasi kecepatan angin dan variasi jumlah *blade*. Struktur *blade* ini adalah hasil kombinasi pemanfaatan gaya *drag* dan gaya *lift* untuk mengurangi efek buruk dari *self starting blade* berbentuk *airfoil* dengan menambahkan *blade drag* pada bagian belakang *blade airfoil*. Dari penelitian ini dapat ditarik kesimpulan, yaitu pada variasi empat *blade* perubahan nilai Cts

relatif sama pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan 10 m/s. Nilai Cts 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 koefisien torsi statis pada LDCS dan empat *blade* yang menunjukkan bahwa torsi statis menjadi lebih stabil dengan bertambahnya jumlah *blade* turbin.

Dari hasil penelitian sebelumnya, maka penelitian Tugas Akhir ini dilakukan secara simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS Fluent 18.1. Penelitian tugas akhir ini berfokus perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dengan menganalisa variasi kecepatan aliran udara (v) dan sudut putar turbin *blade* (θ) terhadap performa turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 pada *kontur* aliran, gaya *drag* dan gaya *lift*, serta koefisien torsi statis.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin tipe VAWT terinspirasi oleh dua tipe dasar yaitu turbin Savonius dan turbin Darrieus. Pada tahun 2007 ditemukan bahwa turbin angin memiliki efisiensi yang lebih besar dari efisiensi kira - kira. Turbin tipe Lenz 2 ditemukan oleh Edwin Lenz. Proyek ini memperkenalkan banyak inovasi, misalnya dia menggabungkan Darrieus turbin bekerja pada gaya angkat aerodinamis dan Turbin Savonius mengandalkan gaya hambatnya.

Turbin Lenz 2 merupakan yang tergolong baru dan belum banyak studi penelitian dari eksperimen maupun simulasi. Karena telah dilakukannya eksperimen sebelumnya maka pada penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* ANSYS *Fluent* 18.1 untuk membandingkan hasil simulasi dengan eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya untuk mengetahui performa turbin tipe Lenz 2. Pada penelitian ini turbin yang digunakan memiliki *blade* berjumlah 4 saling berhadapan dan berfokus pada variasi turbin tipe lenz 2 yaitu terkait dengan sudut putar turbin *blade* (θ) dan kecepatan angin (v) terhadap performa yang optimum dari turbin tipe lenz 2 berdasarkan *kontur* aliran, gaya *drag* dan gaya *lift*, serta koefisien torsi statis. Hipotesa awal pada penelitian ini adalah :

1. Semakin tinggi kecepatan angin yang bekerja pada turbin maka nilai torsi statis semakin tinggi atau berbanding lurus
2. Semakin tinggi nilai gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* turbin maka nilai torsi statis semakin meningkat
3. Nilai hasil koefisien torsi statis perhitungan studi numerik lebih besar dibandingkan dengan hasil perhitungan eksperimen

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian tugas akhir ini diberikan beberapa Batasan masalah, yaitu sebagai berikut :

1. Analisa aliran menggunakan *external flow*
2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan kondisi *incompressible flow*, *steady flow*, *uniform flow*, dan *turbulent flow*
3. Variasi kecepatan angin yang digunakan 4; 5; dan 6 m/s.
4. Variasi sudut putar turbin turbin (θ) = $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$
5. Rotor dianalisa dalam keadaan statis atau diam
6. Analisa dilakukan pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 dengan konfigurasi jumlah *blade* (N) = 4 buah, Diameter turbin (D) = 300 mm, *Blade diameter leading edge* (d) = 75 mm, *chord length* (c) = 180 mm dan nilai *solidity* (σ) = 2.4
7. Simulasi dilakukan dalam model geometri dua dimensi dengan menggunakan *software* ANSYS *Fluent*

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya pengaruh perbedaan sudut *blade* pada turbin terhadap performansi Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) tipe Lenz 2 pada skala simulasi. Variasi sudut pada turbin adalah $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$; pada kecepatan angin 4; 5; dan 6 (m/s). Performansi turbin angin tipe Lenz 2 dapat ditentukan dengan mengukur :

1. Mendapatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* dari hasil simulasi turbin angin Lenz 2
2. Membandingkan hasil koefisien torsi statis simulasi dengan eksperimen
3. Menjelaskan fenomena aliran di turbin angin tipe Lenz 2 berdasarkan simulasi dengan variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin *blade*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberi penjelasan tentang pengaruh perbedaan kecepatan angin (v) dan sudut putar turbin *blade* (θ) untuk mendapatkan *kontur* aliran, gaya *drag* dan gaya *lift*, serta koefisien torsi statis yang dimana untuk membuat *design* yang paling baik untuk turbin angin tipe Lenz 2.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk menggerakkan generator sebagai pembangkit tenaga listrik. Prinsip dasar kerja dari turbin angin adalah mengubah energi mekanis dari angin menjadi energi putar pada kincir, lalu putaran kincir digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya akan menghasilkan listrik. Turbin angin awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dan lain - lain. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara- negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan *windmill*. Namun di Indonesia sendiri sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional Contohnya seperti PLTGU, PLTU, dan lain – lain, turbin angin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tidak terbarukan seperti batubara dan minyak bumi sebagai bahan dasar untuk pembangkit listrik.

Prinsip dasar bahwa sebuah turbin angin dapat berputar pada porosnya adalah karena adanya dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan akibat bentuk aerodinamis dari penampang *blade* tersebut. Ketika sebuah *airfoil* terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan gaya *lift* dan gaya *drag*. Gaya *lift* dan gaya *drag* ini perubahannya dipengaruhi langsung oleh bentuk geometri *blade*, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama *blade*. Akibat dari perubahan gaya *lift* dan *drag*, kecepatan sudut dan torsi poros akan berubah pula.



Gambar 2.1 Turbin Angin di PLTB Sidrap (www.kompasiana.com)

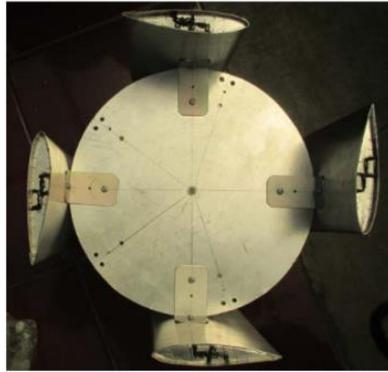
2.1.1 Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) memiliki poros/sumbu rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi, karena *Vertical Axis Wind Turbine* dapat mendayagunakan atau menggunakan angin dari berbagai macam - macam arah.

Dengan sumbu yang vertikal, generator serta *gearbox* bisa ditempatkan di dekat tanah, jadi menara tidak perlu menyokongnya dan lebih mudah diakses untuk keperluan perawatan. *Drag* (gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida zat cair atau gas) dapat tercipta pada saat kincir berputar. Karena VAWT sulit dipasang di atas menara, VAWT biasanya dipasang lebih dekat ke dasar tempat diletakkannya, seperti puncak atap di suatu bangunan atau tanah.

Kelebihan dari VAWT adalah tidak membutuhkan struktur menara yang besar, VAWT memiliki sudut *airfoil* yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi *drag* pada tekanan yang rendah dan tinggi, dan memiliki torsi yang cukup tinggi

sehingga memudahkan gerakan putar turbin, konstruksi yang mudah dan biaya produksi yang rendah. Namun VAWT memiliki beberapa kekurangan seperti VAWT mempunyai torsi awal yang rendah, membutuhkan energi untuk mulai berputar, dan memiliki daya keluaran yang rendah serta efisiensi yang buruk karena mengalami gaya *drag* dari angin VAWT memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi HAWT karena *drag* tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.

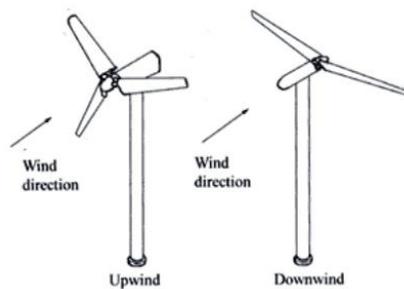


Gambar 2.2 *Vertical Axis Wind Turbine (Purwono et al, 2019)*

2.1.2 Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) merupakan turbin yang poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin. Agar rotor dapat berputar dengan baik, arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Biasanya turbin jenis ini memiliki *blade* berbentuk *airfoil* seperti bentuk sayap pada pesawat. Pada turbin ini, putaran rotor terjadi karena adanya gaya *lift* (gaya angkat) pada *blade* yang ditimbulkan oleh aliran angin. Turbin ini cocok digunakan pada tipe angin sedang dan tinggi, dan banyak digunakan sebagai pembangkit listrik skala besar. Jumlah *blade* pada HAWT bervariasi, mulai dari satu *blade*, dua *blade*, tiga *blade*, dan banyak *blade* (*multi blade*) yang penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi angin. HAWT sebagian besar mempunyai sebuah *gearbox* yang dapat mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat saat *blade* sedang berputar. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak yang tertentu dan bilah – bilah diletakkan sedikit dimiringkan. Jenis turbin ini lebih cenderung menangkap gaya *lift* yang didapatkan dari aliran angin dan dibutuhkan angin dengan kecepatan yang tinggi.

Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur, sebagian besar HAWT merupakan mesin *upwind* atau melawan arah angin. Walaupun memiliki permasalahan pada turbulensi, mesin *downwind* atau mengikuti arah angin dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar HAWT tetap sejalan dengan angin, saat angin berhembus sangat kencang, *blade* dapat ditekuk sehingga mengurangi ketahanan angin dari *blade*. Kelebihan dari turbin ini adalah mampu menangkap angin dengan kecepatan yang relatif kuat, namun memiliki kekurangan sulit dalam pemasangan, sering mengalami kerusakan akibat turbulensi.



Gambar 2.3 *Horizontal Axis Wind Turbine (Mathew, 2006)*

2.2 Turbin Angin Tipe Darrieus

Turbin Darrieus ditemukan oleh Georges Darrieus pada tahun 1931. Turbin Darrieus adalah jenis dari turbin angin vertikal dengan efisiensi tinggi, mampu menghasilkan putaran dan kecepatan angin yang tinggi hingga mendapat torsi besar. Turbin Darrieus menggunakan sudu dengan bentuk rancangan aerodinamika, berdasarkan bentuk sudu prinsip kerja turbin ini memanfaatkan gaya angkat yang terjadi ketika permukaan aerodinamik yang dikenai oleh aliran angin. Gaya angkat yang tercipta dari *airfoil* yang terdapat pada turbin Darrieus ini dikarenakan adanya perbedaan arah aliran yang terjadi disekitar turbin dengan aliran yang melintasi turbin. Perbedaan hasil arah ini menciptakan arah aliran baru yang memiliki *angle of attack* pada turbin Darrieus.

Kekurangan utama turbin angin Darrieus yaitu memiliki torsi awal berputar kecil sehingga susah dalam melakukan putaran mula-mula, namun putaran turbin darrieus lebih tinggi dibandingkan dengan turbin savonius sehingga lebih diutamakan untuk menghasilkan energi listrik. Turbin Darrieus memiliki beberapa model, yang diantaranya adalah model rotor H (giromill), dan model pengocok telur (*eggbeater*). Keunggulan dari turbin jenis Darrieus adalah bentuknya yang ringan, sehingga efisiensi hasil perbandingan antara torsi yang dihasilkan dengan beban turbin sangatlah besar. Hal inilah yang menjadi perhatian utama dalam pembuatan turbin Darrieus. Tetapi, karena turbin Darrieus harus mendapatkan aliran disekitar turbin untuk menciptakan gaya angkat. Oleh karena itu Turbin Darrieus selalu membutuhkan alat bantuan untuk melakukan putaran mula-mula. Alat bantu yang digunakan biasa berupa motor listrik dan umumnya lebih sering menggunakan penggabungan antara turbin Savonius pada poros utama.



Gambar 2.4 *Vertical Axis Wind Turbine tipe Darrieus eggbeater (Aboufares, 2015)*

2.3 Turbin Angin Tipe Savonius

Turbin Savonius dipatenkan oleh S.J. Savonius pada tahun 1922. Tujuan awal dari pembuatan turbin jenis ini adalah mencari solusi alternatif mencari jenis energi yang

terbaharukan dengan biaya minimal dan *impact* terhadap lingkungan yang minim. Konstruksi dari turbin ini relatif lebih sederhana dibandingkan dengan turbin angin lainnya. Dalam bentuk yang paling sederhana turbin Savonius terdiri dari dua bagian setengah silinder yang membentuk penampang seperti huruf “S” dan dihubungkan pada sebuah poros.



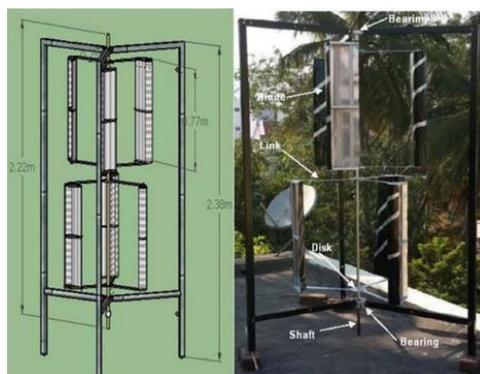
Gambar 2.5 *Vertical Axis Wind Turbine* tipe Savonius (Vanessa, 2016)

Blade Savonius sering dinamakan *bucket* karena berfungsi untuk memanipulasi gaya hambat akibat angin yang mengalir sehingga dapat dikonversikan menjadi torsi. Turbin Savonius memiliki 2 bagian sudu yaitu sudu bersisi cekung atau *advancing blade* dan sudu bersisi cembung atau *returning blade*. Pada saat turbin berputar, bagian sudu cekung (*advancing blade*) menangkap aliran angin sedangkan bagian sudu cembung (*returning blade*) bergerak melawan arah aliran angin. *Advancing blade* memiliki koefisien hambat yang lebih besar dibandingkan dengan koefisien hambat *returning blade*. Sisi *advancing blade* yang dilalui aliran angin akan memberikan gaya hambat yang lebih besar daripada sisi *returning blade* sehingga turbin berputar. Turbin Savonius memanfaatkan gaya hambat (*drag force*) saat mengekstrak energi angin dari aliran angin yang melalui sudu turbin. Dengan memanfaatkan *drag force*, Turbin Angin Savonius memiliki putaran serta daya yang rendah.

Meskipun demikian, turbin Savonius tidak memerlukan torsi awal untuk memutar turbin yang merupakan keunggulan dari turbin ini. Turbin jenis ini umumnya bergerak lebih lama dibandingkan jenis turbin angin sumbu horizontal, tetapi dapat menghasilkan hasil torsi yang besar dan efisiensi yang bisa dicapai turbin savonius sekitar 30%.

2.4 Turbin Angin Tipe Lenz 2

Turbin angin tipe VAWT terinspirasi oleh dua tipe dasar yaitu turbin Savonius dan turbin Darrieus. Pada tahun 2007 ditemukan bahwa turbin angin memiliki efisiensi yang lebih besar dari efisiensi kira - kira. Turbin tipe Lenz 2 ditemukan oleh Edwin Lenz. Turbin ini menggabungkan konsep kedua turbin tersebut yaitu memanfaatkan gaya hambat dari turbin Savonius dan memanfaatkan gaya angkat aerodinamis dari turbin Darrieus. Karena penggabungan kedua turbin tersebut maka turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 memiliki beberapa kelebihan seperti dapat melakukan *self starting* yang merupakan kelebihan dari turbin Savonius dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi di banding Savonius yang merupakan kelebihan dari turbin Darrieus. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 ini memiliki torsi yang cukup walaupun kecepatan angin rendah. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 juga tergolong murah dan sederhana, karena tidak bergantung pada arah aliran angin. Turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 dapat menghasilkan efisiensi yang lebih besar 40% dibanding dengan turbin Savonius dan turbin Darrieus. Namun turbin angin sumbu vertikal tipe Lenz 2 memiliki kekurangan yaitu efisiensi Lenz 2 ini lebih kecil dibanding dengan turbin jenis *Horizontal Axis Wind Turbine*.



Gambar 2.6 Vertical Axis Wind Turbine Tipe Lenz 2 (Sivamani et al, 2017)

2.5 Pemodelan Turbulensi

Aliran turbulen adalah salah satu fenomena yang menggambarkan suatu aliran yang melewati suatu konfigurasi yang dapat menghasilkan pusaran yang bersifat acak tetapi juga memiliki pola tertentu. Suatu aliran turbulen jika diinjeksi (misalnya aliran udara yang diinjeksi asap, atau aliran air yang diinjeksi tinta) akan menunjukkan adanya pusaran yang kemudian dikenal sebagai *Eddy*.

Tennekes dan Lumley (1972) menyatakan bahwa aliran turbulen tidak dapat didefinisikan, namun dapat diidentifikasi berdasarkan beberapa sifat - sifat turbulensi. Sifat - sifat turbulensi seperti aliran tidak beraturan, dispersif atau menyebar yang menyebabkan aliran turbulen memiliki kemampuan yang tinggi dalam proses *mixing*, perpindahan panas, perpindahan momentum dan perpindahan massa. Turbulensi juga bersifat disipatif atau menyebar. Aliran turbulen memiliki bilangan Reynolds yang tinggi, membentuk pusaran tiga dimensi karena jika aliran mengarah ke *down stream*, *boundary* akan mengalami transisi menjadi turbulen.

2.5.1 Klasifikasi Model Turbulensi CFD Pada Software Fluent

Pada simulasi CFD, RANS-based models pada *Fluent* mempunyai beberapa klasifikasi model yaitu diantaranya *one - equation model*, *two - equation model* dan *Reynold Stress Model*. *One - equation model* adalah model yang menggunakan satu persamaan tambahan dalam perhitungannya. Salah satu contoh model dari *one - equation model* adalah *Spalart - Allmaras*, *Spalart - Allmaras* biasanya digunakan untuk menghitung model persamaan dari *kinematic eddy turbulent viscosity* dan dirancang untuk *aerospace* yang melibatkan *wall-bounded flows* pada *fine near-wall mesh*. *Spalart - Allmaras* baik digunakan untuk *meshing* yang cukup besar, namun sangat buruk pada *3D flows*. Model ini lebih sesuai digunakan untuk *meshing* 2D internal atau eksternal *flows* dan *boundary layer flows under pressure gradient*.

Sama seperti *one - equation model*, *two - equation model* digunakan untuk menghitung model persamaan *kinematic eddy turbulent viscosity*. Pada *two - equation model*, menggunakan dua persamaan tambahan agar *Reynolds Stress Tensor* dapat dihitung. Persamaan tambahan yang digunakan berupa $k-\varepsilon$ dan $k-\omega$. $k-\varepsilon$ adalah model dari penggabungan antara *turbulent kinetic energy* k dengan *turbulence eddy dissipation* ε . $k-\varepsilon$ memiliki beberapa model yaitu *standard* $k-\varepsilon$, *RNG* $k-\varepsilon$, *Realizable* $k-\varepsilon$. Sedangkan $k-\omega$ adalah model dari penggabungan antara *turbulent kinetic energy* k dengan *turbulence eddy dissipation* ω . $k-\omega$ memiliki beberapa model yaitu *standard* $k-\omega$ dan *SST* $k-\omega$.

Standard $k-\varepsilon$ adalah model turbulensi yang cukup baik digunakan dalam mensimulasikan berbagai kasus aliran dan dapat menunjukkan kovergensi yang baik. Perhitungan *standard* $k-\varepsilon$ cukup akurat, *standard* $k-\varepsilon$ baik digunakan untuk menghitung kompresibilitas, pembakaran dan daya apung. *standard* $k-\varepsilon$ baik digunakan pada aliran *steady-*

state, namun kurang baik digunakan untuk aliran yang tak terbatas, *swirling flows*, dan *rotating flows*. RNG - $k-\epsilon$ adalah model turbulensi yang lebih akurat dibandingkan dengan *standard k- ϵ* terutama pada *rotating flows* dan baik digunakan untuk simulasi *indoor air*. RNG - $k-\epsilon$ juga dapat mensimulasikan arus yang berputar dan bilangan Reynolds yang rendah dan baik digunakan untuk aliran yang kompleks. Namun, RNG - $k-\epsilon$ kurang akurat untuk aliran *steady-state* dan *vortex evolution* serta membutuhkan CPU yang cukup tinggi dibanding simulasi dengan *standard k- ϵ* . *Realizable k- ϵ* adalah model turbulensi yang lebih akurat dan lebih mudah terkonvergen dibanding dengan RNG. *Realizable k- ϵ* baik digunakan untuk *rotating flows*, tekanan yang besar, dan *recirculation flows*.

Standard k- ω adalah model turbulensi yang baik digunakan untuk *wall-bounded boundary layer*, *free shear flows* dan bilangan Reynolds yang rendah. *Standard k- ω* juga dapat digunakan pada aliran transisi dan aliran *compressible*. SST - $k-\omega$ adalah model turbulensi yang sama dengan *standard k- ω* , namun sangat bergantung pada *wall distance* yang membuat kurang baik digunakan pada *free shear flows* dan cukup lambat untuk konvergensi.

Reynold Stress Model adalah model turbulensi yang baik digunakan untuk 3D *flows* yang kompleks dengan *streamline curvature*, *swirl* dan *rotation flows* yang kuat, namun *Reynold Stress Model* ini membutuhkan CPU yang cukup kuat dan cukup lambat untuk konvergensi.

2.6 Gaya Drag

Dalam aspek aerodinamika sebuah kendaraan menjadi salah satu parameter yang sangat penting dalam desain otomotif, karena itu berkaitan dengan timbulnya gaya hambat (*drag*) pada kendaraan tersebut akan mempengaruhi pada jumlah konsumsi daya listrik atau bahan bakar yang digunakan. Pada turbin angin, gaya *drag* adalah salah satu yang diperlukan untuk memutar *blade* pada turbin angin Lenz 2. Persamaan gaya *drag* dapat dituliskan sebagai berikut tersebut dituliskan dalam persamaan 2.1 sebagai berikut :

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

dimana:

- F_D : Gaya *drag* (N)
- C_D : Koefisien *drag*
- ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
- v : Kecepatan fluida (m/s)
- A : Luas permukaan benda yang ditabrak oleh fluida (m^2)

Tabel 2.1 Nilai koefisien *drag* untuk beberapa bentuk bidang permukaan pada $Re \geq 1000$

(Pitchard et al, 2011)

Object	Diagram	$C_D(Re \geq 10^3)$
Square prism		$b/h = \infty$: 2.05 $b/h = 1$: 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20*
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

*Data from Hoerner [16].
*Based on ring area.

2.7 Gaya Lift

Perbedaan tekanan antara permukaan atas dan bawah *airfoil* akan menimbulkan gaya resultan yang arahnya tegak lurus arah datangnya aliran fluida, gaya ini disebut sebagai gaya angkat (*lift*). Gaya angkat yang dihasilkan oleh *airfoil* inilah yang kemudian dimanfaatkan pada berbagai aplikasi teknik. Besar kecilnya gaya angkat yang terjadi akan berubah-ubah tergantung geometri *airfoil* dan kondisi operasinya.

Gaya *lift* atau biasa disebut gaya angkat adalah gaya yang mengangkat suatu benda keatas yang terjadi karena tekanan dibawah benda lebih besar daripada tekanan diatas benda. Gaya angkat ini sebagian besar ditimbulkan pada sayap pesawat terbang dan biasanya digunakan untuk melawan gaya gravitasi bumi yang masih menarik pesawat tersebut ke arah bawah:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 A \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana:

- F_L = Gaya *Lift* (N)
- C_L = Koefisien *lift*
- ρ = Densitas fluida (Kg/m³)
- v = Kecepatan fluida (m/s)
- A = Luas permukaan benda yang ditabrak oleh fluida (m²)

2.8 Bilangan Reynolds

Aliran fluida dapat dibedakan menjadi laminar dan turbulen menurut dari gerakan partikel fluida. Aliran laminar adalah partikel fluida yang bergerak pada lapisan yang lembut sedangkan aliran turbulen adalah partikel fluida yang bergerak secara acak pada arah 3 dimensi. Karakteristik aliran laminar yaitu memiliki momentum yang kecil untuk melawan adanya gaya gesek pada benda yang dilewatinya sehingga *boundary layer* yang terbentuk memiliki ketebalan yang tinggi karena dipegaruhi gaya gesek benda.

Sedangkan aliran turbulen memiliki momentum yang lebih tinggi untuk melawan adanya gaya gesek yang ditimbulkan oleh benda yang dilaluinya, sehingga pada *boundary layer* yang terbentuk memiliki ketebalan yang rendah sebab hanya sedikit fluida yang terpengaruh oleh gaya gesek tersebut. Perubahan aliran dari keadaan laminar menjadi turbulen dinamakan atau disebut juga dengan keadaan transisi.

Maka dapat dikatakan bilangan Reynold adalah rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous* yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Rumus bilangan Reynold umumnya diberikan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana:

- Re = Bilangan Reynolds
- ρ = Massa jenis fluida (Kg/m³)
- V = kecepatan aliran fluida (m/s)
- L = Panjang karakteristik yang diukur pada aliran (m)
- μ = koefisien gesek statis benda (N.s/m²)

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

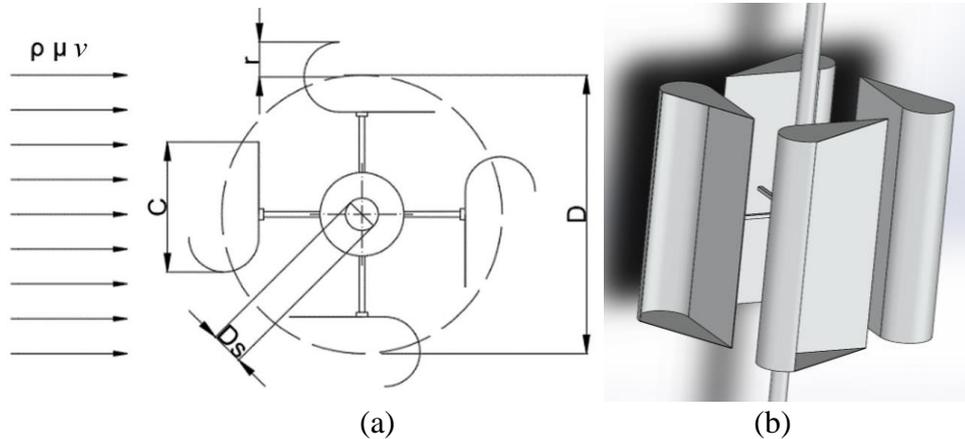
$$L = D + 2r \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

r : Blade radius leading edge (m)

D : Diameter turbin (m)

Untuk lebih jelasnya, pada penelitian ini nilai panjang karakteristik (L) yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.7 berikut :



Gambar 2.7 Skema turbin Lenz 2 (a) dua dimensi (b) tiga dimensi

2.9 Torsi Statis

Torsi statis pada turbin angin Lenz 2 menggunakan perhitungan dengan pengaruh dari gaya *drag* angin. Torsi statis dapat menyebabkan gerak rotasi suatu benda dengan persamaan sebagai berikut:

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

Dengan substitusi gaya *drag* dari persamaan sebelumnya, maka didapatkan persamaan :

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

dimana:

T_s : Torsi yang dihasilkan oleh putaran poros (Nm)

R : jari-jari turbin Lenz 2 (m)

Dengan perhitungan Luas permukaan benda yang ditabrak oleh fluida sebagai berikut :

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

dimana:

H : Tinggi *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:

$$C_{TS} = \frac{T_s}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R} = \frac{4 \cdot T_s}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot D} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.10 Solidity

Solidity juga diperlukan dalam pengerjaan tugas akhir ini karena nilai *solidity* dapat memberikan efek terhadap performa turbin angin tipe Lenz 2. Semakin banyak jumlah bilah, maka nilai *solidity* juga akan meningkat. *Solidity* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{D} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana:

N : Jumlah *blade* yang digunakan

c : *Blade chord length* (m)

D : Diameter turbin (m)

2.11 Aspect Ratio

Aspect Ratio didefinisikan sebagai perbandingan antara tinggi *blade* dan diameter turbin dari turbin. Berdasarkan pengertian tersebut, nilai dari *aspect ratio* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$AR = \frac{H}{D} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

AR : *Aspect Ratio*

H : tinggi *blade* (m)

D : diameter turbin (m)

2.12 Computational Fluid Dynamics (CFD)

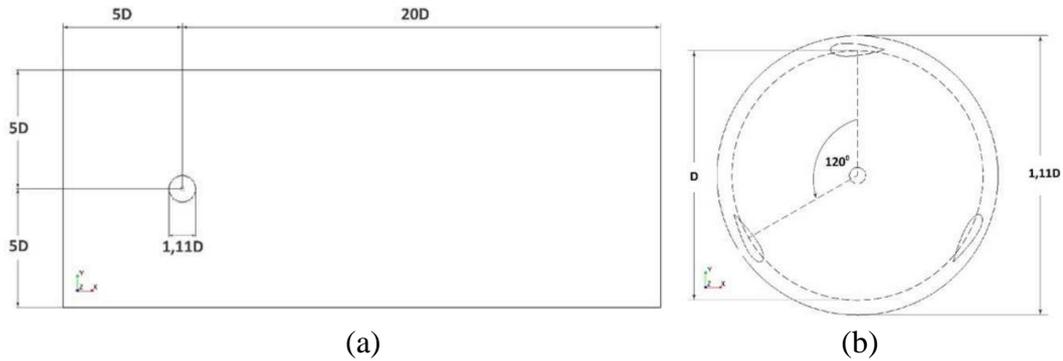
Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah suatu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik untuk menyelesaikan dan menganalisa elemen-elemen yang akan disimulasikan. Pada proses ini, komputer berfungsi untuk menyelesaikan perhitungan numerik dengan cepat dan akurat. Prinsip kerja pada CFD adalah model yang akan kita simulasikan berisi fluida akan dibagi menjadi beberapa elemen. Elemen-elemen yang terbagi tersebut merupakan sebuah kontrol perhitungan yang akan dilakukan oleh *software*, proses ini dinamakan sebagai *meshing*. Selanjutnya elemen diberi batasan *domain* dan *boundry condition*. Prinsip ini lah yang banyak digunakan pada proses perhitungan dengan menggunakan bantuan komputasi.

2.13 Penelitian Terdahulu

Sebagai sumber referensi untuk mendukung penelitian ini, maka dibutuhkan penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan agar dapat mempermudah penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang akan dijelaskan adalah sebagai berikut :

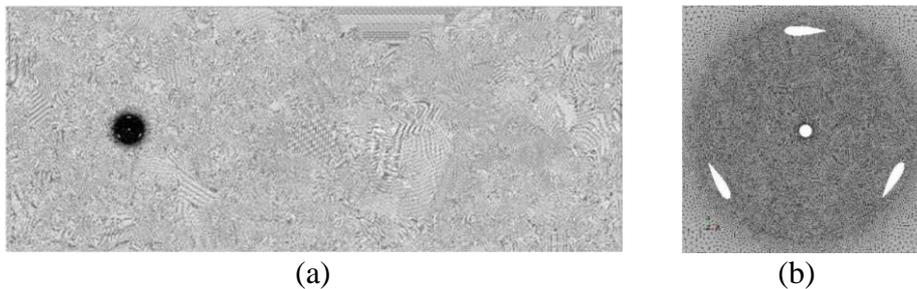
2.16.1 Taufiqurrahman & Suphandani (2017)

Penelitian ini dilakukan oleh Taufiqurrahman et al agar didapat desain turbin angin terbaik yang mampu memanfaatkan tenaga angin seoptimal mungkin. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian numerik dua dimensi dengan analisis aliran *unsteady* menggunakan *software* STAR CCM+ 9.02.007 – R8. Pada penelitian ini turbin angin yang digunakan adalah turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil blade* sesuai dengan NACA 0024. Pada Penelitian ini memiliki beberapa parameter yaitu jumlah *blade* dan kecepatan angin. *Blade* yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 3 dan 4, dan kecepatan angin yang di teliti adalah 5, 7, 9, 11, 13 dan 15 m/s. Pada penelitian ini melewati tiga tahapan utama yaitu *pre – processing*, *processing*, *post – processing*. Pada gambar 2.9 ditunjukkan geometri turbin tipe Darrieus ini.



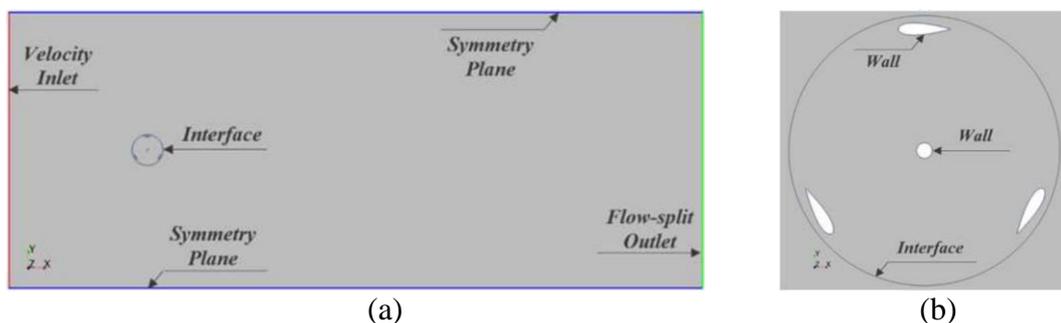
Gambar 2.8 Dimensi domain turbin angin Darrieus tiga *blade* (a) Dimensi *static domain*, (b) Dimensi *rotating domain*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Bentuk *mesh* yang digunakan pada penelitian ini adalah *tetrahedral mesh* dengan metode *automated mesh* dengan jumlah *cell* sebanyak 242256. Hasil *Meshing* dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.9 Mesh Turbin angin Darrieus tiga *blade* (a) Mesh *static domain*, (b) Mesh *rotating domain*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Boundary condition yang digunakan pada *inlet* adalah *velocity inlet* dengan nilai kecepatan *freestream* yang melaluinya yaitu 5, 7, 9, 11, 13, 15 m/s, sedangkan pada *outlet* nya digunakan *flow-split*, pada setiap *blade* dan poros yang digunakan *wall* dengan *rotation motion*, *symmetry plane* adalah batas atas dan batas bawah dan *interface* adalah pertemuan antar dua *domain*.



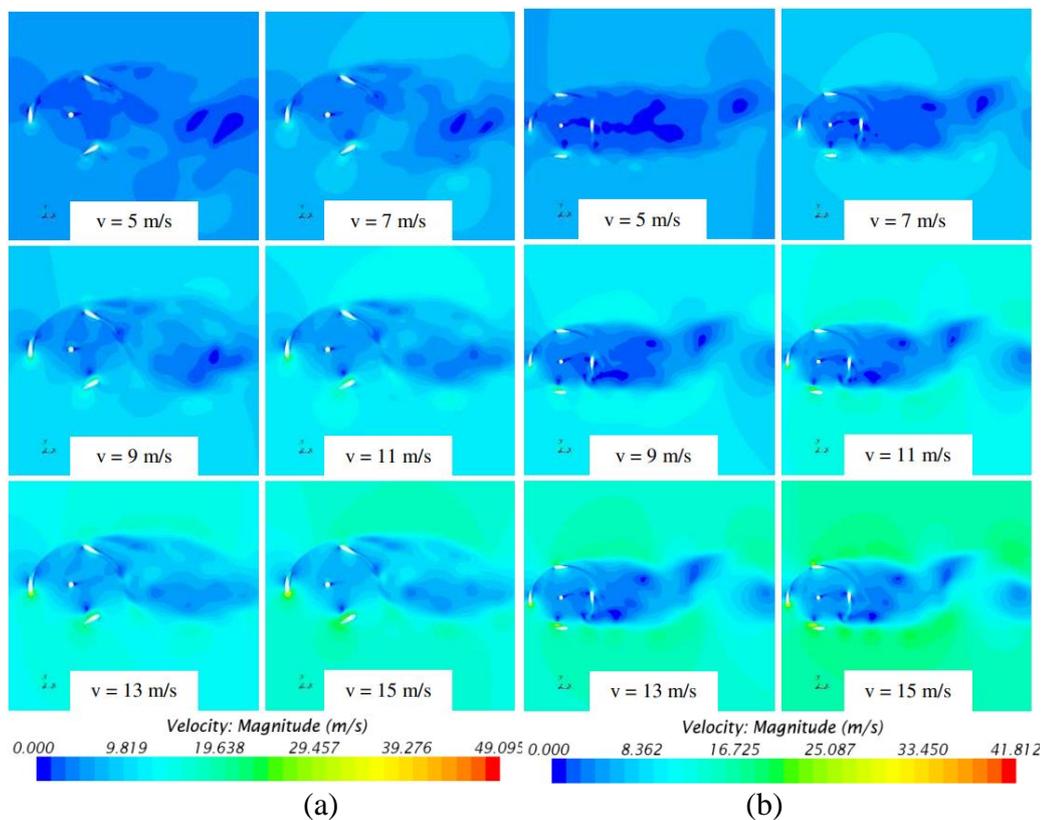
Gambar 2.10 Boundary conditions turbin angin Darrieus tiga *blade* (a) Boundary condition *static domain*, (b) Boundary condition *rotating domain*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Fluida kerja pada simulasi ini adalah udara dengan *density* 1,18415 kg/m³ (*constant*) dengan *dynamic viscosity* 1,85508E-5 Pa.s (*constant*). Kriteria konvergensi ditentukan pada 10E-5. Putaran turbin pada kecepatan *freestream* 9 m/s diadaptasi dari referensi jurnal dengan asumsi parameter lainnya. Berdasarkan hasil perhitungan didapat nilai putaran turbin dan *tip speed ratio* pada setiap kecepatan *freestream* yang ditampilkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2 Nilai putaran turbin dan TSR pada tiap kecepatan angin (*freestream*)
(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

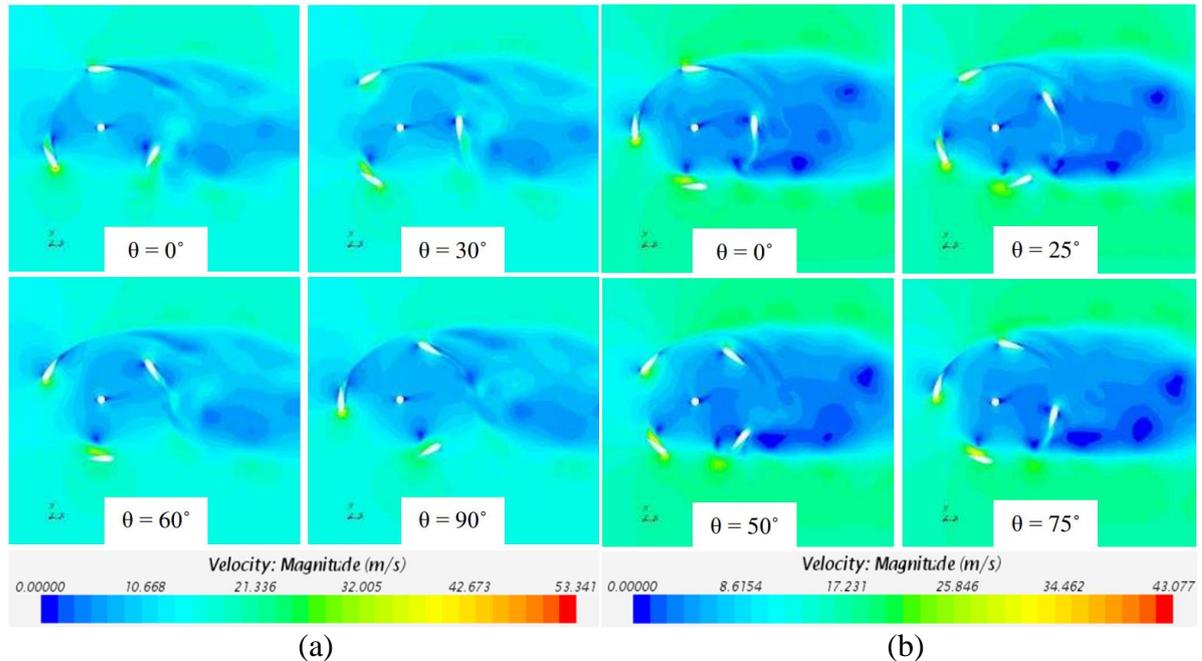
Pada gambar 2.12 menunjukkan hasil grafik *kontur* kecepatan turbin angin Darrieus tiga *blade* pada sudut putar turbin 0° dan 90° dengan variasi kecepatan *freestream*. Dapat dilihat bahwa kecepatan putar tertinggi turbin angin terjadi saat kecepatan *freestream* 15 m/s karena kenaikan kecepatan putar turbin berbanding lurus dengan pertambahan kecepatan angin yang melalui turbin angin. Pada gambar 2.12 kontur kecepatan tersebut pertambahan sudut putar turbin akan menambah nilai angle of attack dan mempengaruhi gaya *lift* yang terjadi. Ketika turbin angin mencapai sudut putar turbin 90° .



Gambar 2.11 Kontur kecepatan turbin angin Darrieus pada (a) tiga *blade* pada sudut 90° dengan variasi kecepatan *freestream*, (b) empat *blade* pada sudut 0° dengan variasi kecepatan *freestream*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

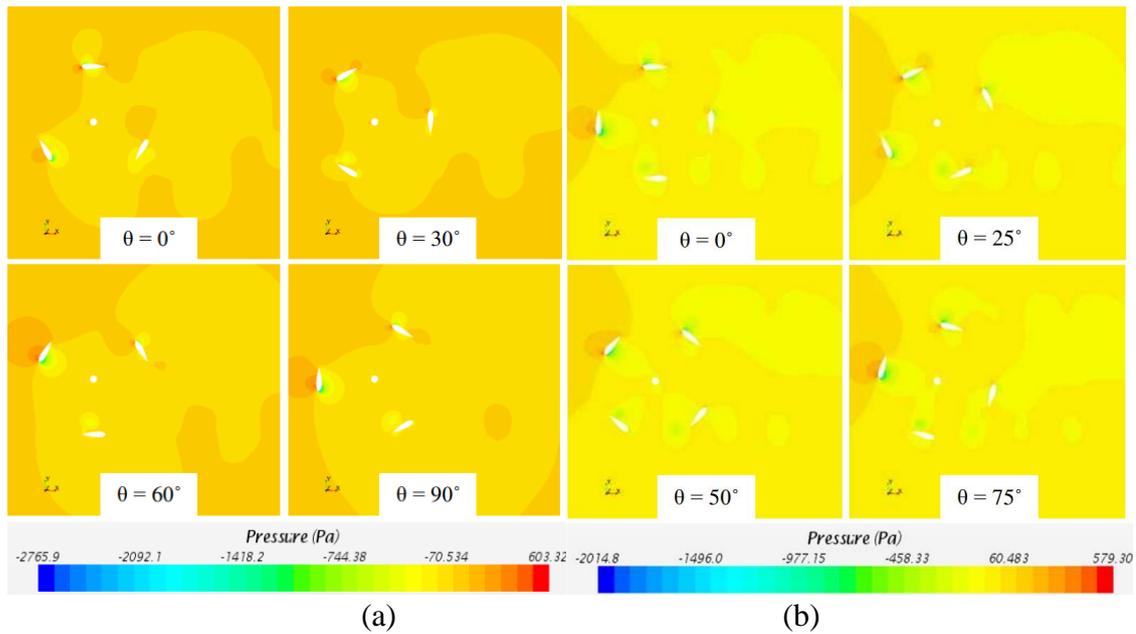
Gambar 2.13 (a) menunjukkan *kontur* kecepatan turbin angin Darrieus tiga sudu dari berbagai sudut putar turbin dengan kecepatan angin 15 m/s. Pada sudut putar turbin 90° mulai muncul *vortex* yang menyebabkan penurunan gaya *lift* pada sudu sehingga kecepatannya pun menurun. *Blade* turbin angin yang telah melalui sudut putar turbin 90° mengalami penurunan kecepatan hingga mencapai sudut putar turbin 360° dikarenakan adanya pengaruh dari *vortex* yang terbentuk dan kondisi kecepatan angin yang mengalir pada daerah *downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*. Pada gambar 2.13 (b) menunjukkan *kontur* kecepatan turbin

angin Darrieus empat *blade* dari berbagai sudut putar turbin dengan kecepatan angin 15 m/s. Turbin angin Darrieus empat *blade* memiliki kemampuan menghasilkan gaya *lift* dan torsi yang lebih kecil daripada turbin angin Darrieus tiga *blade* karena banyaknya sudu di pada daerah *downstream* menjadi penghambat *blade* pada daerah *upstream*. Kecepatan maksimum pada *blade* turbin angin Darrieus empat *blade* tidak setinggi kecepatan maksimum pada sudu turbin angin Darrieus tiga *blade*, begitu juga dengan koefisien daya yang dihasilkan.



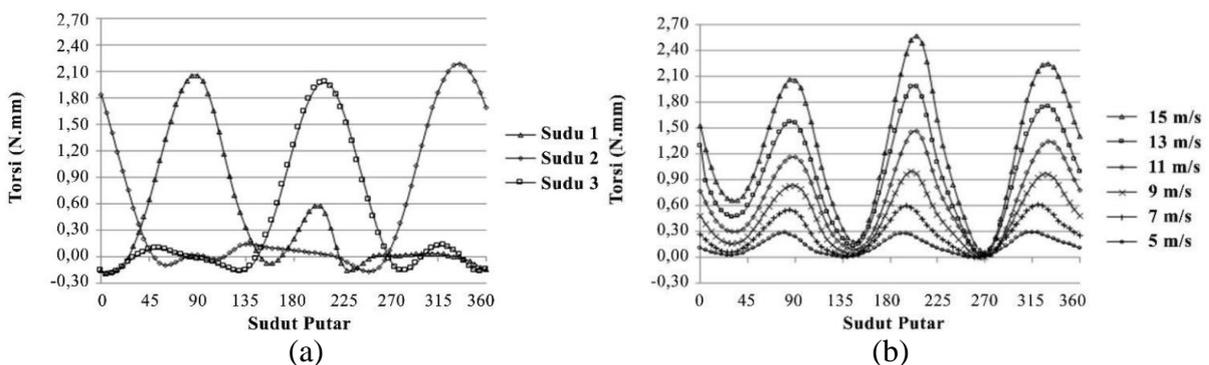
Gambar 2.12 Kontur kecepatan turbin angin Darrieus dari berbagai sudut putar turbin dengan kecepatan *freestream* 15 m/s (a) tiga *blade*, (b) empat *blade*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada gambar 2.14 (a) kontur tekanan tersebut terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* yang tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini terjadi dikarenakan sisi luar *blade* yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang lebih besar dari angin yang melaluinya sedangkan sisi dalam *blade* tidak dikenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan nya rendah. Fenomena ini menyebabkan terjadinya gaya *lift* yang lebih tinggi dari posisi *blade* lainnya. Sedangkan pada *blade* lainnya tidak memiliki perbedaan tekanan yang terlalu besar karena dipengaruhi oleh *vortex* dan posisi *blade*. Kontur tekanan turbin angin Darrieus empat *blade* ditunjukkan pada gambar 2.14 (b) terlihat fenomena yang tidak jauh berbeda dengan turbin tiga *blade*.

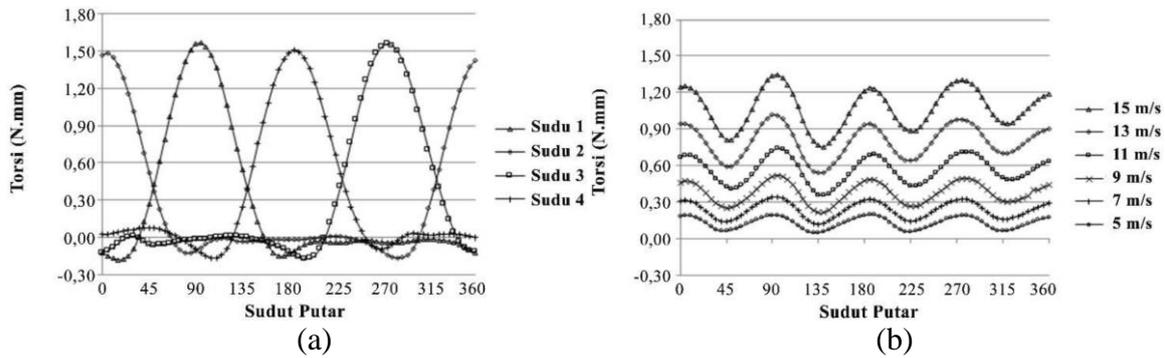


Gambar 2.13 Kontur tekanan turbin angin Darrieus dari berbagai sudut dengan kecepatan angin 15 m/s (a) tiga *blade*, (b) empat *blade*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada gambar 2.15 (a) dan gambar 2.16 (a), dapat dilihat bahwa nilai torsi tertinggi dicapai ketika suatu *blade* tegak lurus dengan arah aliran angin pada sudut putar turbin 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 2.15 (b) dan gambar 2.16 (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 sudu yang digunakan pada turbin angin Darrieus ini, maka semakin banyak pula *blade* yang menghambat dengan nilai torsi kecil yang akan mengurangi performa turbin angin.

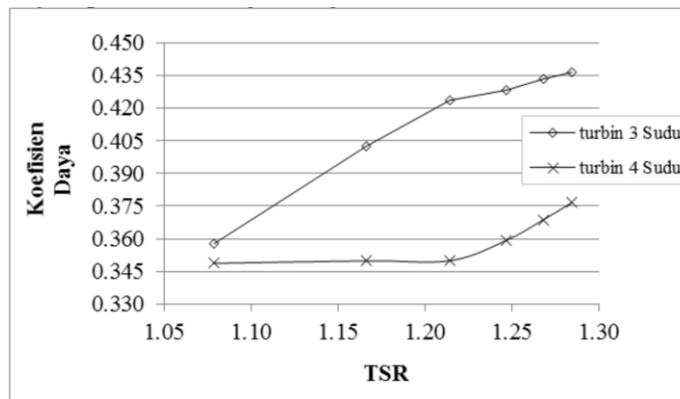


Gambar 2.14 Grafik torsi pada turbin angin tiga *blade* (a) Grafik torsi terhadap sudut putar turbin *blade* 1, 2, 3 pada kecepatan *freestream* 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan *freestream*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)



Gambar 2.15 Grafik torsi pada turbin angin empat *blade* (a) Grafik torsi terhadap sudut putar turbin *blade* 1, 2, 3 pada kecepatan *freestream* 15 m/s, (b) Grafik torsi total terhadap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan *freestream*. (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada gambar 2.17 ditampilkan 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 *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.



Gambar 2.16 Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin Darrieus tiga *blade* dan empat *blade* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Melalui penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi torsi yang dihasilkan, namun semakin banyak jumlah *blade*, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah. Semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu *blade*, maka semakin besar 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. Selain itu, semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu *blade*, maka semakin tinggi kecepatan pada *blade* tersebut dan koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi.

2.16.2 Abu-El-Yazied et al (2015)

Penelitian ini dilakukan oleh Abu-El-Yazied untuk menguji beberapa parameter seperti jumlah *blade* dan *blade chord length* yang mempengaruhi efisiensi *straight Darrieus wind*

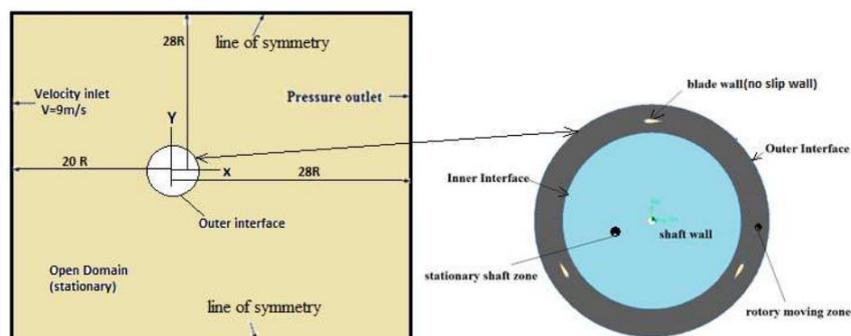
turbine. Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari pengaruh perubahan parameter desain, jumlah *blade*, *blade chord length*, dan soliditas turbin pada performa *vertical axis wind turbine* tipe H-Darrieus dengan nilai sudut pitch yang tetap melalui simulasi CFD. Dua belas model dibuat dengan jumlah *blade* dan *blade chord length* yang berbeda untuk mempelajari pengaruhnya terhadap performa *Darrieus wind turbine*. *Computational fluid dynamics* (CFD) dengan dimensi 2D dilakukan pada *straight-bladed Darrieus-type rotor* dengan acuan karakteristik *airfoil* NACA 0021.

Pada penelitian ini dianalisa aerodynamic behavior dari dua, tiga, empat dan enam *blade* Darrieus VAWT yang beroperasi pada kecepatan sudut yang berbeda. Kecepatan angin yang digunakan dalam penelitian ini konstan dengan nilai sebesar 9 m/s. Parameter utama dan model soliditas dijelaskan pada tabel 2.3 :

Tabel 2.3 Parameter Penelitian (Abu-El-Yazied et al, 2015)

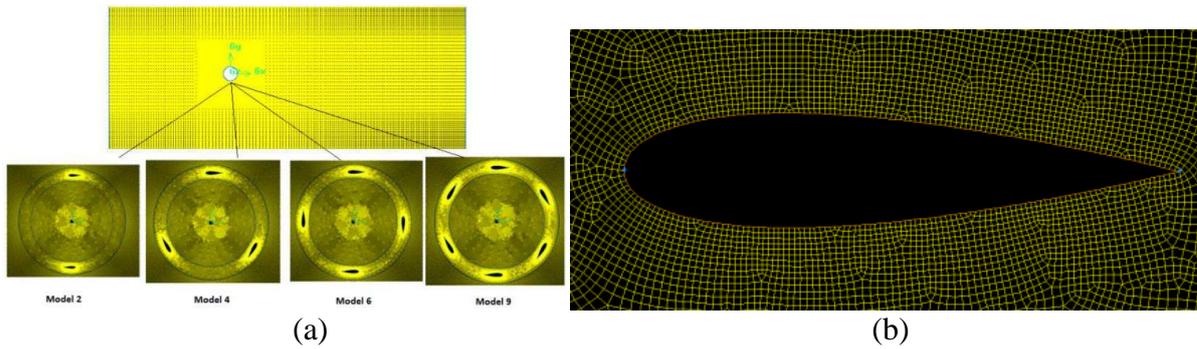
Features	Models											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Drotor [mm]	1030											
Hrotor [m]	1 (2D simulation)											
Blade profile	NACA 0021											
C [mm]	85,8	128,7	85.8	170	85.8	170	64.35	85.8	170	42.9	250	300
Solidity (σ)	0.17	0.25	0.25	0.5	0.33	0.66	0.25	0.5	0.99	0.25	0.48	0.87
Number of blades (n)	2	2	3	3	4	4	4	6	6	6	2	3

Pada gambar 2.18 ditunjukkan bahwa *Inlet* ditetapkan sebagai *velocity inlet*, dengan kecepatan konstan sebesar 9 m/s, sedangkan *outlet* ditetapkan sebagai *pressure outlet*. Dua *symmetry boundary conditions* digunakan untuk kedua sisi dinding.



Gambar 2.17 Skema rotor turbin dan domain VAWT 3 blade (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Semua *mesh* yang dibuat mempunyai ukuran *grid* dan *growth factor* yang sama dengan tipe *meshing* yang digunakan adalah *hexahedral*. Untuk model turbulensi yang digunakan dalam penelitian ini berupa *Realizable k-ε* dengan fungsi dinding yang digunakan tipe *standard*. Setelah dilakukannya simulasi hasil yang didapatkan adalah di dekat semua *wall* di sekitar 40 masuk dalam kisaran yang di rekomendasikan sekitar $30 < y^+ < 300$. *Sample mesh* dua dimensi yang diuji dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.18 Hasil *meshing* 2D (a) *Meshing* 2D dengan beberapa model (b) *Meshing blade* NACA 0021 (Abu-El-Yazied et al)

Penggunaan model turbulensi *realizable k-ε* direkomendasikan untuk *body* yang berputar. Model *realizable k-ε* umumnya memberikan hasil yang lebih baik untuk aliran yang berputar dan aliran yang memisah jika dibandingkan dengan model *k-ε standard* dengan *near-wall treatment* yang digunakan adalah *standard wall function*. Penelitian ini menerapkan skema *SIMPLE*. Di antara beberapa skema diskritisasi khusus yang tersedia pada Fluent, *least squares cell based gradient* dengan *standard pressure* dan skema *second order upwind* sesuai untuk penelitian ini. Simulasi dimulai dengan melanjutkan menggunakan *second order*, dan di antara beberapa formulasi *transient* yang tersedia, *second order implicit* dinilai sesuai dengan simulasi yang dilakukan. Untuk kriteria konvergensi yang ditetapkan sebesar 10^{-5} . Data hasil simulasi 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.

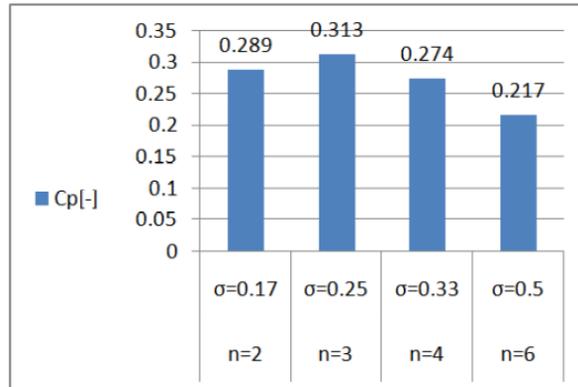
Dari Hasil yang ditunjukkan pada tabel 2.4 nilai koefisien daya dari model yang dianalisis yang disebutkan sebagai fungsi *tip speed ratio*, pada kecepatan angin sebesar 9 m/s. Analisis numerik dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap *vertical axis wind turbine straight-bladed*. 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, yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.4 Hasil Simulasi penelitian (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Model no.	n	$\lambda_{Cp,max}$	$C_{p,max}$	σ	% $C_{p,max}$	% $\lambda_{Cp,max}$
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

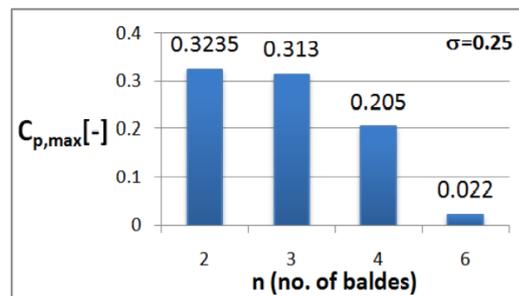
Berdasarkan data hasil simulasi juga didapatkan bahwa, koefisien daya maksimum menurun seiring dengan meningkatnya soliditas dan jumlah *blade*. Analisis ini diperoleh pada

nilai *blade chord length* sebesar 85,8 mm. Berikut merupakan grafik hasil pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap koefisien daya yang dapat dilihat pada gambar 2.20 :



Gambar 2.19 Grafik perbandingan dengan panjang *chord* 85,8 mm terhadap koefisien daya dengan *solidity* (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Berdasarkan pada tabel 2.4, pengaruh *blade chord length* terhadap koefisien daya maksimum. Dengan nilai *solidity* yang sama, maka nilai koefisien daya maksimum meningkat seiring dengan peningkatan nilai *chord length* pada *blade*, dan sebaliknya seperti yang ditunjukkan oleh grafik pada gambar 2.21 sebagai berikut :



Gambar 2.20 Grafik perbandingan koefisien daya maksimum terhadap jumlah *blade* pada nilai *solidity* yang sama (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Maka dapat disimpulkan melalui hasil penelitian yang telah dilakukan bahwa koefisien daya puncak yang diharapkan secara numerik turun seiring dengan meningkatnya nilai soliditas pada rotor dan koefisien daya maksimum. Untuk peningkatan *blade chord length*, dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan koefisien daya pada nilai soliditas yang sama.

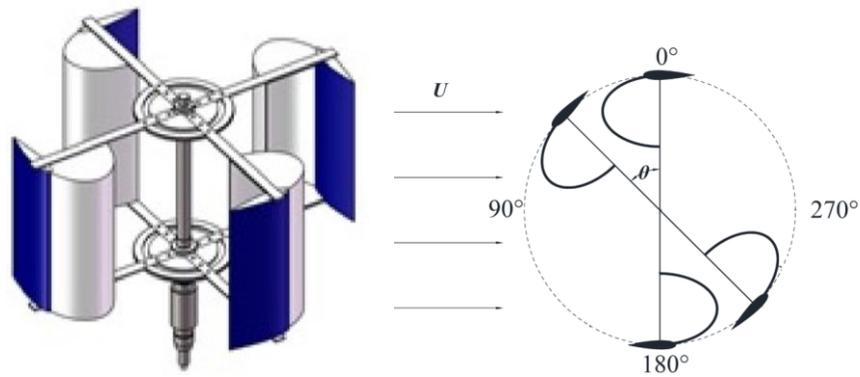
2.16.3 Feng et al (2021)

Penelitian ini dilakukan oleh Feng et al secara analisa numerik melalui aplikasi ANSYS *Fluent* 19.0 dengan dimensi 2D pada *vertical axis wind turbine* tipe LDCS (*lift - drag combine starter*) karena cocok untuk digunakan pada *vertical axis wind turbine* tipe *lift* untuk membantu melakukan *self starting* dengan variasi kecepatan angin dan variasi jumlah *blade*. Struktur *blade* ini adalah hasil kombinasi pemanfaatan gaya *drag* dan gaya *lift* untuk mengurangi efek buruk dari *self starting blade* berbentuk *airfoil* dengan menambahkan *blade drag* pada bagian belakang *blade airfoil*. Pada gambar 2.21 ditunjukkan gambar turbin angin tipe LDCS dan tabel 2.5 parameter yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.5 Parameter LDCS jumlah *blade* tiga (Feng et al, 2021)

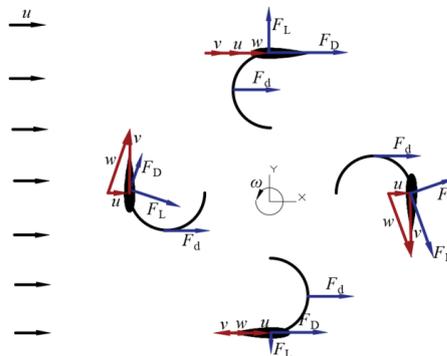
Table 1. Structural parameters of LDCS model with three blade numbers.

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	θ	0° - 360°



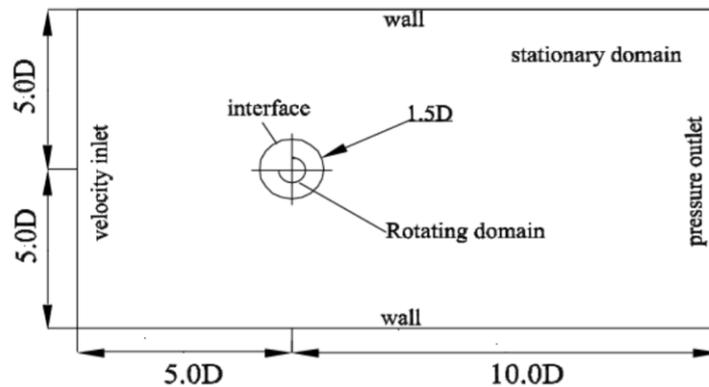
Gambar 2.21 Bentuk *blade* dan sudut *azimuth* turbin angin LDCS (Feng et al, 2021)

Analisa gaya dilakukan pada *blade* berjumlah empat dengan sudut *azimuth* 0° dimana u adalah datangnya angin, v adalah kecepatan angin, w adalah *angular velocity* LDCS, F_L menunjukan *blade* terangkat, F_D menunjukan *blade* hambat, dan f_d gaya *drag* yang bekerja pada *blade*. gaya *drag* yang terbentuk pada *blade drag* terjadi selama satu putaran dari *blade* LDCS ketika aliran masuk melewatinya. Gaya *drag* lebih besar pada saat sudut 0° dan 180° namun, momennya kecil pada sudut 90° dan 270° . Ketika aliran melawati *blade lift*, gaya aerodinamis terbentuk dan momen dihasilkan oleh gaya aerodinamis ditandai dengan perubahan periodik. Momennya kecil pada sudut 0° dan 180° dan besar pada sudut 90° dan 270° . momen aerodinamis yang besar selalu dapat dihasilkan selama satu putaran dari *blade* LDCS. Gambar 2.22 menunjukan analisis gaya pada turbin angin tipe LDCS.



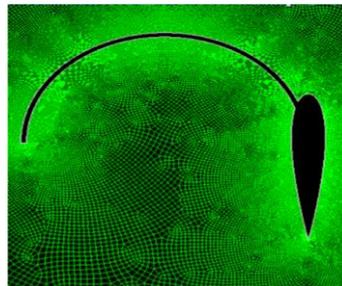
Gambar 2.22 Analisa gaya pada turbin empat *blade* sudut 0° (Feng et al, 2021)

Simulasi numerik dan analisa dinamika fluida pada komputasi dua dimensi yang disimulasikan memiliki ukuran *domain* $10D \times 15D$. Gambar 2.23 menunjukkan gambar *domain* simulasi yang dilakukan.



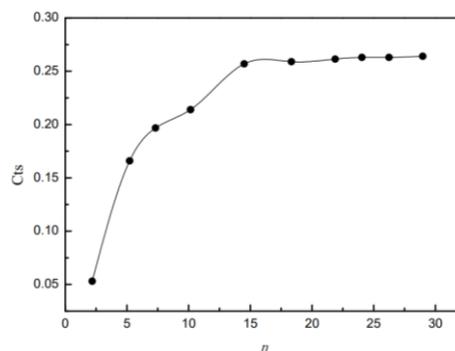
Gambar 2.23 Domain turbin angin LDCS (Feng et al, 2021)

Penelitian menggunakan penggabungan *grid* dinamis dan statis untuk melakukan simulasi numerik, dimana area tersebut diatur *swept* selama rotasi LDCS sebagai area *mesh* dinamis dan mengengkripsi *mesh* pada area ini. *interface* antara area *mesh* dinamis dan statis ditetapkan sebagai permukaan *slip*, yang digunakan untuk mentransfer energi area *mesh* dinamis dan statis. Gambar 2.24 menunjukkan gambar *mesh* yang digunakan.



Gambar 2.24 Meshing pada blade turbin LDCS (Feng et al, 2021)

Setelah dilakukan pembuatan mesh, 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° , 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 grafik 2.25.

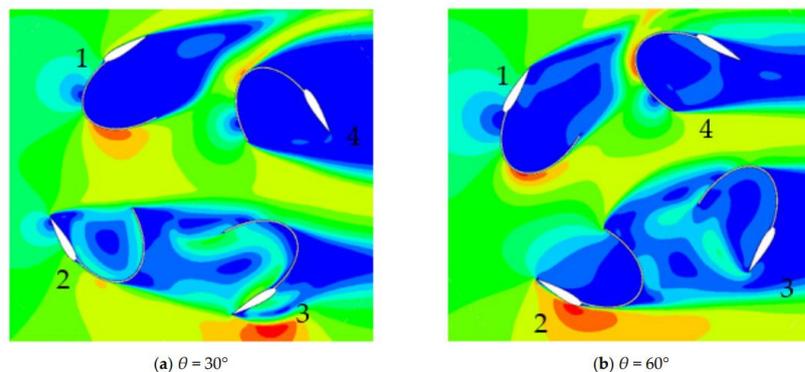


Gambar 2.25 Grafik Grid independency test turbin LDCS (Feng et al, 2021)

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 1×10^5 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- ϵ* , dan *pressure-velocity coupling* menggunakan algoritma SIMPLEC. Kriteria konvergensi residual ditetapkan pada nilai 1×10^{-5} , menggunakan interpolasi *second-order upswing*.

Pada gambar 2.26a, ruang aliran antara empat *blade* besar ketika $\theta = 30^\circ$, dan *blade* 1, 2, dan 4 memiliki bagian cembung yang menghadap angin, menerima udara untuk mengalir, kecepatan aliran udara tinggi, menghasilkan area berkecepatan tinggi. Permukaan cekung dari *blade upstream* 1 dan 4 adalah daerah di bawah angin, memimpin di daerah berkecepatan sangat rendah. *Blade downstream* 2 dan 3 memiliki aliran udara yang mengalir ke permukaan cekungnya, dan aliran udara meningkat untuk membentuk wilayah kecepatan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, kekuatan pendorong saat ini sudut *azimuth* terutama dihasilkan dari perbedaan tekanan yang besar antara bagian dalam dan di luar *blade upstream* 1 dan 4. Kontribusi *blade downstream* 2 dan 3 lebih sedikit. Dari gambar 2.22b bahwa ruang aliran udara juga besar ketika $\theta = 60^\circ$. *Blade* 1, 2, dan 4 semuanya memiliki bagian cembung yang menghadap angin dan menerima aliran udara. Kecepatan aliran udara relatif tinggi, menghasilkan wilayah berkecepatan tinggi. Permukaan cekung dari empat *blade* berada di wilayah berkecepatan sangat rendah; dengan demikian, perbedaan tekanan yang besar dicapai di dalam dan di luar empat *blade*. Pengangkatan yang signifikan dihasilkan di bawah pengaruh karakteristik aerodinamis *blade*, yang selanjutnya menyebabkan peningkatan torsi pada *azimuth* ini. Fenomena ini tidak ada ketika $\theta = 30^\circ$, dengan demikian nilai Cts-max dari LDCS empat bilah muncul ketika $\theta = 60^\circ$.

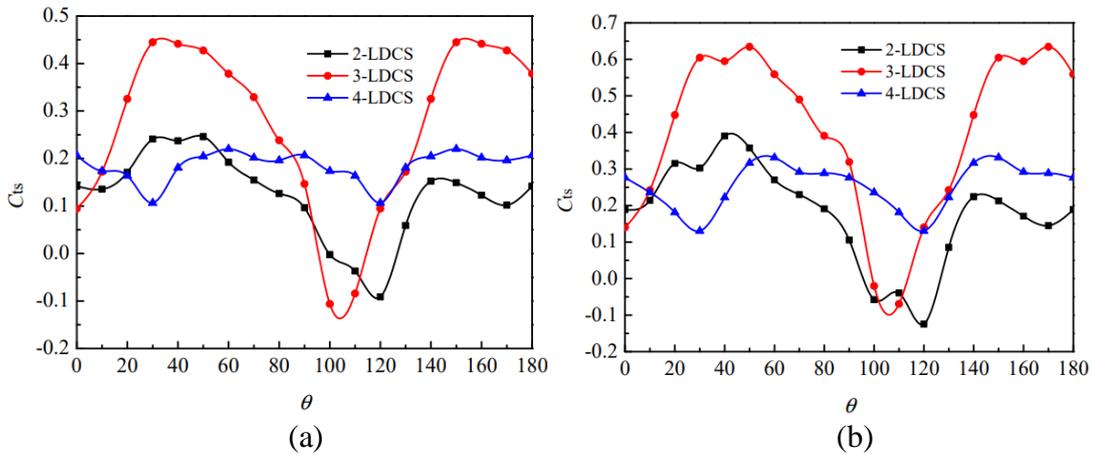


Gambar 2.26 Grafik *kontur* kecepatan pada (a) sudut 30° dan (b) sudut 60° (Feng et al, 2021)

Seperti ditunjukkan pada gambar 2.27 dalam satu periode rotasi memiliki aturan distribusi yang sangat berbeda ketika $U = 6$ m/s Cts dari LDCS empat *blade* menunjukkan *trend* satu puncak tinggi dan lembah berubah, dan nilai Cts lebih rendah dibandingkan dengan dua *blade*, walaupun perbedaan antara nilai puncak dan lembah kecil. Dimana puncak Cts pada dua *blade* $\theta = 30^\circ$ dicapai sekitar 0,25 dan puncak Cts pada empat *blade* $\theta = 60^\circ$ dicapai sekitar 0,22. Pada LDCS empat *blade* yang menunjukkan bahwa torsi statis menjadi lebih stabil dengan bertambahnya jumlah *blade* LDCS.

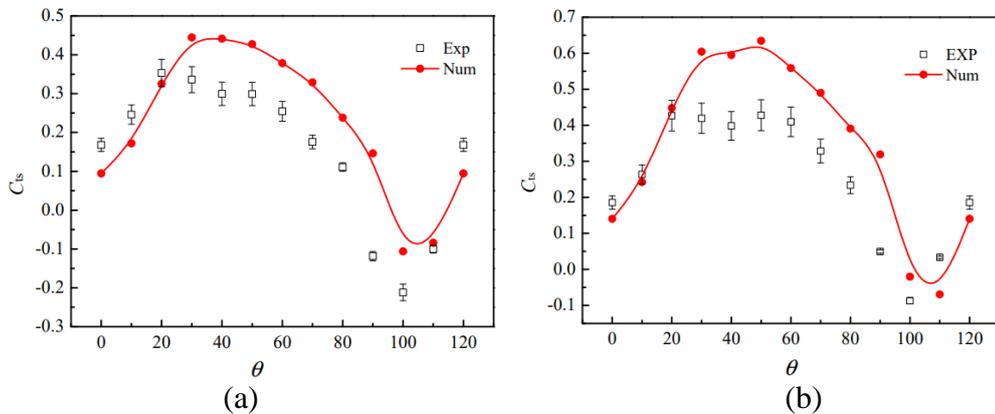
Kemudian seperti yang ditunjukkan pada gambar, distribusi Cts dari empat *blade* LDCS dalam satu periode rotasi pada dasarnya sama dengan pada gambar ketika $U = 10$ m/s. Empat *blade* menunjukkan nilai puncak dan lembah. Cts dari LDCS empat *blade* menunjukkan *trend* satu puncak tinggi dan lembah berubah, dan nilai Cts lebih rendah dibandingkan dengan dua

blade, walaupun perbedaan antara nilai puncak dan lembah kecil. Dimana puncak C_{ts} pada dua *blade* $\theta = 40^\circ$ dicapai sekitar 0,41 dan puncak C_{ts} pada empat *blade* $\theta = 60^\circ$ dicapai sekitar 0,35.



Gambar 2.27 Perbandingan kurva torsi statis LDCS dari ketiga *blade* (a) kecepatan angin 6 m/s dan (b) kecepatan angin 10 m/s (Feng et al, 2021)

Setelah dilakukan simulasi numerik, dilakukan pula eksperimen *wind tunnel* pada LDCS pada variasi 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 gambar 2.28.



Gambar 2.28 Kurva hasil eksperimen di *wind tunnel* dengan jumlah *blade* tiga (a) kecepatan angin 6 m/s (b) kecepatan angin 10 m/s (Feng et al, 2021)

Melalui penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan, yaitu pada variasi empat *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 dan empat *blade* yang menunjukkan bahwa torsi statis menjadi lebih stabil dengan bertambahnya jumlah *blade* turbin.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Simulasi

Dalam penelitian tugas akhir pada *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2 ini menggunakan metode numerik *computational fluid dynamic* (CFD). Tahap awal yang dilakukan adalah pembuatan geometri dan *meshing vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2 yang menggunakan *software* GAMBIT dengan menggunakan model geometri dua dimensi dan variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin turbin. Setelah itu dilakukan simulasi dengan menggunakan *software* ANSYS 18.1 dengan variasi yang disimulasikan adalah kecepatan udara, dengan *blade* yang di simulasikan dalam keadaan diam atau statis, dikarenakan penyerdehanaan Analisa untuk melihat detail aliran yang menghasilkan torsi statis. Pada proses pembuatan geometri dan *meshing* hingga simulasi melalui tiga tahapan yaitu tahap *pre – processing*, tahap *processing*, tahap *post – processing*.

3.2 Tahap Pre – Processing

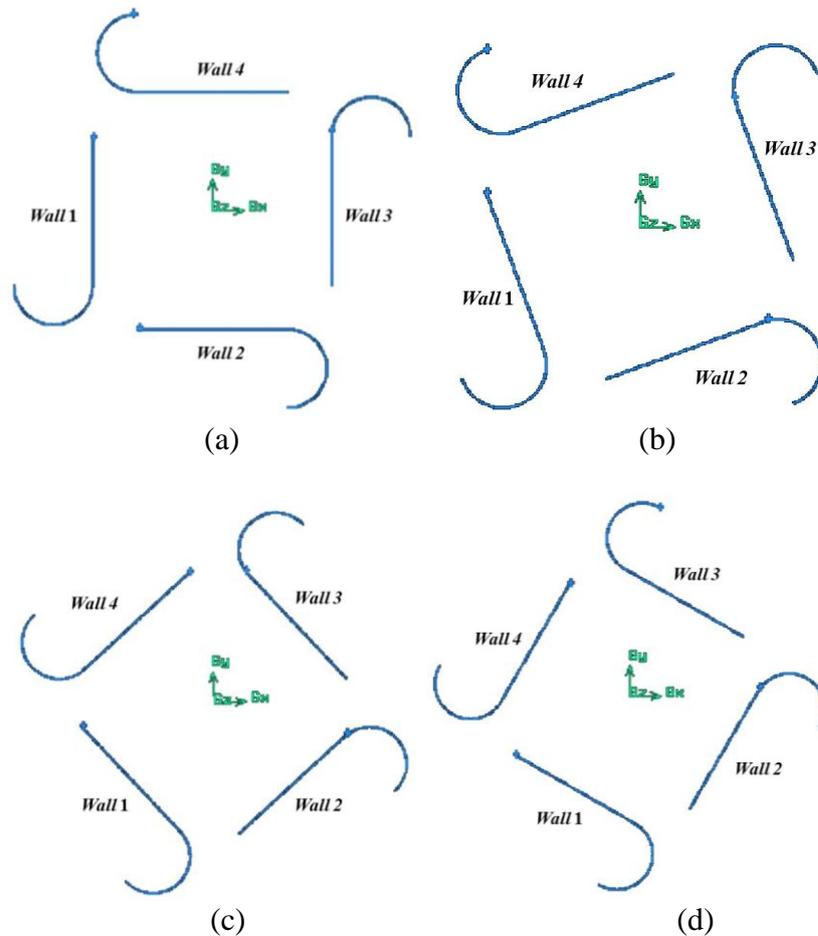
Tahapan *pre – processing* adalah tahapan awal yang dilakukan sebelum melakukan simulasi CFD pada *software* ANSYS 18.1. Pada tahapan ini adalah melakukan pembuatan geometri dan *meshing* menggunakan *software* GAMBIT.

3.2.1 Tahap Pembuatan Geometri

Tabel 3.1 Geometri *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2

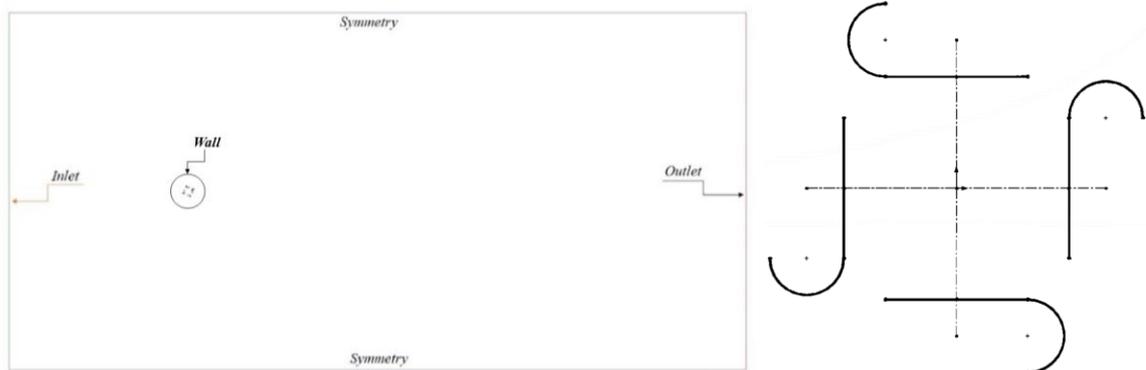
Jumlah Blade (N)	Chord Length (c)	Diameter Turbin (D)	Variasi Sudut putar turbin blade (θ)	Blade Diameter Leading Edge (d)
4	180 mm	300 mm	0°	75 mm
4	180 mm	300 mm	20°	75 mm
4	180 mm	300 mm	40°	75 mm
4	180 mm	300 mm	60°	75 mm

Proses simulasi *vertical axis wind turbine* ini dilakukan seperti di tempat yang terbuka, hanya saja tempat yang terbuka digantikan oleh bentuk simulasi dalam bentuk CFD. Pada proses pembuatan geometri untuk *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2 dilakukan atau dibuat menggunakan *software* GAMBIT ini ditentukan dengan jumlah *blade* sebesar empat buah, dengan Panjang dari ujung ke ujung *blade* turbin atau *chord length* sepanjang 180 mm, dengan diameter turbin sebesar tiga ratus milimeter dan *blade* diameter *leading edge* nya sebesar 75 mm. Pada penelitian ini hanya memiliki satu *domain* yaitu *static domain*. *Static domain* merupakan *domain* yang dilewati fluida, tidak bergerak, dan ditunjukkan dengan bentuk persegi panjang pada *meshing* yang telah dibuat pada geometri turbin *vertical axis wind turbine* yang disimulasikan.



Gambar 3.1 Geometri Turbin tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin *blade* 0° , (b) sudut putar turbin *blade* 20° , (c) sudut putar turbin *blade* 40° , (d) sudut putar turbin *blade* 60°

3.2.2 Penentuan *Boundary Condition*

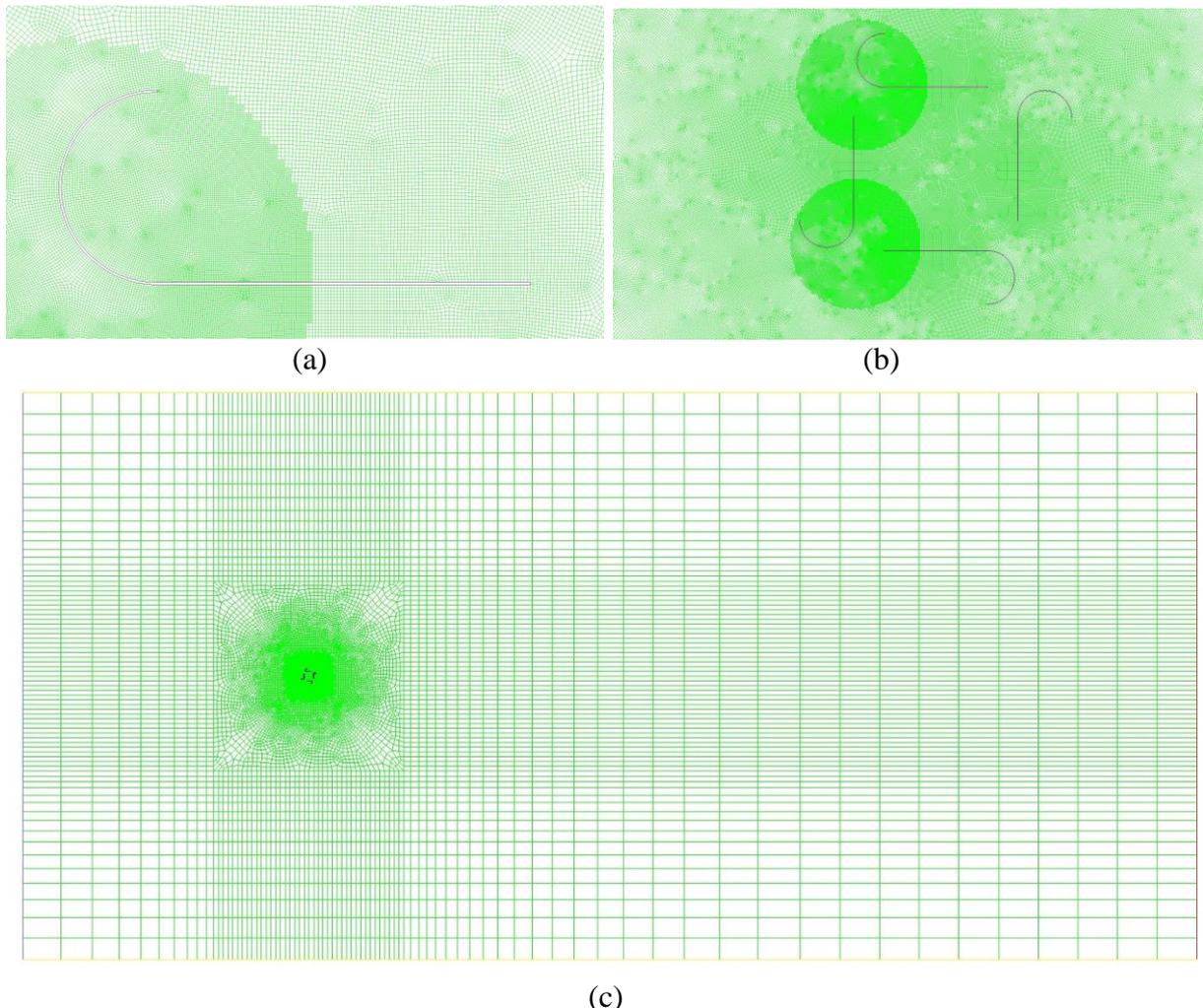


Gambar 3.2 *Boundary condition* VAWT tipe Lenz 2 empat *blade*

Pada *boundary condition* nya terdapat tujuh batasan yang terdiri dari *inlet*, *outlet*, *symmetry*, *wall 1*, *wall 2*, *wall 3*, *wall 4*. *Inlet* sendiri adalah masuk nya udara kedalam sistem dan *outlet* adalah keluarnya udara keluar sistem. *Symmetry* adalah batas atas dan bawah udara di dalam suatu sistem. *wall 1*, *wall 2*, *wall 3*, *wall 4* adalah *blade* pada turbin yang disimulasikan.

3.2.3 Tahap Pembuatan *Meshing*

Meshing adalah proses membagi domain fluida yang kontinu menjadi domain komputasi yang diskrit, sehingga persamaan-persamaan mekanika fluida yang pada umumnya dalam bentuk persamaan diferensial parsial non-linear dapat diselesaikan secara numerik. Dalam proses ini geometri dibagi menjadi bagian-bagian kecil. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu objek akan mempengaruhi ketelitian analisis CFD yang akan dilakukan, tetapi membutuhkan daya komputasi dan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan objek yang memiliki ukuran *mesh* yang lebih besar.



Gambar 3.3 Hasil *Meshing* turbin Lenz 2 pada sudut putar turbin 0° (a) *Meshing* dekat *blade* (b) *Meshing* pada sekitar rotor (c) Keseluruhan *Meshing*

Meshing yang digunakan dalam penelitian *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2 ini berupa dua dimensi karena domain geometri yang ditentukan atau yang dibuat berupa dua dimensi. Pada penelitian *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2 ini *mesh* yang digunakan adalah jenis *Quadrilateral* karena cenderung lebih terstruktur dengan tipe *pave*.

3.3 Tahap *Processing*

Pada tahap *processing* ini ada banyak hal yang harus dilakukan kaitannya dengan penentuan kondisi batas dalam sebuah simulasi CFD. Proses ini merupakan proses paling penting karena hampir semua parameter penelitian diproses dalam tahapan ini seperti *general*,

models, materials, cell zone conditions, boundary conditions, solution methods, solution monitors, solution initialization, dan yang terakhir run calculation.

Tabel 3.2 Tabel Variasi Penelitian

Parameter	Nilai
Metode	2 dimensi
<i>Solver type</i>	<i>Pressure based</i>
<i>Model Viscous</i>	<i>Standard K - epsilon</i>
Material	Udara dan Alumunium
<i>Pressure-Velocity Coupling Scheme</i>	<i>Coupled</i>
<i>Gradient</i>	<i>Least Square Cell Based</i>
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
Momentum	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulen Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbunlen Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
Nilai konvergensi	10 ⁻⁶
<i>solution Intialization</i>	<i>Hybrid Intialization</i>

Sebelum melakukan simulasi karena *mesh* yang telah dibuat memiliki satuan milimeter, maka *mesh scale* dibuat milimeter dengan *view length unit* nya adalah meter. Pada simulasi ini menggunakan tipe berbasis tekanan dengan *velocity formulation* nya bersifat absolut dengan variasi waktu yang dipilih berupa *steady* dan 2d space nya *planar*. Pada bagian *models*, penelitian ini menggunakan *viscous model* dengan model yang digunakan adalah k-epsilon dengan menggunakan tipe k-epsilon *standard*, dikarenakan aliran yang disimulasikan berupa aliran turbulen dan bersifat *steady*.

Pada simulasi ini material yang digunakan berupa *fluid* dan material *solid* dengan *fluent fluid materials* nya adalah udara untuk *fluid* dan alumunium untuk material *solid*. Udara adalah benda uji yang disimulasikan yang mempunyai dua *properties* yaitu *density* dengan nilai sebesar 1,225 kg/m³ dan *viscosity* nya sebesar 1,7894 x 10⁻⁵ kg/m-s. Dan *blade* yang bermaterial *solid* berupa alumunium dengan *density* sebesar 2719 kg/m³. Pada bagian *inlet* nya, *velocity magnitude* dimasukan salah satu dari variasi nilai kecepatan udara yang telah ditentukan yaitu sebesar 4 m/s, 5 m/s, atau 6 m/s. Pada *specification method* nya digunakan dalam simulasi adalah *Intensity and Length Scale* dengan nilai *turbulent intensity* nya sebesar 10% dan *turbulent length scale* nya sebesar 0,2 m.

Pada simulasi ini skema yang digunakan dalam simulasi ini adalah *coupled*. Di dalam pengaturan *solution method* ada *spatial Discretization* yang terdiri dari *gradient, pressure, momentum, turbulent kinetic energy, dan turbulent dissipation rate*. Untuk bagian *gradient* yang digunakan adalah *least squares cell based*. Untuk *pressure* nya metode yang digunakan adalah *second order* dengan momentum yang digunakan adalah *second order upwind*. Untuk bagian *turbulent kinetic energy* dan *turbulent dissipation rate* metode yang digunakan adalah *second order upwind*. Setelah melakukan *initialization*, Simulasi di lakukan dilakukan hingga menyentuh nilai kovergensi.

3.4 Tahap Post – Processing

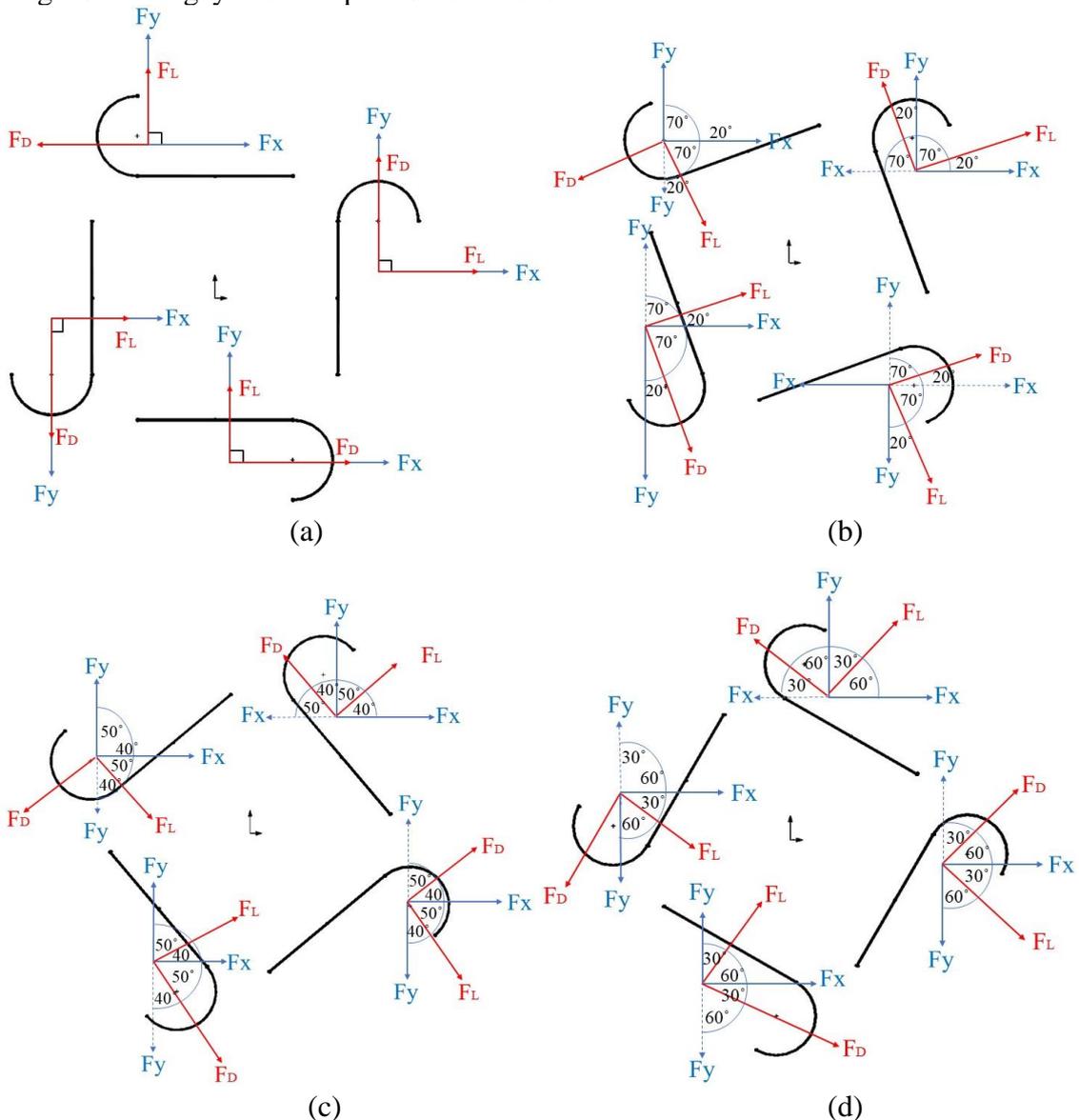
Tahap *post - processing* adalah tahap akhir dari penelitian simulasi ini, pada tahap *post – processing* menampilkan *output* hasil simulasi berupa *display* pada grafik *kontur* untuk tekanan dan grafik *Vektor* untuk kecepatan.

3.5 Data yang Digunakan

Pada penelitian tugas akhir ini, terdapat beberapa data hasil simulasi yang akan digunakan untuk dilakukan analisa secara numerik, yaitu data berupa gaya *drag* dan gaya *lift* dan koefisien torsi statis yang nantinya data-data tersebut akan dibandingkan dalam bentuk tabel dan grafik dengan data hasil eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya.

3.5.1 Free Body Diagram Blade

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:



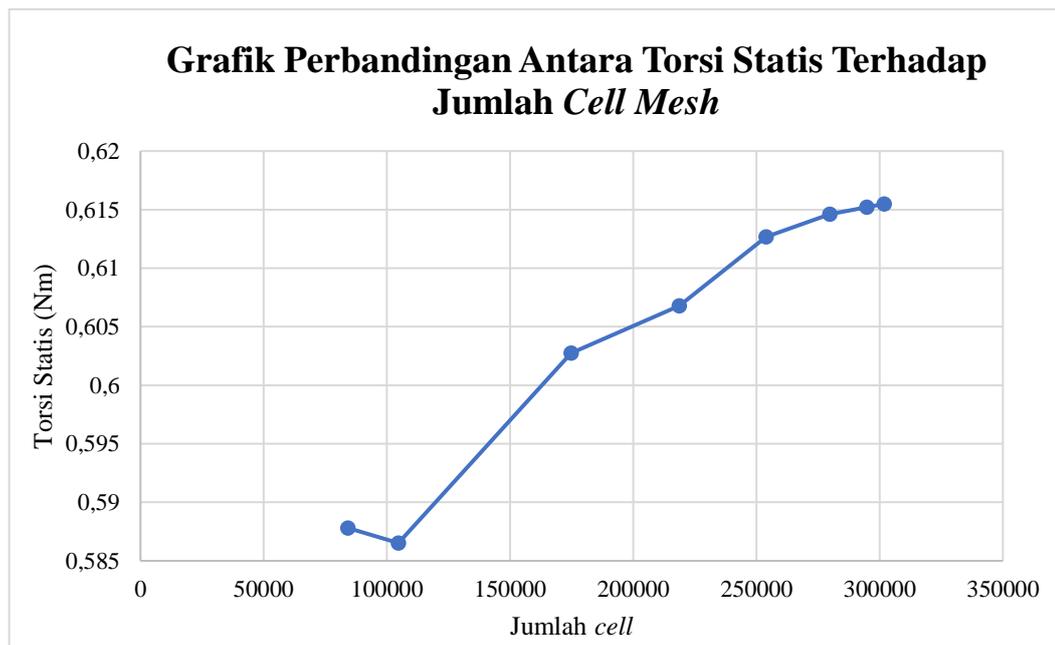
Gambar 3.4 *Free body diagram* pada setiap *blade* pada (a) sudut putar turbin 0° , (b) sudut putar turbin 20° , (c) sudut putar turbin 40° , (d) sudut putar turbin 60°

3.6 Grid Independency Test

Grid independency test merupakan tahapan atau metode yang cukup umum digunakan dalam memverifikasi bahwa *mesh* yang digunakan sudah tepat adalah memastikan bahwa *setingan mesh* sedikit ubah, maka tidak akan mempengaruhi hasil simulasi. Dengan cara ini jumlah *cell* yang berbeda untuk menentukan *grid* paling optimal agar diperoleh hasil yang akurat dengan salah satu konfigurasi sebagai acuannya. Data hasil simulasi yang dibandingkan adalah hasil *moment* di setiap *grid refinement*. Berikut adalah tabel hasil *Grid Independence Test* pada beberapa *grid refinement* :

Tabel 3.3 *Grid Independence Test* pada *vertical axis wind turbine* tipe Lenz 2

No	R Grid Refinement (m)	Jumlah cell	Torsi Statis (Nm)	Error Relatif (%)
1.	0	84242	0,58780468	
2.	0,1	104639	0,58652438	0,217810447
3.	0,2	174779	0,60274096	2,764860346
4.	0,3	218669	0,6067778	0,669747083
5.	0,4	253964	0,61266571	0,970356859
6.	0,5	279749	0,61459583	0,315036401
7.	0,6	294785	0,61521942	0,101463428
8.	0,7	301823	0,61548342	0,042911519



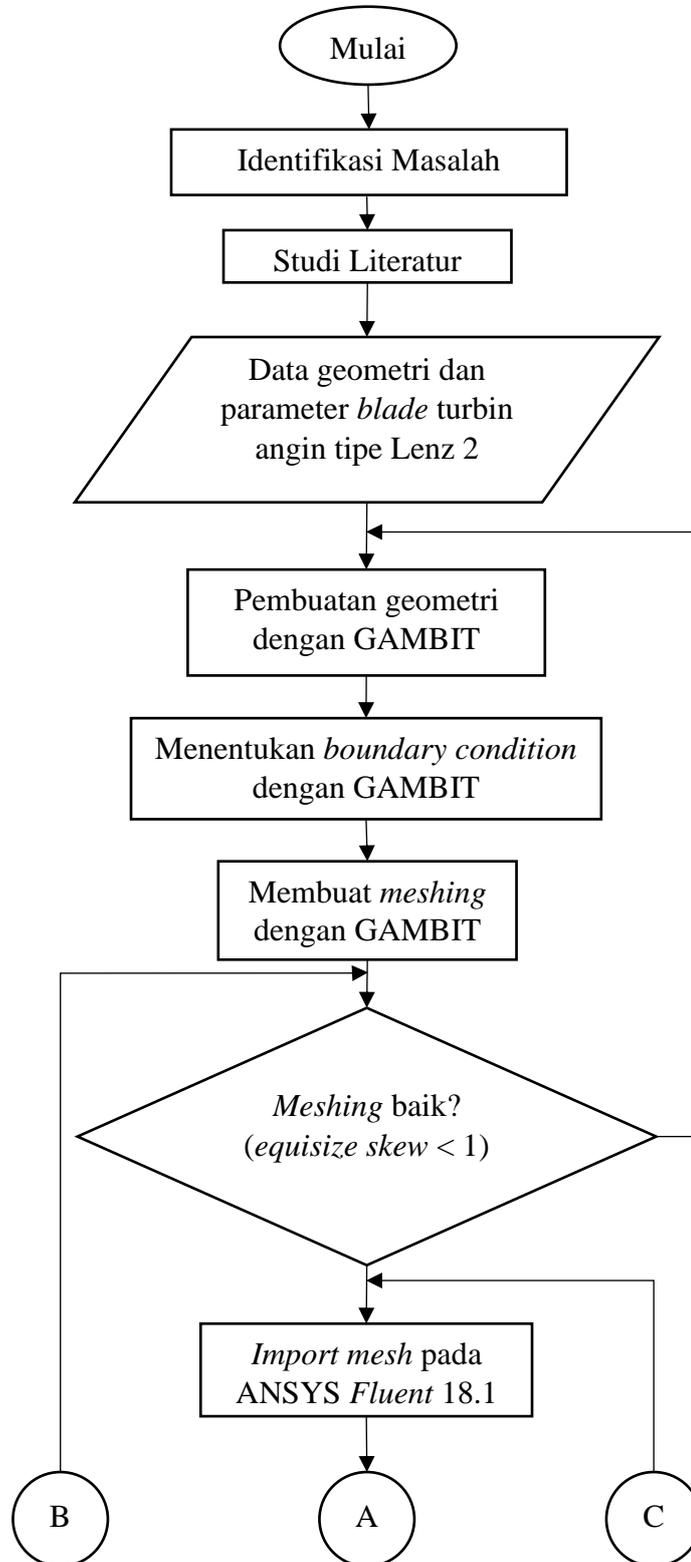
Gambar 3.5 Grafik perbandingan jumlah *cell* pada *mesh* dengan torsi statis hasil simulasi

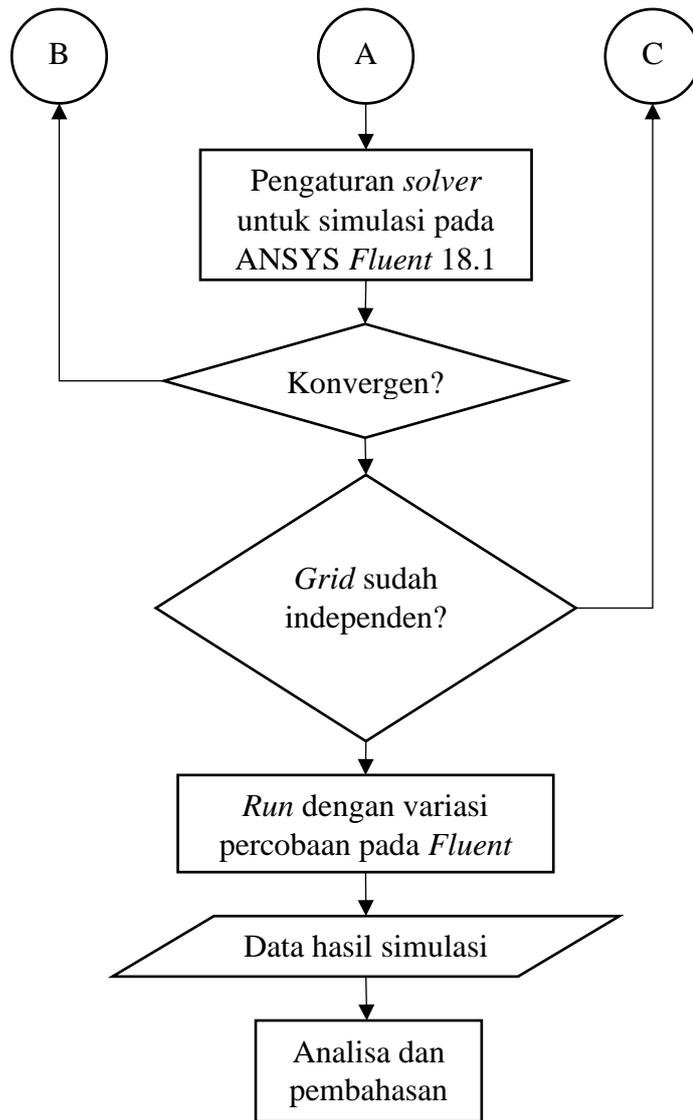
Berdasarkan definisi dari *grid independency test* yang mengacu pada tabel 3.3 dan grafik pada gambar 3.5 yang berisi detail nilai torsi statis dan jumlah *cell* pada *mesh*, maka digunakan model geometri dengan *grid refinement* sebesar 0,7 m, jumlah *cell* pada *mesh* sebanyak 301823 dan torsi statis sebesar 0,615 Nm. Karena pada *grid refinement* tersebut didapat nilai torsi statis yang mulai stabil atau tidak ada kenaikan atau penurunan yang signifikan dan dapat mewakili hasil *Grid Independence Test* lainnya.

3.7 Diagram alir

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahap agar didapatkan hasil yang sesuai, sebagaimana yang diilustrasikan dalam susunan flowchart penelitian berikut:

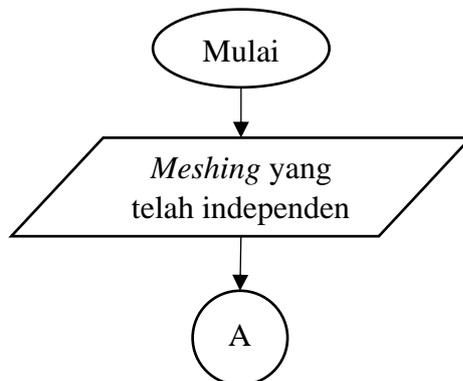
3.7.1 Diagram alir Penelitian

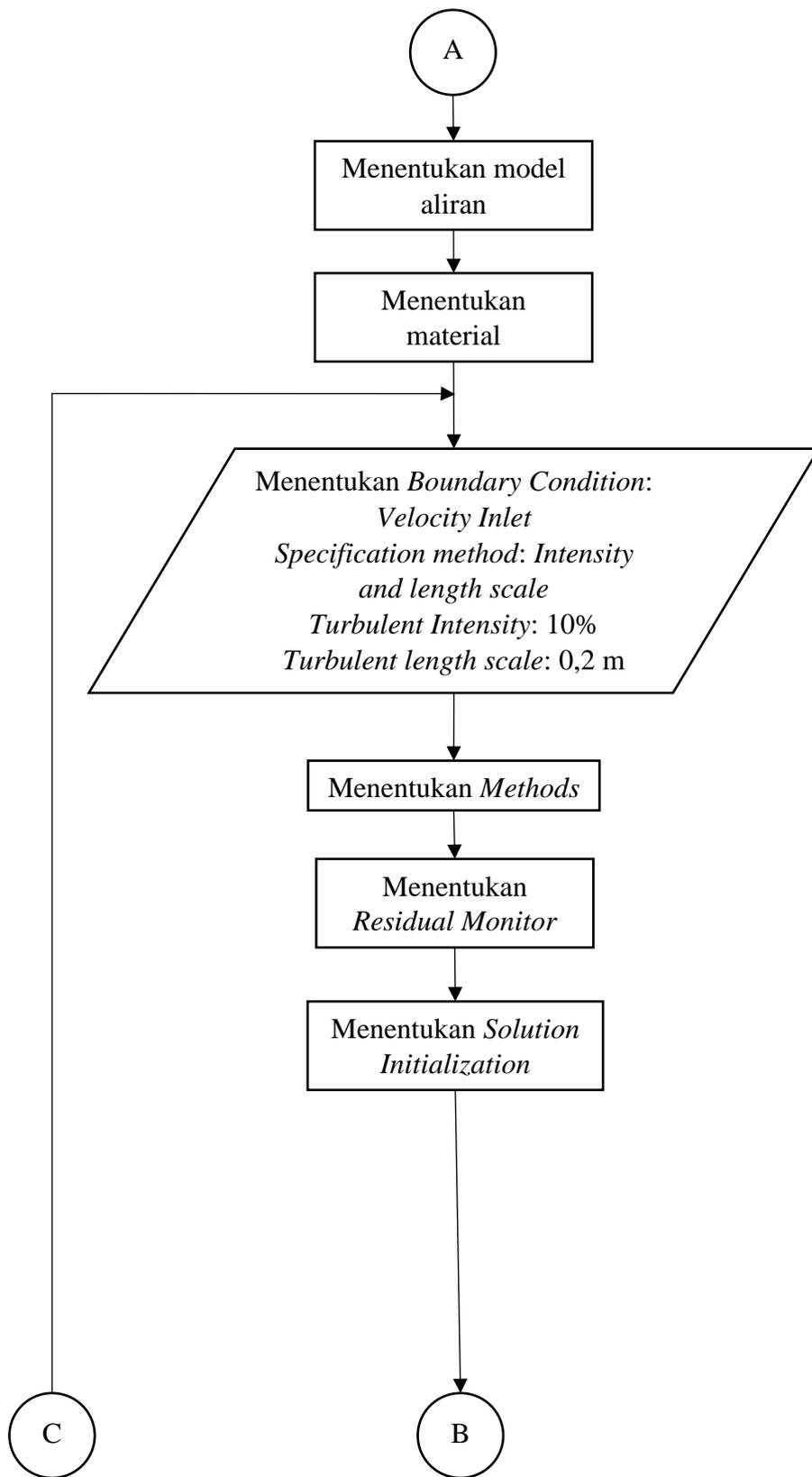


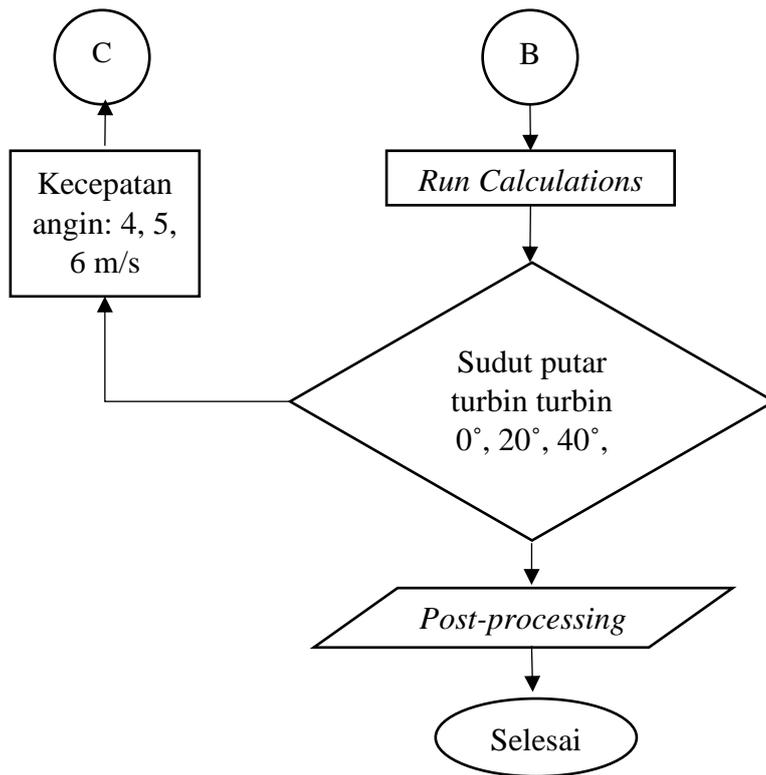


Gambar 3.6 Diagram alir penelitian

3.7.2 Diagram alir Simulasi







Gambar 3.7 Diagram alir simulasi

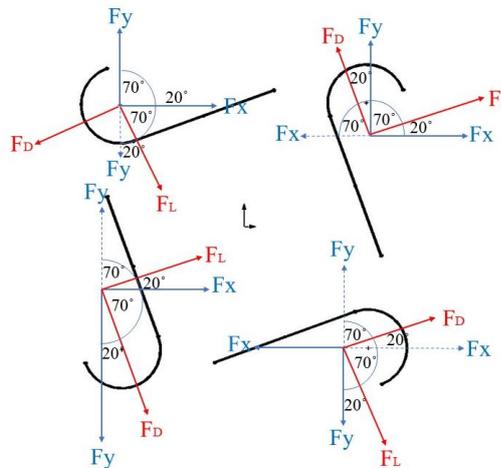
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

Pada Penelitian ini, hasil yang didapatkan adalah nilai gaya *drag*, nilai gaya *lift*, torsi statis (Ts), dan koefisien torsi statis (Cts). Dalam perhitungannya, penelitian ini menggunakan asumsi bahwa aliran udara sebagai fluida kerja dalam keadaan aliran *steady* dan *incompressible* dengan Massa jenis udara dalam keadaan standard (ρ_{std}) sebesar $1,225 \text{ Kg/m}^3$.

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

Contoh perhitungan dilakukan pada tiap *blade* dengan sudut putar turbin 20 derajat dan kecepatan 6 m/s, serta dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:



Gambar 4.1 Free body diagram pada sudut putar turbin 20°

Pada perhitungan *Blade* satu di sudut 20 derajat membutuhkan perhitungan sin dan cos dikarenakan adanya sudut pada setiap perhitungannya, perhitungan pada *blade* satu sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_D &= F_x \cdot \sin 20^\circ + F_y \cdot \sin 70^\circ \\
 F_D &= 5,660 \times \sin 60^\circ + 1,220 \times \sin 30^\circ \\
 F_D &= 3,082 \text{ N} \\
 F_L &= F_x \cdot \cos 20^\circ - F_y \cdot \cos 70^\circ \\
 F_L &= 5,660 \times \cos 20^\circ + 1,220 \times \cos 70^\circ \\
 F_L &= 4,900 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Untuk Perhitungan pada *Blade* dua di sudut 20 derajat sama seperti perhitungan sebelumnya, Perhitungan pada *blade* dua sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 F_D &= -F_y \cdot \sin 20^\circ - F_x \cdot \sin 70^\circ \\
 F_D &= -0,203 \times \sin 20^\circ - 0,193 \times \sin 70^\circ \\
 F_D &= -0,257 \text{ N} \\
 F_L &= F_y \cdot \cos 20^\circ - F_x \cdot \cos 70^\circ \\
 F_L &= 0,203 \times \cos 20^\circ + 0,193 \times \cos 70^\circ \\
 F_L &= 0,112 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Untuk Perhitungan pada *Blade* tiga di sudut 20 derajat sama seperti perhitungan sebelumnya, Perhitungan pada *blade* tiga sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
F_D &= F_y \cdot \sin 70^\circ - F_x \cdot \sin 20^\circ \\
F_D &= 0,563 \times \sin 70^\circ - 0,406 \times \sin 20^\circ \\
F_D &= 0,390 \text{ N} \\
F_L &= F_y \cdot \cos 70^\circ + F_x \cdot \cos 20^\circ \\
F_L &= 0,563 \times \cos 30^\circ + 0,406 \times \cos 60^\circ \\
F_L &= 0,574 \text{ N}
\end{aligned}$$

Untuk Perhitungan pada *Blade* empat di sudut 20 derajat sama seperti perhitungan sebelumnya, Perhitungan pada *blade* empat sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
F_D &= F_x \cdot \cos 20^\circ - F_y \cdot \cos 70^\circ \\
F_D &= -0,406 \times \cos 20^\circ - 0,563 \times \cos 70^\circ \\
F_D &= -2,187 \text{ N} \\
F_L &= F_x \cdot \sin 20^\circ - F_y \cdot \sin 70^\circ \\
F_L &= 0,406 \times \cos 20^\circ + 0,563 \times \sin 70^\circ \\
F_L &= -0,690 \text{ N}
\end{aligned}$$

Sehingga gaya *drag* dan gaya *lift* total yang didapat pada turbin sudut 20 derajat dan kecepatan 6 m/s adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
F_D &= 3,082 \text{ N} - 0,257 \text{ N} + 0,390 \text{ N} - 2,187 \text{ N} \\
F_D &= 1,029 \text{ N} \\
F_L &= 4,900 \text{ N} + 0,112 \text{ N} + 0,574 \text{ N} - 0,690 \text{ N} \\
F_L &= 4,896 \text{ N}
\end{aligned}$$

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 20 derajat sebagai berikut:

$$T_s = F_D \cdot R$$

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

Pada perhitungan torsi statis pada *Blade* satu ini nilai gaya drag yang telah dihitung sebelumnya dikalikan oleh jari – jari dari turbin angin dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T_s = 3,082 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$T_s = 0,462 \text{ Nm}$$

Pada perhitungan torsi statis pada *Blade* dua ini nilai gaya drag yang telah dihitung sebelumnya dikalikan oleh jari – jari dari turbin angin dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T_s = -0,257 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$T_s = -0,038 \text{ Nm}$$

Pada perhitungan torsi statis pada *Blade* tiga ini nilai gaya drag yang telah dihitung sebelumnya dikalikan oleh jari – jari dari turbin angin dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T_s = 0,390 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$T_s = 0,058 \text{ Nm}$$

Pada perhitungan torsi statis pada *Blade* empat ini nilai gaya drag yang telah dihitung sebelumnya dikalikan oleh jari – jari dari turbin angin dengan perhitungan sebagai berikut :

$$T_s = -2,187 \text{ N} \times 0,15 \text{ m}$$

$$T_s = -0,328 \text{ Nm}$$

Maka gaya torsi statis total yang didapat pada turbin sudut 20 derajat dan kecepatan 6 m/s adalah sebagai berikut:

$$T_s = 0,462 \text{ Nm} - 0,038 \text{ Nm} + 0,058 \text{ Nm} - 0,328 \text{ Nm}$$

$$T_s = 0,154 \text{ Nm}$$

4.1.3 Perhitungan Koefisien Gaya Drag dan Gaya Lift

Untuk menghitung koefisien gaya drag (C_D), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.1 dengan contoh perhitungan untuk kecepatan 6 m/s pada *blade* satu dengan sudut putar turbin 20 derajat sebagai berikut:

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

$$C_D = \frac{2 \times 4,736 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,375 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$C_D = 0,572$$

Untuk menghitung koefisien gaya drag (C_D), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.2 dengan contoh perhitungan untuk kecepatan 6 m/s pada *blade* satu dengan sudut putar turbin 20 derajat sebagai berikut:

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

$$C_L = \frac{2 \times 3,294 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,375 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$C_L = 0,398$$

4.1.4 Perhitungan Koefisien Torsi Statis

Untuk menghitung nilai koefisien torsi statis (C_{TS}), pada penelitian ini digunakan persamaan 2.7 dengan contoh perhitungan untuk kecepatan 6 m/s pada *blade* dengan sudut putar turbin 20 derajat sebagai berikut:

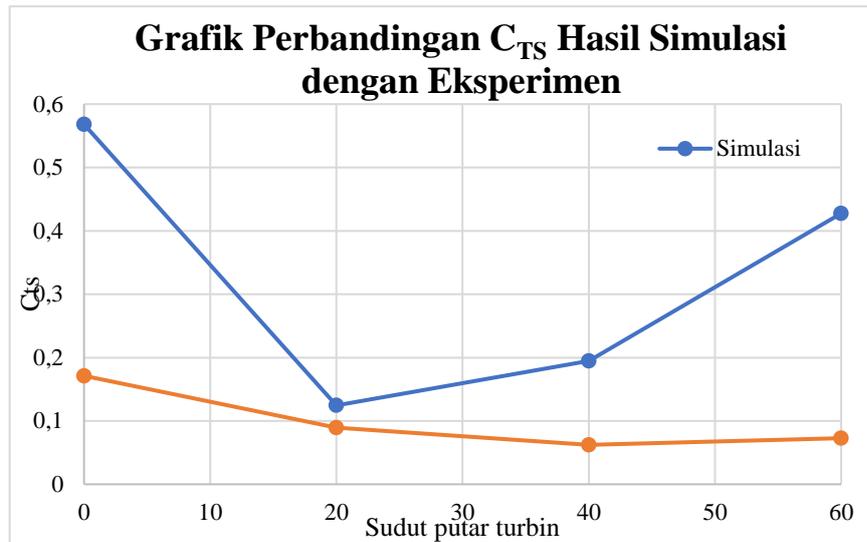
$$C_{TS} = \frac{4 \cdot T_s}{\rho \cdot A \cdot v^2 \cdot D}$$

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

$$C_{TS} = \frac{4 \times 0,154 \text{ Nm}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,375 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 0,3 \text{ m}}$$

$$C_{TS} = 0,124$$

4.2 Perbandingan Data Hasil Simulasi dengan Eksperimen



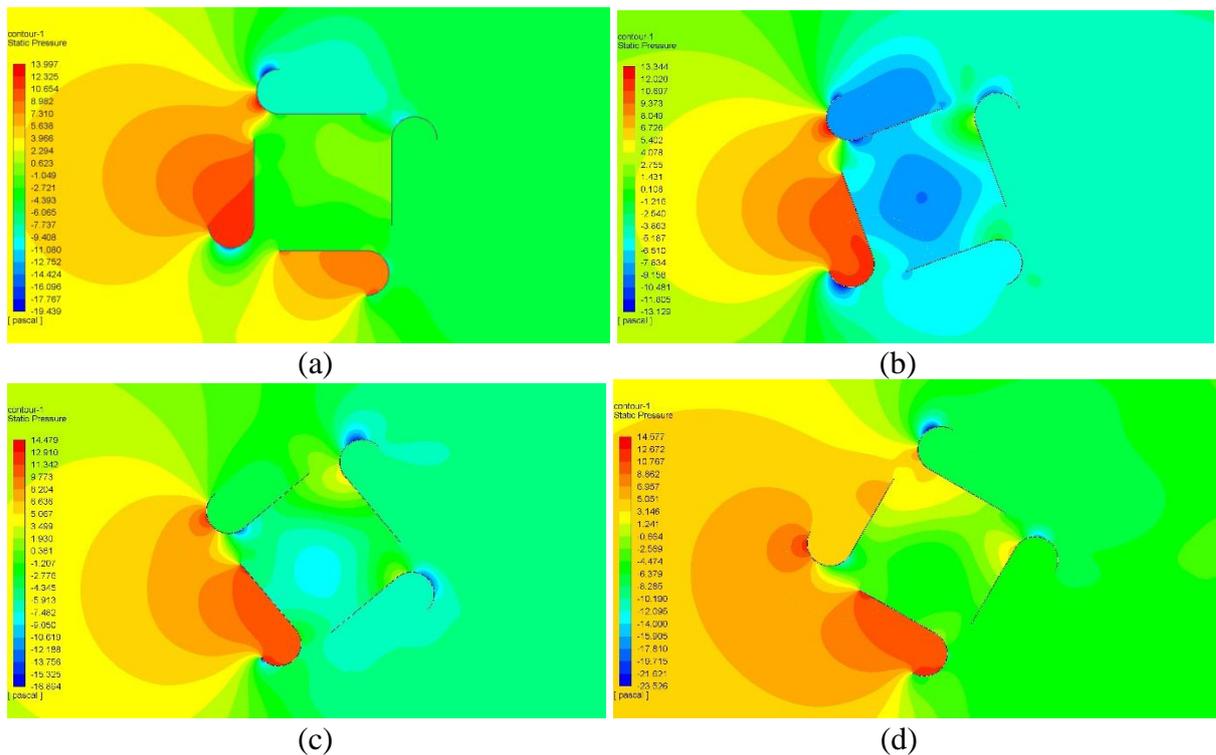
Gambar 4.2 Grafik perbandingan koefisien torsi statis simulasi dengan hasil eksperimen

Gambar 4.2 menunjukkan grafik perbandingan koefisien torsi statis simulasi dengan hasil eksperimen. Pada perbandingan koefisien torsi statis, sudut putar turbin 0° memiliki nilai koefisien statis paling tinggi sebesar 0,568, sedangkan sudut putar turbin 20° memiliki nilai koefisien torsi statis paling rendah dengan nilai sebesar 0,124. Nilai koefisien torsi statis pada sudut putar turbin 40° mengalami kenaikan dari sudut putar turbin 20° dengan nilai sebesar 0,194. Pada sudut putar turbin 60° mengalami peningkatan lagi setelah sudut 40° dengan besar nilai koefisien torsi statis nya sebesar 0,427. Hasil koefisien torsi statis simulasi juga dibandingkan dengan hasil koefisien torsi statis eksperimen yang dapat dilihat pada gambar grafik 4.2 Pada grafik hasil C_{ts} eksperimen didapat bahwa nilai koefisien torsi statis maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai koefisien torsi statis nya sebesar 0,171. Pada sudut putar turbin 20 mengalami penurunan nilai koefisien torsi statis dari sudut putar turbin sebelumnya yaitu dengan nilai koefisien torsi statis nya sebesar 0,089. Pada sudut 40° nilai koefisien torsi statis mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya yaitu dengan nilai koefisien torsi statis nya sebesar 0,062. Dan koefisien torsi statis mengalami kenaikan dari sudut putar turbin sebelumnya yaitu dengan nilai koefisien torsi statis sebesar 0,072. Dari hasil perbandingan yang telah dilakukan dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan oleh **Utomo dan Ikhwan, 2021**. Hal berbeda terjadi pada sudut putar turbin 40° , dimana hasil simulasi menunjukkan kenaikan setelah sudut putar turbin 20° sedangkan hasil eksperimen menunjukan hasil turun setelah sudut 20° . Hal ini dapat terjadi karena disebabkan beberapa aspek dari simulasi diabaikan seperti efek pada ujung *blade* dan osilasi pada turbin. Pada uji eksperimen juga bearing yang digunakan tidak dalam keadaan optimal atau aus dan dapat terjadinya beberapa *human error*. Sedangkan sudut putar turbin yang lain memiliki pola yang sama dengan simulasi, namun untuk koefisien torsi statis nilai maksimum nya sama dengan hasil eksperimen yaitu berada pada sudut putar turbin 0° . Perbedaan juga terjadi pada hasil nilai koefisien torsi statis, dimana hasil simulasi memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding hasil eksperimen yang telah dilakukan. Hal ini dikarenakan pada simulasi hasil simulasi mengabaikan pengaruh dari komponen pendukung seperti *bearing* dan bantalan. Hal ini juga didukung oleh penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh **Feng et al, 2021** yang menyatakan bahwa nilai hasil simulasi selalu lebih besar dibandingkan dengan hasil eksperimen.

4.3 Analisa Fenomena Aliran

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

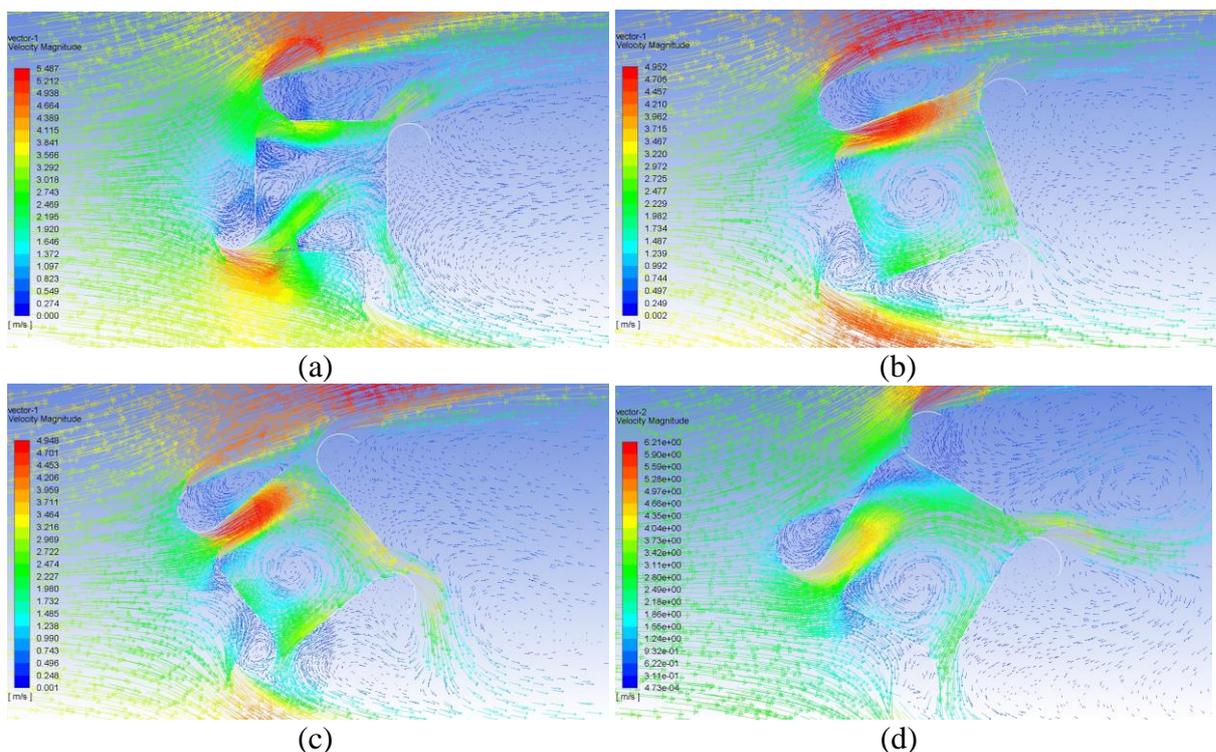
4.3.1 Analisa Aliran *Kontur* Tekanan dan Vektor kecepatan pada kecepatan 4 m/s



Gambar 4.3 *Display* kontur tekanan 4 m/s pada (a) sudut putar turbin 0°, (b) sudut putar turbin 20°, (c) sudut putar turbin 40°, (d) sudut putar turbin 60°

Dapat dilihat dari gambar 4.3 (a) pada kondisi sudut putar turbin turbin 0° terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar *blade* yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi dibandingkan dengan posisi lainnya dengan arah *counter clock wise*. Pada *blade* dua distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade* yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* dua bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik. Selanjutnya pada *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan kecil. Pada *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar namun *blade clock wise*. Pada gambar 4.3 (b) adalah kondisi sudut putar turbin turbin 20°. Pada *blade* satu terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar

blade yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi. Pada *blade* dua dan *blade* tiga perbedaan tekanan yang terjadi kecil, dikarenakan *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* tersebut tidak besar. Pada *blade* empat perbedaan tekanan yang terjadi cukup besar, namun *blade* empat adalah *clock wise*. Pada gambar 4.3 (c) adalah turbin dengan sudut putar turbin turbin 40° . Dapat dilihat pada *blade* satu memiliki perbedaan tekanan yang cukup tinggi, pada bagian luar *blade* tekanan yang terjadi tinggi dikarenakan pada bagian luar *blade* satu dikenai angin secara langsung dan pada bagian dalam *blade* memiliki tekanan yang cukup rendah karena tidak dikenai angin secara langsung. Pada *blade* dua perbedaan tekanan cukup rendah karena ada pada bagian *downstream*. Untuk *blade* tiga tekanan pada depan *blade* cukup besar karena ada celah di antara *blade* satu dan *blade* empat. Pada *blade* empat perbedaan tekanan cukup besar namun *blade* empat *counter clock wise*. Gambar 4.3 (d) adalah sudut putar turbin turbin 60° , dimana perbedaan tekanan terjadi pada *blade* satu karena mengenai angin secara langsung atau *upstream*. Pada *blade* dua ada perbedaan tekanan dikarenakan adanya celah antara *blade* satu dan *blade* empat, namun perbedaan tekanan yang terjadi tidak begitu besar. Pada *blade* tiga dan *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar.

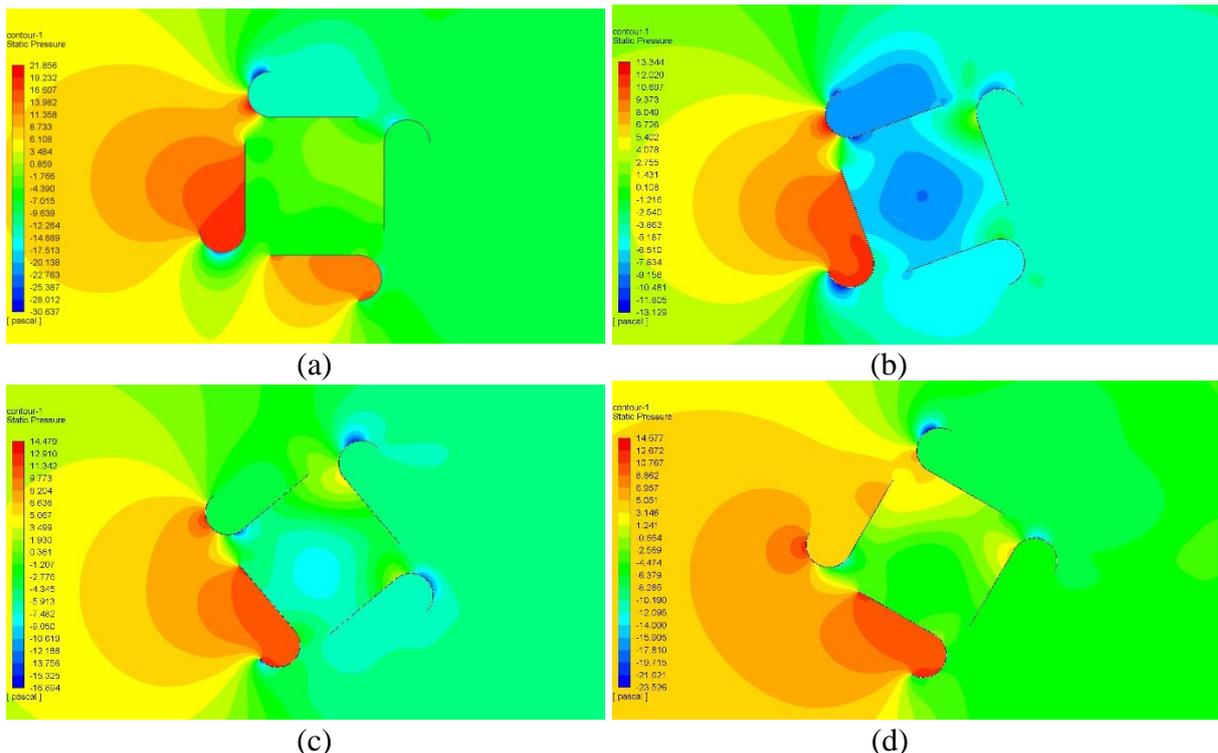


Gambar 4.4 Display vektor kecepatan 4 m/s pada (a) sudut putar turbin turbin 0° , (b) sudut putar turbin turbin 20° , (c) sudut putar turbin turbin 40° , (d) sudut putar turbin turbin 60°

Pada gambar 4.4 menampilkan grafik vektor kecepatan pada kecepatan angin 4 m/s. Dapat dilihat dari gambar 4.4 (a) pada sudut putar turbin turbin 0° timbul *vortex* pada daerah separasi pada bagian belakang *blade* satu, sehingga membuat kecepatan angin yang melawati *blade* tiga mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu besar serta kecepatan angin rendah pada *blade* tiga juga diakibatkan karena angin telah terhalang oleh *blade* satu. Namun kecilnya nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu berpengaruh pada skema turbin angin

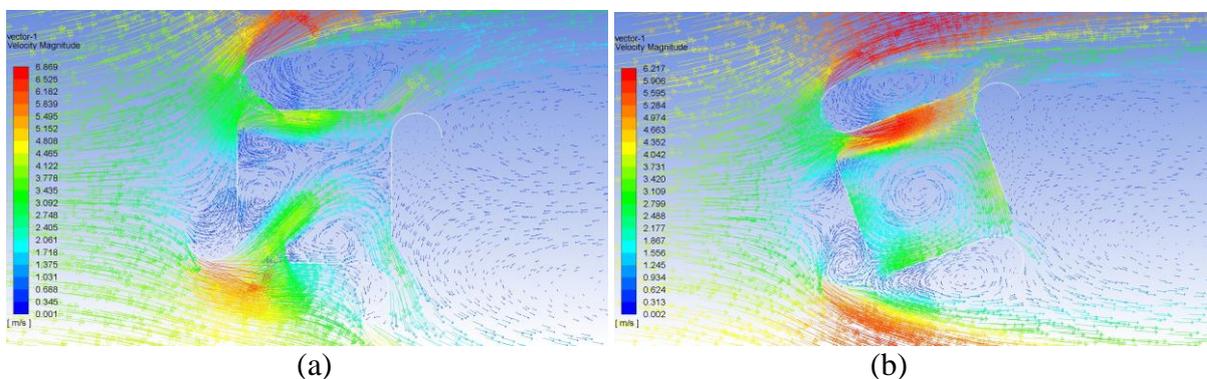
empat *blade* ini, dikarenakan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* yang tidak langsung dikenai oleh angin atau kecepatan angin di daerah tersebut rendah. *Vortex* juga muncul pada bagian atas *blade* dua yang membuat kecepatan angin di *blade* tiga mengalami penurunan. *Vortex* juga terbentuk pada daerah separasi di *blade* empat namun pengaruhnya tidak begitu besar. Pada gambar 4.4 (b) menunjukkan display *Vektor* pada sudut putar turbin turbin 20°. Dimana pada sudut putar turbin ini muncul *wake* dan *vortex* yang cukup besar pada bagian tengah turbin yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* dua, *blade* tiga, dan *blade* empat rendah. Ditambah lagi pada bagian pada *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream* dikarenakan kecepatan angin pada daerah tersebut kecil karena terhalang oleh *blade* satu. Sedangkan pada *blade* satu ada pada daerah *upstream* atau dikenai angin secara langsung yang membuat pada *blade* satu dapat menghasilkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar. Pada gambar 4.4 (c) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin 40°. Dimana pada sudut tersebut dapat dilihat *wake* dan *vortex* muncul pada bagian tengah turbin, namun *wake* dan *vortex* yang dihasilkan tidak sebesar di sudut putar turbin turbin 20°. Perbedaan juga terjadi pada bagian *blade* dua dimana pada bagian *blade* dua di sudut putar turbin turbin 20° ada pada daerah *downstream* namun pada *blade* dua di sudut putar turbin dapat di kenai oleh angin dengan cukup baik. Sedangkan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* karena terhalang oleh *blade* satu yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada bagian tersebut rendah. Gambar 4.4 (d) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin turbin 60°. Dimana *vortex* juga muncul di antara dekat *leading edge blade* satu dengan ujung *blade* dua, dimana *vortex* yang muncul tidak begitu besar. Yang membuat pada *blade* dua nilai gaya *drag* dan gaya *lift* nya tidak begitu besar. Pada *blade* tiga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan cukup besar dikarenakan aliran angin dapat masuk dari celah antara *blade* satu dan *blade* empat. *Vortex* juga terjadi pada bagian belakang turbin, namun hal ini tidak berpengaruh terhadap nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan oleh setiap *blade*.

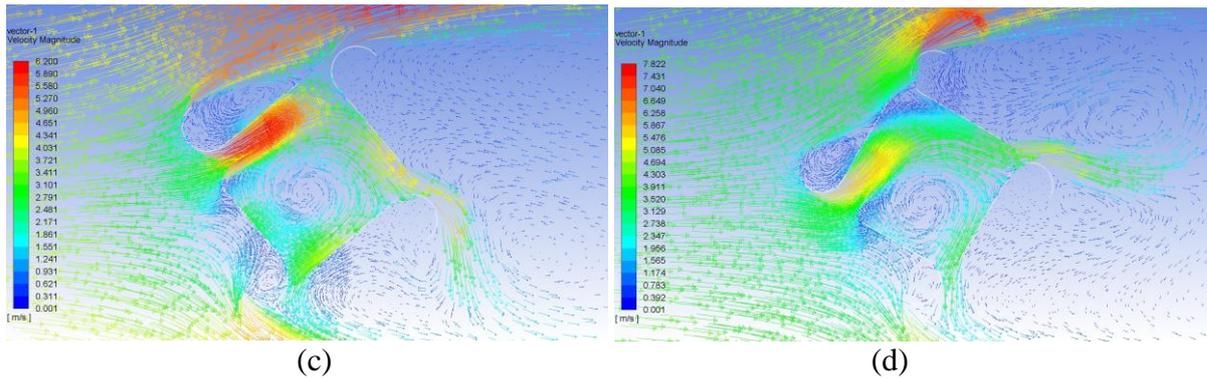
4.3.2 Analisa Aliran Kontur Tekanan dan Vektor kecepatan pada kecepatan 5 m/s



Gambar 4.5 Display kontur tekanan kecepatan 5 m/s pada (a) sudut putar turbin 0° , (b) sudut putar turbin 20° , (c) sudut putar turbin 40° , (d) sudut putar turbin 60°

Dapat dilihat dari gambar 4.5 (a) pada kondisi sudut putar turbin turbin 0° terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar *blade* yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi dibandingkan dengan posisi lainnya dengan arah *counter clock wise*. Pada *blade* dua distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade* yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* dua bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik. Selanjutnya pada *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan kecil. Pada *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar namun *blade* *clock wise*. Pada gambar 4.5 (b) adalah kondisi sudut putar turbin turbin 20° . Pada *blade* satu terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar *blade* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi. Pada *blade* dua dan *blade* tiga perbedaan tekanan yang terjadi kecil, dikarenakan *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* tersebut tidak besar. Pada *blade* empat perbedaan tekanan yang terjadi cukup besar, namun *blade* empat adalah *clock wise*. Pada gambar 4.5 (c) adalah turbin dengan sudut putar turbin turbin 40° . Dapat dilihat pada *blade* satu memiliki perbedaan tekanan yang cukup tinggi, pada bagian luar *blade* tekanan yang terjadi tinggi dikarenakan pada bagian luar *blade* satu dikenai angin secara langsung dan pada bagian dalam *blade* memiliki tekanan yang cukup rendah karena tidak dikenai angin secara langsung. Pada *blade* dua perbedaan tekanan cukup rendah karena ada pada bagian *downstream*. Untuk *blade* tiga tekanan pada depan *blade* cukup besar karena ada celah di antara *blade* satu dan *blade* empat. Pada *blade* empat perbedaan tekanan cukup besar namun *blade* empat *counter clock wise*. Gambar 4.5 (d) adalah sudut putar turbin turbin 60° , dimana perbedaan tekanan terjadi pada *blade* satu karena mengenai angin secara langsung atau *upstream*. Pada *blade* dua ada perbedaan tekanan dikarenakan adanya celah antara *blade* satu dan *blade* empat, namun perbedaan tekanan yang terjadi tidak begitu besar. Pada *blade* tiga dan *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar.

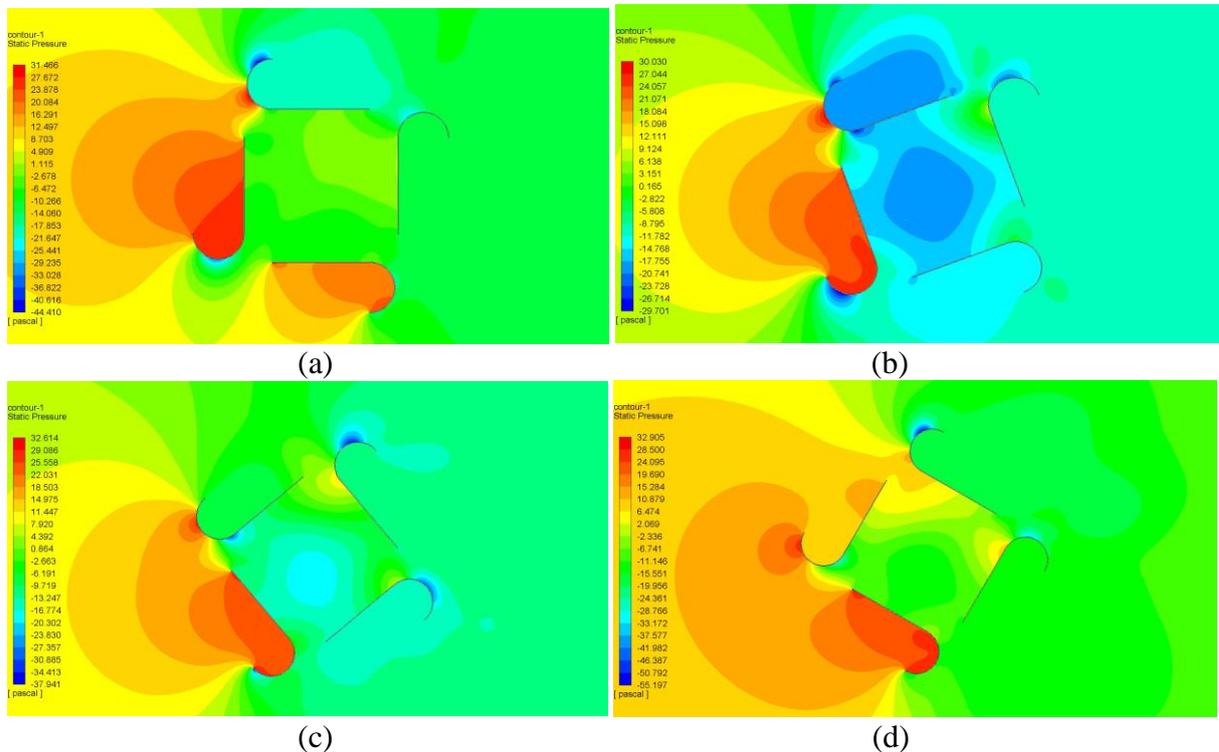




Gambar 4.6 Display vektor kecepatan 5 m/s pada (a) sudut putar turbin 0° , (b) sudut putar turbin 20° , (c) sudut putar turbin 40° , (d) sudut putar turbin 60°

Pada gambar 4.6 menampilkan grafik vektor kecepatan pada kecepatan angin 5 m/s. Dapat dilihat dari gambar 4.6 (a) pada sudut putar turbin turbin 0° timbul *vortex* pada daerah separasi pada bagian belakang *blade* satu, sehingga membuat kecepatan angin yang melawati *blade* tiga mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu besar serta kecepatan angin rendah pada *blade* tiga juga diakibatkan karena angin telah terhalang oleh *blade* satu. Namun kecilnya nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu berpengaruh pada skema turbin angin empat *blade* ini, dikarenakan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* yang tidak langsung dikenai oleh angin atau kecepatan angin di daerah tersebut rendah. *Vortex* juga muncul pada bagian atas *blade* dua yang membuat kecepatan angin di *blade* tiga mengalami penurunan. *Vortex* juga terbentuk pada daerah separasi di *blade* empat namun pengaruhnya tidak begitu besar. Pada gambar 4.6 (b) menunjukkan display Vektor pada sudut turbin 20° . Dimana pada sudut putar turbin ini muncul *wake* dan *vortex* yang cukup besar pada bagian tengah turbin yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* dua, *blade* tiga, dan *blade* empat rendah. Ditambah lagi pada bagian pada *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream* dikarenakan kecepatan angin pada daerah tersebut kecil karena terhalang oleh *blade* satu. Sedangkan pada *blade* satu ada pada daerah *upstream* atau dikenai angin secara langsung yang membuat pada *blade* satu dapat menghasilkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar. Pada gambar 4.6 (c) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin turbin 40° . Dimana pada sudut tersebut dapat dilihat *wake* dan *vortex* muncul pada bagian tengah turbin, namun *wake* dan *vortex* yang dihasilkan tidak sebesar di sudut putar turbin turbin 20° . Perbedaan juga terjadi pada bagian *blade* dua dimana pada bagian *blade* dua di sudut putar turbin turbin 20° ada pada daerah *downstream* namun pada *blade* dua di sudut putar turbin dapat di kenai oleh angin dengan cukup baik. Sedangkan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* karena terhalang oleh *blade* satu yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada bagian tersebut rendah. Gambar 4.6 (d) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin turbin 60° . Dimana *vortex* juga muncul di antara dekat *leading edge* *blade* satu dengan ujung *blade* dua, dimana *vortex* yang muncul tidak begitu besar. Yang membuat pada *blade* dua nilai gaya *drag* dan gaya *lift* nya tidak begitu besar. Pada *blade* tiga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan cukup besar dikarenakan aliran angin dapat masuk dari celah antara *blade* satu dan *blade* empat. *Vortex* juga terjadi pada bagian belakang turbin, namun hal ini tidak berpengaruh terhadap nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan oleh setiap *blade*.

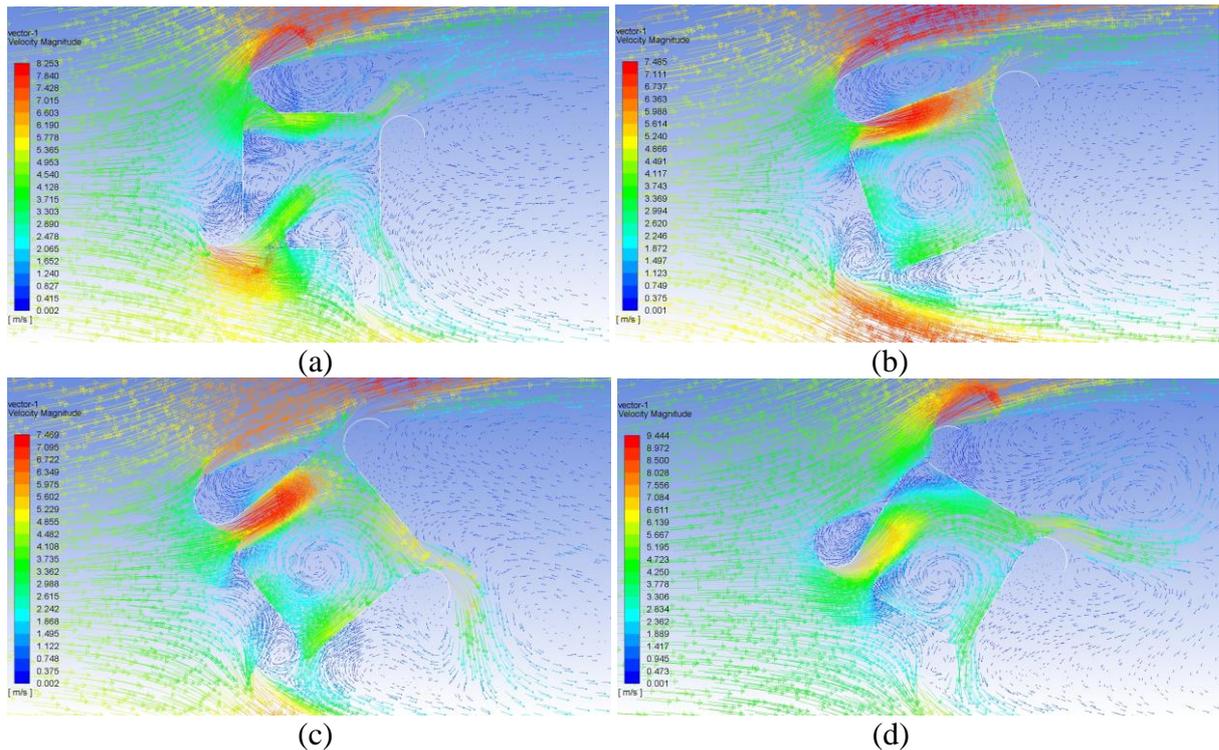
4.3.3 Analisa Aliran Kontur Tekanan dan Vektor kecepatan pada kecepatan 6 m/s



Gambar 4.7 Display kontur tekanan kecepatan 6 m/s pada (a) sudut putar turbin 0° , (b) sudut putar turbin 20° , (c) sudut putar turbin 40° , (d) sudut putar turbin 60°

Dapat dilihat dari gambar 4.7 (a) pada kondisi sudut putar turbin turbin 0° terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar *blade* yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi dibandingkan dengan posisi lainnya dengan arah *counter clock wise*. Pada *blade* dua distribusi tekanan mayoritas terjadi pada bagian dalam permukaan *blade* yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* dua bekerja secara optimum dan dapat dimanfaatkan dengan baik. Selanjutnya pada *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, sehingga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan kecil. Pada *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar namun *blade* *clock wise*. Pada gambar 4.7 (b) adalah kondisi sudut putar turbin turbin 20° . Pada *blade* satu terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* satu yang hampir tegak lurus terhadap arah aliran angin, hal ini terjadi dikarenakan sisi terluar *blade* yang hampir tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang melaluinya, sedangkan sisi terdalam *blade* tidak di kenai angin secara langsung yang mengakibatkan tekanan pada bagian tersebut rendah. Hal ini menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* tinggi. Pada *blade* dua dan *blade* tiga perbedaan tekanan yang terjadi kecil, dikarenakan *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream*, yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada *blade* tersebut tidak besar. Pada *blade* empat perbedaan tekanan yang terjadi cukup besar, namun *blade* empat adalah *clock wise*. Pada gambar 4.7 (c) adalah turbin dengan sudut putar turbin turbin 40° . Dapat dilihat pada *blade* satu memiliki perbedaan tekanan yang cukup tinggi, pada bagian luar *blade* tekanan yang terjadi tinggi dikarenakan pada bagian luar *blade* satu

dikenai angin secara langsung dan pada bagian dalam *blade* memiliki tekanan yang cukup rendah karena tidak dikenai angin secara langsung. Pada *blade* dua perbedaan tekanan cukup rendah karena ada pada bagian *downstream*. Untuk *blade* tiga tekanan pada depan *blade* cukup besar karena ada celah di antara *blade* satu dan *blade* empat. Pada *blade* empat perbedaan tekanan cukup besar namun *blade* empat *counter clock wise*. Gambar 4.7 (d) adalah sudut putar turbin turbin 60° , dimana perbedaan tekanan terjadi pada *blade* satu karena mengenai angin secara langsung atau *upstream*. Pada *blade* dua ada perbedaan tekanan dikarenakan adanya celah antara *blade* satu dan *blade* empat, namun perbedaan tekanan yang terjadi tidak begitu besar. Pada *blade* tiga dan *blade* empat memiliki perbedaan tekanan yang cukup besar.



Gambar 4.8 Display vektor kecepatan 6 m/s pada (a) sudut putar turbin turbin 0° , (b) sudut putar turbin 20° , (c) sudut putar turbin 40° , (d) sudut putar turbin 60°

Pada gambar 4.8 menampilkan grafik vektor kecepatan pada kecepatan angin 6 m/s. Dapat dilihat dari gambar 4.8 (a) pada sudut putar turbin turbin 0° timbul *vortex* pada daerah separasi pada bagian belakang *blade* satu, sehingga membuat kecepatan angin yang melawati *blade* tiga mengalami penurunan. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu besar serta kecepatan angin rendah pada *blade* tiga juga diakibatkan karena angin telah terhalang oleh *blade* satu. Namun kecilnya nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* tiga tidak begitu berpengaruh pada skema turbin angin empat *blade* ini, dikarenakan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* yang tidak langsung dikenai oleh angin atau kecepatan angin di daerah tersebut rendah. *Vortex* juga muncul pada bagian atas *blade* dua yang membuat kecepatan angin di *blade* tiga mengalami penurunan. *Vortex* juga terbentuk pada daerah separasi di *blade* empat namun pengaruhnya tidak begitu besar. Pada gambar 4.8 (b) menunjukkan display Vektor pada sudut turbin 20° . Dimana pada sudut putar turbin ini muncul *wake* dan *vortex* yang cukup besar pada bagian tengah turbin yang menyebabkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan pada *blade* dua, *blade* tiga, dan *blade* empat rendah. Ditambah lagi pada bagian pada *blade* dua dan *blade* tiga ada pada daerah *downstream* dikarenakan kecepatan angin pada daerah tersebut kecil karena terhalang oleh

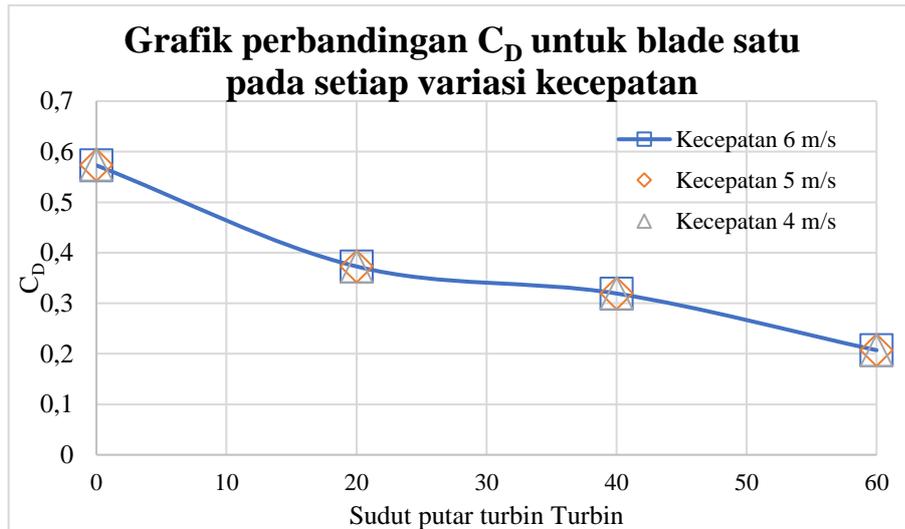
blade satu. Sedangkan pada *blade* satu ada pada daerah *upstream* atau dikenai angin secara langsung yang membuat pada *blade* satu dapat menghasilkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar. Pada gambar 4.8 (c) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin turbin 40° . Dimana pada sudut tersebut dapat dilihat *wake* dan *vortex* muncul pada bagian tengah turbin, namun *wake* dan *vortex* yang dihasilkan tidak sebesar di sudut putar turbin turbin 20° . Perbedaan juga terjadi pada bagian *blade* dua dimana pada bagian *blade* dua di sudut putar turbin turbin 20° ada pada daerah *downstream* namun pada *blade* dua di sudut putar turbin dapat di kenai oleh angin dengan cukup baik. Sedangkan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* karena terhalang oleh *blade* satu yang membuat gaya *drag* dan gaya *lift* pada bagian tersebut rendah. Gambar 4.8 (d) menunjukkan turbin angin dengan sudut putar turbin turbin 60° . Dimana *vortex* juga muncul di antara dekat *leading edge blade* satu dengan ujung *blade* dua, dimana *vortex* yang muncul tidak begitu besar. Yang membuat pada *blade* dua nilai gaya *drag* dan gaya *lift* nya tidak begitu besar. Pada *blade* tiga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan cukup besar dikarenakan aliran angin dapat masuk dari celah antara *blade* satu dan *blade* empat. *Vortex* juga terjadi pada bagian belakang turbin, namun hal ini tidak berpengaruh terhadap nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan oleh setiap *blade*.

4.4 Analisa Koefisien Gaya Drag dan Lift

Analisa gaya drag dan lift dilakukan pada setiap *blade* turbin angin tipe Lenz 2 untuk setiap variasi sudut 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 *blade* yang memiliki gaya *drag* dan *lift* yang optimal dengan membandingkan hasil nilai koefisien gaya *drag* dan gaya *lift*. Dimana pada Analisa koefisien gaya *drag* dan gaya lift ini digunakan untuk memperoleh nilai torsi statis dan koefisien torsi statis. Dimana pada analisa koefisien gaya drag dan gaya lift ini mempengaruhi besarnya nilai torsi statis dan koefisien torsi statis yang digunakan untuk torsi atau momen yang dibutuhkan oleh turbin dari keadaan diam menuju bergerak.

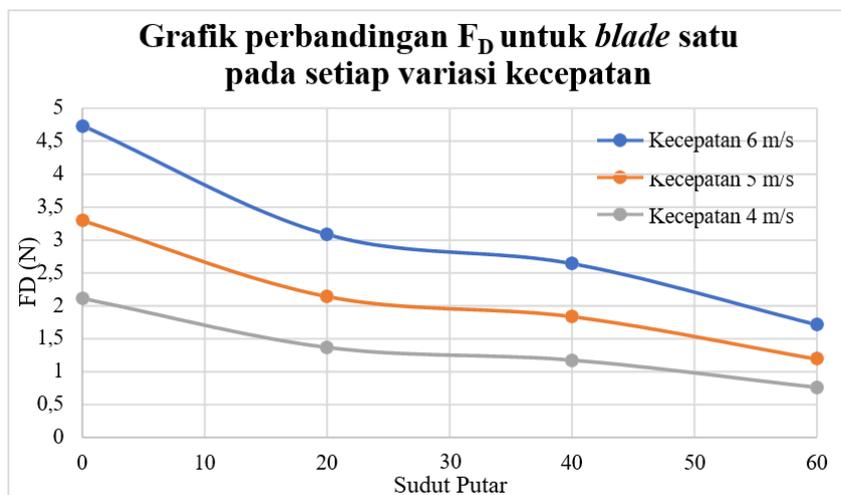
4.4.1 Analisa Koefisien Gaya Drag dan Lift Untuk Blade Satu Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin

Berikut adalah grafik perbandingan koefisien gaya *drag* dan koefisien gaya *lift*, dimana pada *blade* satu ini posisi *blade* di sudut putar turbin turbin 0° ada pada sudut 0° , sedangkan pada sudut putar turbin turbin 20° ada pada di posisi sudut 20° , pada sudut putar turbin turbin 40° ada pada di posisi sudut 40° , pada sudut putar turbin turbin 60° ada pada di posisi sudut 60° .



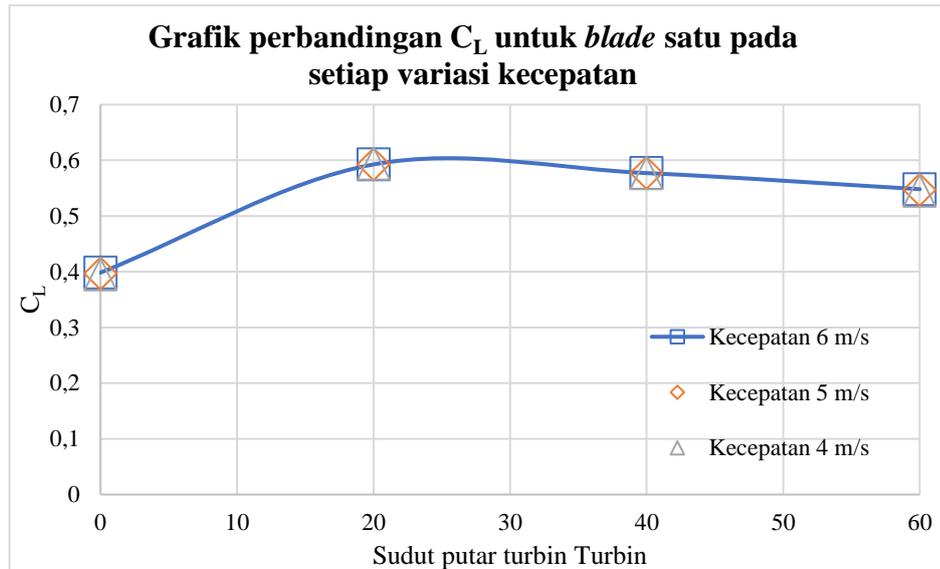
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan nilai C_D pada *blade* satu

Pada gambar 4.9 yang menunjukkan grafik perbandingan koefisien gaya *drag* pada *blade* satu pada setiap variasi kecepatan angin. Dapat dilihat nilai koefisien gaya *drag* maksimum terjadi pada sudut putar turbin turbin 0° . Hal ini dapat disebabkan karena pada *blade* satu di sudut putar turbin turbin 0° tegak lurus dengan arah datangnya angin. Pada sudut putar turbin turbin 20° nilai koefisien gaya *drag* mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan sudut putar turbin turbin 20° mulai mengalami kemiringan yang dimana gaya *drag* pada sudut putar turbin turbin 20° mengalami penurunan. Pada sudut putar turbin turbin 40° nilai koefisien gaya *drag* juga mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin turbin 40° mulai mengalami penambahan kemiringan dari sudut putar turbin sebelumnya yang membuat gaya *drag* pada *blade* tersebut menurun. Koefisien gaya *drag* minimum terjadi pada sudut putar turbin turbin 60° , hal ini dikarenakan sudut putar turbin turbin 60° memiliki kemiringan yang paling tinggi dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya. Dari gambar 4.9 yang menunjukkan perbandingan koefisien gaya *drag* pada setiap variasi kecepatan dapat disimpulkan bahwa nilai koefisien gaya *drag* yang maksimum terjadi pada posisi *blade* tegak lurus dengan arah datangnya angin, dan nilai gaya *drag* akan semakin menurun seiring dengan penambahan sudut putar turbin *blade* atau kemiringan *blade*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017**.



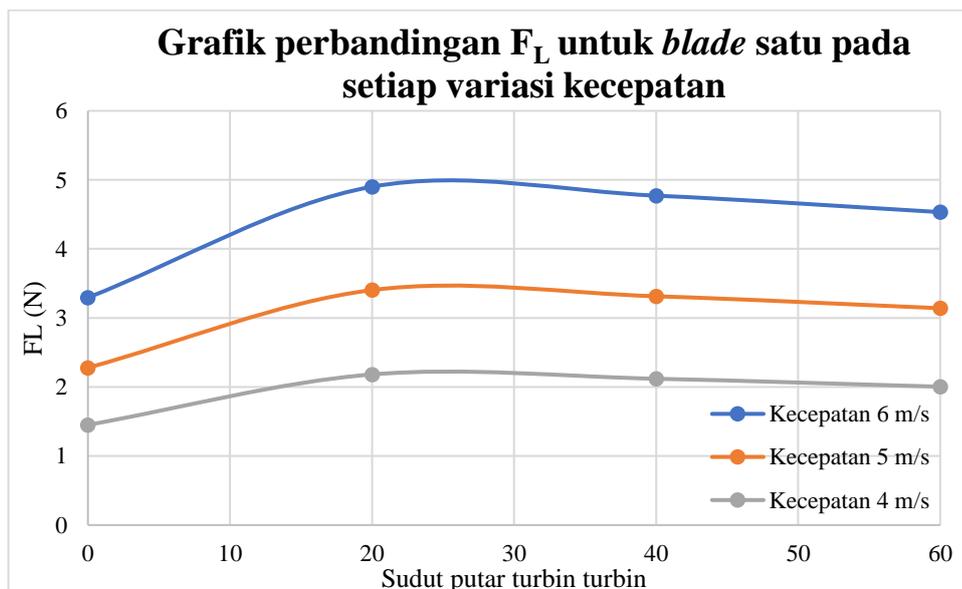
Gambar 4.10 Grafik Perbandingan nilai F_D pada *blade* satu

Pada gambar 4.10 yang menunjukkan grafik gaya *drag* pada *blade* satu pada setiap variasi kecepatan angin. Dapat dilihat nilai gaya *drag* pada kecepatan angin sebesar 6 m/s maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai sebesar 4,736 N. Hal ini dapat disebabkan karena pada *blade* satu di sudut putar turbin 0° tegak lurus dengan arah datangnya angin. Pada sudut putar turbin 20° nilai gaya *drag* mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan sudut putar turbin 20° mulai mengalami kemiringan yang dimana gaya *drag* pada sudut putar turbin 20° mengalami penurunan dengan nilai gaya *drag* nya sebesar 3,082 N. Pada sudut putar turbin 40° nilai F_D juga mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin 40° mulai mengalami penambahan kemiringan dari sudut putar turbin sebelumnya yang membuat gaya *drag* pada *blade* tersebut menurun, gaya *drag* yang dihasilkan pada sudut putar turbin 40° sebesar 2,639 N. Gaya *drag* minimum terjadi pada sudut putar turbin 60° , hal ini dikarenakan sudut putar turbin 60° memiliki kemiringan yang paling tinggi dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, pada sudut putar turbin 60° gaya *drag* yang dihasilkan sebesar 1,711 N. Pada kecepatan angin 5 m/s juga dapat dilihat kecepatan maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai sebesar 3,293 N, hal ini dapat terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 0° berada dalam kondisi tegak lurus dengan arah datangnya angin, yang menyebabkan gaya *drag* pada sudut putar turbin 0° dapat memanfaatkan gaya *drag* secara maksimal. Pada sudut putar turbin 20° nilai gaya *drag* mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan sudut putar turbin 20° mulai mengalami kemiringan yang dimana gaya *drag* pada sudut putar turbin 20° mengalami penurunan dengan nilai gaya *drag* nya sebesar 2,139 N. Pada sudut putar turbin 40° nilai gaya *drag* juga mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin 40° mulai mengalami penambahan kemiringan dari sudut putar turbin sebelumnya yang membuat gaya *drag* pada *blade* tersebut menurun, gaya *drag* yang dihasilkan pada sudut putar turbin 40° sebesar 1,384 N. Gaya *drag* minimum terjadi pada sudut putar turbin 60° , hal ini dikarenakan sudut putar turbin 60° memiliki kemiringan yang paling tinggi dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, pada sudut putar turbin 60° gaya *drag* yang dihasilkan sebesar 1,189 N. Pada kecepatan angin 4 m/s dapat dilihat kecepatan maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai sebesar 2,110 N, hal ini dapat terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 0° berada dalam kondisi tegak lurus dengan arah datangnya angin, yang menyebabkan gaya *drag* pada sudut putar turbin 0° dapat memanfaatkan gaya *drag* secara maksimal. Pada sudut putar turbin 20° nilai gaya *drag* mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan sudut putar turbin 20° mulai mengalami kemiringan yang dimana gaya *drag* pada sudut putar turbin 20° mengalami penurunan. Pada sudut putar turbin 40° nilai gaya *drag* juga mengalami penurunan dari sudut putar turbin sebelumnya, hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin 40° mulai mengalami penambahan kemiringan dari sudut putar turbin sebelumnya yang membuat gaya *drag* pada *blade* tersebut menurun. Gaya *drag* minimum terjadi pada sudut putar turbin 60° , hal ini dikarenakan sudut putar turbin 60° memiliki kemiringan yang paling tinggi dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, pada sudut putar turbin 60° gaya *drag* yang dihasilkan sebesar 0,759 N. Dari gambar 4.9 yang menunjukkan perbandingan gaya *drag* pada setiap variasi kecepatan dapat disimpulkan bahwa nilai gaya *drag* yang maksimum terjadi pada posisi *blade* tegak lurus dengan arah datangnya angin, dan nilai gaya *drag* akan semakin menurun seiring dengan penambahan sudut putar turbin *blade* atau kemiringan *blade*. Hal ini telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017**. Dimana detail nilai gaya *drag* dapat dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan nilai C_L pada *blade* satu

Pada gambar 4.11 menunjukkan gambar grafik perbandingan koefisien gaya *lift* pada setiap kecepatan angin. Pada sudut putar turbin turbin 0° nilai koefisien gaya *lift* minimum. Kemudian mengalami peningkatan nilai pada koefisien gaya *lift* nya pada sudut putar turbin 20° . Dimana pada sudut putar turbin ini paling besar atau maksimum diantara sudut putar turbin lainnya, hal ini terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 20° perbedaan tekanan pada *blade* bagian luar dan bagian dalam *blade* cukup signifikan. Pada sudut 40° gaya *lift* yang dihasilkan mengalami penurunan, hal ini terjadi dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada *blade* satu di sudut putar turbin 40° tidak sebesar pada *blade* satu di sudut putar turbin 20° dan pada sudut putar turbin 60° gaya *lift* juga mengalami penurunan nilai dikarenakan perbedaan tekanan pada *blade* satu tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan sudut putar turbin 20° dan 40° yang membuat kurang baiknya pemanfaatan gaya *lift* pada sudut putar turbin 60° .



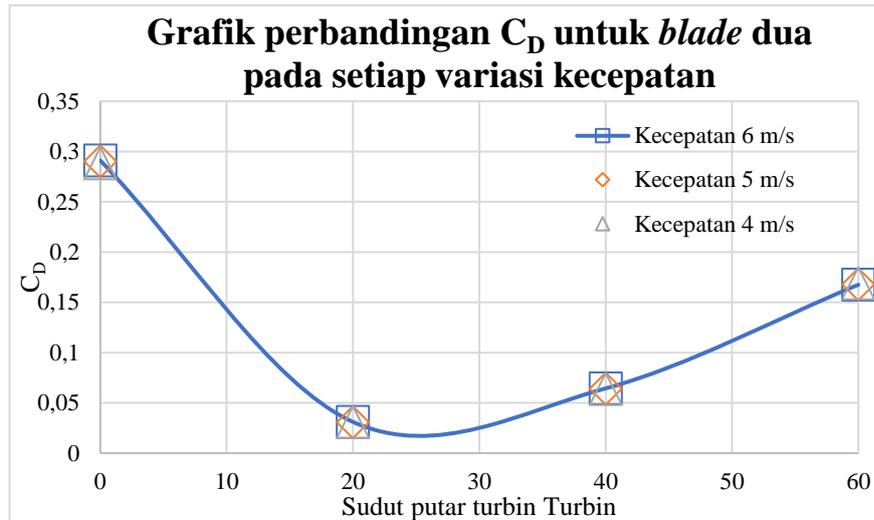
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan nilai F_L pada *blade* satu

Pada gambar 4.12 menunjukkan gambar grafik perbandingan gaya *lift* pada setiap sudut putar turbin. Pada kecepatan angin sebesar 6 m/s di sudut putar turbin 0° gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 3,294 N. Kemudian mengalami peningkatan nilai pada gaya *lift* nya pada

sudut putar turbin 20° dimana sudut putar turbin 20° ini gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 4,900 N. Dimana pada sudut putar turbin ini paling besar atau maksimum diantara sudut putar turbin lainnya, hal ini terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 20° perbedaan tekanan pada *blade* bagian luar dan bagian dalam *blade* cukup signifikan. Pada sudut 40° gaya *lift* yang dihasilkan mengalami penurunan dengan nilai sebesar 4,771 N, hal ini terjadi dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada *blade* satu di sudut putar turbin 40° tidak sebesar pada *blade* satu di sudut putar turbin 20° dan pada sudut putar turbin 60° gaya *lift* juga mengalami penurunan nilai dikarenakan perbedaan tekanan pada *blade* satu tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan sudut putar turbin 20° dan 40° yang membuat kurang baiknya pemanfaatan gaya *lift* pada sudut putar turbin 60° . Pada sudut 60° ini menghasilkan gaya *lift* sebesar 4,533 N. Pada kecepatan 5 m/s di sudut putar turbin 0° gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 2,278 N. Kemudian mengalami peningkatan nilai pada gaya *lift* nya pada sudut putar turbin 20° dimana sudut putar turbin 20° ini gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 3,403 N. Dimana pada sudut putar turbin ini paling besar atau maksimum diantara sudut putar turbin lainnya, hal ini terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 20° perbedaan tekanan pada *blade* bagian luar dan bagian dalam *blade* cukup signifikan. Pada sudut 40° gaya *lift* yang dihasilkan mengalami penurunan dengan nilai sebesar 3,313 N, hal ini terjadi dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada *blade* satu di sudut putar turbin 40° tidak sebesar pada *blade* satu di sudut putar turbin 20° dan pada sudut putar turbin 60° gaya *lift* juga mengalami penurunan nilai dikarenakan perbedaan tekanan pada *blade* satu tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan sudut putar turbin 20° dan 40° yang membuat kurang baiknya pemanfaatan gaya *lift* pada sudut putar turbin 60° . Pada sudut 60° ini menghasilkan gaya *lift* sebesar 3,140 N. Pada sudut putar turbin 0° gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 1,451 N. Kemudian mengalami peningkatan nilai pada gaya *lift* nya pada sudut putar turbin 20° dimana sudut putar turbin 20° ini gaya *lift* yang dihasilkan sebesar 2,181 N. Dimana pada sudut putar turbin ini paling besar atau maksimum diantara sudut putar turbin lainnya, hal ini terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 20° perbedaan tekanan pada *blade* bagian luar dan bagian dalam *blade* cukup signifikan. Pada sudut 40° gaya *lift* yang dihasilkan mengalami penurunan dengan nilai sebesar 2,119 N, hal ini terjadi dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada *blade* satu di sudut putar turbin 40° tidak sebesar pada *blade* satu di sudut putar turbin 20° dan pada sudut putar turbin 60° gaya *lift* juga mengalami penurunan nilai dikarenakan perbedaan tekanan pada *blade* satu tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan sudut putar turbin 20° dan 40° yang membuat kurang baiknya pemanfaatan gaya *lift* pada sudut putar turbin 60° . Pada sudut 60° ini menghasilkan gaya *lift* sebesar 2,004 N. Dari gambar 4.9 dapat disimpulkan bahwa semakin tegak lurus *blade*, maka semakin kecil pula nilai gaya *lift* nya.

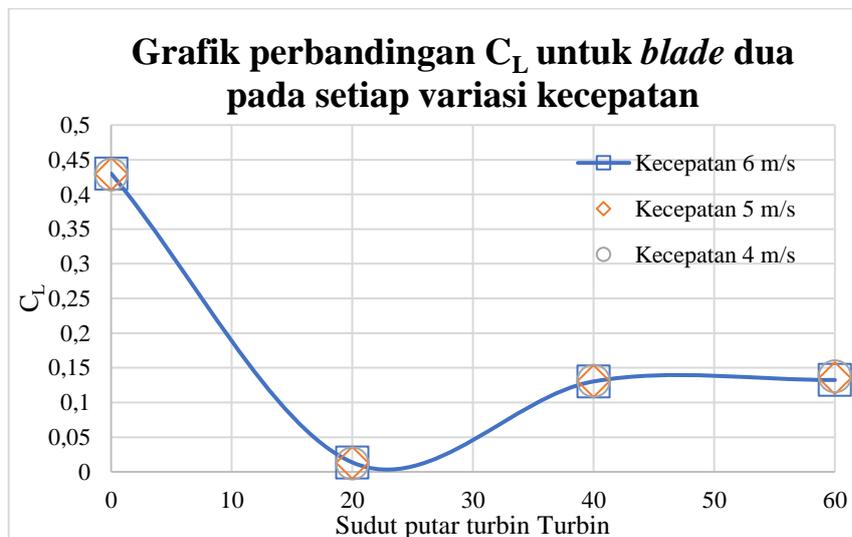
4.4.2 Analisa Koefisien Gaya *Drag* dan *Lift* Untuk *Blade* Dua Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin

Berikut adalah grafik perbandingan koefisien gaya *drag* dan koefisien gaya *lift*, dimana pada *blade* satu ini posisi *blade* di sudut putar turbin turbin 0° ada pada sudut 90° , sedangkan pada sudut putar turbin turbin 20° ada pada di posisi sudut 110° , pada sudut putar turbin turbin 40° ada pada di posisi sudut 130° , pada sudut putar turbin turbin 60° ada pada di posisi sudut 150° .



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan nilai C_D pada *blade* dua

Pada gambar 4.13 menjelaskan grafik perbandingan koefisien gaya *drag* pada *blade* dua di setiap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan angin. Dapat koefisien gaya *drag* maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° , hal ini dapat terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 0° *blade* dua ada pada daerah *upstream* atau pada posisi dimana *blade* di kenai angin secara langsung, yang membuat pada sudut putar turbin 0° dapat memanfaatkan gaya *drag* dengan baik. Pada sudut putar turbin 20° koefisien gaya *drag* mengalami penurunan nilai secara drastis. Hal ini dikarenakan pada saat posisi *blade* dua di sudut putar turbin 20° ada pada daerah *downstream* atau tidak dikenai angin secara langsung, hal ini terjadi karena posisi *blade* dua terhalang oleh *blade* depan nya yaitu *blade* satu. Pada posisi sudut putar turbin 40° koefisien gaya *drag* mengalami peningkatan nilai. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada posisi sudut putar turbin 40° ada sedikit celah yang dapat dilewati oleh angin yang dapat memanfaatkan gaya *drag* dengan cukup baik yang dapat menghasilkan koefisien gaya *drag* meningkat dari sebelumnya. Pada sudut putar turbin 60° koefisien gaya *drag* yang dihasilkan meningkat dari sudut putar turbin sebelumnya. Hal ini terjadi karena ada celah angin masuk yang lebih besar dibanding dengan sudut putar turbin 40° , yang membuat pada sudut putar turbin 60° koefisien gaya *drag* cukup meningkat dikarenakan pada sudut putar turbin ini dapat memanfaatkan gaya *drag* dengan baik dapat dimanfaatkan dengan baik.

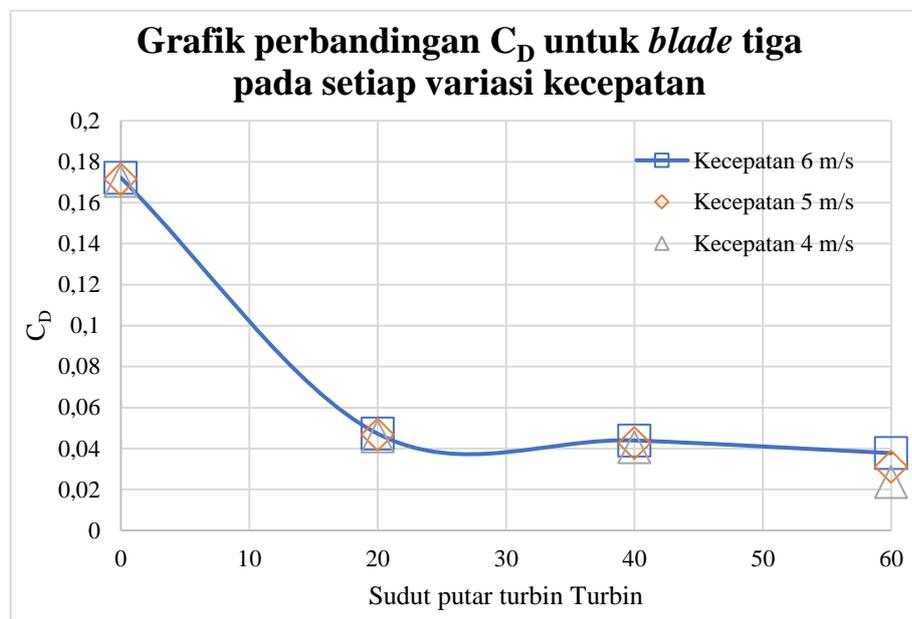


Gambar 4.14 Grafik Perbandingan nilai C_L pada *blade* dua

Pada gambar 4.14 menjelaskan grafik perbandingan koefisien gaya *lift* pada *blade* dua di setiap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan angin. Dapat dilihat pada pada sudut putar turbin 0° koefisien gaya *lift* maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0°, hal ini dapat terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 0° *blade* dua ada berada pada daerah *upstream* atau pada posisi dimana *blade* di kenai angin secara langsung, yang membuat pada sudut putar turbin 0° dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan baik. Pada sudut putar turbin 20° koefisien gaya *lift* mengalami penurunan nilai secara drastis. Hal ini dikarenakan pada saat posisi *blade* dua di sudut putar turbin 20° ada pada daerah *downstream* atau tidak dikenai angin secara langsung, hal ini terjadi karena posisi *blade* dua terhalang oleh *blade* depan nya yaitu *blade* satu dan jika dilihat dari vector kecepatannya muncul *wake* yang membuat kecepatan angin menurun saat menabrak *blade* dua. Pada posisi sudut putar turbin 40° koefisien gaya *lift* mengalami peningkatan nilai. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada posisi sudut putar turbin 40° ada sedikit celah yang dapat dilewati oleh angin yang dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan cukup baik. Pada sudut putar turbin 60° koefisien gaya *lift* meningkat dari sudut putar turbin sebelumnya. Hal ini terjadi karena ada celah angin masuk yang lebih besar dibanding dengan sudut putar turbin 40°, yang membuat pada sudut putar turbin 60° gaya *lift* cukup dapat dimanfaatkan dengan baik.

4.4.3 Analisa Koefisien Gaya Drag dan Lift Untuk Blade Tiga Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin

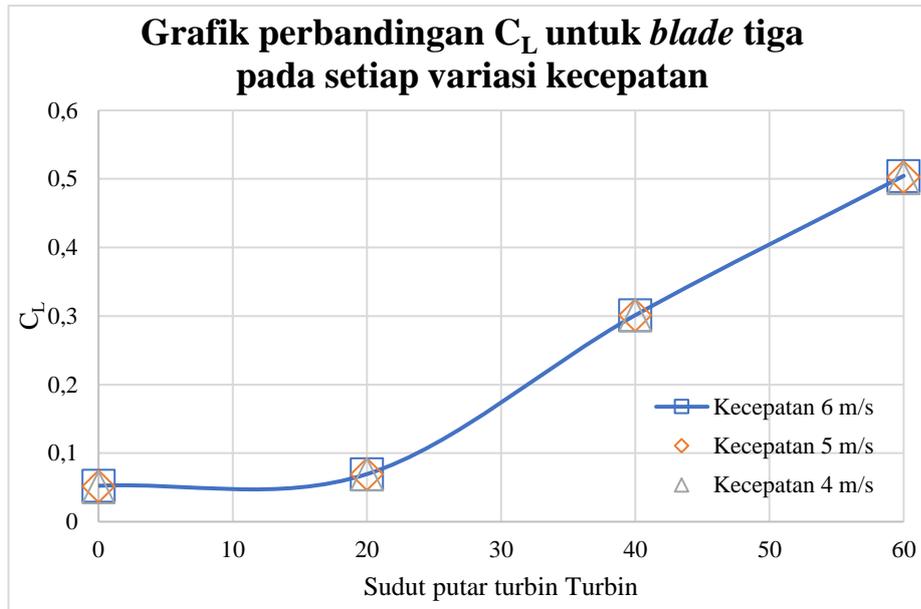
Berikut adalah grafik perbandingan koefisien gaya *drag* dan koefisien gaya *lift*, dimana pada *blade* satu ini posisi *blade* di sudut putar turbin turbin 0° ada pada sudut 180°, sedangkan pada sudut putar turbin turbin 20° ada pada di posisi sudut 200°, pada sudut putar turbin turbin 40° ada pada di posisi sudut 220°, pada sudut putar turbin turbin 60° ada pada di posisi sudut 240°.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan nilai C_D pada *blade* tiga

Pada gambar grafik 4.15 menunjukkan perbandingan koefisien gaya *drag* pada *blade* tiga pada setiap variasi kecepatan angin. Pada sudut putar turbin 0° dapat dilihat bahwa nilai gaya *drag* terbesar terjadi, hal ini di sebabkan pada sudut 0° tegak lurus dengan datangnya angin yang membuat *blade* dapat memanfaatkan gaya *drag* cukup baik. Pada sudut 20° nilai koefisien

gaya *drag* mengalami penurunan, yang disebabkan karena pada sudut ini mengalami penambahan kemiringan yang membuat penurunan nilai gaya *drag* nya menurun juga. Pada sudut putar turbin 40° koefisien gaya *drag* mengalami penurunan, dikarenakan pada sudut putar turbin 40° perbedaan tekanan yang terjadi tidak signifikan atau cenderung sama ditambah lagi kecepatan angin pada saat menabrak *blade* tiga sudah mengalami penurunan. Pada sudut putar turbin 60° mengalami penurunan nilai koefisien gaya *drag* sedikit, dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi di sudut putar turbin 60° tidak terlalu besar atau signifikan.

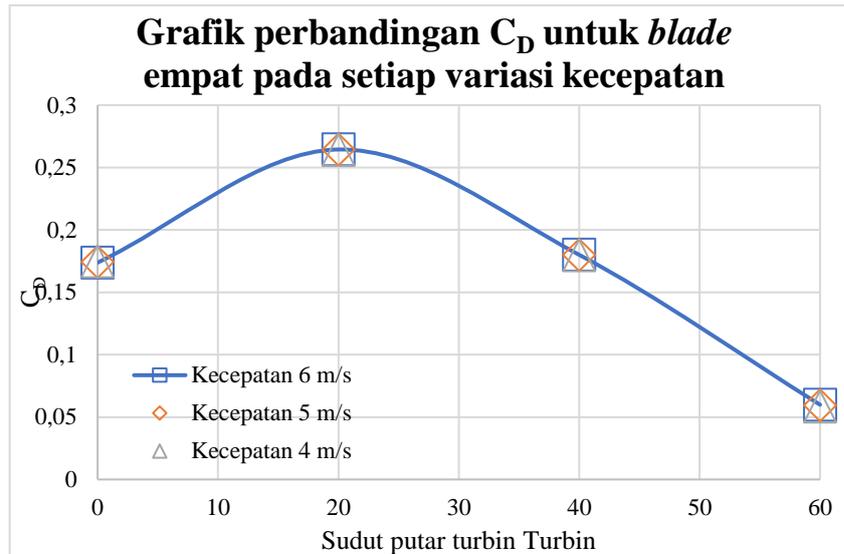


Gambar 4.16 Grafik Perbandingan nilai C_L pada *blade* tiga

Pada gambar 4.16 menjelaskan grafik perbandingan koefisien gaya *lift* pada *blade* tiga di setiap variasi kecepatan angin. Dapat dilihat nilai minimum terjadi pada sudut putar turbin turbin 0°, hal ini dapat terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin turbin 0° ada pada daerah *downstream* yang menyebabkan nilai pada *blade* tiga di sudut putar turbin ini lebih baik memanfaatkan gaya *drag* dibandingkan gaya *lift*. Pada sudut putar turbin turbin 20° koefisien gaya *drag* mengalami peningkatan dari sudut putar turbin sebelumnya, namun pada *blade* tiga pada sudut putar turbin 20° kurang baik dalam memanfaatkan gaya *lift* dan cukup baik dalam memanfaatkan gaya *drag* yang membuat koefisien gaya *lift* pada sudut putar turbin turbin 20° kecil. Pada sudut putar turbin turbin 40° koefisien gaya *lift* mulai meningkat dari sudut putar turbin sebelumnya hal ini dikarenakan semakin bertambahnya kemiringan yang dimana *blade* tiga dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan baik. Koefisien gaya *lift* maksimum terjadi pada sudut putar turbin blade 60°, hal ini dikarenakan adanya penambahan kemiringan yang membuat *blade* tiga pada posisi ini dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan baik.

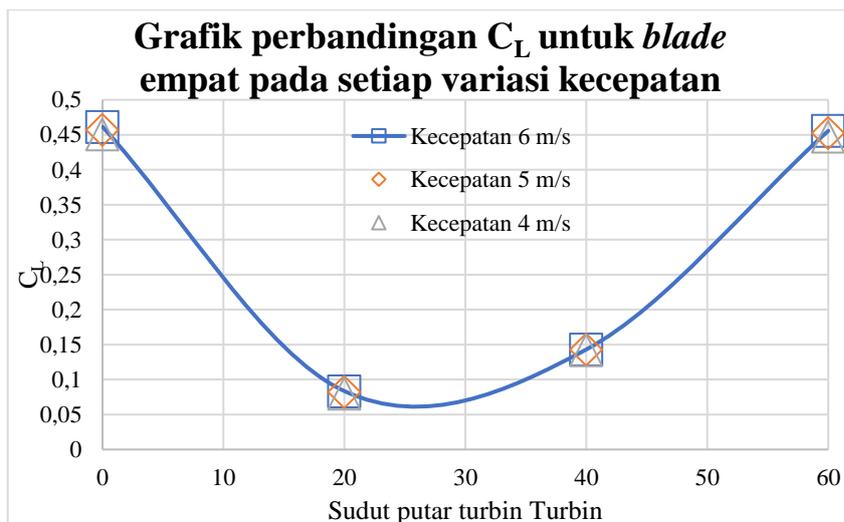
4.4.4 Analisa Koefisien Gaya *Drag* dan *Lift* Untuk *Blade* Empat Pada Setiap Variasi Kecepatan Angin

Berikut adalah grafik perbandingan koefisien gaya *drag* dan koefisien gaya *lift*, dimana pada *blade* satu ini posisi *blade* di sudut putar turbin turbin 0° ada pada sudut 270°, sedangkan pada sudut putar turbin turbin 20° ada pada di posisi sudut 290°, pada sudut putar turbin turbin 40° ada pada di posisi sudut 310°, pada sudut putar turbin turbin 60° ada pada di posisi sudut 330°.



Gambar 4.17 Grafik Perbandingan nilai C_D pada *blade* empat

Pada gambar 4.17 menunjukkan gambar grafik perbandingan koefisien gaya *drag* pada setiap sudut putar turbin turbin. Di sudut putar turbin turbin 0° koefisien gaya *drag* terbesar setelah pada sudut putar turbin turbin 20° dikarenakan pada sudut putar turbin turbin 0° angin menabrak turbin pada bagian cembung nya. Kemudian mengalami peningkatan nilai pada gaya *drag* nya pada sudut putar turbin 20° , dimana pada sudut putar turbin ini paling besar atau maksimum diantara sudut putar turbin lainnya, hal ini terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin turbin 20° perbedaan tekanan pada *blade* bagian luar dan bagian dalam *blade* cukup signifikan. Pada sudut turbin 40° koefisien gaya *drag* yang dihasilkan mengalami penurunan, hal ini terjadi dikarenakan perbedaan tekanan yang terjadi pada *blade* satu di sudut putar turbin turbin 40° tidak sebesar pada *blade* empat di sudut putar turbin turbin 20° dan pada sudut putar turbin turbin 60° koefisien gaya *drag* juga mengalami penurunan nilai dikarenakan perbedaan tekanan pada *blade* satu tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan sudut putar turbin turbin 20° dan 40° yang membuat kurang baiknya pemanfaatan gaya *drag* pada sudut putar turbin 60° .



Gambar 4.18 Grafik Perbandingan nilai C_L pada *blade* empat

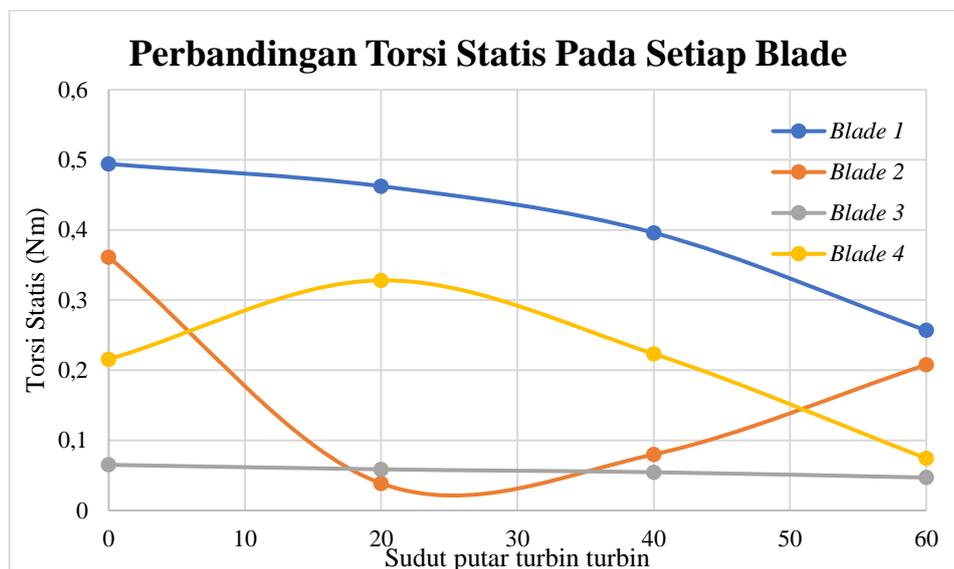
Pada gambar 4.18 menjelaskan grafik perbandingan koefisien gaya *lift* pada *blade* empat di setiap sudut putar turbin dengan variasi kecepatan angin. Dapat dilihat Pada sudut putar turbin 0° gaya *lift* pada sudut ini menghasilkan nilai koefisien gaya *lift* maksimum, hal ini dapat

terjadi dikarenakan pada sudut putar turbin 0° *blade* empat berada searah dengan angin yang menabrak. Pada sudut putar turbin 20° koefisien gaya *lift* menurun drastis, dikarenakan pada sudut putar turbin ini *blade* empat lebih memanfaatkan gaya *drag* dibanding gaya *lift*. Pada sudut putar turbin 40° koefisien gaya *lift* mulai meningkat, hal ini dikarenakan pada sudut putar turbin 40° dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan baik dan dapat dilihat pada kontur tekanannya perbedaan yang terjadi cukup besar, dan hal sama terjadi pada sudut putar turbin 60° dimana *blade* empat dapat memanfaatkan gaya *lift* dengan baik, serta perbedaan tekanan yang terjadi pada sudut putar turbin 60° besar atau cukup signifikan. Pada sudut putar turbin 60° koefisien gaya *lift* yang dihasilkan terbesar setelah sudut putar turbin 0° .

4.5 Analisa Torsi Statis

Analisa torsi statis dilakukan pada turbin angin tipe Lenz 2 untuk setiap variasi sudut dengan variasi kecepatan angin 4, 5, dan 6 m/s. Hal ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh variasi kecepatan angin terhadap besar nilai torsi statis.

4.5.1 Analisa Perbandingan Torsi Statis Pada Setiap *Blade*

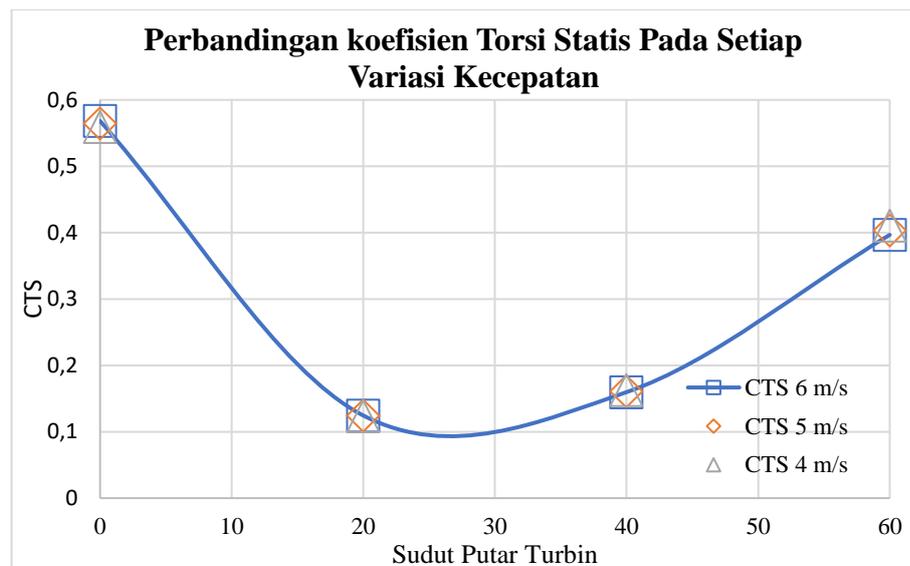


Gambar 4.19 Grafik perbandingan torsi statis pada setiap *blade*

Pada gambar 4.19 menunjukkan grafik perbandingan torsi statis pada setiap *blade* di variasi kecepatan angin sebesar 6 m/s. Dapat dilihat pada grafik *blade* satu memiliki nilai torsi statis paling maksimum di banding dengan *blade* lainnya. Pada *blade* satu di sudut putar turbin 0° memiliki torsi statis terbesar dengan nilai sebesar 0,494 Nm dikarenakan pada sudut putar turbin 0° posisi *blade* tegak lurus dengan arah datangnya angin atau ada pada daerah *upstream*. Pada sudut putar turbin 20° , sudut putar turbin 40° , dan sudut putar turbin 60° mengalami penurunan secara terus menerus dengan nilai berturut – turut yaitu 0,462 Nm, 0,395 Nm, dan 0,256 Nm. Pada *blade* dua nilai maksimum terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai 0,361 Nm dikarenakan pada *blade* tersebut angin menabrak *blade* pada bagian cekungnya. Pada sudut putar turbin 20° torsi statis yang dihasilkan sebesar 0,038 Nm mengalami penurunan dikarenakan pada sudut putar turbin 20° *blade* dua tidak terkena angin secara langsung karena telah terhalang oleh *blade* satu atau berada dalam daerah *downstream*. Pada *blade* sudut putar turbin 40° nilai torsi statis mengalami peningkatan yang tidak begitu besar dari sudut putar turbin 20° dikarenakan pada sudut putar turbin 40° juga dalam daerah *downstream* namun masih dikenai angin sedikit, torsi yang dihasilkan di sudut ini sebesar 0,079 Nm. Pada sudut putar turbin 60° *blade* torsi statis mengalami peningkatan dari sudut putar turbin sebelumnya karena

pada sudut putar turbin 60° *blade* dua dapat dikenai oleh angin yang masuk dari celah antara *blade* satu dan *blade* empat dengan nilai torsi statis nya sebesar 0,207 Nm. Pada *blade* tiga torsi statis yang dihasilkan mengalami penurunan di setiap kenaikan sudut putar turbinnya. Hal ini dikarenakan pada *blade* tiga ada pada daerah *downstream* yang dimana pada *blade* tiga tidak dikenai angin secara langsung karena telah terhalang oleh *blade* di depannya. Torsi statis maksimum pada *blade* tiga ini terjadi pada sudut putar turbin 0° dengan nilai torsi statis sebesar 0,065 Nm. Pada *blade* empat nilai maksimum terjadi pada sudut putar turbin 20° karena pada *blade* tersebut ada pada daerah *upstream* atau dikenai angin secara langsung dengan nilai torsi statis sebesar 0,328 Nm. Pada sudut putar turbin di 40° torsi statis mengalami penurunan karena pada sudut putar turbin tersebut ada sedikit kemiringan yang membuat adanya penurunan pada torsi statis yang bekerja. Pada sudut putar turbin 0° nilai torsi yang dihasilkan sebesar 0,215 Nm dikarenakan ditabrak oleh angin pada bagian *leading edge* nya. Pada sudut putar turbin 60° torsi statis yang dihasilkan paling kecil diantara sudut putar turbin lainnya dikarenakan pada sudut 60° mengalami kemiringan yang cukup tinggi torsi statis yang dihasilkan sebesar 0,074 Nm. Dari gambar grafik 4.16 nilai torsi statis terbesar terjadi jika *blade* ada pada posisi tegak lurus oleh datangnya angin dan torsi yang besar dapat dihasilkan oleh *blade* yang ada pada daerah *upstream* atau yang dikenai angin secara langsung. Hal ini sama dengan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Taufiqurrahman & Suphandani, 2017.

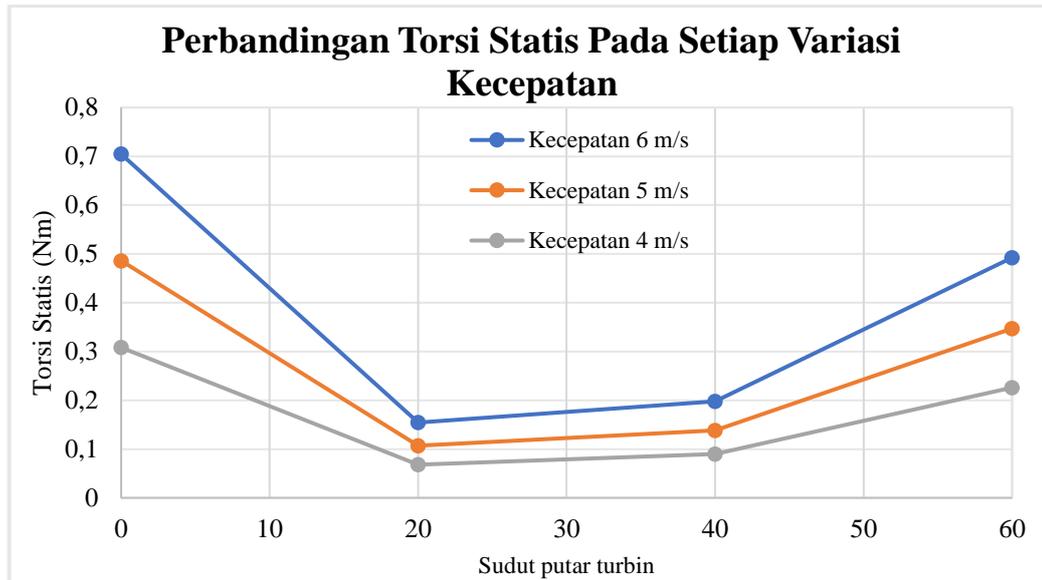
4.5.1 Analisa Perbandingan Torsi Statis Pada Setiap Variasi Kecepatan



Gambar 4.20 Grafik perbandingan koefisien torsi statis pada setiap variasi kecepatan

Pada gambar 4.20 menunjukkan grafik perbandingan koefisien torsi statis pada setiap variasi kecepatan angin. Dimana pada sudut putar turbin 0° nilai koefisien torsi statis maksimum terjadi karena pada sudut putar 0° ini gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan sangat besar. Ditambah lagi pada sudut putar turbin 0° ini ada dua *blade* yang dikenai angin secara langsung pada bagian cekung nya dimana hal ini menyebabkan nilai torsi statis yang dihasilkan pada sudut putar 0° ini besar. Pada sudut putar turbin 20° nilai koefisien torsi statis yang dihasilkan paling kecil diantara sudut putar turbin lainnya, dimana pada sudut putar ini terdapat dua *blade* yang berada pada daerah *downstream* dimana pada *blade* dua dan *blade* tiga tidak dapat menghasilkan nilai torsi statis yang cukup besar hal ini dikarenakan posisi *blade* dua dan *blade* tiga angin telah terhalang oleh *blade* satu, serta munculnya vortex dibagian tengah turbin yang membuat kecepatan pada saat menabrak *blade* dua dan *blade* tiga mulai menurun drastis. Pada sudut putar turbin 40° mengalami kenaikan dari sudut putar sebelumnya, hal ini dikarenakan

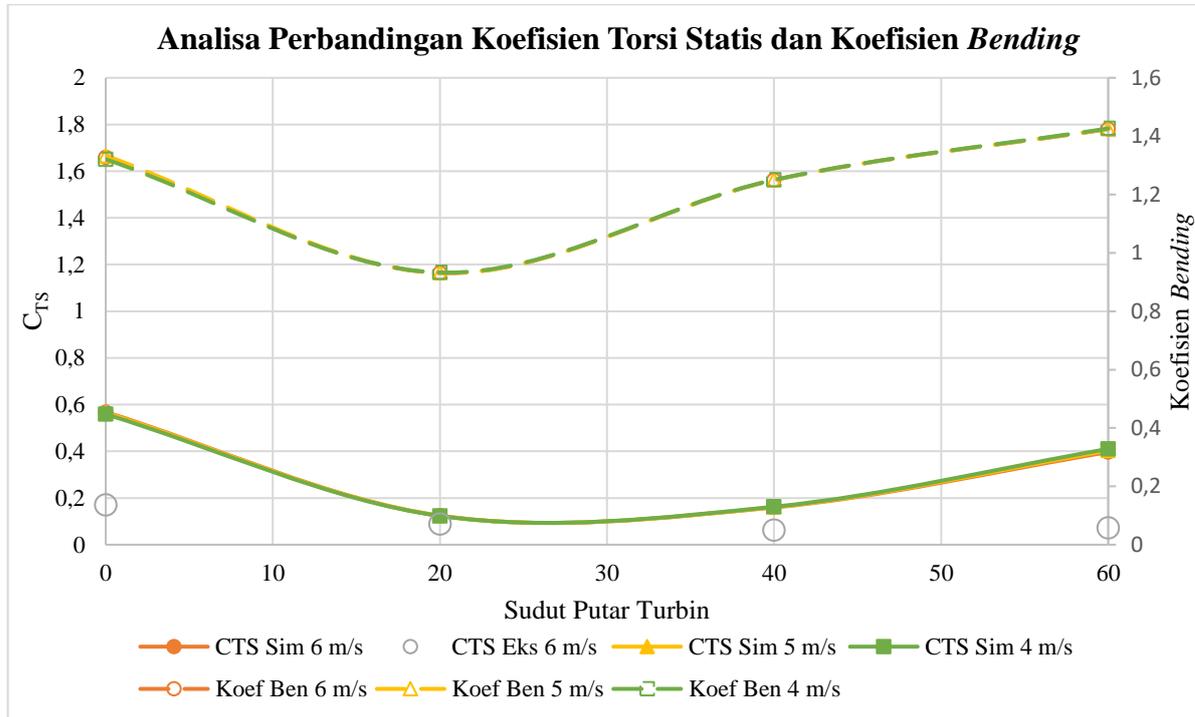
pada sudut putar 40° *blade* dua masih berada pada daerah *downstream* namun tidak begitu terhalang pada *blade* satu, dan pada *blade* 40° ini juga muncul vortex dibagian tengah turbin, namun vortex yang muncul tidak sebesar pada sudut putar turbin 20° . Pada sudut putar turbin 60° nilai koefisien torsi statis mengalami kenaikan yang drastis dimana pada sudut putar turbin 60° ini *blade* yang ada pada daerah *downstream* mulai dapat memanfaatkan gaya *drag* dan gaya *lift* dengan baik, dikarenakan pada sudut putar turbin 60° ini mulai terdapat celah diantara *blade* satu dan *blade* dua yang membuat angin dapat masuk melalui celah.



Gambar 4.21 Grafik perbandingan torsi statis pada setiap variasi kecepatan

Pada gambar 4.21 menunjukkan grafik perbandingan koefisien torsi statis pada setiap variasi kecepatan angin. Dimana pada sudut putar turbin 0° nilai torsi statis maksimum terjadi karena pada sudut putar 0° ini gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan sangat besar. Ditambah lagi pada sudut putar turbin 0° ini ada dua *blade* yang dikenai angin secara langsung pada bagian cekung nya dimana hal ini menyebabkan nilai torsi statis yang dihasilkan pada sudut putar 0° ini besar. Pada sudut putar turbin 20° nilai torsi statis yang dihasilkan paling kecil diantara sudut putar turbin lainnya, dimana pada sudut putar ini terdapat dua *blade* yang berada pada daerah *downstream* dimana pada *blade* dua dan *blade* tiga tidak dapat menghasilkan nilai torsi statis yang cukup besar hal ini dikarenakan posisi *blade* dua dan *blade* tiga angin telah terhalang oleh *blade* satu, serta munculnya vortex dibagian tengah turbin yang membuat kecepatan pada saat menabrak *blade* dua dan *blade* tiga mulai menurun drastis. Pada sudut putar turbin 40° mengalami kenaikan dari sudut putar sebelumnya, hal ini dikarenakan pada sudut putar 40° *blade* dua masih berada pada daerah *downstream* namun tidak begitu terhalang pada *blade* satu, dan pada *blade* 40° ini juga muncul vortex dibagian tengah turbin, namun vortex yang muncul tidak sebesar pada sudut putar turbin 20° . Pada sudut putar turbin 60° nilai torsi statis mengalami kenaikan yang drastis dimana pada sudut putar turbin 60° ini *blade* yang ada pada daerah *downstream* mulai dapat memanfaatkan gaya *drag* dan gaya *lift* dengan baik, dikarenakan pada sudut putar turbin 60° ini mulai terdapat celah diantara *blade* satu dan *blade* dua yang membuat angin dapat masuk melalui celah. Dapat dilihat pada grafik 4.21 torsi statis yang dihasilkan terbesar terjadi pada kecepatan angin 6 m/s, dan torsi statis terkecil terjadi pada kecepatan angin 4 m/s, dari hasil diatas didapatkan bahwa semakin besar kecepatan angin maka semakin besar pula torsi statis yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017**.

4.5.2 Analisa Perbandingan Koefisien Torsi Statis dan Koefisien *Bending*



Gambar 4.22 Grafik koefisien torsi statis dan gaya *lift* dari setiap variasi kecepatan angin

Pada gambar 4.22 menjelaskan tentang perbandingan hasil torsi statis dengan nilai gaya *lift*, dapat dilihat bahwa nilai gaya *lift* total yang bekerja pada turbin memiliki nilai tertinggi pada saat turbin berada pada posisi 60° untuk setiap kecepatannya, dimana saat turbin dilewati oleh aliran angin dengan kecepatan 4 m/s, nilai gaya *lift* yang bekerja pada turbin tersebut sebesar 5,996 N/m, sedangkan untuk kecepatan 5 m/s gaya *lift* yang bekerja pada turbin sebesar 9,400 N/m, dan untuk 6 m/s sebesar 13,568 N/m. Dapat dilihat juga pada grafik gambar 4.17, bahwa nilai gaya *lift* yang bekerja pada turbin lebih besar dibandingkan koefisien nilai torsi statis yang bekerja pada turbin, sehingga dibutuhkan desain poros yang cukup kuat untuk menahan gaya *lift* atau gaya *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

Berdasarkan penelitian terkait studi numerik Studi numerik performa turbin angin tipe lenz 2 pada kondisi aliran dua dimensi dan *blade* statis untuk jumlah *blade* 4, *blade chord length* 180 mm, dan diameter turbin 300 mm diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Perubahan variasi kecepatan angin yang semakin besar terbukti dapat meningkatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* dari turbin angin tipe Lenz 2. Rata-rata nilai gaya *drag* dan gaya *lift* tertinggi terletak pada kecepatan aliran angin yang melewati turbin sebesar 6 m/s jika dibandingkan variasi kecepatan angin lainnya.
2. Perubahan variasi kecepatan angin yang semakin besar terbukti dapat meningkatkan nilai torsi statis yang dihasilkan. Hal tersebut tentunya juga berbanding lurus dengan nilai torsi statis. Semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar pula nilai torsi statis yang dihasilkan. Dimana nilai torsi statis tertinggi sebesar 0,704 Nm pada kecepatan angin sebesar 6 m/s.
3. Perubahan sudut putar turbin turbin yang digunakan akan maskimal nilai *Coefficient of Static Torque* (CTS) nya pada sudut putar turbin *blade* 0° dari turbin angin tipe Lenz 2, dimana nilai *Coefficient of Static Torque* (CTS) tertinggi sebesar 0,568. Nilai *Coefficient of Static Torque* (CTS) hasil simulasi akan memiliki *trend* yang relatif sama dengan *Coefficient of Static Torque* (CTS) hasil eksperimen, namun nilai untuk hasil simulasi akan lebih besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hal tersebut dikarenakan adanya beberapa faktor yang diabaikan pada faktor simulasi.

5.2 Saran

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

1. Melakukan studi numerik dengan *blade rotation* dan model tiga dimensi untuk melihat fenomena aliran turbin angin tipe Lenz 2.
2. Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan aliran turbulen pada simulasi turbin angin tipe Lenz 2 seperti k-omega.
3. Diperlukan studi lebih lanjut untuk menggunakan tipe *mesh* lainnya dengan jumlah *cell* yang lebih banyak atau sedikit daripada simulasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboufares, G. (2015). Performance characteristics of a vertical axis wind turbine operating in different environmental conditions. Huddersfield.
- 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.
- Bounani, A., Bouchaour, M., Merad, L. (2020). Modeling and simulation of the vertical axis wind turbine by *qblade* software. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 2(2), 181-188.
- 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.
- Huda, S., & Arief, I. S. (2014). Analisa bentuk profile dan jumlah *blade* vertical axis wind turbine terhadap putaran rotor untuk menghasilkan energi listrik. *Jurnal Teknik Pomits* Vol. 3, No. 1, ISSN: 2337-3539.
- Kompasiana.com. (2017, August 21). PLTB Tidak Layak Untuk Indonesia? ah, Kata Siapa? KOMPASIANA. Retrieved March 5, 2022, from <https://www.kompasiana.com/cahyawardhani/599b018e5af02c1fad017cc2/pltb-tidak-layak-untuk-indonesia-ah-kata-siapa>
- 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.
- 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>
- Purnomo, B., S, A., Irawan, B., Setiawan, A., A, Supriatna. (2019). Simulation of Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) using Turbine Blades NACA 4412 Type. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. ISSN: 1473-804x
- 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.
- Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. (2020). Statistik Ketenagalistrikan Tahun 2020. Jakarta: Sekretariat Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. Edisi No. 34.
- Sivamani, S., T, M. P., Sohail, M., T, M., & V, H. (2017). Experimental data on load test and performance parameters of a LENZ type vertical axis wind turbine in open environment condition. *Data in Brief*, 15, 1035–1042.
- 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.
- Utomo, S. B., & Ikhwan, N. (2021). Experimental study of the effect of turbine diameter (d) differences on performance and optimum operating condition of vertical axis wind turbine (VAWT) type lenz 2 with the number of *blades* 3 and 4 on laboratory scale. *Jurnal Teknik Mesin ITS*.
- Vanessa, M. C. (2016). Laporan penelitian riset mini tentang turbin angin model savonius dan darrieus. Banten.
- 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*. Kielce: EDP Sciences.

LAMPIRAN

A. Data Hasil Perhitungan Gaya *Drag* dan Gaya *Lift* pada Turbin Angin Lenz 2 Dengan Variasi Diameter Turbin 300 mm Pada Kecepatan Angin 4 m/s; 5 m/s; dan 6 m/s

Tabel A.1 Data hasil perhitungan gaya *drag* dan gaya *lift* turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 6 \text{ m/s}$

	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	Sudut 0 Derajat	1	4,7365734	3,2946803	4,7365734	3,2946803	0,572828227
2		2,4069338	3,5570717	2,4069338	3,5570717	0,291087988	0,430182519
3		1,4236239	0,43359203	1,4236239	0,43359203	0,172169179	0,052437434
4		1,4376265	3,8154202	-1,4376265	3,8154202	-0,173862615	0,461426479
Total				7,1295046	11,10076423		
Sudut 20 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	5,6592947	1,2207708	3,082742097	4,900469264	0,372818394	0,592649344
	2	0,20315149	0,19333805	-0,257025464	0,112196437	-0,031083956	0,01356873
	3	0,40616001	0,56364505	0,390738189	0,574443525	0,047254807	0,069471628
	4	1,8189851	1,3970062	-2,187091137	-0,690626873	0,264500818	-0,083522524
Total			1,029363686	4,896482354			
Sudut 40 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	5,3520984	1,0447502	2,639937452	4,771497722	0,319266812	0,577051879
	2	1,1009819	0,48349698	0,532615198	1,078077699	0,064413025	0,130379767
	3	1,6749756	1,879757	-0,363323842	2,49139026	-0,043939391	0,301301921
	4	1,9010046	0,050532906	-1,488735936	1,183231751	0,180043651	0,14309681
Total			1,320492873	9,524197431			
Sudut 60 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	4,5715943	2,5949816	1,711796812	4,533117138	0,207020023	0,548222783
	2	1,7471894	0,25611382	1,385053496	1,095395774	0,16750458	0,132474168
	3	1,8153958	3,7689478	-0,312295019	4,17170244	-0,037768105	0,504514278
	4	3,0154224	2,3129803	0,495388498	3,767922552	0,059910929	0,455682244
Total			3,279943786	13,5681379			

Tabel A.2 Data hasil perhitungan gaya *drag* dan gaya *lift* turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 5 \text{ m/s}$

	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	Sudut 0 Derajat	1	3,2933174	2,2787001	3,2933174	2,2787001	0,573530105
2		1,6655962	2,4669773	1,6655962	2,4669773	0,290063012	0,429623258
3		0,98490656	0,29646734	0,98490656	0,29646734	0,171521142	0,051629686
4		1,0003145	2,6242986	-1,0003145	2,6242986	0,17420443	0,457020709
Total				4,94350566	7,66644334		
Sudut 20 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	3,929959	0,84611793	2,139215916	3,403564097	0,372543724	0,59272953
	2	0,14067357	0,13013202	-0,176697688	0,074170904	-0,030771842	0,012916838
	3	0,28338725	0,38898463	0,268601839	0,399337487	0,046776919	0,069544487
	4	1,2647355	0,96395136	-1,518153399	-0,473252963	0,264385898	-0,082416843
Total			0,712966667	3,403819525			
Sudut 40 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	3,7174297	0,72504255	1,834102935	3,313764732	0,319408402	0,577091001
	2	0,7641208	0,33910409	0,367378585	0,750936186	0,063978856	0,130775281
	3	1,1681904	1,2994137	-0,244510329	1,730132791	-0,042581391	0,301302037
	4	1,3187066	0,035351203	-1,032911178	0,820567671	0,17988113	0,142901581
Total			0,924060012	6,61540138			
Sudut 60 Derajat	Blade	F _x	F _y	FD	FL	CD	CL
	1	3,1696583	1,7966265	1,189080419	3,14075334	0,207077951	0,546961126
	2	1,221669	0,18909632	0,963448229	0,774596717	0,167784181	0,134895755
	3	1,2886977	2,5897467	-0,178828404	2,887135282	-0,031142906	0,502793627
	4	2,0795307	1,5948124	0,341382703	2,598332614	0,059451682	0,452498741
Total			2,315082947	9,400817953			

Tabel A.3 Data hasil perhitungan gaya *drag* dan gaya *lift* turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 4 \text{ m/s}$

	Blade	Fx	Fy	FD	FL	CD	CL
	Sudut 0 Derajat	1	2,1105358	1,4510741	2,1105358	1,4510741	0,574295456
2		1,0591963	1,574526	1,0591963	1,574526	0,28821668	0,428442449
3		0,62658894	0,18569784	0,62658894	0,18569784	0,170500392	0,050530024
4		0,64186697	1,6562156	-0,64186697	1,6562156	0,174657679	0,450670912
Total				3,15445407	4,86751354		
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	CD	CL
	Sudut 20 Derajat	1	2,5179468	0,53841698	1,367134988	2,181946575	0,372009521
2		0,090206819	0,080149171	-0,112179313	0,044463035	-0,030524983	0,012098785
3		0,1812134	0,24567483	0,168880192	0,254310635	0,045953794	0,069200173
4		0,81138121	0,60847292	-0,970558931	-0,294268795	0,264097668	-0,080073142
Total				0,453276936	2,18645145		
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	CD	CL
	Sudut 40 Derajat	1	2,3781651	0,4626316	1,174258694	2,11915402	0,319526175
2		0,4894765	0,21994956	0,233579901	0,483120568	0,063559157	0,131461379
3		0,75304868	0,82679599	-0,149312113	1,108322975	-0,040629146	0,301584483
4		0,84217298	0,023773331	-0,660423134	0,523126929	0,179706975	0,142347464
Total				0,598103348	4,233724491		
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	CD	CL
	Sudut 60 Derajat	1	2,023419	1,1458833	0,759968209	2,004073548	0,20679407
2		0,079016065	0,12787281	0,004493515	0,150249134	0,168806202	0,137638484
3		0,84633148	1,638941	-0,086525938	1,842530281	-0,023544473	0,501368784
4		1,3170485	1,0077745	0,214234068	1,644484709	0,058294985	0,447478832
Total				0,892169854	5,641337672		

B. Data Hasil Perhitungan Torsi Statis pada Turbin Angin Lenz 2 Dengan Variasi Diameter Turbin 300 mm Pada Kecepatan Angin 4 m/s; 5 m/s; dan 6 m/s

Tabel B.1 Data hasil perhitungan turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 6 \text{ m/s}$

	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 0 Derajat	1	4,7365734	3,2946803	4,7365734	3,2946803
2		2,4069338	3,5570717	2,4069338	3,5570717	0,36104007
3		1,4236239	0,43359203	1,4236239	0,43359203	0,065038805
4		1,4376265	3,8154202	-1,4376265	3,8154202	-0,215643975
Total				7,1295046	11,10076423	0,704636945
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 20 Derajat	1	5,6592947	1,2207708	3,082742097	4,900469264
2		0,20315149	0,19333805	-0,257025464	0,112196437	-0,03855382
3		0,40616001	0,56364505	0,390738189	0,574443525	0,058610728
4		1,8189851	1,3970062	-2,187091137	-0,690626873	-0,32806367
Total				1,029363686	4,896482354	0,154404553
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 40 Derajat	1	5,3520984	1,0447502	2,639937452	4,771497722
2		1,1009819	0,48349698	0,532615198	1,078077699	0,07989228
3		1,6749756	1,879757	-0,363323842	2,49139026	-0,054498576
4		1,9010046	0,050532906	-1,488735936	1,183231751	-0,22331039
Total				1,320492873	9,524197431	0,198073931
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 60 Derajat	1	4,5715943	2,5949816	1,711796812	4,533117138
2		1,7471894	0,25611382	1,385053496	1,095395774	0,207758024
3		1,8153958	3,7689478	-0,312295019	4,17170244	-0,046844253
4		3,0154224	2,3129803	0,495388498	3,767922552	0,074308275
Total				3,279943786	13,5681379	0,491991568

Tabel B.2 Data hasil perhitungan torsi statis turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 5$ m/s

	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 0 Derajat	1	3,2933174	2,2787001	3,2933174	2,2787001
2		1,6655962	2,4669773	1,6655962	2,4669773	0,24983943
3		0,98490656	0,29646734	0,98490656	0,29646734	0,044470101
4		1,0003145	2,6242986	-1,0003145	2,6242986	-0,150047175
Total				4,94350566	7,66644334	0,486067371
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 20 Derajat	1	3,929959	0,84611793	2,139215916	3,403564097
2		0,14067357	0,13013202	-0,176697688	0,074170904	-0,026504653
3		0,28338725	0,38898463	0,268601839	0,399337487	0,040290276
4		1,2647355	0,96395136	-1,518153399	-0,473252963	-0,22772301
Total				0,712966667	3,403819525	0,106945
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 40 Derajat	1	3,7174297	0,72504255	1,834102935	3,313764732
2		0,7641208	0,33910409	0,367378585	0,750936186	0,055106788
3		1,1681904	1,2994137	-0,244510329	1,730132791	-0,036676549
4		1,3187066	0,035351203	-1,032911178	0,820567671	-0,154936677
Total				0,924060012	6,61540138	0,138609002
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 60 Derajat	1	3,1696583	1,7966265	1,189080419	3,14075334
2		1,221669	0,18909632	0,963448229	0,774596717	0,144517234
3		1,2886977	2,5897467	-0,178828404	2,887135282	-0,026824261
4		2,0795307	1,5948124	0,341382703	2,598332614	0,051207405
Total				2,315082947	9,400817953	0,347262442

Tabel B.3 Data hasil perhitungan torsi statis turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 4$ m/s

	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 0 Derajat	1	2,1105358	1,4510741	2,1105358	1,4510741
2		1,0591963	1,574526	1,0591963	1,574526	0,158879445
3		0,62658894	0,18569784	0,62658894	0,18569784	0,027854676
4		0,64186697	1,6562156	-0,64186697	1,6562156	-0,096280046
Total				3,15445407	4,86751354	0,308115191
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 20 Derajat	1	2,5179468	0,53841698	1,367134988	2,181946575
2		0,090206819	0,080149171	-0,112179313	0,044463035	-0,016826897
3		0,1812134	0,24567483	0,168880192	0,254310635	0,025332029
4		0,81138121	0,60847292	-0,970558931	-0,294268795	-0,14558384
Total				0,453276936	2,18645145	0,06799154
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 40 Derajat	1	2,3781651	0,4626316	1,174258694	2,11915402
2		0,4894765	0,21994956	0,233579901	0,483120568	0,035036985
3		0,75304868	0,82679599	-0,149312113	1,108322975	-0,022396817
4		0,84217298	0,023773331	-0,660423134	0,523126929	-0,09906347
Total				0,598103348	4,233724491	0,089715502
	Blade	Fx	Fy	FD	FL	Torsi Statis
	Sudut 60 Derajat	1	2,023419	1,1458833	0,759968209	2,004073548
2		0,079016065	0,12787281	0,004493515	0,150249134	0,000674027
3		0,84633148	1,638941	-0,086525938	1,842530281	-0,012978891
4		1,3170485	1,0077745	0,214234068	1,644484709	0,03213511
Total				0,892169854	5,641337672	0,133825478

C. Data Hasil Perhitungan Koefisien Torsi Statis pada Turbin Angin Lenz 2 Dengan Variasi Diameter Turbin 300 mm Pada Kecepatan Angin 6m/s

Tabel C.1 Data hasil perhitungan koefisien torsi statis turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 6$ m/s

Sudut Putar	Torsi Statis	CTS	CTS eksperimen
0	0,704636945	0,568112427	0,171199024
20	0,154404553	0,124488428	0,089174922
40	0,198073931	0,159696795	0,062254191
60	0,491991568	0,396667427	0,072770101

Tabel C.2 Data hasil perhitungan koefisien torsi statis turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 5$ m/s

Sudut	Torsi Statis	CTS
0	0,486067371	0,564323116
20	0,106945	0,124162903
40	0,138609002	0,160924737
60	0,347262442	0,403170908

Tabel C.3 Data hasil perhitungan koefisien torsi statis turbin angin Lenz 2 4 *blade* dengan diameter turbin 300 mm pada $V = 4$ m/s

Sudut	Torsi Statis	CTS
0	0,390911886	0,558939121
20	0,06799154	0,123340663
40	0,089715502	0,16274921
60	0,226205869	0,410350784

BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Abellio Dhira Ryandi, dilahirkan di Grobogan, 13 Juni 2000. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari Bapak Baik Benyamin dan Ibu Mardiana Ginting. Penulis telah menempuh Pendidikan formal yaitu di TK Trisula Perwari 1 Purwodadi pada tahun 2004 - 2006, SD Kristen 1 Purwodadi pada tahun 2006 - 2012, SMPN 3 Purwodadi pada tahun 2012 - 2015, dan SMAN 1 Purwodadi pada tahun 2015 – 2018 . Setelah lulus dari SMAN 1 Purwodadi tahun 2018, Penulis melanjutkan pendidikan di jurusan Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP. 02111840000151.

Dalam proses menuntut ilmu di di Jurusan Teknik Mesin ini Penulis mengambil bidang studi Konversi Energi. Penulis sempat aktif di Persekutuan Mahasiswa Kristen ITS sebagai staff logistik pada tahun 2019. Dan penulis juga pernah menjadi asisten praktikum 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 abellsdhira@gmail.com.