

TUGAS AKHIR - TM184835

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

MUHAMMAD RIONALDI DWI PUTRA

NRP 02111840000037

Dosen Pembimbing

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

NIP 196709151995121001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

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

MUHAMMAD RIONALDI DWI PUTRA

NRP 02111840000037

Dosen Pembimbing

Nur Ikhwan S.T., M.Eng.

NIP 196709151995121001

Program Studi Sarjana

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 3, BLADE CHORD LENGTH 180
mm AND TURBINE DIAMETER 400 mm**

MUHAMMAD RIONALDI DWI PUTRA

NRP 02111840000037

Advisor

Nur Ikhwan S.T., M.Eng.

NIP 196709151995121001

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA
KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI dan *BLADE* STATIS UNTUK
JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm dan DIAMETER
TURBIN 400 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

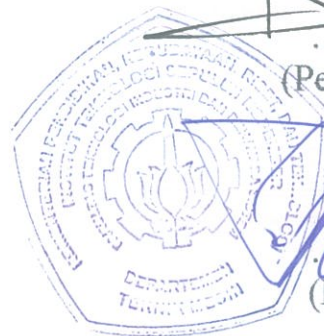
Oleh : **MUHAMMAD RIONALDI DWI PUTRA**
NRP. 0211184000037

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

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

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

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



[Signature]
.....
(Pembimbing)

[Signature]
.....
(Penguji I)

[Signature]
.....
(Penguji II)

SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

**NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE
PERFORMANCE AT TWO DIMENSIONAL FLOW AND STATIC
BLADE CONDITION FOR NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD
LENGTH 180 mm AND TURBINE DIAMETER 400 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 System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


By : **MUHAMMAD RIONALDI DWI PUTRA**
NRP. 02111840000037

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. Ing. Herman Sasongko
NIP. 196010041986011001


(Examiner II)

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Rionaldi Dwi Putra / 0211184000037

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Nur Ikhwan, S.T., M.Eng / 196709151995121001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI dan *BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm dan DIAMETER TURBIN 400 mm” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

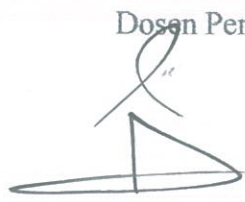
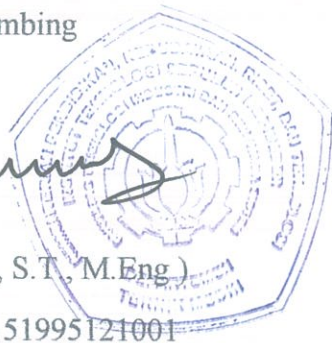
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2022

Mengetahui,

Dosen Pembimbing

Mahasiswa

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

NIP. 196709151995121001



(Muhammad Rionaldi Dwi Putra)

NRP. 0211184000037

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Muhammad Rionaldi Dwi Putra / 0211184000037
Departement : Mechanical Engineering
Advisor / NIP : Nur Ikhwan, S.T., M.Eng / 196709151995121001

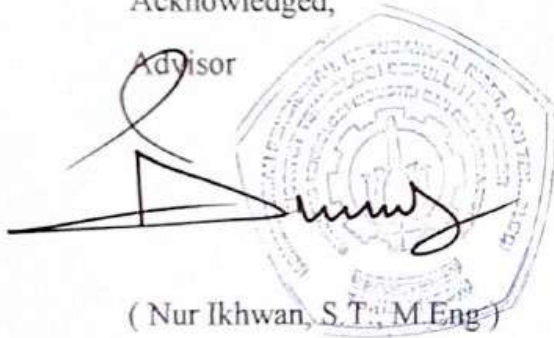
hereby declare that the Final Project with the title of "NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE PERFORMANCE AT TWO DIMENSIONAL FLOW AND STATIC BLADE CONDITION FOR NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD LENGTH 180 mm AND TURBINE DIAMETER 400 mm" is the result of my own work, is original, and is written by 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



(Muhammad Rionaldi Dwi Putra)

NRP. 0211184000037

STUDI NUMERIK PERFORMA TURBIN ANGIN TIPE LENZ 2 PADA KONDISI ALIRAN DUA DIMENSI DAN *BLADE* STATIS UNTUK JUMLAH *BLADE* 3, *BLADE CHORD LENGTH* 180 mm DAN DIAMETER TURBIN 400 mm

Nama Mahasiswa : Muhammad Rionaldi Dwi Putra
NRP : 0211184000037
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Nur Ikhwan, ST, M.Eng

Abstrak

Kegiatan manusia sering dikaitkan dengan penggunaan listrik yang kian hari meningkat akibat peningkatan jumlah penduduk setiap tahunnya. Disatu sisi, keadaan sumber daya masih bergantung pada sumber daya tak terbarukan yang jumlahnya relatif terbatas. Berdasarkan Capaian Kinerja Sektor ESDM 2021 & Rencana 2022, penggunaan listrik di Indonesia pada 2021 mengalami peningkatan yang signifikan sebesar 0,034 MW dari 2020 dengan persentase sumber energi listrik sebesar 86,46 persen untuk energi tak terbarukan dan diperkirakan akan habis untuk sumber minyak bumi dalam sembilan tahun lagi, gas bumi akan habis 22 tahun kedepan, dan batubara akan habis 65 tahun mendatang. Problematika tersebut berdampak pada kompleksnya kelangkaan energi. Maka dari itu, diperlukan sumber energi alternatif dengan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Berdasarkan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) 2021, total potensi energi terbarukan Indonesia mencapai 421.384 MW, salah satunya adalah tenaga angin dengan potensinya sebesar 60.647 MW. Dengan demikian, Indonesia dapat memanfaatkan sumber tenaga angin melalui inovasi turbin angin. Salah satu tipe yang tepat yakni turbin angin vertikal tipe Lenz 2, mengingat kondisi angin di Indonesia memiliki kecepatan berkisar 3 – 6 m/s, maka tergolong sesuai digunakan di kecepatan angin yang rendah. Selain itu desain turbin termasuk praktis sehingga memuat biaya yang tidak terlalu tinggi serta perawatannya yang mudah.

Penelitian ini menggunakan metode analisa numerik dua dimensi dengan *software* ANSYS Fluent 19.2. Tahapan yang digunakan yakni *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan model turbulensi *standard k-ε* dengan *static domain*. *Boundary condition* yang digunakan untuk *inlet* adalah *velocity inlet*, *outlet* menggunakan *pressure outlet*, *sym* menggunakan *symmetry* dan *blades* turbin adalah *wall*.

Penelitian ini didapatkan hasil berupa perubahan variasi kecepatan angin yang semakin besar terbukti dapat meningkatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* serta torsi statis dari turbin angin tipe Lenz 2 dengan nilai tertinggi pada kecepatan angin sebesar 6 m/s, dimana nilai torsi statis tertinggi sebesar 1,262 Nm. Adapun hasil nilai koefisien torsi statis hasil simulasi akan memiliki *trend* yang relatif serupa dengan koefisien torsi statis hasil eksperimen, namun nilai untuk hasil simulasi akan lebih besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Kata kunci : Gaya *Drag & Lift*, Kecepatan Angin, Koefisien Torsi Statis, Sudut Putar Turbin, Turbin Angin Lenz 2

**NUMERICAL STUDY OF LENZ 2 TYPE WIND TURBINE
PERFORMANCE AT TWO DIMENSIONAL FLOW AND STATIC
BLADE CONDITION FOR NUMBER OF BLADE 3, BLADE CHORD
LENGTH 180 mm AND TURBINE DIAMETER 400 mm**

Student Name : Muhammad Rionaldi Dwi Putra
NRP : 0211184000037
Department : Mechanical Engineering FTIRS-ITS
Advisor : Nur Ikhwan, ST, M.Eng

Abstract

Human activities are often associated with the use of electricity, which is increasing day by day due to the increase in population every year. On the one hand, the state of resources is still dependent on non-renewable resources, which are relatively limited in number. Based on the Performance Achievement of the ESDM Sector 2021 and the 2022 Plan, the use of electricity in Indonesia in 2021 will experience a significant increase of 0.034 MW from 2020 with a percentage of electrical energy sources of 86.46 percent for non-renewable energy, and it's estimated to be used up for petroleum sources in nine years, natural gas will run out in 22 years, and coal will run out in 65 years. These problems have an impact on the complexity of energy scarcity. Therefore, alternative energy sources are needed with the use of new renewable energy (EBT). Based on the Agency for the Assessment and Application of Technology (BPPT) 2021, Indonesia's total renewable energy potential reaches 421,384 MW, one of them is wind power with a potential of 60,647 MW. Thus, Indonesia can take advantage of the wind power source with the innovation of wind turbine drive. One of the right types is the Lenz 2 type vertical wind turbine, considering the wind conditions in Indonesia, which have speeds ranging from 3 to 6 m/s, it is classified as suitable for use at low wind speeds. In addition, the turbine design is practical so that the costs are not too high and the maintenance is easy.

This study uses a two dimensional numerical analysis method with ANSYS Fluent 19.2 software. The stages used are pre-processing, processing, and post-processing. This research was conducted using the standard k-ε turbulence model with a static domain. The boundary conditions used for inlet are velocity inlet, outlet using pressure outlet, sym using symmetry, and turbine blades using wall.

This study obtained results in the form of changes in wind speed that are increasingly proven to increase the value of the drag force and lift force as well as static torque from the Lenz 2 type wind turbine, with the highest value at wind speed of 6 m/s, where the highest static torque value is 1.262 Nm. The results of the coefficient of static torque simulation results will have a relatively similar trend to the coefficient of static torque experimental results, but the value for the simulation results will be greater when compared to the experimental results.

Keywords : Drag & Lift Force, Lenz 2 Wind Turbine, Static Torque Coefficient, Turbine Turning Angle, Wind Velocity

KATA PENGANTAR

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

1. Kedua orang tua penulis yang selalu mendoakan serta memfasilitasi penulis yaitu Bapak Taufiqurrahman dan Ibu Anita Mutiarsih serta Kak Yoga dan Uti selaku saudara yang selalu mendukung penulis.
2. Bapak Nur Ikhwan, S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing dalam tugas akhir yang senantiasa telah memberikan saran, masukan dan arahan yang sangat bermanfaat kepada penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D, Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T.,M.T dan Bapak Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko selaku dosen penguji tugas akhir yang senantiasa memberikan saran dan masukan guna membuat penelitian tugas akhir ini menjadi lebih baik lagi dan bermanfaat kedepannya.
4. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T.,M.T, selaku dosen wali yang selalu membimbing dan memberi masukan kepada penulis dalam proses perkuliahan.
5. Kelompok seperbimbingan tugas akhir penulis antara lain Abel, Faiz dan Qadri yang selalu bersama dalam proses pengerjaan tugas akhir.
6. Kerabat terdekat penulis yang selalu mendukung saat suka atau duka selama perkuliahan antara lain Iqbal, Dipa, Bella, Cheri, Dimas, Murthi, Apin, Fadel, Dika, dll.
7. Teman-teman seperjuangan tugas akhir dari Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida yang telah membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
8. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat selama penulis berkuliah disini.
9. Teman seangkatan M61 yang telah memberikan pengalaman sangat berharga kepada penulis selama menjalani proses perkuliahan.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu oleh penulis.

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

Surabaya, 21 Juli 2022



Muhammad Rionaldi Dwi Putra

DAFTAR ISI

| | |
|--------------------------------------------------------|------|
| LEMBAR PENGESAHAN | i |
| APPROVAL SHEET | ii |
| PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| STATEMENT OF ORIGINALITY | iv |
| Abstrak | v |
| <i>Abstract</i> | vi |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR SIMBOL | xv |
| BAB I | 1 |
| 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 | 5 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Turbin angin | 5 |
| 2.1.1 <i>Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)</i> | 5 |
| 2.1.2 <i>Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)</i> | 6 |
| 2.2 Turbin Angin Tipe Darrieus | 7 |
| 2.3 Turbin Angin Tipe Savonius | 8 |
| 2.4 Turbin Angin Tipe Lenz 2 | 8 |
| 2.5 Konsep Gaya <i>Drag</i> dan Gaya <i>Lift</i> | 9 |
| 2.6 Bilangan Reynolds | 10 |
| 2.7 Pemodelan Turbulensi | 11 |
| 2.7.1 <i>k-ε Models</i> | 11 |
| 2.7.2 <i>k-ω Models</i> | 11 |
| 2.8 <i>Solidity</i> | 12 |
| 2.9 Torsi Statis | 12 |
| 2.10 <i>Aspect Ratio (AR)</i> | 12 |

| | | |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.11 | <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> | 13 |
| 2.12 | Penelitian Terdahulu | 13 |
| 2.12.1 | <i>Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine (Abu-El-Yazied et al, 2015)</i> | 13 |
| 2.12.2 | Penelitian Numerik Turbin Angin Darrieus dengan Variasi Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 16 |
| 2.12.3 | <i>Numerical Simulation and Wind Tunnel Investigation on Static Characteristics of VAWT Rotor Starter with Lift - Drag Combined Structure (Feng et al, 2021)</i> | 21 |
| METODOLOGI PENELITIAN | | 26 |
| 3.1 | Tahapan Simulasi | 26 |
| 3.2 | Tahap <i>Pre-Processing</i> | 26 |
| 3.2.1 | Pembuatan Geometri | 26 |
| 3.2.2 | Penentuan <i>Boundary Condition</i> | 27 |
| 3.2.3 | Pembuatan <i>Meshing</i> | 27 |
| 3.3 | Tahap <i>Processing</i> | 28 |
| 3.4 | Tahap <i>Post Processing</i> | 29 |
| 3.5 | Data Hasil Simulasi..... | 29 |
| 3.5.1 | <i>Free Body Diagram</i> Vektor Gaya | 29 |
| 3.6 | <i>Grid Independency Test</i> | 30 |
| 3.7 | Diagram Alir | 31 |
| 3.7.1 | Diagram Alir Penelitian | 31 |
| 3.7.2 | Diagram Alir Simulasi | 33 |
| BAB IV | | 35 |
| ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN..... | | 35 |
| 4.1 | Contoh Perhitungan | 35 |
| 4.1.1 | Perhitungan Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> | 35 |
| 4.1.2 | Perhitungan Torsi Statis | 36 |
| 4.1.3 | Perhitungan Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> | 36 |
| 4.1.4 | Perhitungan Koefisien Torsi Statis | 37 |
| 4.2 | Analisa Validasi Data Hasil Simulasi dan Eksperimen..... | 38 |
| 4.3 | Analisa Interaksi Aliran Terhadap Sudut Putar Turbin pada Setiap Variasi Kecepatan Angin | 39 |
| 4.3.1 | Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada Kecepatan Angin 4 m/s | 39 |
| 4.3.2 | Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada Kecepatan Angin 5 m/s | 42 |

| | | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.3 | Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada Kecepatan Angin 6 m/s | 44 |
| 4.4 | Analisa Nilai Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> di Tiap Posisi <i>Blade</i> pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin..... | 47 |
| 4.4.1 | Analisa Nilai Koefisien serta Gaya <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> di Posisi <i>Blade</i> 1 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin | 47 |
| 4.4.2 | Analisa Nilai Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> di Posisi <i>Blade</i> 2 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin..... | 51 |
| 4.4.3 | Analisa Nilai Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> di Posisi <i>Blade</i> 3 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin..... | 52 |
| 4.5 | Analisa Perbandingan Nilai Torsi Statis di Setiap <i>Blade</i> pada Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin | 54 |
| 4.6 | Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis serta Torsi Statis di Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin | 56 |
| 4.7 | Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis dan Gaya <i>Lift</i> di Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin..... | 58 |
| BAB V | | 59 |
| KESIMPULAN DAN SARAN | | 59 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 59 |
| 5.2 | Saran | 59 |
| DAFTAR PUSTAKA | | 60 |
| LAMPIRAN | | 61 |
| BIODATA PENULIS | | 65 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Instalasi turbin angin (Manwell et al, 2009) | 5 |
| Gambar 2. 2 Komponen pada Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) (Manwell et al, 2009) | 6 |
| Gambar 2. 3 Tipe Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) (Óskarsdóttir, 2014) | 6 |
| Gambar 2. 4 Contoh turbin angin tipe Darrieus (a) tipe Giromill (Straight Blade) dan (b) tipe Eggbeater (Curved Blade) (Bhutta et al, 2012)..... | 7 |
| Gambar 2. 5 Contoh turbin angin tipe Savonius (a) tipe sudu turbin Savonius U (b) tipe sudu turbin Savonius L (Bahri W et al, 2014)..... | 8 |
| Gambar 2. 6 Desain profil turbin angin tipe Lenz 2 (Zwierzchowski et al, 2017)..... | 9 |
| Gambar 2. 7 Skema turbin angin tipe Lenz 2 (a) dua dimensi (b) tiga dimensi | 10 |
| Gambar 2. 8 Tampilan boundary condition dan geometri turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015)..... | 14 |
| Gambar 2. 9 Tampilan meshing turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015)..... | 14 |
| Gambar 2. 10 Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas dengan nilai chord length 85,8 mm (Abu-El-Yazied et al, 2015)..... | 15 |
| Gambar 2. 11 Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas dengan nilai chord length 170 mm (Abu-El-Yazied et al, 2015)..... | 15 |
| Gambar 2. 12 Grafik perbandingan model koefisien daya maksimum terhadap jumlah blade dengan nilai solidity yang sama (Abu-El-Yazied et al, 2015) | 16 |
| Gambar 2. 13 Tampilan tahap geometri pre-processing (a) static domain (b) rotating domain (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 17 |
| Gambar 2. 14 Tampilan tahap mesh processing (a) mesh static domain (b) mesh rotating domain (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 17 |
| Gambar 2. 15 Tampilan tahap boundary condition post-processing (a) static domain (b) rotating domain (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 17 |
| Gambar 2. 16 Tampilan kontur kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga blade dengan sudut putar turbin 90° (b) empat blade dengan sudut putar turbin 0° | 18 |
| Gambar 2. 17 Tampilan kontur kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga blade dengan kecepatan angin 15 m/s (b) empat blade dengan kecepatan angin 15 m/s (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 19 |
| Gambar 2. 18 Tampilan kontur tekanan turbin angin tipe Darrieus (a) tiga blade dengan kecepatan angin 15 m/s (b) empat blade dengan kecepatan angin 15 m/s | 20 |
| Gambar 2. 19 Grafik torsi turbin angin tipe Darrieus tiga blade (a) terhadap sudut putar dengan blade 1, 2, 3 pada kecepatan 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan tertentu (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 20 |
| Gambar 2. 20 Grafik torsi turbin angin tipe Darrieus empat blade (a) terhadap sudut putar dengan blade 1, 2, 3 pada kecepatan 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan tertentu (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 20 |
| Gambar 2. 21 Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin tipe Darrieus tiga blade dan empat blade (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)..... | 21 |
| Gambar 2. 22 Tampilan geometri turbin (a) struktural 3D (b) geometri 2D berdasarkan sudut putar blade (Feng et al, 2021) | 22 |
| Gambar 2. 23 Domain simulasi (Feng et al, 2021) | 22 |
| Gambar 2. 24 Meshing pada blade LDCS (Feng et al, 2021)..... | 22 |
| Gambar 2. 25 Grafik grid independency test pada penelitian untuk sudut putar 20° (Feng et al, 2021)..... | 23 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 26 Tampilan kontur kecepatan pada LDCS tiga blade (a) sudut putar 30° (b) sudut putar 100° (Feng et al, 2021) | 23 |
| Gambar 2. 27 Grafik perbandingan nilai C_{TS} terhadap sudut putar blade pada setiap variasi blade (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s (Feng et al, 2021)..... | 24 |
| Gambar 2. 28 Grafik perbandingan nilai C_{TS} terhadap sudut putar blade dengan jumlah blade tiga untuk hasil eksperimen dan simulasi (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s (Feng et al, 2021)..... | 24 |
| Gambar 3. 1 Variasi turbin angin tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 27 |
| Gambar 3. 2 Boundary condition simulasi turbin angin tipe Lenz 2 (a) domain keseluruhan (b) domain wall | 27 |
| Gambar 3. 3 Detail hasil meshing turbin angin tipe Lenz 2 (a) meshing keseluruhan (b) meshing sekitar rotor (c) meshing dekat blade | 28 |
| Gambar 3. 4 Free Body Diagram vektor gaya (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 30 |
| Gambar 3. 5 Grafik perbandingan antara jumlah cell mesh terhadap torsi statis | 31 |
| Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian..... | 33 |
| Gambar 3. 7 Diagram alir simulasi | 34 |
| Gambar 4. 1 Free Body Diagram vektor gaya pada sudut putar turbin 180° | 35 |
| Gambar 4. 2 Grafik perbandingan koefisien torsi statis simulasi dan eksperimen pada setiap variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin 6 m/s..... | 38 |
| Gambar 4. 3 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 39 |
| Gambar 4. 4 Tampilan vektor kecepatan pada kecepatan 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 41 |
| Gambar 4. 5 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 42 |
| Gambar 4. 6 Tampilan vektor kecepatan pada kecepatan 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 44 |
| Gambar 4. 7 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 45 |
| Gambar 4. 8 Tampilan vektor kecepatan pada kecepatan 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280° | 46 |
| Gambar 4. 9 Grafik nilai koefisien drag di posisi blade 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 47 |
| Gambar 4. 10 Grafik nilai gaya drag di posisi blade 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 48 |
| Gambar 4. 11 Grafik nilai koefisien lift di posisi blade 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 49 |
| Gambar 4. 12 Grafik nilai gaya lift di posisi blade 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 50 |
| Gambar 4. 13 Grafik nilai koefisien drag di posisi blade 2 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 51 |
| Gambar 4. 14 Grafik nilai koefisien lift di posisi blade 2 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 52 |
| Gambar 4. 15 Grafik nilai koefisien drag di posisi blade 3 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 53 |
| Gambar 4. 16 Grafik nilai koefisien lift di posisi blade 3 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 53 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4. 17 Grafik perbandingan torsi statis di setiap blade pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan variasi sudut putar turbin | 54 |
| Gambar 4. 18 Grafik perbandingan koefisien torsi statis di setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin | 56 |
| Gambar 4. 19 Grafik perbandingan torsi statis di setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin..... | 57 |
| Gambar 4. 20 Grafik perbandingan koefisien torsi statis dan koefisien bending di setiap variasi sudut putar turbin dan variasi kecepatan angin | 58 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 2. 1 Tabel perbedaan antara Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) dan Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) (Bhutta et al, 2012) | 7 |
| Tabel 2. 2 Variasi nilai koefisien drag (Pritchard, 2011)..... | 9 |
| Tabel 2. 3 Parameter turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015) | 13 |
| Tabel 2. 4 Detail hasil simulasi pada model uji (Abu-El-Yazied et al, 2015)..... | 15 |
| Tabel 2. 5 Detail nilai putaran turbin dan tip speed ratio pada setiap kecepatan angin (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017) | 17 |
| Tabel 2. 6 Detail parameter penelitian LDCS (Feng et al, 2021) | 21 |
| Tabel 3. 1 Ukuran geometri turbin angin tipe Lenz 2 skala simulasi | 26 |
| Tabel 3. 2 Detail input parameter simulasi | 28 |
| Tabel 3. 3 Grid Independency Test pada turbin angin tipe Lenz 2..... | 30 |

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 turbin angin ($^\circ$) |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kegiatan manusia sering dikaitkan dengan penggunaan listrik yang kian hari meningkat akibat jumlah penduduk yang terus naik dari tahun ke tahun, khususnya di Indonesia. Di satu sisi, keadaan sumber daya yang dimiliki masih bergantung pada sumber daya tak terbarukan yang jumlahnya relatif terbatas. Berdasarkan Capaian Kinerja Sektor ESDM 2021 & Rencana 2022 dan Ditjen Dukcapil Kemendagri, pada akhir tahun 2020 penggunaan listrik di Indonesia mengalami nilai konsumsi listrik per kapita sebesar 1,089 MW dengan jumlah penduduk sebanyak 270.203.917 jiwa. Sedangkan hingga akhir tahun 2021 nilai konsumsi listrik per kapita di Indonesia sebesar 1,123 MW dengan jumlah penduduk sebanyak 273.879.750 jiwa. Hal ini terdapat peningkatan yang sangat signifikan sebesar 0,034 MW. Penggunaan listrik yang berkepanjangan hingga tahun 2020, melibatkan kapasitas nyata yang terpatok pada pembangkit tenaga listrik di Indonesia mencapai 72.800 MW. Sedangkan pada tahun 2021 meningkat sebesar 74.000 MW, maka kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik nasional mengalami kenaikan sebesar 1.200 MW, dengan data persentase spesifik sumber daya energi listrik sebesar 86,46 persen untuk energi yang tak terbarukan dan 13,54 persen untuk energi yang terbarukan. Sementara itu pemerintah menargetkan persentase untuk energi terbarukan pada tahun 2025 mencapai 23 persen, dimana pemerintah perlu meningkatkan kisaran persentase tersebut selama kurang lebih 10 persen dalam waktu 4 tahun per 2021.

Dari kondisi tersebut terlihat bahwa energi listrik yang selalu bergantung pada peningkatan penyediaan tenaga listrik tidak akan memecahkan masalah pada isu lingkungan dan iklim Indonesia tanpa adanya solusi alternatif. Seiring bertambahnya penduduk Indonesia, maka kebutuhan tenaga listrik akan semakin tinggi dan energi tak terbarukan yang akan habis dipakai secara terus menerus. Cadangan energi tak terbarukan akan terus menurun setiap tahun bersamaan dengan konsumsi energi yang semakin meningkat, dengan detail perkiraan akan habis untuk sumber minyak bumi dalam sembilan tahun lagi, gas bumi akan habis 22 tahun kedepan, dan batubara akan habis 65 tahun mendatang. Problematika tersebut berdampak pada kompleksnya kelangkaan energi hingga berakhir ke perubahan iklim dunia. Maka diperlukan sumber alternatif untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik dengan pemanfaatan energi terbarukan yang melimpah di alam, tidak akan habis, dan ramah lingkungan.

Pada dasarnya Indonesia sendiri memiliki potensi yang melimpah dalam hal energi terbarukan. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) 2021 bahwa total potensi energi terbarukan Indonesia mencapai 421.384 MW. Dengan kedudukan yang paling tinggi berasal dari tenaga surya yakni sebesar 207.898 MW, lalu diikuti tenaga hidro atau air sebesar 75.000 MW, tenaga bayu atau angin 60.647 MW, bionergi 32.654 MW, panas bumi 25.800 MW dan yang paling rendah yakni tenaga minihidro sebesar 19.385 MW. Dari data diatas salah satu pemanfaatan sumber daya alam yang dapat dilihat berpotensi kedepannya adalah dengan pembangkit listrik tenaga bayu atau angin (PLTB) sebesar 60.647 MW, namun kapasitas energi yang baru terpasang di Indonesia sekitar 147 MW dengan perincian 75 MW di PLTB Sidrap dan 72 MW di PLTB Tolo. Menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dalam letak geografis Indonesia berada di garis khatulistiwa dengan karakteristik kecepatan angin yang dimiliki berkisar 3 - 6 m/s, dimana angka ini ideal digunakan pada skala perumahan di dataran rendah. Oleh karena itu, diperlukan performa PLTB dengan bentuk pengaplikasian di turbin angin yang sesuai dengan kondisi di Indonesia dan diharapkan menjadi solusi berkepanjangan dan komersil kedepannya, salah satu opsi jenis turbin angin yang cocok digunakan adalah turbin angin tipe Lenz 2.

Turbin angin tipe Lenz 2 sendiri adalah turbin angin yang tergolong jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) yang berarti tidak perlu diarahkan sesuai dengan arah datangnya angin. Kriteria pada turbin angin ini sama dengan turbin angin tipe VAWT lainnya dimana memiliki desain yang praktis sehingga memuat biaya yang tidak terlalu tinggi, bisa diaplikasikan pada daerah yang memiliki kecepatan angin yang rendah dan perawatannya yang mudah. Seorang peneliti selaku pembuat dari turbin angin tipe ini yang bernama **Edwin Lenz (2007)** beropini bahwa jika dilihat dari kemampuannya turbin yang sudah ada terdapat permasalahan pada *airfoil*-nya, dimana turbin Savonius dengan efisiensinya yang tidak terlalu baik dan turbin angin Darrieus dengan kemampuan *self-starting*. Maka dari itu Edwin Lenz menawarkan sebuah turbin angin tipe Lenz 2 yang merupakan pengembangan dari konsep gaya *drag* pada turbin angin Savonius dan konsep gaya *lift* pada turbin angin Darrieus.

Selain itu, terdapat beberapa penelitian terkait dengan turbin angin VAWT ini, namun mengingat jumlah penelitian baik secara eksperimen dan simulasi yang belum banyak membahas mengenai turbin angin tipe Lenz 2 ini. Maka akan dijelaskan terkait penelitian secara simulasi CFD serupa, dengan jenis turbin angin vertikal lainnya untuk mendapatkan aspek yang mempengaruhi di dalam turbin angin tipe Lenz 2 ini. Salah satu simulasinya dilakukan oleh **Abu-El-Yazied et al (2015)**. Penelitian ini menggunakan metode simulasi CFD analisa dua dimensi dan menggunakan *software* ANSYS Fluent 14.5. Jenis turbin angin yang digunakan adalah vertikal tipe H-Darrieus dengan jenis *blade* airfoil NACA 0021. Dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja turbin angin dengan dua belas model yang digabungkan dari beberapa parameter seperti variasi jumlah *blade* berupa 2; 3; 4 dan 6 buah, variasi jumlah *blade chord length* sebesar 42,9; 64,35; 85,8; 128,7; 170; 250 dan 300 mm dan variasi nilai *solidity* sebesar 0,17; 0,25; 0,33; 0,48; 0,5; 0,66; 0,87 dan 0,99, serta kecepatan angin konstan sebesar 9 m/s dan tanpa merubah nilai *pitch angle*. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa nilai koefisien daya secara numerik turun seiring dengan meningkatnya nilai soliditas. Lalu kesimpulan lainnya didapatkan bahwa kenaikan nilai *blade chord length* dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan nilai koefisien daya pada nilai soliditas yang sama.

Penelitian selanjutnya dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani (2017)** dengan menggunakan metode analisa numerik dua dimensi melalui *software* STAR CCM+ 9.02.007-R8 yang akan disimulasikan ke model turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil* NACA 0024 yang bertujuan guna mendapatkan nilai torsi dan koefisien daya yang optimal menggunakan jumlah variasi *blade* 3 dan 4 serta variasi kecepatan angin yang menabrak *blade* sebesar 5; 7; 9; 11; 13 dan 15 m/s. Dari penelitian ini didapat kesimpulan bahwa nilai torsi tertinggi berada pada sudut putar *upstream* atau tegak lurus dengan arah aliran angin, lalu didapatkan juga semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan. Namun semakin banyak jumlah *blade* yang digunakan, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah, dimana dengan nilai koefisien daya yang berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi.

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh **Feng et al (2021)** yang bertujuan untuk mendapatkan nilai optimasi terhadap karaktersitik *starting* dari *lift-type* VAWT dengan menggunakan *lift-drag combined starter* (LDCS). Konfigurasi yang digunakan yakni *semi-elliptical drag blades* dan *lift blades* yang dilengkapi pada bagian tengah dan belakang di luar *starter*. Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik dengan *software* ANSYS Fluent 19.0 dan eksperimen uji *wind tunnel* melalui variasi kecepatan angin sebesar 6 dan 10 m/s dan variasi jumlah *blade* sejumlah 2; 3 dan 4 buah. Pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada ketiga variasi *blade* perubahan nilai C_t relatif sama pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan 10 m/s, dimana nilai C_t pada kecepatan angin 10 m/s lebih besar dibandingkan dengan pada kecepatan angin 6 m/s. Hal ini menandakan bahwa peningkatan kecepatan angin dapat meningkatkan nilai C_t pada LDCS. Lalu untuk nilai C_t pada variasi jumlah *blade* 3 memiliki

self-starting yang lebih baik dan untuk jumlah *blade* 4 mendapatkan hasil yang paling stabil jika dibandingkan dengan dua variasi lainnya serta hasil perbandingan nilai C_t pada metode eksperimen akan lebih kecil jika dibandingkan metode simulasi.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan diatas, maka dilakukan penelitian tugas akhir ini yang akan dilakukan secara simulasi menggunakan turbin angin tipe Lenz 2 dengan menggunakan *software* Gambit 2.4.6 dan ANSYS Fluent 19.2. Pada penelitian ini berfokus pada simulasi dengan menganalisa pengaruh variasi kecepatan udara sebesar (v) 4; 5; dan 6 m/s dan sudut putar turbin sebesar (θ) 0° ; 100° ; 180° dan 280° terhadap performa turbin angin tipe Lenz 2 pada cakupan torsi statis, koefisien torsi statis, gaya *drag* & gaya *lift* dan interaksi kontur aliran, yang nantinya nilai koefisien torsi statis akan dibandingkan hasilnya dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh mahasiswa teknik mesin ITS pada penelitian sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin tipe Lenz 2 adalah turbin angin yang tergolong jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan merupakan pengembangan dari konsep gaya *drag* pada turbin angin Savonius dan konsep gaya *lift* pada turbin angin Darrieus. Namun pada turbin angin tipe Darrieus dan Savonius masih memiliki kekurangan yakni kemampuan *self-start* pada tipe Darrieus, dan kemampuan efisiensi yang kurang baik pada tipe Savonius.

Pada pengaplikasiannya turbin angin tipe Lenz 2 merupakan inovasi yang tergolong baru dan belum banyak peneliti yang melakukan eksperimen atau simulasi terkait turbin angin jenis ini. Dikarenakan pada penelitian sebelumnya, mahasiswa teknik mesin ITS telah melakukan eksperimen terkait turbin angin jenis ini, maka tugas akhir ini dilakukan guna membandingkan hasil nilai eksperimen yang telah dilakukan dengan hasil simulasi menggunakan *software* ANSYS Fluent 19.2 guna mendapatkan perbandingan yang lebih baik melalui konfigurasi jumlah *blade* 3 buah, variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin berdasarkan besaran torsi statis, nilai gaya *drag* & gaya *lift* dari turbin angin tipe Lenz 2 melalui hipotesa awal sebagai berikut:

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

1.3 Batasan Masalah

Berikut merupakan batasan masalah yang digunakan pada penelitian di tugas akhir ini:

1. Analisa aliran menggunakan konsep *external flow*.
2. Simulasi menggunakan model dua dimensi dengan *software* ANSYS Fluent 19.2.
3. Aliran fluida yang mengalir berupa udara dengan kondisi *incompressible flow*, *steady flow* dan *uniform flow*.
4. Analisa dilakukan pada *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 dengan konfigurasi jumlah *blade* (N) = 3 buah, diameter turbin (D) = 400 mm, *blade diameter leading edge* (d) = 75 mm, *solidity* (σ) = 1,35 dan *chord length* (c) = 180 mm.
5. Variasi kecepatan udara yang digunakan sebesar (v) = 4; 5; dan 6 m/s.
6. Variasi sudut putar turbin angin (θ) = 0° ; 100° ; 180° dan 280° .
7. Rotor di analisa dalam keadaan statis atau diam.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan performansi dan desain terbaik melalui pengaruh perbedaan sudut putar turbin dan kecepatan angin dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) tipe Lenz 2 dalam skala simulasi. Performansi turbin angin tipe Lenz 2 dapat ditentukan melalui hal berikut:

1. Mendapatkan nilai gaya *drag* & gaya *lift* pada turbin angin tipe Lenz 2 pada hasil simulasi.
2. Membandingkan hasil koefisien torsi statis turbin angin tipe Lenz 2 hasil simulasi dengan eksperimen.
3. Menganalisa interaksi kontur aliran pada turbin angin tipe Lenz 2 berdasarkan hasil simulasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain adalah memberikan penjelasan terkait keluaran pengaruh variasi sudut putar turbin dan kecepatan angin melalui hasil torsi statis, koefisien torsi statis, gaya *drag* & gaya *lift* dan interaksi kontur aliran dari turbin angin tipe Lenz 2 yang nantinya kondisi operasi turbin ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemilihan konfigurasi yang optimum untuk digunakan atau dilakukan penelitian kedepannya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Turbin angin

Turbin angin adalah mesin yang dapat mengubah sumber energi angin menjadi sumber energi listrik. Sebagai pembangkit sumber energi listrik, turbin angin terhubung ke beberapa jaringan listrik. Jaringan ini termasuk sirkuit pengisian baterai, sistem skala daya, jaringan terisolasi dan jaringan utilitas besar. Dengan mekanisme kerjanya pada saat angin mengalir pada satu sisi *blade* turbin angin, terdapat perbedaan antara tekanan pada kedua sisi *blade* dan gaya aerodinamis (*lift & drag*) yang bekerja pada *blade*. Dikarenakan adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi *blade* dan gaya aerodinamis, maka *blade* akan berputar dan poros juga ikut berputar. Di sisi lain juga, poros terhubung dengan generator yang menyebabkan perputaran poros akan menghasilkan energi listrik. Yang jika dapat disimpulkan bahwa kerja turbin angin didasarkan pada energi yang dihasilkan oleh kecepatan angin untuk memutar *blade*, lalu rotasi diubah menjadi energi mekanik yang kemudian energi mekanik dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Berikut ini gambar 2.1 terkait penampakan turbin angin.

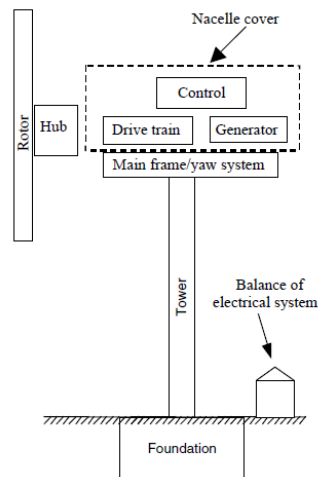


Gambar 2. 1 Instalasi turbin angin (Manwell et al, 2009)

Lebih lanjut, turbin angin dapat diklasifikasikan berdasarkan sumbu putar rotornya, dimana rotor ini berfungsi mengkonversi gerak linier angin menjadi gerak putar *blade* turbin yang dapat digolongkan menjadi 2 tipe yakni *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Di sisi lain, rotor turbin juga dibagi menjadi dua jenis sesuai dengan fungsi gaya aerodinamisnya, yang mengacu pada gaya utama menyebabkan rotor berputar yakni tipe *drag* dan tipe *lift*. Pada tipe *drag* memanfaatkan efek gaya hambatan sebagai gaya penggerak rotor dan pada tipe *lift* memanfaatkan gaya angkat sebagai penggerak rotor. Berikut penjelasan lebih lanjut terkait *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT).

2.1.1 *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

Turbin tipe ini merupakan desain turbin angin yang paling umum dan sering digunakan karena poros utamanya berputar menyesuaikan arah angin, dimana arah angin harus sejajar dengan poros turbin dan tegak lurus terhadap arah putaran rotor. Turbin jenis ini juga cocok digunakan di daerah dengan tipe angin sedang dan tinggi serta sering digunakan untuk pembangkit listrik dengan skala besar. Berikut merupakan komponen-komponen yang ada pada HAWT berdasarkan gambar 2.2

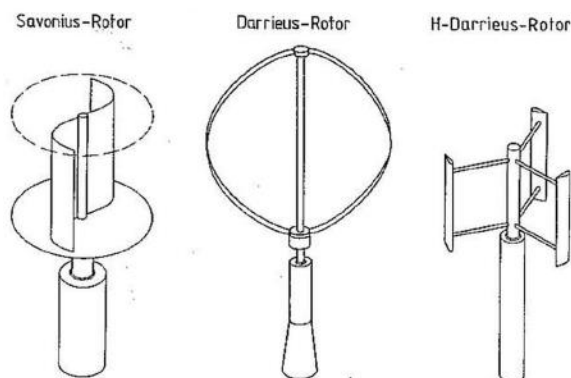


Gambar 2. 2 Komponen pada *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) (Manwell et al, 2009)

Untuk kelebihanannya turbin tipe HAWT ini memiliki efisiensi yang tinggi yang dapat menghasilkan energi dengan jumlah yang besar, selain itu pada turbin jenis ini dapat dikonstruksikan lebih tinggi dengan diameter rotor yang lebih besar, karena jika dihubungkan dengan pengaruh gaya gesek yang dapat menghambat laju udara, maka semakin tinggi tempat membuat angin yang bertiup semakin kencang. Namun jika turbin diletakkan terlalu tinggi juga dapat menjadi hal yang merugikan dikarenakan faktor keamanan, selain turbin penempatan *generator* juga berada di atas *tower* sehingga menambah beban dan risiko pada *tower*. Kerugian lainnya karena konstruksi lebih besar maka dapat berdampak pula pada biaya pembuatan dan perawatan yang lebih tinggi.

2.1.2 *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT)

Pada turbin tipe VAWT ini memiliki sumbu yang tegak lurus dengan tanah, serta gerakan poros dan rotor sejajar dengan arah angin, sehingga rotor dapat berputar pada semua arah angin maka dari itu turbin ini sangat baik digunakan pada lingkungan yang dimana arah datangnya angin tidak menentu. Secara garis besar turbin ini digolongkan menjadi 3 tipe model rotor yaitu tipe Darrieus, tipe Savonius dan tipe H-Darrieus. Pada tipe Darrieus dan tipe H-Darrieus memanfaatkan gaya *lift*, sedangkan pada tipe Savonius memanfaatkan gaya *drag*. Berikut adalah beberapa contoh VAWT melalui gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Tipe *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) (Óskarsdóttir, 2014)

Pada dasarnya turbin jenis VAWT bisa diaplikasikan di daerah yang memiliki kecepatan angin yang rendah karena memiliki torsi tinggi, maka dari itu dapat ditempatkan di daerah pembangkit listrik dalam skala kecil. Berdasarkan konstruksinya juga turbin ini memiliki desain lebih praktis yang membuat biaya tidak terlalu tinggi, selain itu beda halnya dengan tipe

HAWT, turbin ini memiliki *generator* yang ditempatkan di bagian bawah turbin sehingga proses perawatan lebih mudah. Lalu untuk kekurangannya sendiri VAWT memiliki kecepatan angin di bagian bawah sangat rendah sehingga apabila tidak memakai *tower* akan menghasilkan putaran yang rendah, dan efisiensi lebih rendah dibandingkan HAWT.

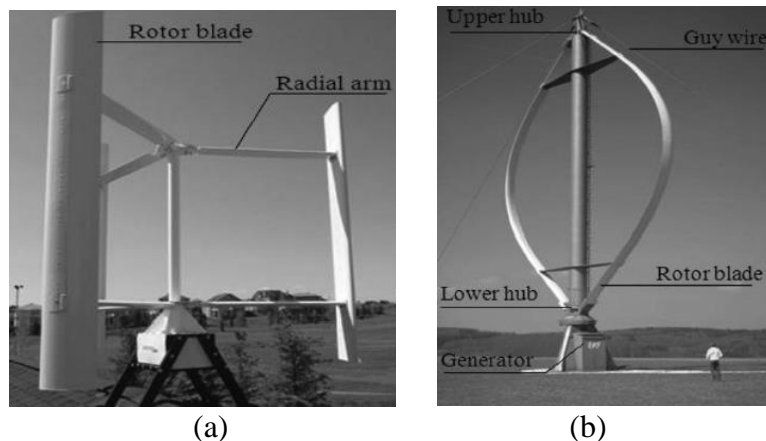
Tabel 2. 1 Tabel perbedaan antara *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) dan *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) (Bhutta et al, 2012)

| | Vertical axis wind turbine (VAWT) | Horizontal axis wind turbine (HAWT) |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Tower sway | Small | Large |
| Yaw mechanism | No | Yes |
| Self starting | No | Yes |
| Overall formation | Simple | Complex |
| Generator location | On ground | Not on ground |
| Height from ground | Small | Large |
| Blade's operation space | Small | Large |
| Noise produced | Less | Relatively high |
| Wind direction | Independent | Dependent |
| Obstruction for birds | Less | High |
| Ideal efficiency | More than 70% | 50-60% |

2.2 Turbin Angin Tipe Darrieus

Turbin angin tipe Darrieus tergolong jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin tipe ini pertama kali ditemukan oleh G. J. M. Darrieus pada tahun 1931 di Prancis. Pada dasarnya ide pembuatan turbin angin ini adalah membuat suatu turbin yang desainnya sederhana serta mudah dalam konstruksinya, dimana desain dari turbin ini menggunakan gaya *lift* yang tercipta dari sebuah *airfoil* untuk menciptakan putaran pada turbin.

Dalam turbin angin tipe Darrieus memiliki beberapa permodelan dalam *blade*-nya, yakni ada model *straight* dan *curved*. Lalu untuk masing-masing permodelan *blade* memiliki beberapa jenis, diantaranya yang paling populer adalah tipe *giromill* untuk permodelan *straight* dan tipe *eggbeater* untuk permodelan *curved*. Salah satu keunggulan dari turbin angin tipe Darrieus adalah bentuknya yang ringan dan yang menjadi perhatian utama dalam turbin ini adalah efisiensi hasil perbandingan antara torsi yang dihasilkan. Namun, pada penggerakannya turbin angin tipe Darrieus harus mendapatkan aliran angin disekitarnya untuk terciptanya gaya *lift* dan jika kecepatan angin disekitar turbin rendah, rotor tidak dapat berputar untuk melawan torsi yang diperlukan untuk memutar generator. Maka dari itu *starting* awal harus pada kondisi kecepatan angin yang tinggi. Hal ini dikarenakan, turbin angin tipe Darrieus tidak memiliki mekanisme *self-start*.

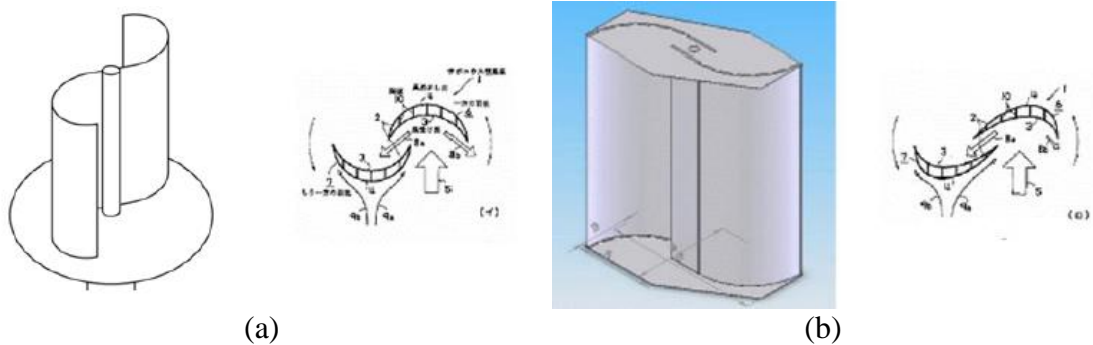


Gambar 2. 4 Contoh turbin angin tipe Darrieus (a) tipe *Giromill* (*Straight Blade*) dan (b) tipe *Eggbeater* (*Curved Blade*) (Bhutta et al, 2012)

2.3 Turbin Angin Tipe Savonius

Pada turbin angin tipe Savonius sama halnya seperti tipe Darrieus yang tergolong jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin angin tipe Savonius ditemukan oleh seorang sarjana asal Finlandia bernama Sigurd J Savonius pada tahun 1922, dengan konstruksi turbin sangat sederhana didasarkan pada pemotongan silinder menjadi dua bagian sepanjang bidang pusat dan kemudian memindahkan dua silinder setengah samping sepanjang bidang pemotongan, sehingga penampang menyerupai huruf S lalu *blade* yang meghadap arah keadatangan angin disebut *advancing blade* dan yang membelakangi arah kedatangan angin disebut *returning blade*. Desain dari turbin ini bekerja berdasarkan gaya *drag* yang dapat *starting* dalam kondisi kecepatan yang rendah, namun memiliki efisiensi rendah untuk memutar rotor dengan efisiensi sekitar 31%. Pada turbin ini dibedakan menjadi 2 rancangan model berdasarkan bentuk sudunya, yakni tipe sudu turbin Savonius U dan L.

Pada rancangan turbin angin tipe Savonius ini, angin yang menumbuk salah satu *blade* sehingga rotor dapat berputar, titik pusat gaya dorong angin pada rotor akan bergeser menjauhi poros rotor. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan torsi yang lebih besar. Pada turbin angin tipe Savonius permodelan setengah lingkaran (Savonius U), aliran udara di kedua sisi *blades* sama besar, sementara pada rancang permodelan kedua (Savonius L) aliran udara pada sisi *blade* yang lurus lebih besar dibandingkan pada sisi *blade* lengkung seperempat lingkaran.



Gambar 2. 5 Contoh turbin angin tipe Savonius (a) tipe sudu turbin Savonius U (b) tipe sudu turbin Savonius L (Bahri W et al, 2014)

2.4 Turbin Angin Tipe Lenz 2

Turbin angin tipe Lenz 2 adalah turbin angin yang memiliki sumbu vertikal dan tergolong jenis *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). Turbin angin tipe Lenz 2 ini ditemukan oleh salah satu peneliti yang bernama Edwin Lenz tepatnya pada tahun 2007. Turbin jenis ini merupakan pengembangan dari konsep gaya *drag* pada turbin angin Savonius dan konsep gaya *lift* pada turbin angin Darrieus.

Konsep turbin jenis ini lebih baik daripada turbin angin Darrieus dan Savonius karena kedua masing-masing turbin tersebut memiliki kemampuan *self-starting* dan efisiensi yang kurang baik. Pada turbin angin tipe Lenz 2 menghasilkan efisiensi sebesar 40% yang dapat dibuktikan dengan biaya fabrikasi yang rendah, ketahanan dan keandalannya baik, mampu bekerja pada kecepatan angin yang rendah, mudah dalam proses *self-starting* dan efisiensi yang lebih baik. Berikut ini merupakan bentuk desain profil airfoil berdasarkan turbin angin tipe Lenz 2 melalui gambar 2.4.



Gambar 2. 6 Desain profil turbin angin tipe Lenz 2 (Zwierzchowski et al, 2017)

2.5 Konsep Gaya Drag dan Gaya Lift

Ketika suatu benda dialiri oleh aliran fluida *viscous* dan *incompressible*, maka akan terjadi gaya aerodinamis. Gaya aerodinamis sendiri dapat dibedakan menjadi 2 komponen yaitu gaya *drag* dan gaya *lift*. Gaya *drag* merupakan komponen gaya hambat yang bekerja relatif sejajar horizontal dengan vektor kecepatan aliran, Berikut merupakan persamaan pada gaya *drag*:

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

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

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa gaya *drag* berbanding lurus dengan koefisien *drag*, densitas fluida, kecepatan aliran fluida dan luas permukaan benda padat yang dialiri fluida. Untuk koefisien *drag* sendiri merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk mengetahui besar dari gaya *drag* yang muncul. Koefisien *drag* memiliki nilai yang bervariasi bergantung dengan geometri dari benda yang dilewati oleh aliran fluida dan kecepatan aliran fluida yang melewatinya, dimana variasi nilai koefisien *drag* dapat dilihat melalui tabel dibawah ini:

Tabel 2. 2 Variasi nilai koefisien *drag* (Pritchard, 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^b |
| 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 |

Sedangkan gaya *lift* merupakan gaya angkat yang tegak lurus dengan vektor kecepatan aliran, dimana dapat mengangkat suatu benda ke atas yang terjadi karena tekanan dibawah benda lebih besar daripada tekanan diatas benda. Gaya *lift* biasanya disebabkan pada sayap pesawat terbang dan umumnya dipakai buat melawan gaya gravitasi bumi untuk menarik pesawat tadi ke arah bawah. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan gaya *lift*:

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

- dimana :
- F_L : Gaya *lift* (N)
 - C_L : Koefisien *lift*
 - ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
 - v : Kecepatan aliran fluida (m/s)
 - A : Luas permukaan benda padat yang dialiri fluida (m^2)

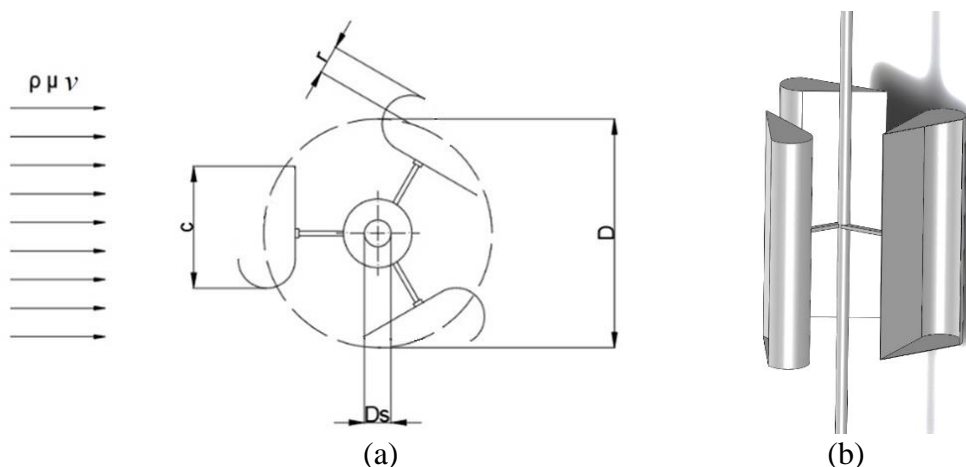
2.6 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk penentuan suatu karakteristik aliran fluida. Jenis aliran fluida diantaranya aliran laminar yang memiliki pola aliran yang teratur. Lalu ada aliran turbulen yang memiliki pola aliran yang sangat tidak beraturan. Terakhir ada aliran transisi yang memiliki pola mirip dengan kedua aliran laminar dan turbulen.

Pada bilangan Reynolds menunjukkan bahwa transisi aliran antara aliran laminar dan aliran turbulen tidak hanya dipengaruhi oleh fungsi kecepatan tetapi juga oleh kepadatan dan viskositas. Nilai bilangan Reynolds juga dapat menentukan apakah aliran itu laminar atau turbulen, dimana untuk aliran laminar $Re < 2100$ dan untuk aliran turbulen $Re > 2100$. Secara umum, bilangan Reynolds dapat diperoleh dari persamaan:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \dots\dots\dots(2.3)$$

- dimana :
- Re : Bilangan Reynolds
 - v : Kecepatan aliran fluida (m/s)
 - ρ : Densitas fluida (Kg/m^3)
 - L : Panjang karakteristik aliran angin (m)
 - μ : Viskositas fluida ($N.s/m^2$)



Gambar 2. 7 Skema turbin angin tipe Lenz 2 (a) dua dimensi (b) tiga dimensi

Panjang karakteristik aliran angin atau fluida yang melalui turbin dapat dicari dari persamaan berikut:

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

dimana :

D : Diameter turbin angin tipe Lenz 2 (m)

r : Jari - jari *blade leading edge* (m)

2.7 Pemodelan Turbulensi

Aliran turbulen adalah suatu fenomena pergerakan yang tidak beraturan dan tidak stabil dari partikel-partikel fluida yang membentuk pusaran acak. Dalam pemodelan turbulensi terdapat *based models* yang biasanya digunakan yakni *Reynolds Average Navier Stokes Equation* (RANS), dimana RANS dibedakan lagi menjadi menjadi beberapa model turbulensi yang digunakan untuk simulasi aliran CFD yakni *one equation model* dan *two equation model*. Pada dasarnya *two equation model* mengekspresikan *eddy viscosity* dalam bentuk *specific turbulent kinetic energy* dan menggunakan dua persamaan tambahan agar *reynolds stress tensor* dapat diselesaikan, yakni berupa *k-ε model* dan *k-ω model*. Berikut detail penjelasan terkait masing-masing model:

2.7.1 k-ε Models

Pada *k-ε models* terdiri dari beberapa jenis yang dapat diatur didalam *software* CFD sesuai dengan batasan pada simulasi antara lain *standard k-ε models*, *RNG k-ε models* dan *realizable k-ε models*. *Standard k-ε models* merupakan model turbulensi yang paling sering digunakan dalam pemodelan fluida, hal tersebut dikarenakan model ini mampu memprediksi berbagai jenis kasus aliran dengan hasil yang cukup akurat dan hasil konvergen yang baik. Model ini cocok digunakan untuk pemodelan aliran *fully turbulent* dan aliran *steady state*, namun kurang akurat untuk aliran yang kompleks dengan melibatkan *gradient* tekanan tinggi, kelengkungan *streamline* yang kuat dan aliran separasi.

Lalu selanjutnya ada *RNG k-ε models* yang efektif digunakan jika dibandingkan dengan *standard k-ε models* terutama untuk aliran yang berputar. Pada model ini juga cocok digunakan pada aliran dengan melibatkan *shear* yang kompleks, aliran dengan vortisitas dan separasi yang tinggi. Namun, *RNG k-ε models* kurang akurat untuk evolusi *vortex* dan tidak stabil untuk aliran *steady state*.

Model turbulensi yang terakhir dalam *k-ε models* adalah *realizable k-ε models* yang merupakan pemodelan yang memiliki keunggulan untuk aliran rotasi, *boundary layers* dibawah *gradient* tekanan yang tinggi dan aliran separasi. Pada dasarnya model ini sebagian besar sama dengan *RNG k-ε models*, namun pada model ini lebih mudah digunakan serta meghasilkan *output* yang lebih akurat untuk dikonvergensi.

2.7.2 k-ω Models

Pada *k-ω model* terdiri dari *standard k-ω model* dan *SST k-ω model*. *k-ω model* merupakan pemodelan turbulensi yang akurat digunakan pada berbagai aliran *boundary layer* dengan gradien tekanan. Selain itu cocok digunakan untuk aliran yang dibatasi *wall* dan memiliki bilangan reynolds rendah. Namun model ini terlalu sensitif terhadap sifat turbulensi aliran *freestream*.

Model selanjutnya adalah *SST k-ω model* yang merupakan singkatan dari *shear stress transport*, dimana model ini biasa digunakan pada aliran separasi yang sedang. *SST k-ω model* cocok untuk penggunaan pada fenomena aliran yang terjadi didekat *wall*, namun dikarenakan hal tersebut membuat pemodelan ini kurang cocok digunakan untuk aliran *free shear*. Selain itu model ini membutuhkan waktu yang cukup lama untuk konvergen.

2.8 Solidity

Solidity (σ) merupakan rasio luas keseluruhan *blade* terhadap luas sapuan turbin. Pada kondisi operasinya nilai optimum dari *solidity* akan menghasilkan *output power* yang maksimal, maka dari itu performa optimum pada turbin dapat dihasilkan dengan kombinasi *solidity* yang rendah pada *tip speed ratio* yang tinggi, begitu juga sebaliknya. Berikut persamaan yang mendefinisikan aspek *solidity*:

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{D} \dots\dots\dots(2.5)$$

- dimana :
- N : Jumlah *blade*
 - c : *Blade chord length* (m)
 - D : Diameter turbin (m)

2.9 Torsi Statis

Torsi statis merupakan torsi minimal yang menyebabkan *blade* pada turbin angin mulai bergerak dari posisi diamnya. Pada dasarnya besaran nilai torsi statis yang terjadi pada turbin angin tipe Lenz 2 menggunakan perhitungan dengan pengaruh gaya aerodinamis berupa gaya *drag*. Dalam gaya torsi statis dapat diperoleh melalui persamaan:

$$T_s = F_D \cdot R \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan memasukkan persamaan gaya *drag*, didapatkan persamaan baru yakni:

$$T_s = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot R \dots\dots\dots(2.7)$$

Sedangkan nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara torsi statis terhadap torsi teoritis. Nilai *coefficient of static torque* (C_{TS}) dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

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

Adapun untuk mencari persamaan luas permukaan benda yang dialiri fluida sebagai berikut:

$$A = L \cdot H \dots\dots\dots(2.9)$$

- dimana :
- T_s : Torsi statis (N.m)
 - F_D : Gaya *drag* (N)
 - R : Jari-jari turbin angin tipe Lenz 2 (m)
 - C_D : Koefisien *drag*
 - ρ : Densitas fluida (kg/m^3)
 - v : Kecepatan aliran fluida (m/s)
 - A : Luas permukaan benda padat yang dialiri fluida (m^2)
 - L : Panjang karakteristik aliran angin (m)
 - H : Tinggi *blade* (m)

2.10 Aspect Ratio (AR)

Aspect Ratio (AR) merupakan perbandingan antara tinggi *blade* dan diameter *blade* dari turbin. Dimana pada perbandingannya, semakin kecil nilai *aspect ratio* maka dapat berpengaruh pada performa rotor yang cenderung berkurang. Berdasarkan pengertian tersebut, persamaan nilai *aspect ratio* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$AR = \frac{H}{D} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana :
 AR : *Aspect Ratio*
 H : Tinggi *blade* (m)
 D : Diameter turbin (m)

2.11 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computatuional Fluid Dynamic (CFD) adalah sebuah metode dengan penggabungan konsep ilmu teknik, fisika, matematika dan ilmu komputer untuk menghasilkan informasi tentang bagaimana fluida mengalir pada suatu sistem tertentu pada suatu kondisi yang ditentukan. Saat ini pemanfaatan *software* CFD digunakan untuk membantu proses perancangan semakin meningkat pada kalangan praktisi maupun akademisi. CFD juga merupakan metode perhitungan dengan menggunakan sebuah kontrol dimensi, luas dan volume dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk dalam perhitungan di setiap elemen pembagiannya.

2.12 Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan eksperimen ini juga diperlukan beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan guna menunjang penelitian berjalan dengan lancar serta meningkatkan pemahaman penulis dalam melaksanakan eksperimen ini. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang dijelaskan sebagai berikut:

2.12.1 Effect of Number of Blades and Blade Chord Length on the Performance of Darrieus Wind Turbine (Abu-El-Yazied et al, 2015)

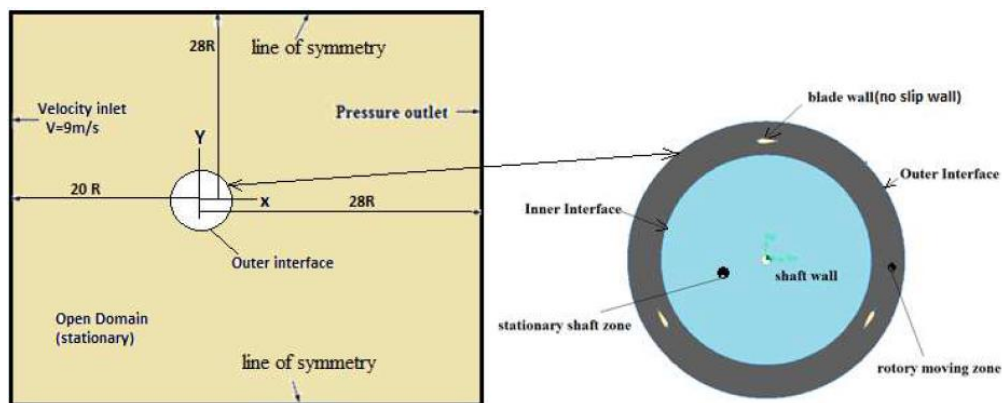
Penelitian ini dilakukan oleh Abu-El-Yazied et al pada tahun 2015 yang bertujuan untuk mendapatkan desain turbin angin terbaik dengan metode simulasi CFD analisa dua dimensi dan menggunakan *software* Gambit 2.4 untuk pembuatan geometri dan *meshing* serta menggunakan ANSYS Fluent 14.5 untuk pembuatan simulasi CFD. Jenis turbin angin yang digunakan dalam penelitian ini adalah vertikal tipe H-Darrieus dengan jenis *blades airfoil* NACA 0021. Dalam penelitian ini menggunakan dua belas model dengan beberapa parameter seperti empat variasi jumlah *blade*, tujuh variasi jumlah *blade chord length* dan delapan variasi nilai *solidity* turbin, serta kecepatan angin konstan sebesar 9 m/s dan tanpa merubah nilai *pitch angle*. Penelitian ini didasari karena kesadaran atas pengaruh energi angin yang sangat bermanfaat sebagai sumber energi terbarukan dan juga turbin angin yang merupakan media pengantar energi paling banyak digunakan saat ini. Berikut detail nilai parameter yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 2. 3 Parameter turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015)

| Features | Models | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------|------|-----|------|-----|-------|------|-----|------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Diameter of rotor [mm] | 1030 | | | | | | | | | | | |
| Height of rotor [m] | 1 | | | | | | | | | | | |
| Blade profile | NACA 0021 | | | | | | | | | | | |
| Chord length [mm] | 85,8 | 128,7 | 85,8 | 170 | 85,8 | 170 | 64,35 | 85,8 | 170 | 42,9 | 250 | 300 |

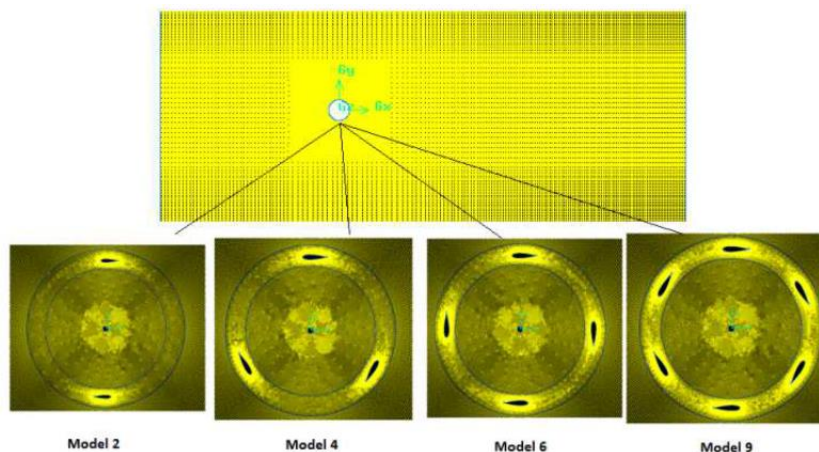
| | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|------|------|------|------|
| <i>Solidity</i> (σ) | 0,17 | 0,25 | 0,25 | 0,5 | 0,33 | 0,66 | 0,25 | 0,5 | 0,99 | 0,25 | 0,48 | 0,87 |
| <i>Number of blades</i> (n) | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 | 6 | 2 | 3 |

Geometri yang digunakan dalam penelitian ini memiliki beberapa model *boundary condition* yang merupakan model batas berupa data yang dibutuhkan pada simulasi. Beberapa batasan tersebut antara lain *inlet* yang ditetapkan sebagai *velocity inlet*, *outlet* ditetapkan sebagai *pressure outlet* dan dua *symmetry* ditetapkan sebagai kedua sisi *wall*. Berikut merupakan tampilan geometri dan *boundary condition* terkait penelitian ini:



Gambar 2. 8 Tampilan *boundary condition* dan geometri turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Setelah dilakukan penggambaran model komputasi, maka dilakukan proses *meshing*. Lalu pada *software* ANSYS menggunakan model turbulensi *realizable k-ε* dengan kriteria *near wall treatment*-nya diatur *standard wall function*. Model turbulensi *realizable k-ε* sendiri digunakan untuk *body* yang berputar dan biasanya digunakan pada simulasi dengan aliran *swirl*. Pada simulasi ini menggunakan skema SIMPLE dengan detail *gradient* diatur *least squares cell based*, *pressure* diatur *standard* dan *momentum* diatur *second order upwind*. Setelah itu dilanjutkan menggunakan *second order* dan diantara beberapa formulasi *transient* yang tersedia digunakan skema *second order implicit* untuk simulasi yang digunakan. Pada kriteria konvergensi yang digunakan sebesar 1×10^{-5} . Data hasil simulasi diolah untuk menentukan gaya yang bekerja pada masing-masing *airfoil* yang berputar. Berikut tampilan hasil *meshing* tampak dua dimensi:



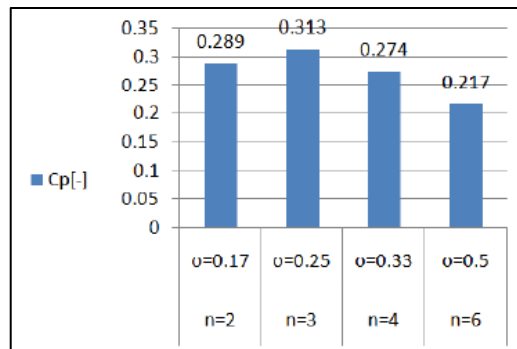
Gambar 2. 9 Tampilan *meshing* turbin angin (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Proses selanjutnya dilakukan analisa data yang telah dibuat untuk memahami pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap turbin angin. Hasil yang didapatkan berupa nilai koefisien daya meningkat seiring dengan meningkatnya nilai soliditas dan jumlah *blade*. Berikut tabel hasil simulasi:

Tabel 2. 4 Detail hasil simulasi pada model uji (Abu-El-Yazied et al, 2015)

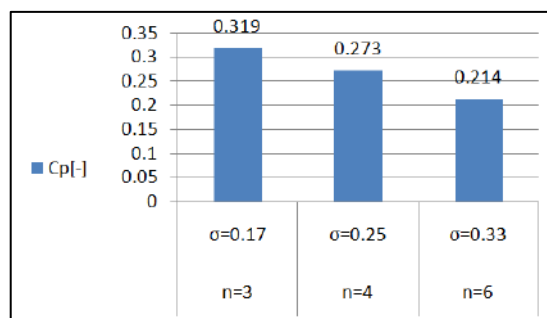
| Model | n | λ $C_{P \max}$ | $C_{P \max}$ | σ | % $C_{P \max}$ | % $\lambda C_{P \max}$ |
|-------|---|------------------------|--------------|----------|----------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3.5 | 0.289 | 0.17 | -7.67 | 33.59 |
| 2 | 2 | 2.62 | 0.3235 | 0.25 | 3.35 | 0 |
| 3 | 3 | 2.62 | 0.313 | 0.25 | 0 | 0 |
| 4 | 3 | 2.03 | 0.319 | 0.5 | 1.92 | -22.52 |
| 5 | 4 | 2.62 | 0.274 | 0.33 | -12.46 | 0 |
| 6 | 4 | 1.67 | 0.273 | 0.66 | -12.78 | -36.26 |
| 7 | 4 | 2.8 | 0.205 | 0.25 | -34.5 | 6.87 |
| 8 | 6 | 2.32 | 0.217 | 0.5 | -30.67 | -11.45 |
| 9 | 6 | 1.67 | 0.214 | 0.99 | -31.63 | -36.26 |
| 10 | 6 | 2.8 | 0.022 | 0.25 | -92.97 | 6.87 |
| 11 | 2 | 2.03 | 0.29 | 0.48 | -7 | -22.52 |
| 12 | 3 | 1.43 | 0.249 | 0.87 | -20.45 | -45.41 |

Dari tabel diatas dapat dibuktikan dengan salah satu contoh grafik analisa pada nilai *blade chord length* sebesar 85,8 mm. Berikut merupakan grafik hasil pengaruh jumlah *blade* dan soliditas terhadap koefisien daya untuk *chord length* sebesar 85,8 mm:



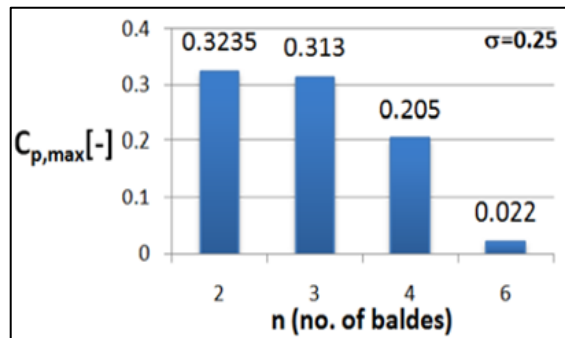
Gambar 2. 10 Grafik perbandingan koefisien daya terhadap soliditas dengan nilai *chord length* 85,8 mm (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Selain data untuk nilai *chord length* sebesar 85,8 mm, hal yang sama dilakukan juga untuk nilai *chord length* sebesar 170 mm, dimana didapatkan konsep nilai yang sama. Berikut grafik perbandingannya:



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

Berdasarkan tabel 2.4 juga didapatkan pengaruh *blade chord length* terhadap koefisien daya maksimum pada nilai *solidity* yang sama, dimana didapatkan nilai koefisien daya maksimum meningkat seiring dengan peningkatan nilai *blade chord length* dan berlaku sebaliknya untuk nilai *solidity* yang sama. Dapat dibuktikan seperti pada tabel 2.3 dan tabel 2.4 terlihat bahwa pada model 2; 3; 7 dan 10 masing-masing memiliki nilai *blade chord length* sebesar 128,7; 85,8; 64,35 dan 42,9 mm. Lalu dapat dilihat juga bahwa pada masing-masing model tersebut memiliki nilai koefisien daya maksimum sebesar 0,3235; 0,313; 0,205 dan 0,202 dengan nilai *solidity* yang sama sebesar 0,25. Berikut grafik perbandingannya:

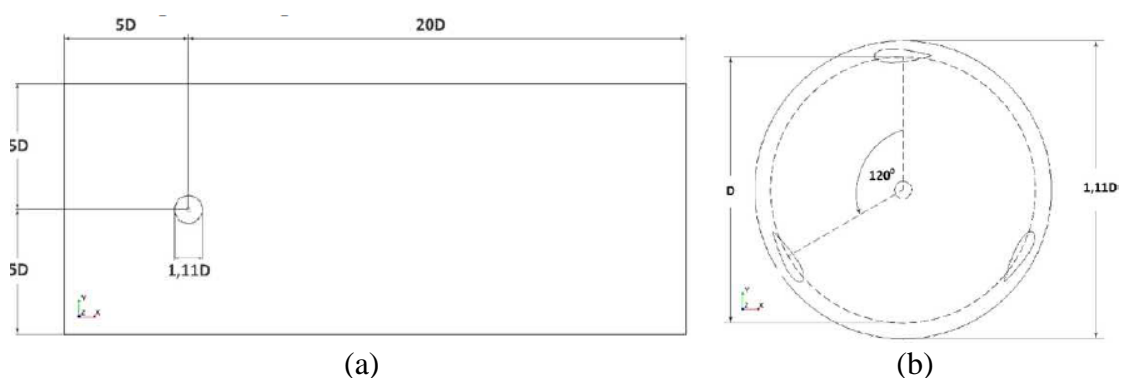


Gambar 2. 12 Grafik perbandingan model koefisien daya maksimum terhadap jumlah *blade* dengan nilai *solidity* yang sama (Abu-El-Yazied et al, 2015)

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa melalui hasil penelitian ini nilai koefisien daya yang diharapkan secara numerik turun seiring dengan meningkatnya nilai soliditas. Lalu kesimpulan lainnya didapatkan bahwa kenaikan *blade chord length* dan penurunan jumlah *blade* dapat memaksimalkan nilai koefisien daya pada nilai soliditas yang sama.

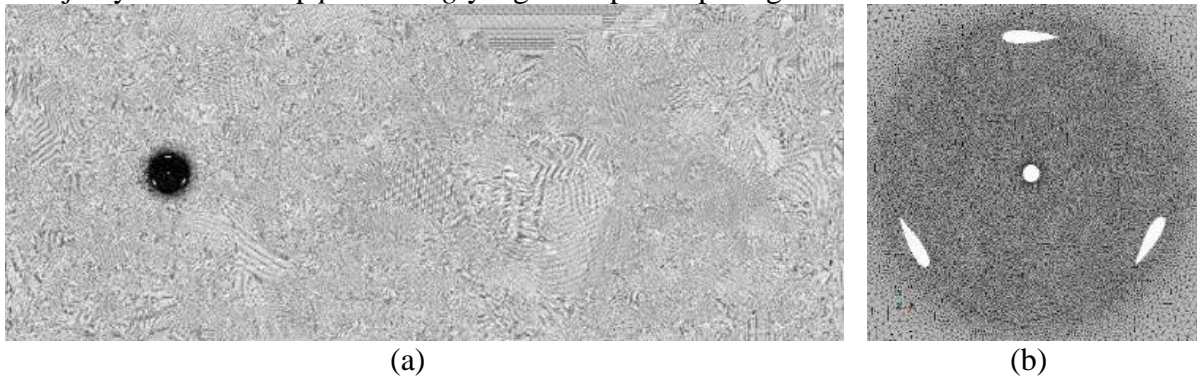
2.12.2 Penelitian Numerik Turbin Angin Darrieus dengan Variasi Jumlah Sudu dan Kecepatan Angin (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Penelitian turbin angin ini dilakukan oleh Taufiqurrahman & Suphandani pada tahun 2017 dengan tujuan agar didapatkan desain turbin angin yang terbaik serta dengan pemanfaatan tenaga angin yang paling optimal. Pada penelitian ini menggunakan metode analisa numerik dua dimensi dengan menggunakan *software* STAR CCM+ 9.02.007-R8 yang akan disimulasikan ke model turbin angin tipe Darrieus dengan profil *airfoil* NACA 0024 menggunakan jumlah variasi *blade* 3 dan 4 serta variasi kecepatan angin yang menabrak *blade* sebesar 5; 7; 9; 11; 13 dan 15 m/s sehingga didapatkan nilai torsi dan koefisien daya yang optimal serta pada penelitian ini digunakan nilai kriteria konvergensi sebesar 1×10^{-5} . Penelitian ini menggunakan 3 tahapan dalam simulasinya yakni *pre-processing*, *processing* dan *post processing*. Berikut tampilan untuk tahapan *pre-processing*:



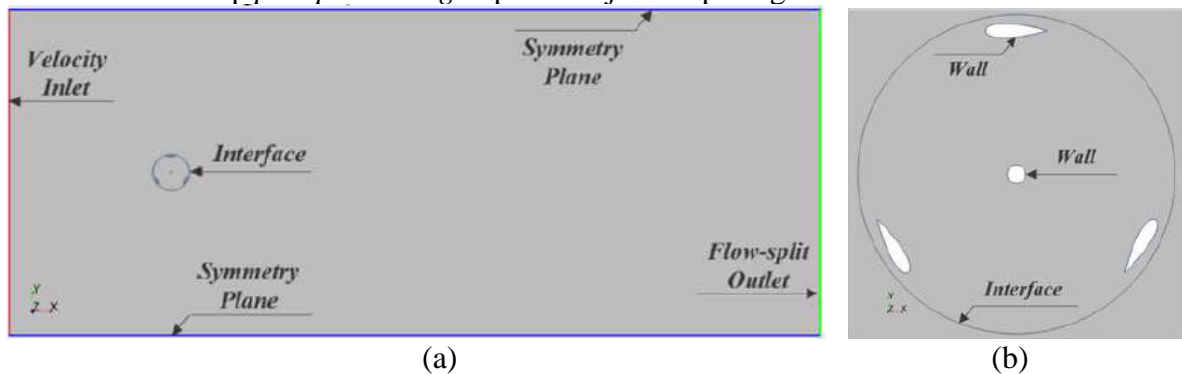
Gambar 2. 13 Tampilan tahap geometri *pre-processing* (a) *static domain* (b) *rotating domain* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Dalam tahapan *pre-processing* dilakukan pembuatan geometri, dimana pada penelitian ini dimensi geometri dibedakan menjadi dua yaitu *static domain* dan *rotating domain*. Lalu selanjutnya adalah tahap *processing* yang ditampilkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 14 Tampilan tahap *mesh processing* (a) *mesh static domain* (b) *mesh rotating domain* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada tahapan *processing* mencakup terkait pembuatan *meshing* mengenai geometri dan penentuan *domain* yang sudah dibuat, dimana pada simulasi ini menggunakan metode *automated mesh* dengan jumlah *cells* sebanyak 242.256 dan bentuk *tetrahedral mesh*. Lalu yang terakhir untuk tahap *post processing* dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 15 Tampilan tahap *boundary condition post-processing* (a) *static domain* (b) *rotating domain* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

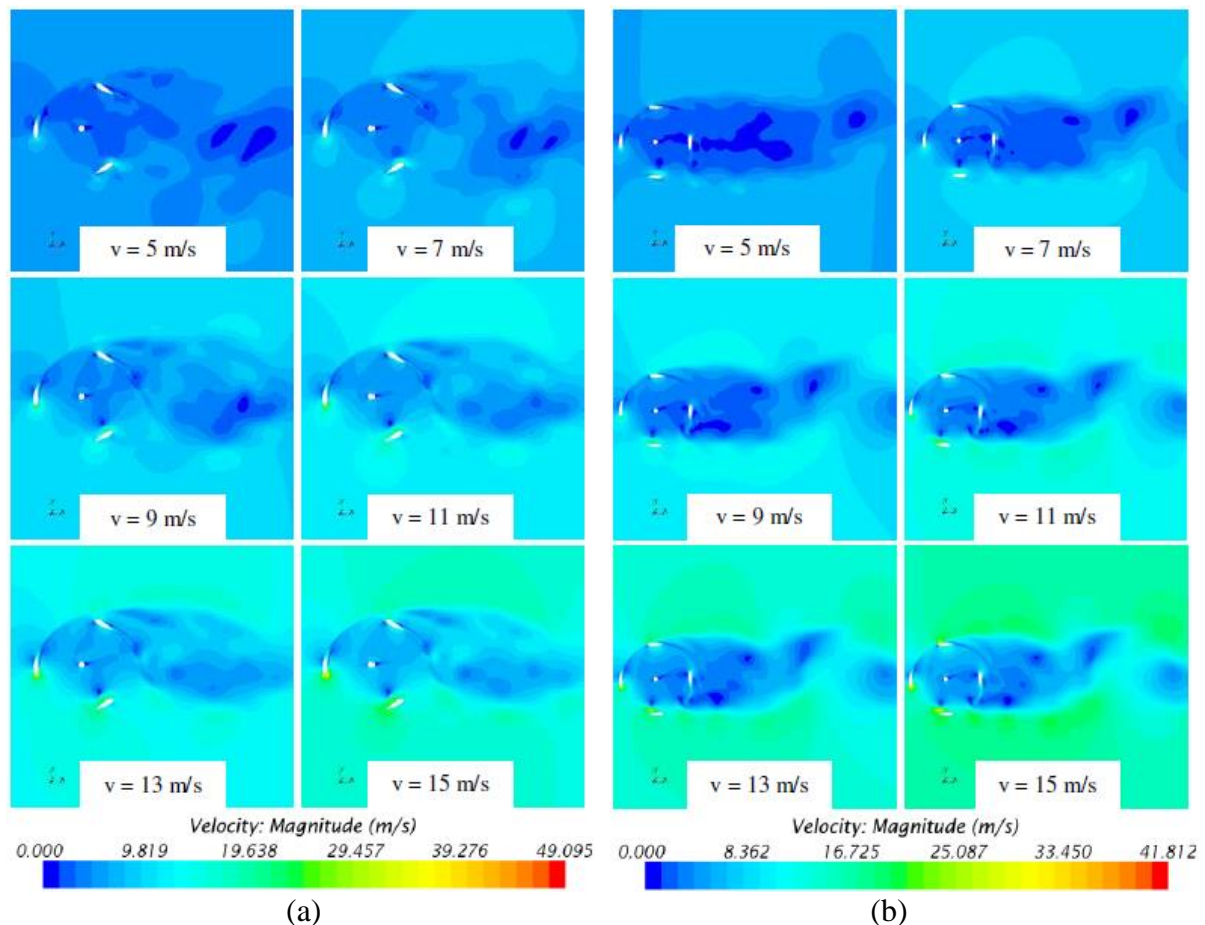
Dalam simulasi ini tahapan *post processing* mencakup tentang penetapan *boundary condition*. *Boundary condition* untuk sisi *inlet* diatur *velocity inlet* menggunakan nilai kecepatan udara yang melewati batasnya sebesar 5; 7; 9; 11; 13 dan 15 m/s dengan *density* sebesar 1,18415 kg/m³, lalu pada sisi *outlet* diatur *flow-split outlet*, pada poros dan *blade* diatur menjadi *wall* dengan *rotation motion*, batas atas dan bawah diatur *symmetry plane* dan pertemuan antar dua *domain* diatur sebagai *interface*. Berikut data yang didapatkan terkait nilai putaran turbin dan *tip speed ratio* pada masing-masing kecepatan angin:

Tabel 2. 5 Detail nilai putaran turbin dan *tip speed ratio* pada setiap kecepatan angin (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

| Kecepatan Angin (m/s) | Putaran Turbin (rpm) | Tip Speed Ratio |
|-----------------------|----------------------|-----------------|
| 5 | 440 | 1,08 |
| 7 | 666 | 1,17 |
| 9 | 892 | 1,21 |

| | | |
|----|------|------|
| 11 | 1119 | 1,25 |
| 13 | 1345 | 1,27 |
| 15 | 1572 | 1,28 |

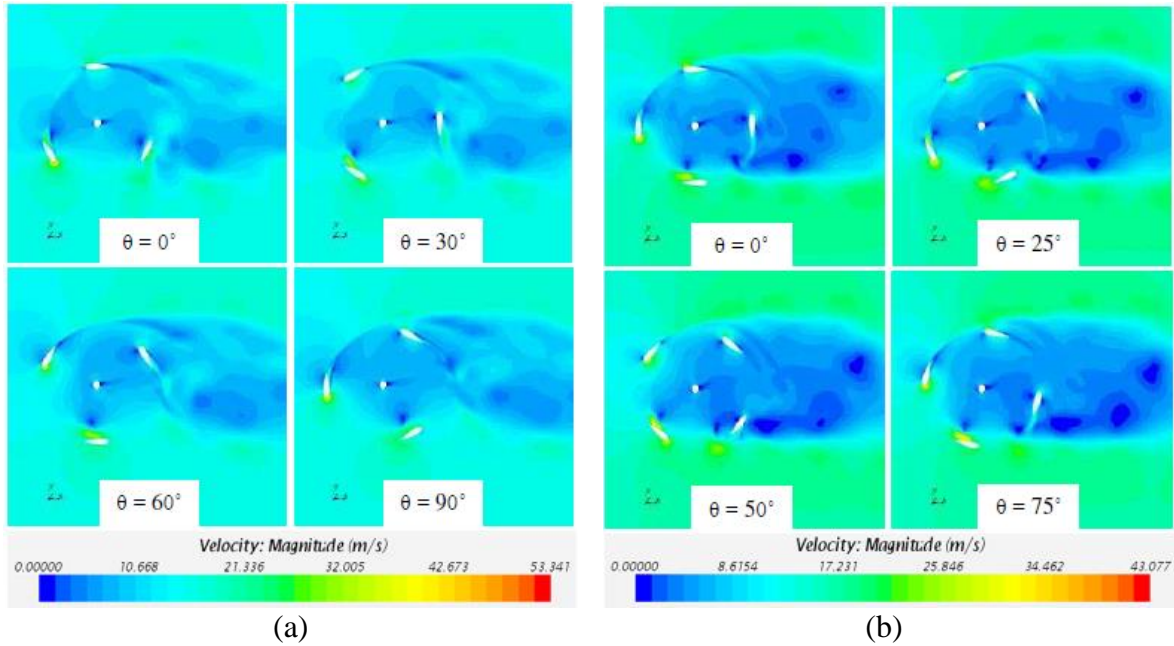
Terdapat beberapa hasil yang didapat dari simulasi ini salah satunya ada pada gambar dibawah menunjukkan grafik kontur kecepatan, dimana kecepatan putar tertinggi turbin angin terjadi pada saat kecepatan angin sebesar 15 m/s. Hal tersebut disebabkan karena kenaikan kecepatan putar turbin berbanding lurus dengan pertambahan kecepatan angin yang melalui turbin angin.



Gambar 2. 16 Tampilan kontur kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga *blade* dengan sudut putar turbin 90° (b) empat *blade* dengan sudut putar turbin 0° (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

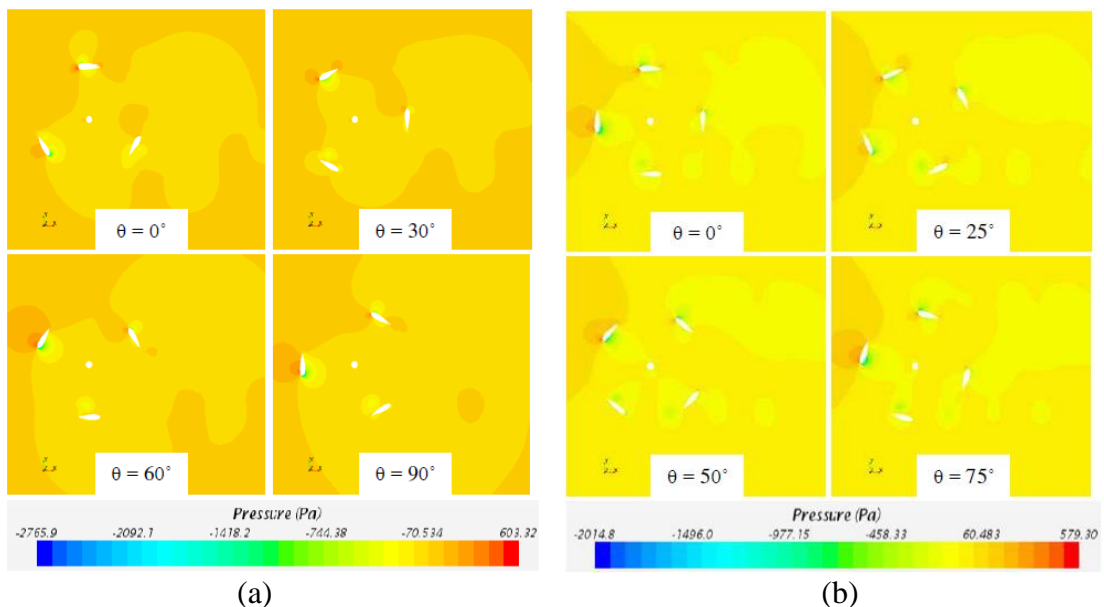
Dikarenakan kecepatan putar tertinggi turbin angin terjadi pada saat kecepatan angin sebesar 15 m/, maka dari itu dilakukan simulasi untuk memvariasikan jumlah *blade* dan sudut putar *blade* dengan menggunakan kecepatan angin 15 m/s. Hasil yang didapat yakni pada sudut putar 90° dan jumlah *blade* tiga terjadinya *vortex* yang membuat penurunan gaya *lift* pada *blade* dan menyebabkan turunnya kecepatan turbin angin. Dikarenakan hal tersebut *blade* turbin angin yang telah melalui sudut putar sebesar 90° sampai sudut putar 360° akan mengalami penurunan kecepatan dikarenakan pengaruh dari *vortex* dan kondisi kecepatan angin yang mengalir pada daerah *downstream* tidak secepat pada daerah *upstream*. Sedangkan pada jumlah *blade* empat memiliki kemampuan hasil gaya *lift* dan torsi yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin tiga *blade* sebelumnya, hal tersebut dikarenakan banyaknya *blade* di daerah *downstream* yang menjadi penghambat *blade* di daerah *upstream*. Oleh karena itu, kecepatan maksimum pada *blades* turbin angin Darrieus empat *blade* tidak setinggi kecepatan

maksimum pada *blade* turbin angin tiga *blade*, begitu juga dengan koefisien daya yang dihasilkan. Berikut merupakan tampilan kontur kecepatannya:



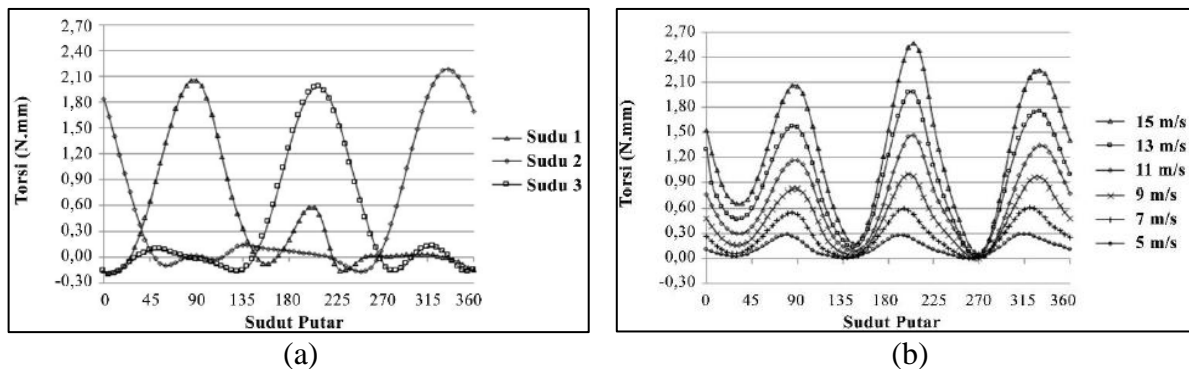
Gambar 2. 17 Tampilan kontur kecepatan angin pada turbin angin tipe Darrieus (a) tiga *blade* dengan kecepatan angin 15 m/s (b) empat *blade* dengan kecepatan angin 15 m/s (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Pada tampilan kontur tekanan yang terlihat di gambar 2.18 digunakan kecepatan angin sebesar 15 m/s karena kecepatan tersebut mencapai putaran angin tertinggi, dimana perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada *blade* yang tegak lurus terhadap arah aliran angin. Hal ini dikarenakan sisi terluar *blade* yang tegak lurus dengan arah aliran angin mendapatkan tekanan yang besar dari angin yang menabraknya sedangkan sisi terdalam *blade* terdampak tekanan yang rendah karena tidak mengenai arah aliran angin secara langsung. Dikarenakan hal tersebut maka terjadi 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*.

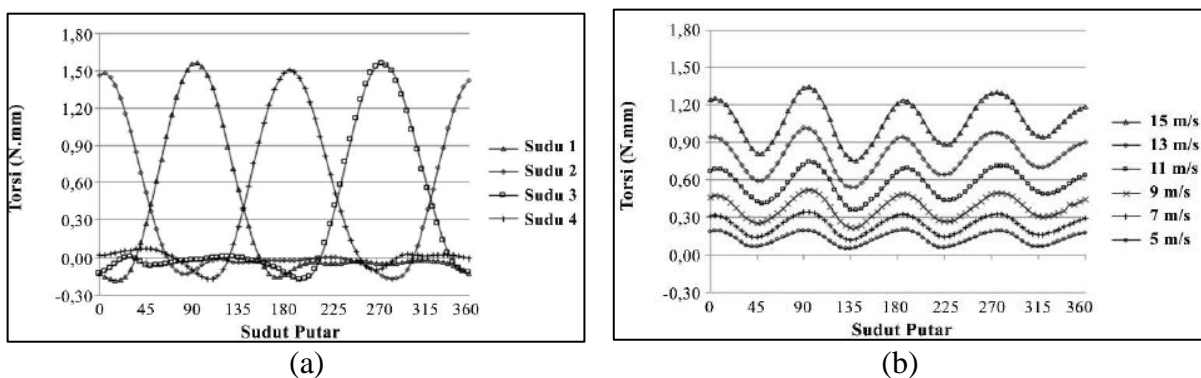


Gambar 2. 18 Tampilan kontur tekanan turbin angin tipe Darrieus (a) tiga *blade* dengan kecepatan angin 15 m/s (b) empat *blade* dengan kecepatan angin 15 m/s (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Selanjutnya menampilkan hasil nilai torsi, dimana pada gambar 2.19 (a) dan gambar 2.20 (a) terlihat bahwa nilai torsi tertinggi dicapai ketika suatu *blade* berada pada daerah kondisi *upstream* atau tegak lurus dengan arah aliran angin pada sudut putar tertentu, sedangkan *blade* lainnya bernilai rendah karena berada di daerah *downstream*. Sedangkan pada gambar 2.19 (b) dan gambar 2.20 (b) menunjukkan grafik hasil torsi dengan perbandingan kecepatan angin, dimana dapat dilihat nilai torsi semakin tinggi seiring bertambahnya kecepatan angin dan nilai torsi maksimum turbin tiga *blade* lebih besar sekitar 2,50 N.mm jika dibandingkan dengan turbin empat *blade* dengan nilai torsi maksimum sekitar 1,35 N.mm. Namun jika dilihat grafik torsi turbin empat *blade* lebih stabil jika dibandingkan dengan tiga *blade*. Hal ini terjadi karena semakin banyak *blade* yang digunakan, maka semakin banyak pula penghambat yang akan mengurangi kinerja turbin angin dengan nilai torsi kecil atau minus.



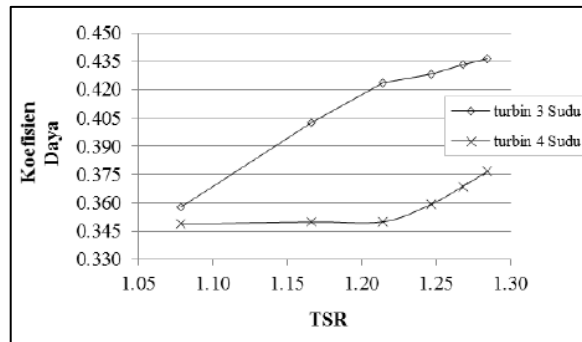
Gambar 2. 19 Grafik torsi turbin angin tipe Darrieus tiga *blade* (a) terhadap sudut putar dengan *blade* 1, 2, 3 pada kecepatan 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan tertentu (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)



Gambar 2. 20 Grafik torsi turbin angin tipe Darrieus empat *blade* (a) terhadap sudut putar dengan *blade* 1, 2, 3 pada kecepatan 15 m/s (b) terhadap sudut putar dengan variasi kecepatan tertentu (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

Lalu yang terakhir untuk hasil perbandingan dari koefisien daya dan TSR yang dapat dilihat pada gambar 2.21 bahwa koefisien daya turbin angin dengan tiga *blades* dan empat *blades* mencapai nilai tertinggi pada 0,4366 dan 0,3766 pada nilai TSR sebesar 1,28. Sedangkan pada rentang TSR 1,08 - 1,28 turbin angin tiga *blades* memiliki nilai koefisien daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin empat *blade*. Hal ini dikarenakan semakin banyak *blade* yang digunakan pada turbin angin maka semakin banyak pula *blade* yang berada pada daerah *downstream* yang menghasilkan gaya *drag* tambahan, sehingga nilai torsi yang

dihasilkan sangat kecil bahkan bernilai minus. Maka dari itu semakin besar nilai TSR membuat nilai koefisien daya semakin meningkat hingga nilai TSR dan jumlah *blades* tertentu.



Gambar 2. 21 Grafik koefisien daya terhadap TSR turbin angin tipe Darrieus tiga *blade* dan empat *blade* (Taufiqurrahman & Suphandani, 2017)

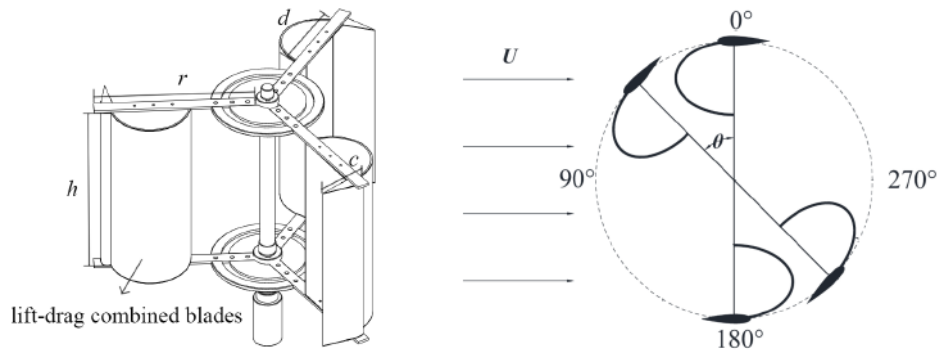
Dari simulasi ini, didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi kecepatan angin, maka semakin tinggi pula torsi yang dihasilkan dan semakin banyak jumlah *blade* yang digunakan, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin rendah. Lalu kesimpulan lain, semakin tinggi perbedaan tekanan yang terjadi pada suatu *blade*, maka semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan oleh *blade* tersebut dan nilai resultan dari gaya *lift* dan *drag* akan bertambah, dimana pertambahan nilai resultan gaya ini berbanding lurus dengan pertambahan nilai torsi. Untuk yang terakhir didapatkan bahwa semakin besar gaya *lift* yang dihasilkan pada suatu *blade*, maka semakin tinggi pula kecepatan pada *blade* tersebut dan koefisien daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai torsi yang terjadi.

2.12.3 Numerical Simulation and Wind Tunnel Investigation on Static Characteristics of VAWT Rotor Starter with Lift - Drag Combined Structure (Feng et al, 2021)

Penelitian ini dilakukan oleh Feng et al pada tahun 2021 yang bertujuan untuk mengetahui optimasi terhadap karakteristik *starting* dari *lift-type* VAWT dengan menggunakan *lift-drag combined starter* (LDCS). Konfigurasi yang digunakan yakni *semi-elliptical drag blades* dan *lift blades* yang dilengkapi pada bagian tengah dan belakang di luar *starter*. Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik dengan *software* ANSYS Fluent 19.0 dan eksperimen uji *wind tunnel* melalui variasi kecepatan angin sebesar 6 dan 10 m/s dan variasi jumlah *blade* sejumlah 2; 3 dan 4 buah. Berikut merupakan parameter dan geometri pada penelitian ini:

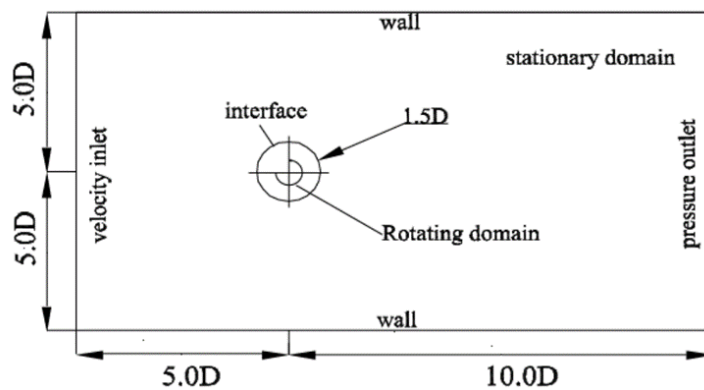
Tabel 2. 6 Detail parameter penelitian LDCS (Feng et al, 2021)

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



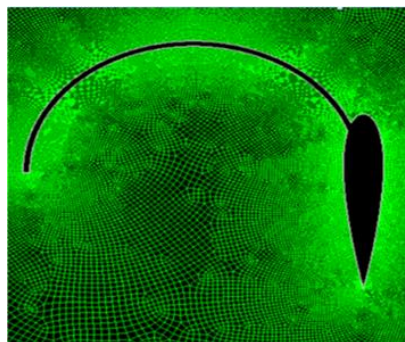
Gambar 2. 22 Tampilan geometri turbin (a) struktural 3D (b) geometri 2D berdasarkan sudut putar *blade* (Feng et al, 2021)

Setelah ditentukan parameter terkait geometri turbin angin, dilakukan pembuatan *domain boundary condition* dengan *inlet boundary* adalah *velocity inlet* yang nilainya sesuai variasi kecepatan angin, kondisi *outlet boundary* adalah *pressure outlet* yang nilainya sama dengan tekanan atmosfer normal sebesar 1×10^{-5} Pa. Lalu batas atas dan bawah domain ditetapkan ke permukaan dinding. *Impermeable wall boundaries* digunakan untuk membatasi arah aliran fluida. Berikut merupakan tampilan *domain* simulasinya:



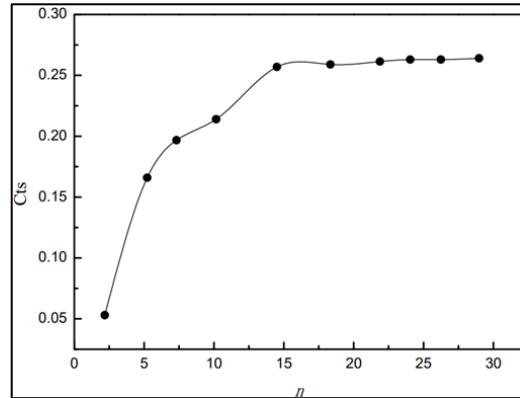
Gambar 2. 23 Domain simulasi (Feng et al, 2021)

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan *meshing*, dimana pada penelitian ini dilakukan penggabungan *grid* dinamis dan *grid* statis dalam simulasi, yang diatur *swept* selama rotasi LDCS sebagai area *mesh* dinamis dan mengenkripsi *mesh* di area ini. *Interface* antara area *mesh* dinamis dan statis ditetapkan sebagai permukaan *slip*, yang digunakan untuk mentransfer energi area *mesh* dinamis dan statis. Berikut merupakan gambar *mesh* yang digunakan pada penelitian ini:



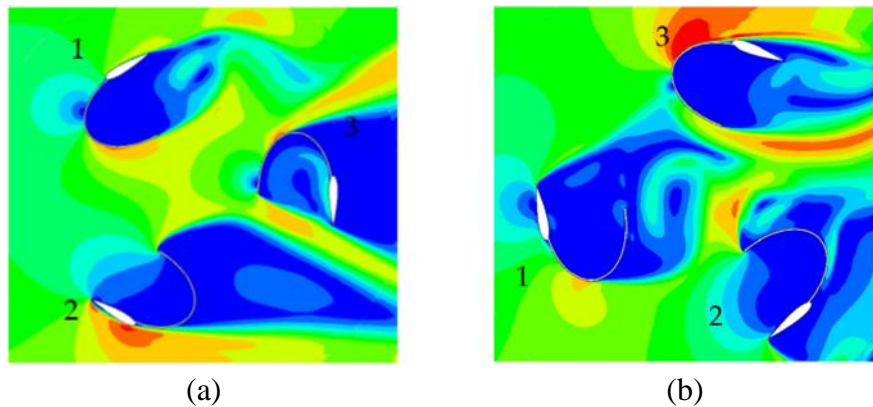
Gambar 2. 24 Meshing pada *blade* LDCS (Feng et al, 2021)

Setelah itu dilakukan perbandingan dan analisa terkait pengaruh jumlah *grid* yang berbeda pada hasil simulasi numerik nilai koefisien torsi statis dengan menggunakan LDCS dua *blade* pada sudut 20° . Dari hasilnya digunakan jumlah *grid* berkisar antara 250.000 sampai 280.000 dikarenakan pada jumlah *grid* tersebut, nilai koefisien torsi statis sudah mulai stabil, yang dapat ditunjukkan seperti grafik berikut:



Gambar 2. 25 Grafik *grid independency test* pada penelitian untuk sudut putar 20° (Feng et al, 2021)

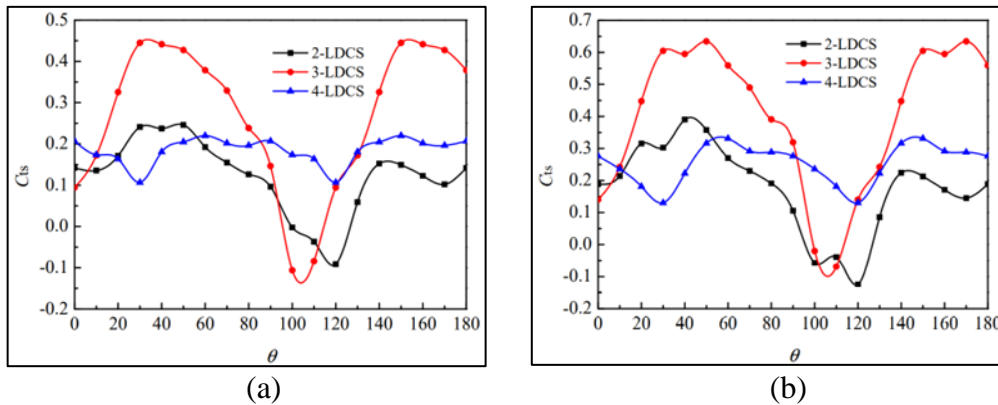
Pada *software* ANSYS 19.0 digunakan model simulasi berupa aliran *incompressible*. Dalam pengaturan statis, *pressure-based solver* digunakan pada aliran masuk yang stabil. Model turbulensi diatur *model double standard k-ε* dan *pressure-velocity coupling* diatur SIMPLEC. Kriteria konvergensi residual ditetapkan pada nilai 1×10^{-5} dengan menggunakan interpolasi *second-order upswing*.



Gambar 2. 26 Tampilan kontur kecepatan pada LDCS tiga *blade* (a) sudut putar 30° (b) sudut putar 100° (Feng et al, 2021)

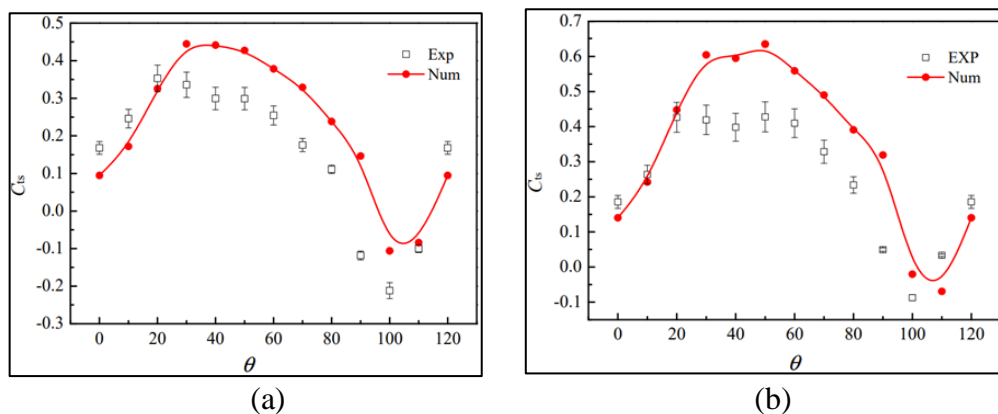
Setelah pengaturan simulasi selesai diatur, maka dapat ditampilkan hasil kontur seperti gambar 2.26 diatas. Pada gambar 2.26 (a) dapat dilihat ruang antara *blade* besar ketika sudut putar sebesar 30° , dimana permukaan cembung *blade* satu dan tiga menabrak langsung ke arah angin yang datang. Sedangkan permukaan cekung dari *blade* dua berada di area *downstream* sehingga menghasilkan torsi yang besar dan positif. Perbedaan tekanan yang besar dapat dicapai di dalam dan di luar *blade*, sehingga meningkatkan peningkatan gaya *lift* yang signifikan di bawah pengaruh karakteristik aerodinamis *blade*, yang selanjutnya mendorong peningkatan torsi pada sudut ini. Maka dari itu nilai C_{ts-max} dari LDCS tiga *blade* muncul ketika sudut putar sebesar 30° . Lalu pada gambar 2.26 (b) menunjukkan sudut putar *blade* 100° , dimana pada kontur terlihat kecepatan permukaan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan

sudut putar 30° dan hanya *blade* tiga yang memiliki permukaan cembung yakni di bagian *upstream*. Oleh karena itu, nilai C_{Ts} tergolong rendah pada sudut putar *blade* 100° .



Gambar 2. 27 Grafik perbandingan nilai C_{Ts} terhadap sudut putar *blade* pada setiap variasi *blade* (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s (Feng et al, 2021)

Dapat dilihat pada gambar 2. 27 (a), C_{Ts} dari tiga variasi *blade* LDCS dalam satu periode rotasi kecepatan 6 m/s memiliki aturan distribusi yang sangat berbeda. Terlihat nilai C_{Ts} dari variasi jumlah *blade* tiga menunjukkan lebih tinggi dibandingkan dengan kedua variasi lainnya, dimana puncak pada sudut putar sebesar 30° dicapai sekitar 0,45, jika dibandingkan dengan variasi dua dan empat *blade* didapatkan nilai C_{Ts} jauh lebih kecil. Oleh karena itu, variasi tiga *blade* memiliki karakteristik awal (*self-starting*) yang paling baik pada kecepatan angin yang lebih rendah. Namun, nilai C_{Ts} terendah dari variasi tiga *blade* sebesar -0,15 pada sudut putar *blade* sekitar 100° – 110° , yang menunjukkan bahwa ada wilayah torsi negatif untuk variasi tiga *blade*. Tetapi hal ini tidak berlaku untuk variasi empat *blade* yang menunjukkan bahwa torsi statis menjadi lebih stabil. Namun, dari rata-rata C_{Ts} variasi *blade* LDCS dua, tiga, dan empat menunjukkan karakteristik aerodinamis terbaik ada pada variasi tiga *blade*. Begitu juga pada gambar 2.27 (b) menunjukkan perbandingan C_{Ts} dari tiga variasi jumlah *blade* LDCS dalam satu periode rotasi pada kecepatan 10 m/s. Dapat dilihat secara keseluruhan *trend* grafik sama seperti kecepatan 6 m/s, hanya saja pada gambar 2.27 (b) nilai C_{Ts} yang didapat lebih besar, hal tersebut dipengaruhi karena kecepatan udara yang melewati *blade* tersebut juga lebih besar.



Gambar 2. 28 Grafik perbandingan nilai C_{Ts} terhadap sudut putar *blade* dengan jumlah *blade* tiga untuk hasil eksperimen dan simulasi (a) kecepatan 6 m/s (b) kecepatan 10 m/s (Feng et al, 2021)

Setelah dilakukan simulasi numerik, dilakukan pula eksperimen *wind tunnel* pada LDCS dengan tiga *blade* yang grafik perbandingannya ditunjukkan pada gambar 2.28. Hasil yang didapatkan yakni nilai C_{Ts} dengan *trend* grafik yang terbentuk pada satu putaran *blade*

menunjukkan kemiripan dengan hasil simulasi, namun jika dilihat berdasarkan data numerik, hasil nilai penelitian berbeda, dimana nilai yang didapat melalui eksperimen sangat rendah dibandingkan dengan simulasi. Maka dari itu pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pada ketiga variasi *blade* perubahan nilai Cts relatif sama pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan 10 m/s, dimana nilai Cts pada kecepatan angin 10 m/s lebih besar dibandingkan dengan pada kecepatan angin 6 m/s. Hal ini menandakan bahwa peningkatan kecepatan angin dapat meningkatkan nilai Cts pada LDCS. Lalu untuk nilai Cts pada variasi jumlah *blade* 3 memiliki *self-starting* yang lebih baik dan untuk jumlah *blade* 4 mendapatkan hasil yang paling stabil jika dibandingkan dengan dua variasi lainnya serta hasil perbandingan nilai Cts pada metode eksperimen akan lebih kecil jika dibandingkan metode simulasi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Simulasi

Pada penelitian ini menggunakan metode numerik dan *blade* statis guna penyederhanaan analisa serta melihat detail aliran yang menghasilkan torsi melalui *software* Gambit 2.4.6 untuk pembuatan geometri, *boundary condition* dan *meshing*, setelah itu di-input ke *software* ANSYS Fluent 19.2 untuk pembuatan simulasi aliran pada *blade* turbin. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan tiga tahapan, yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post processing*. Dalam simulasinya berikut detail tahapan yang digunakan:

3.2 Tahap Pre-Processing

Tahap *pre-processing* adalah tahap awal pembuatan model dari turbin angin tipe Lenz 2 yang perlu dilakukan sebelum melakukan simulasi seperti membuat geometri, *boundary condition* dan *meshing* dari geometri tersebut. Berikut penjelasan lebih lanjut terkait tahap *pre-processing*:

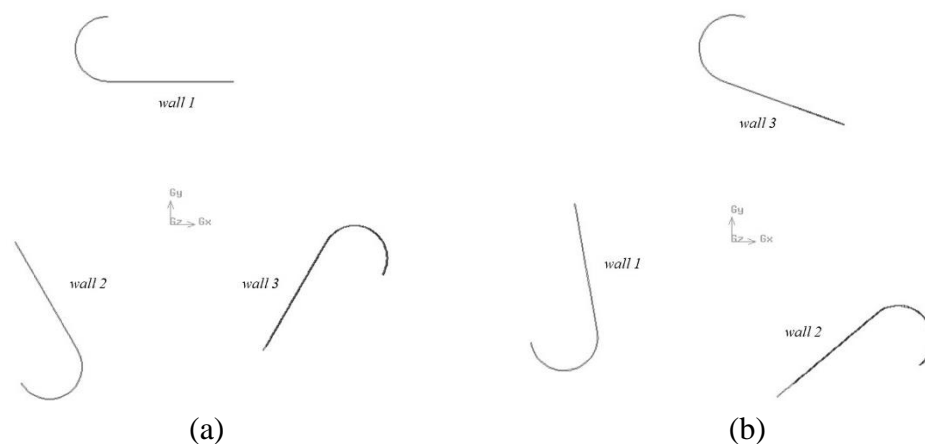
3.2.1 Pembuatan Geometri

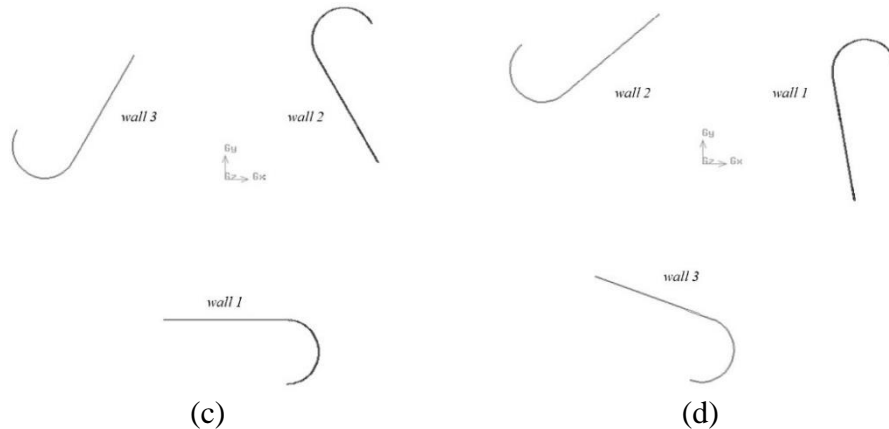
Pembuatan geometri adalah hal paling mendasar dalam melakukan simulasi. Penelitian ini menggunakan model berupa geometri dua dimensi dari turbin angin tipe Lenz 2 dengan jumlah *blade* sebanyak 3 buah dan variasi sudut putar turbin. Penelitian ini memiliki satu domain yaitu *static domain* karena simulasi dilakukan dalam kondisi turbin yang diam. Berikut merupakan ukuran geometri dari turbin angin tipe Lenz 2 yang digunakan pada penelitian ini:

Tabel 3. 1 Ukuran geometri turbin angin tipe Lenz 2 skala simulasi

| Jumlah Blade | Blade Diameter Leading Edge (d) | Chord Length (c) | Diameter Turbin (D) | Sudut Putar Turbin (θ) |
|--------------|---------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------------|
| 3 | 75 mm | 180 mm | 400 mm | 0° |
| 3 | 75 mm | 180 mm | 400 mm | 100° |
| 3 | 75 mm | 180 mm | 400 mm | 180° |
| 3 | 75 mm | 180 mm | 400 mm | 280° |

Setelah ditentukan parameter ukuran turbin angin tipe Lenz 2, berikut ditampilkan gambar geometri dari turbin angin tipe Lenz 2 tampak dua dimensi:

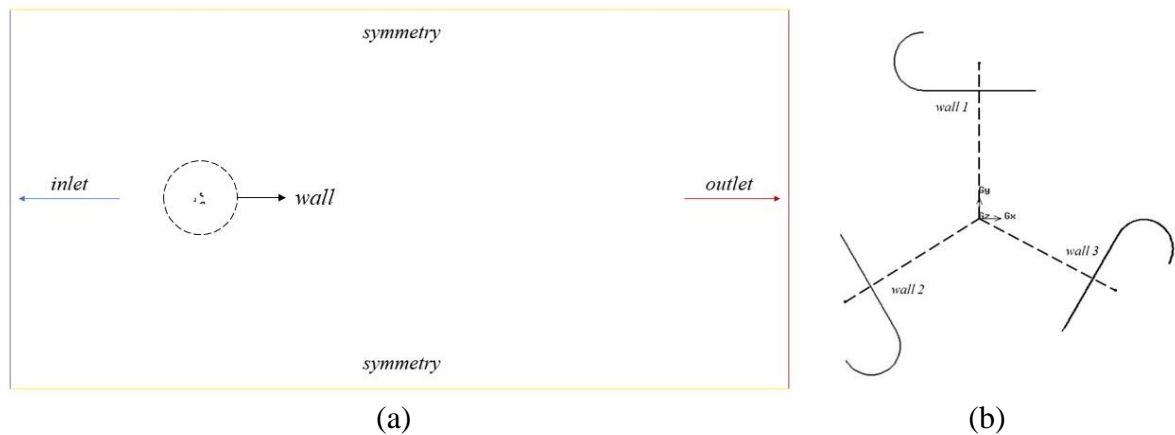




Gambar 3. 1 Variasi turbin angin tipe Lenz 2 (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

3.2.2 Penentuan *Boundary Condition*

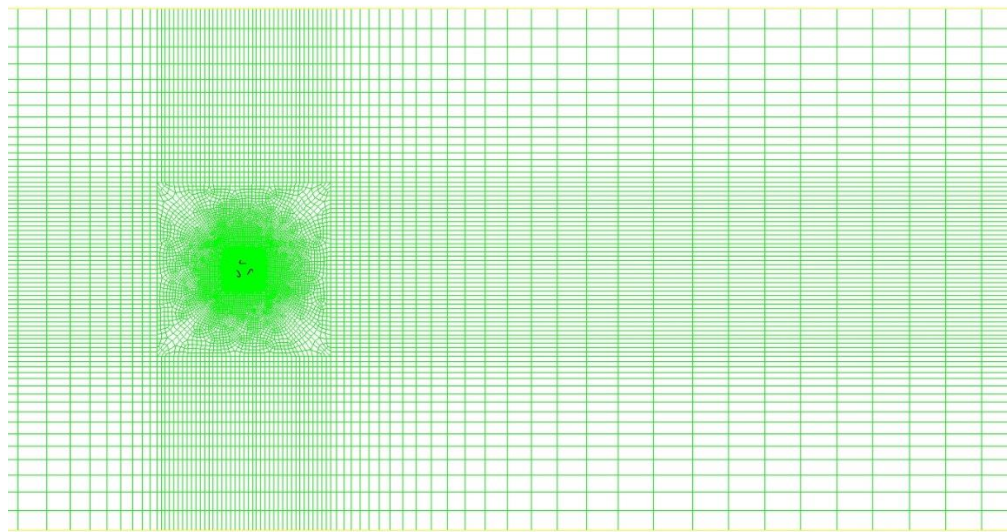
Penentuan *boundary condition* merupakan proses untuk memberikan kondisi batas setiap bagian pada simulasi. Pada penelitian ini terdapat beberapa batasan antara lain *inlet*, *outlet*, *sym*, *wall 1*, *wall 2* dan *wall 3* dengan detail *boundary condition* untuk *inlet* diatur dengan *velocity inlet*, dimana merupakan daerah masuknya udara kedalam sistem. Lalu pada *outlet* diatur *pressure outlet*, dimana *boundary*-nya merupakan tempat keluar udara saat meninggalkan suatu sistem. Pada *sym* diatur *symmetry* yang berarti batas atas dan bawah, lalu untuk *wall 1*, *wall 2* dan *wall 3* diatur *wall* yang diasumsikan sebagai *boundary* dari *blade* pada turbin.



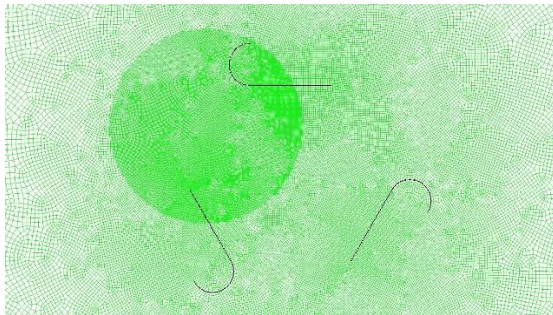
Gambar 3. 2 *Boundary condition* simulasi turbin angin tipe Lenz 2 (a) *domain* keseluruhan (b) *domain wall*

3.2.3 Pembuatan *Meshing*

Pada tahap pembuatan *meshing* dilakukan proses pembagian komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil. Dalam proses ini ukuran dari *mesh* pada suatu objek simulasi mempengaruhi ketelitian yang akan dilakukan dimana semakin besar jumlah elemen *meshing*, maka hasil *meshing* akan semakin halus dan detail. Namun jika elemen simulasi yang kita buat semakin besar, maka akan berpengaruh terhadap berat proses simulasi numerik yang akan dijalankan serta besar ukuran *file*. Hasil *meshing* bisa dilihat pada gambar di bawah ini:



(a)



(b)



(c)

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

Dari hasil pada gambar 3.3 dilakukan *meshing* dengan bentuk sel *quadrilateral* dengan bentuk sel *meshing* segi empat untuk keseluruhan domain simulasi. Lalu guna menambahkan detail *meshing* disekitar *blade*, maka ditambahkan *local refinement* di arah masuknya aliran angin dengan penambahan *region circle* sebesar 0,17 m. Dari *setting* tersebut terlihat bahwa hasil *meshing* di sekitar ujung *blade* menjadi lebih padat.

3.3 Tahap Processing

Tahapan *processing* merupakan proses lanjutan dari pembuatan *meshing* pada tahap *pre-processing*, dengan cara melakukan *input file meshing* guna menjalankan simulasi. Tahap *processing* termasuk tahapan yang paling penting dikarenakan hal yang bersinggungan dengan parameter dan variasi penelitian digunakan dalam tahap ini. Berikut merupakan detail parameter dan variasi yang dipakai dalam penelitian ini:

Tabel 3. 2 Detail *input* parameter simulasi

| Parameter | Variasi |
|------------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Solver type</i> | <i>Pressure-Based</i> |
| <i>Model viscous</i> | <i>Standard k-ε</i> |
| <i>Materials</i> | Udara dan aluminum |
| <i>Pressure-velocity coupling scheme</i> | SIMPLE |
| <i>Gradient</i> | <i>Least squares cell based</i> |
| <i>Pressure</i> | <i>Second order</i> |

| | |
|-----------------------------------|------------------------------|
| <i>Momentum</i> | <i>Second order upwind</i> |
| <i>Turbulent kinetic energy</i> | <i>Second order upwind</i> |
| <i>Turbulent dissipation rate</i> | <i>Second order upwind</i> |
| <i>Convergence criteria</i> | 1×10^{-6} |
| <i>Initialization method</i> | <i>Hybrid initialization</i> |

Jika dilihat dari tabel 3.2, pada penelitian ini menggunakan *solver type pressure-based* dan *velocity formulation absolute* serta aspek waktu diatur *steady* dan aspek dua dimensi *space* diatur *planar*. Untuk *model viscous* diatur menjadi *standard k-ε* dikarenakan aliran yang akan disimulasikan berupa aliran turbulen. Lalu untuk material yang digunakan dalam simulasi ini terbagi menjadi dua macam, yang pertama adalah *fluid* yang berupa udara dengan mempresentasikan aliran udara disekitar *blade* turbin dengan besar densitas sebesar $1,225 \text{ kg/m}^3$, lalu ada *solid* yang menunjukkan jenis material *blade* turbin yang digunakan berupa aluminium dengan besar densitas sebesar 2719 kg/m^3 .

Setelah itu untuk penentuan *boundary condition* di *software ANSYS Fluent 19.2*, *boundary condition inlet* diatur dengan spesifikasi *velocity specification method* menjadi *magnitude, normal to boundary* dengan *velocity magnitude* menyesuaikan variasi kecepatan dari aliran angin yang telah ditentukan yakni 4; 5; dan 6 m/s. Sedangkan untuk *specification method* diatur menjadi *intensity and length scale* dengan *turbulent intensity* sebesar 10% dan *turbulent length scale* sebesar 0,2 m. Simulasi ini menggunakan skema *pressure-velocity coupling* dengan jenis SIMPLE. Lalu untuk detail *spatial discretization* antara lain pada *gradient* diatur *least squares cell based*, *pressure* diatur *second order*, *momentum* diatur *second order upwind*, *turbulent kinetic energy* diatur *second order upwind* dan untuk *turbulent dissipation rate* diatur *second order upwind*.

Dalam bagian *residual monitor* akan diatur *convergence criterion* yang berupa *absolute* dengan *absolute criteria* dengan nilai masing-masing sebesar 1×10^{-6} . Jika sudah dilanjutkan dengan perhitungan dengan metode *Hybrid Initialization*. Setelah itu baru dapat dilakukan *run* iterasi, dimana iterasi tersebut akan berhenti berjalan jika sudah mencapai titik konvergen. Namun apabila belum mencapai titik konvergensi sampai batas jumlah iterasi yang ditentukan, maka dapat ditambahkan lagi jumlah iterasi tersebut pada kolom iterasi.

3.4 Tahap Post Processing

Tahapan ini merupakan langkah terakhir dalam proses simulasi. Dalam tahapan dilakukan pengolahan data hasil simulasi dan menginterpretasi hasil yang diperoleh dalam bentuk data distribusi dan visualiasi. Dalam proses *post processing* dapat memberikan tampilan grafik yang menunjukkan *mesh*, *contours*, *vectors*, *pathlines* dan *particle tracks*. Sedangkan pada penelitian ini hanya berfokus pada hasil *pressure contours* dan *velocity vectors*.

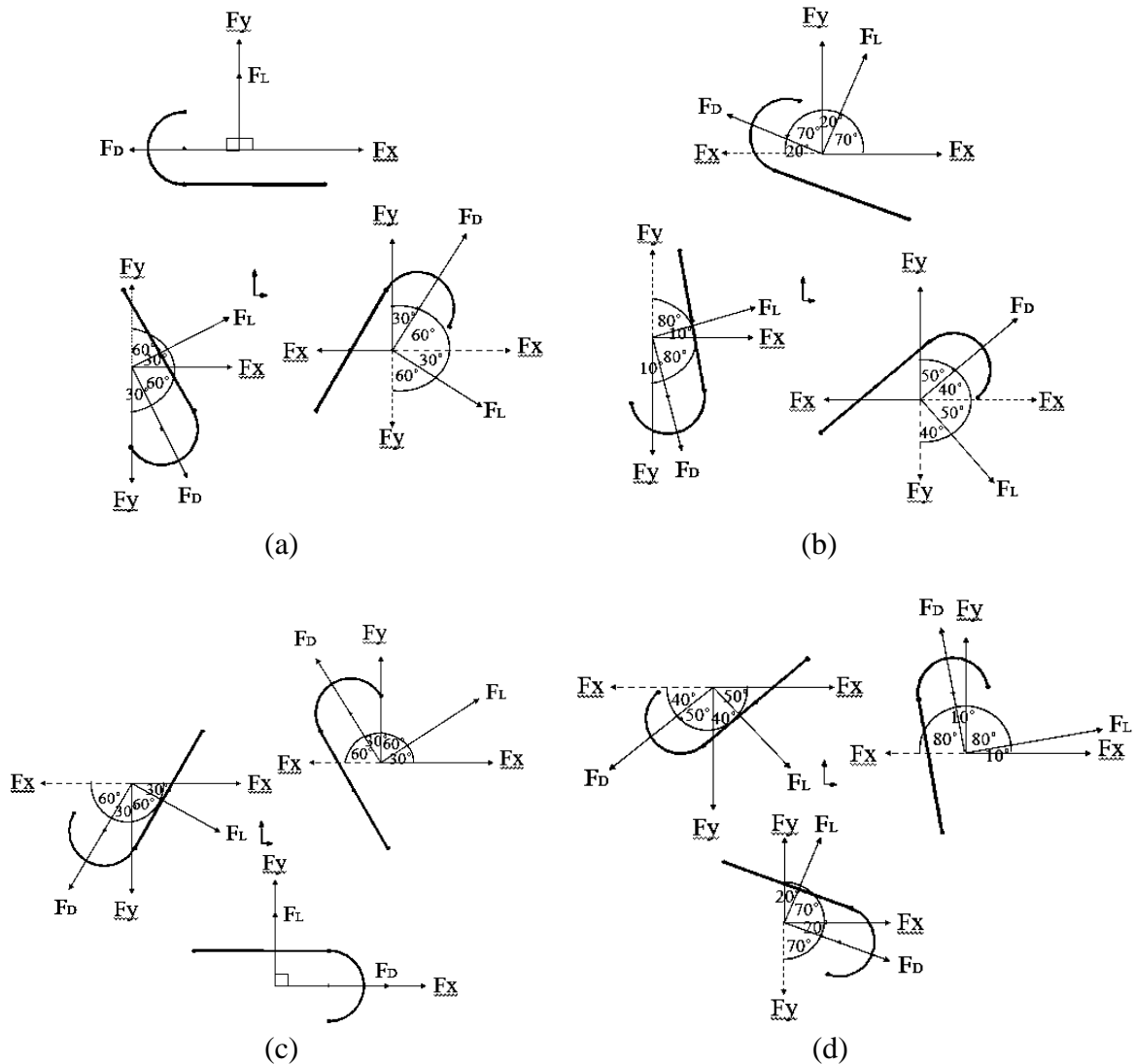
3.5 Data Hasil Simulasi

Penelitian ini memiliki beberapa data hasil simulasi yang akan digunakan untuk dilakukan analisa secara numerik, yakni nilai gaya *drag* dan gaya *lift*, torsi statis dan koefisien torsi statis. Data simulasi ini nantinya akan dianalisa dan dibandingkan dalam bentuk tabel ataupun grafik dengan data hasil eksperimen. Namun melalui *software ANSYS Fluent 19.2*, penulis hanya dapat mendapatkan nilai dari gaya ke sumbu x dan sumbu y, yang nantinya dapat dilakukan perhitungan lebih lanjut setelah diketahui *free body diagram* untuk masing-masing gaya yang bekerja pada *blade*.

3.5.1 Free Body Diagram Vektor Gaya

Free body diagram merupakan ilustrasi untuk memvisualisasikan vektor gaya yang didasarkan pada orientasi *blade* yang diasumsikan gaya *drag* (gaya untuk memutar *blade*) dan

gaya *lift* (gaya untuk mendorong *blade*) sama dengan arah gaya tangensial dan gaya normal. Berikut merupakan ilustrasi *blade*-nya:



Gambar 3. 4 *Free Body Diagram* vektor gaya (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

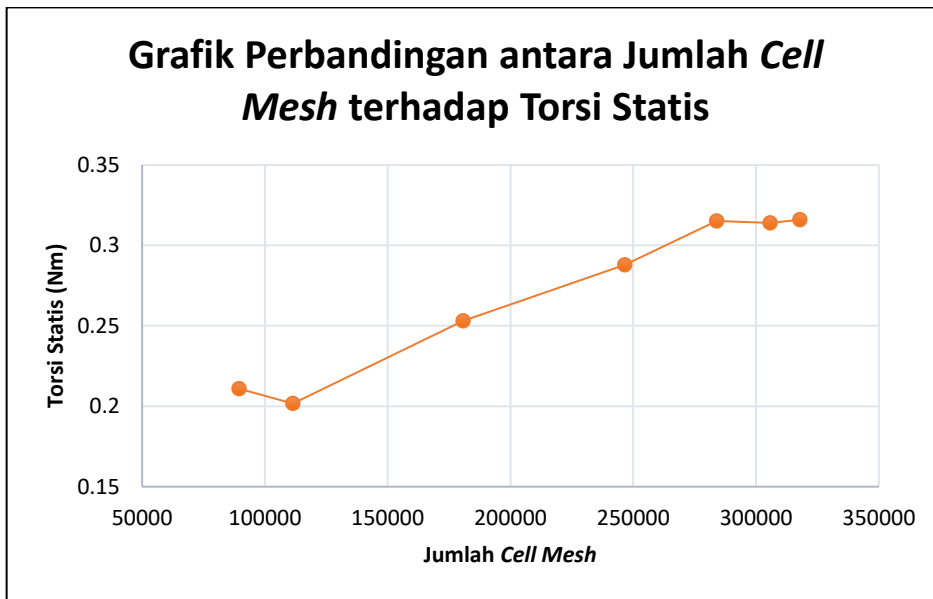
3.6 Grid Independency Test

Grid independency test adalah salah satu metode yang cukup umum dan digunakan untuk menentukan *grid* yang optimal agar didapatkan hasil yang paling akurat dalam pemodelan CFD. Perbandingan yang dilakukan pada penelitian ialah antara torsi statis yang dihasilkan pada setiap variasi jumlah *cell* dengan acuan setiap *radius grid refinement*. Berikut hasil *grid independency test* yang didapatkan dalam penelitian ini:

Tabel 3. 3 *Grid Independency Test* pada turbin angin tipe Lenz 2

| No. | Radius Grid Refinement (m) | Jumlah Cell Mesh | Torsi Statis (Nm) | Error Relatif (%) |
|-----|----------------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 1. | 0 | 89526 | 0,210 | - |
| 2. | 0,1 | 111393 | 0.201 | 4,319 |
| 3. | 0,2 | 180765 | 0,253 | 25,491 |
| 4. | 0,3 | 246507 | 0,287 | 13,733 |

| | | | | |
|----|-----|--------|-------|-------|
| 5. | 0,4 | 283929 | 0,315 | 9,493 |
| 6. | 0,5 | 305742 | 0,314 | 0,371 |
| 7. | 0,6 | 317802 | 0,316 | 0,598 |



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

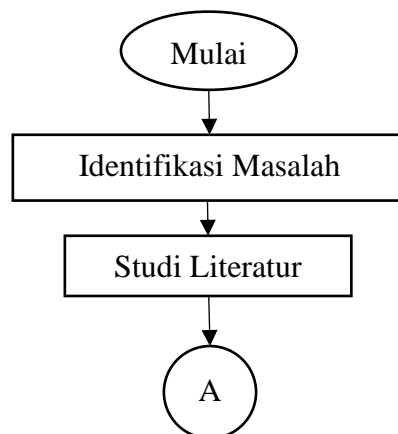
Berdasarkan tabel 3.3 dan gambar 3.5 dapat disimpulkan bahwa penelitian untuk turbin angin tipe Lenz 2 ini menggunakan GIT model nomor 6, dengan *radius grid refinement* sebesar 0,5 m dan jumlah *cell mesh* sebanyak 305742. Hal ini dikarenakan pada model tersebut didapatkan nilai torsi statis sebesar 0,314 Nm, yang berarti nilainya sudah stabil dan optimal jika dibandingkan dengan model dengan *radius grid refinement* lebih besar yang memiliki jumlah *cell* lebih banyak, serta telah memiliki *error* relatif yang rendah.

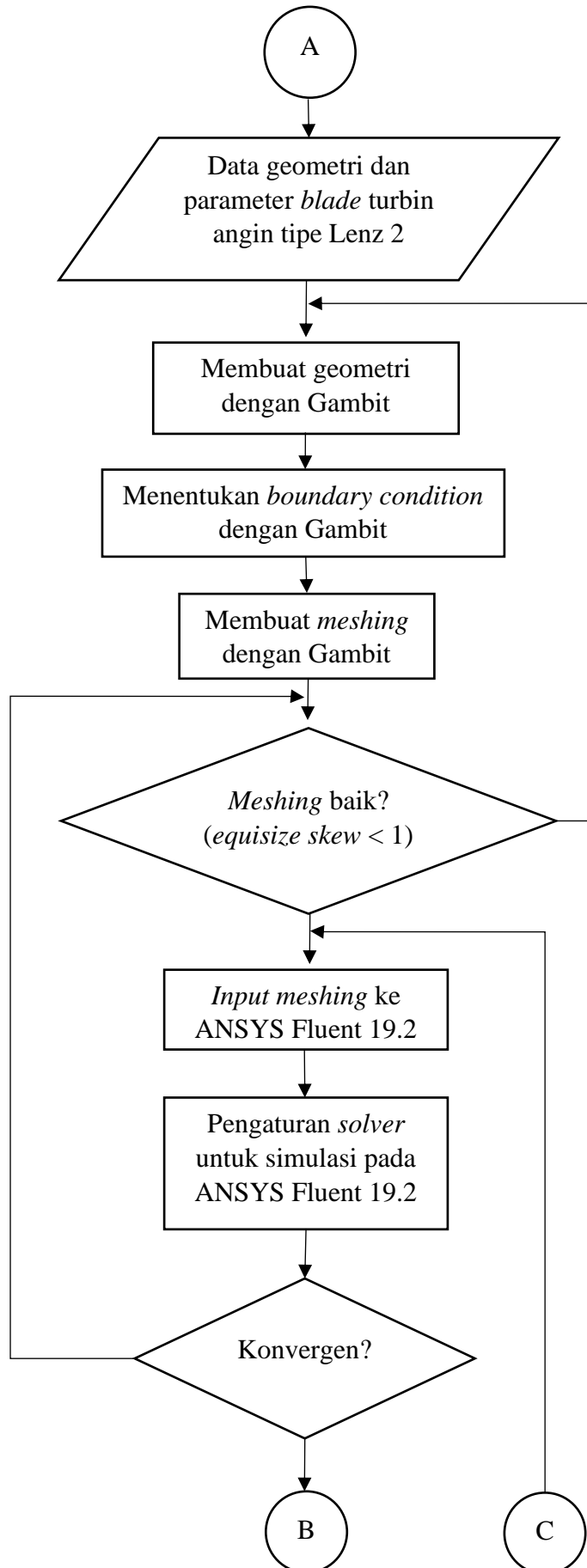
3.7 Diagram Alir

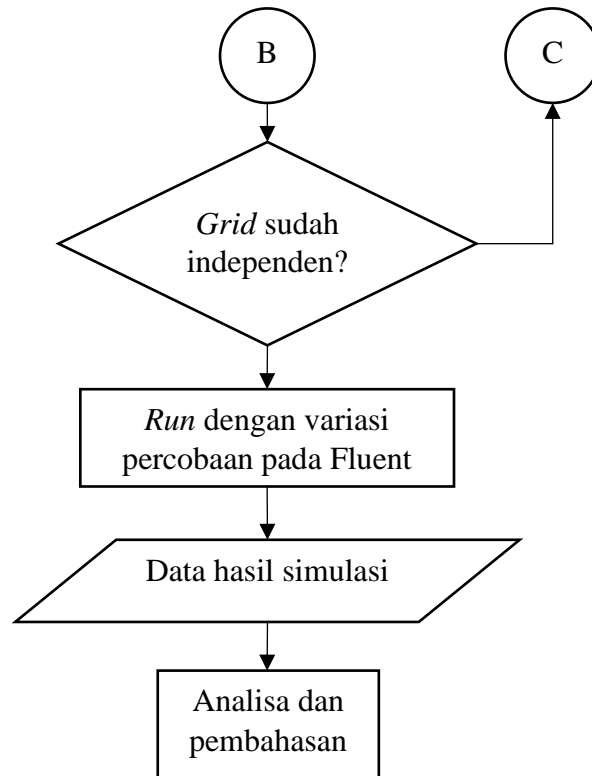
Berikut ditampilkan diagram alir pada penelitian ini, dimana terdapat dua diagram, yaitu diagram penelitian yang menjelaskan tahapan terbentuknya laporan penelitian tugas akhir ini dan tahap simulasi yang menjelaskan tahapan simulasi guna mendapatkan data yang digunakan untuk analisa numerik.

3.7.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan diagram alir penelitian dalam pengerjaan tugas akhir ini:



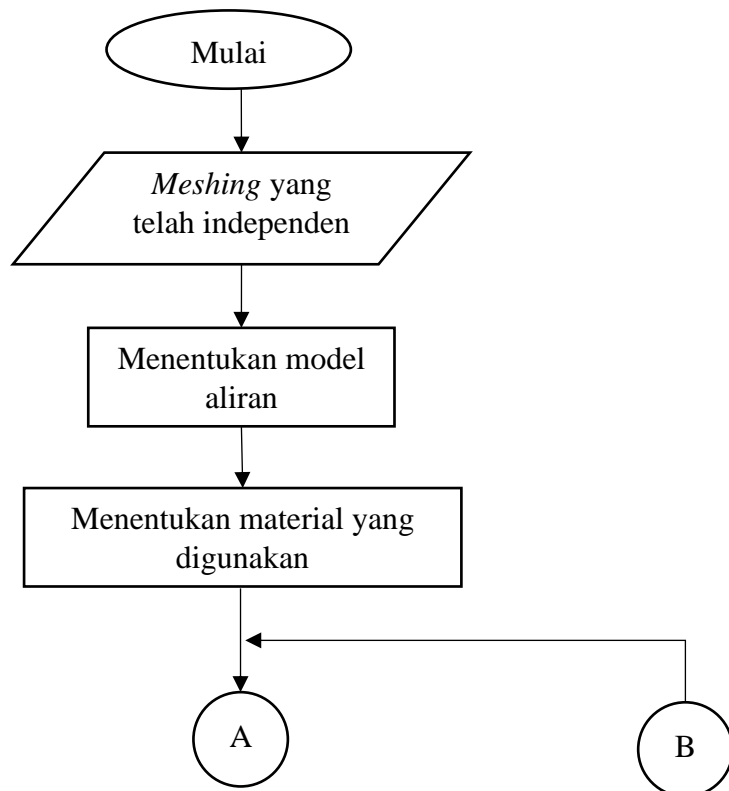


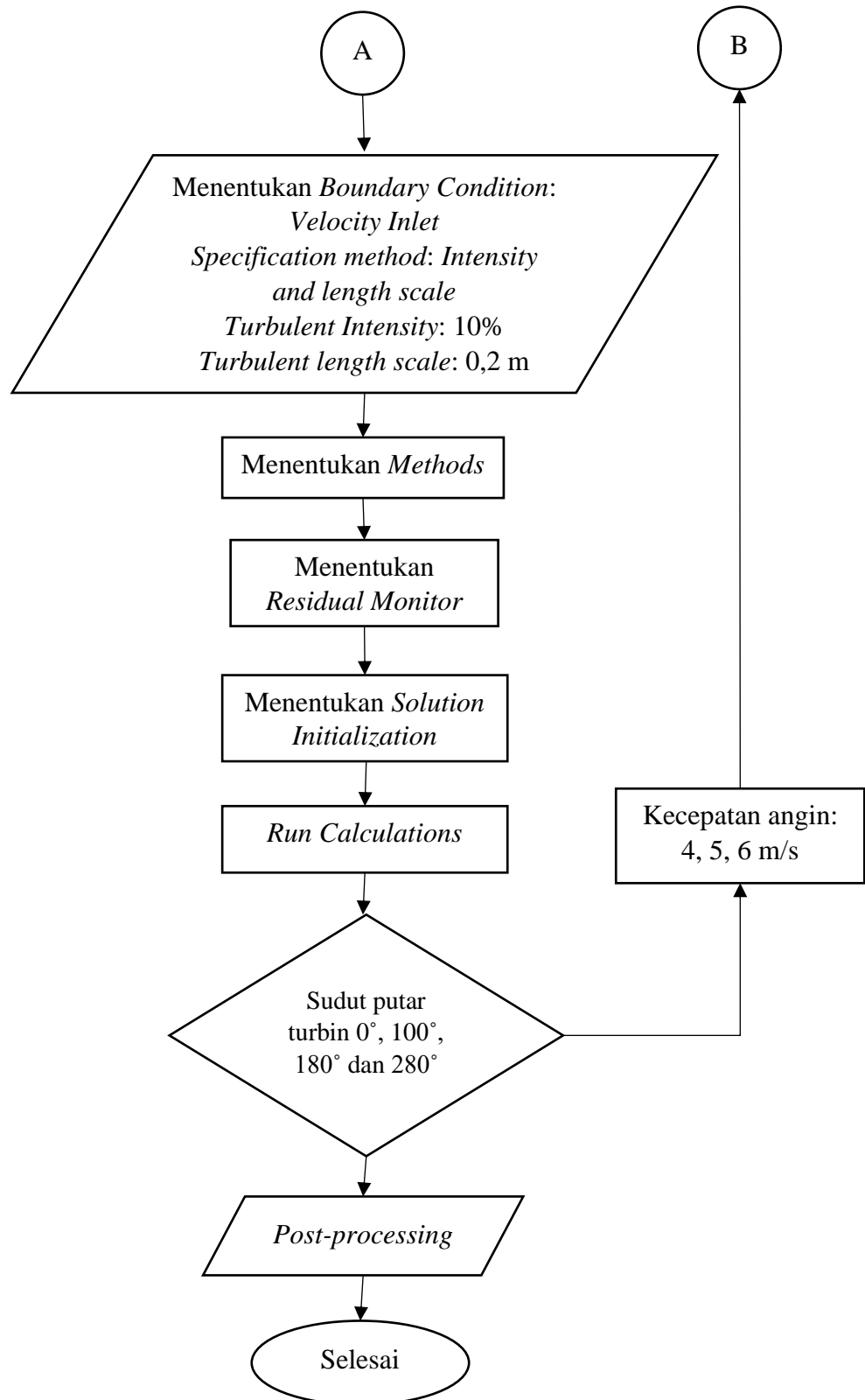


Gambar 3. 6 Diagram alir penelitian

3.7.2 Diagram Alir Simulasi

Berikut merupakan diagram alir simulasi dalam pengerjaan tugas akhir ini:





Gambar 3. 7 Diagram alir simulasi

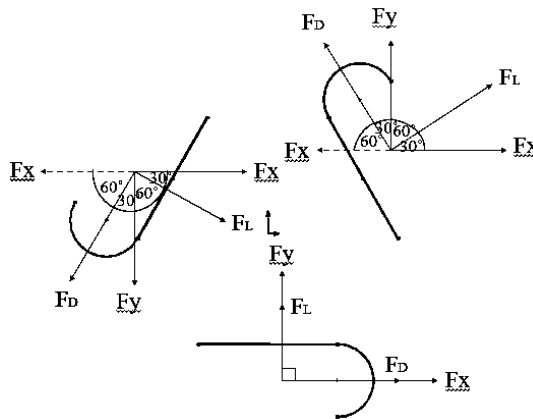
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Contoh Perhitungan

Penelitian ini diawali dengan proses pembuatan desain geometri dan *meshing* dari *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) Lenz 2 menggunakan *software* Gambit 2.4.6. Kemudian dilanjutkan dengan pengambilan data secara simulasi melalui *software* ANSYS Fluent 19.2 yang bertujuan untuk mendapatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift*, torsi statis dan koefisien torsi statis. Dari data hasil simulasi yang didapat, akan dilakukan proses perhitungan lebih lanjut.

4.1.1 Perhitungan Gaya *Drag* dan *Lift*

Pada bab ini dilakukan perhitungan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* untuk tiap *blade* dengan contoh perhitungan pada kecepatan angin yang melewati *blade* sebesar 6 m/s serta pada posisi sudut putar turbin 180°. Berikut tampilan *free body diagram* dan perhitungan tiap gaya *drag* dan gaya *lift* untuk tiap *blade*:



Gambar 4. 1 *Free Body Diagram* vektor gaya pada sudut putar turbin 180°

Berikut perhitungan gaya *drag* untuk *blade* satu:

$$F_D = F_x = 3,433 \text{ N}$$

Lalu berikut merupakan perhitungan gaya *lift* untuk *blade* satu:

$$F_L = F_y = 7,765 \text{ N}$$

Adapun contoh perhitungan gaya *drag* yang digunakan untuk *blade* dua:

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

$$F_D = 2,094 (\sin 60^\circ) - 2,561 (\sin 30^\circ)$$

$$F_D = 0,532 \text{ N}$$

Lalu berikut merupakan perhitungan gaya *lift* untuk *blade* dua:

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

$$F_L = 2,561 (\cos 30^\circ) + 2,094 (\cos 60^\circ)$$

$$F_L = 3,265 \text{ N}$$

Selanjutnya merupakan contoh perhitungan gaya *drag* untuk *blade* tiga:

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

$$F_D = 4,644 (\sin 60^\circ) - 3,355 (\sin 30^\circ)$$

$$F_D = 2,344 \text{ N}$$

Lalu berikut merupakan perhitungan gaya *lift* untuk *blade* tiga:

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

$$F_L = 3,355 (\cos 30^\circ) + 4,644 (\cos 60^\circ)$$

$$F_L = 5,227 \text{ N}$$

Dari perhitungan masing-masing gaya *drag* dan gaya *lift* tiap *blade* diatas didapatkan nilai gaya *drag* dan gaya *lift* total yang didapat pada turbin sudut putar 180° dan kecepatan 6 m/s. Berikut merupakan total perhitungan gaya *drag*:

$$F_D = 3,433 \text{ N} + 0,532 \text{ N} + 2,344 \text{ N}$$

$$F_D = 6,311 \text{ N}$$

Lalu berikut merupakan contoh perhitungan untuk gaya *lift*:

$$F_L = 7,765 \text{ N} + 3,265 \text{ N} + 5,227 \text{ N}$$

$$F_L = 16,259 \text{ N}$$

4.1.2 Perhitungan Torsi Statis

Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai dari torsi statis pada penelitian ini menggunakan persamaan yang mengacu pada persamaan 2.6 dengan contoh perhitungan pada geometri dengan kecepatan angin yang melewati *blade* sebesar 6 m/s serta pada posisi sudut putar turbin 180° sebagai berikut:

$$T_s = F_D \cdot R$$

dimana :
 T_s : Torsi statis (Nm)
 F_D : Gaya *drag* total (N)
 R : Jari-jari turbin (m)

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

$$T_s = 6,311 \text{ N} \times 0,2 \text{ m}$$

$$T_s = 1,262 \text{ Nm}$$

4.1.3 Perhitungan Koefisien *Drag* dan *Lift*

Untuk menghitung nilai koefisien *drag* dan *lift* pada penelitian ini mengacu pada persamaan 2.1 dan 2.2 dengan contoh perhitungan pada geometri dengan kecepatan angin yang melewati *blade* sebesar 6 m/s serta pada posisi *blade* 1 dan sudut putar turbin 180° sebagai berikut:

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

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

$$C_D = \frac{2 \times 3.4335044 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,475 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$C_D = 0.327819969$$

Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai koefisien *lift* pada penelitian ini menggunakan persamaan sebagai berikut:

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

dimana :

C_D : Koefisien *drag*

C_L : Koefisien *lift*

F_L : Gaya *lift* (N)

ρ : Densitas fluida (kg/m^3)

A : Luas permukaan benda yang dialiri fluida (m^2)

v : Kecepatan aliran fluida (m/s)

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

$$C_L = \frac{2 \times 7.7655919 \text{ N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,475 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$C_L = 0.741433765$$

4.1.4 Perhitungan Koefisien Torsi Statis

Dalam melakukan perhitungan koefisien torsi statis pada penelitian ini mengacu pada persamaan 2.8 dengan contoh perhitungan pada geometri dengan kecepatan angin yang melewati *blade* sebesar 6 m/s serta pada posisi sudut putar turbin 180° sebagai berikut:

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

dimana :

C_{TS} : Koefisien torsi statis

T_s : Torsi statis (Nm)

ρ : Densitas fluida (kg/m^3)

A : Luas permukaan benda yang dialiri fluida (m^2)

v : Kecepatan aliran fluida (m/s)

D : Diameter turbin (m)

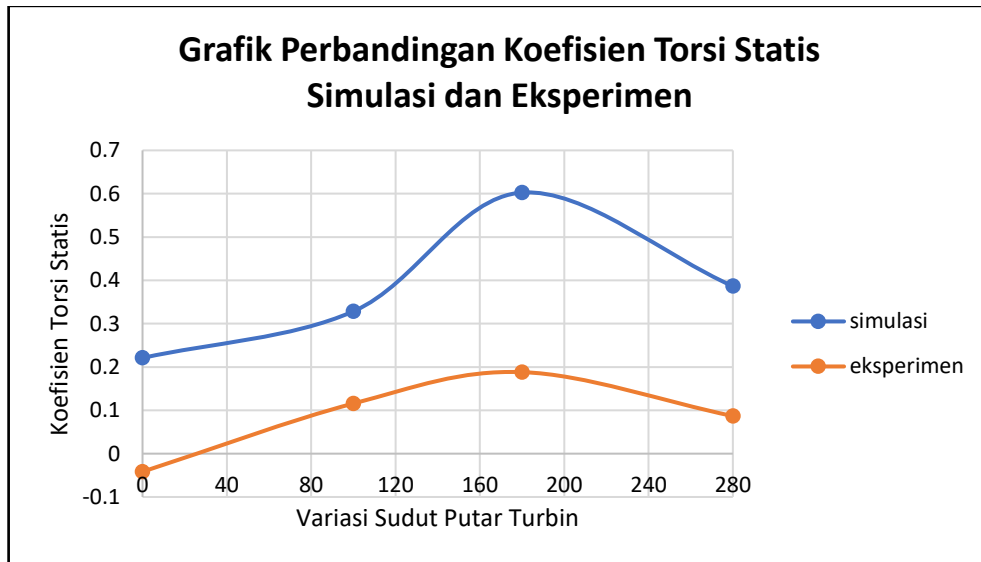
Dengan menggunakan persamaan koefisien torsi statis diatas, maka didapatkan nilai sebagai berikut:

$$C_{TS} = \frac{4 \times 1,262 \text{ Nm}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,475 \text{ m}^2 \times 36 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \times 0,4 \text{ m}}$$

$$C_{TS} = 0,602$$

4.2 Analisa Validasi Data Hasil Simulasi dan Eksperimen

Pada perbandingan ini dilakukan guna memastikan bahwa hasil simulasi dengan hasil eksperimen akurat, dimana validasi berdasarkan hasil eksperimen sebelumnya yang dilakukan oleh **Rahman & Ikhwan (2021)**. Pada eksperimennya menggunakan turbin angin tipe Lenz 2 dengan menggunakan 3 buah *blade*, diameter turbin 400 mm, *diameter leading edge* 75 mm, serta *blade chord length* sebesar 180 mm dengan variasi kecepatan angin yang mengalir sebesar 6 m/s. Berikut hasil perhitungan data untuk masing-masing sudut putar turbin dengan perbandingan hasil eksperimennya:



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

Pada gambar 4.2 terlihat hasil koefisien torsi statis simulasi sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai koefisien torsi statis minimum sebesar 0,220, setelah itu mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada sudut putar turbin 100° sebesar 0,328, lalu selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan yang signifikan yakni sebesar 0,602 yang sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai yang maksimum, dan yang terakhir pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan hingga mencapai nilai sebesar 0,386. Sedangkan untuk hasil koefisien torsi statis eksperimen sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai koefisien torsi statis minimum sebesar -0,041, setelah itu mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada sudut putar turbin 100° yakni sebesar 0,115, lalu selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan yang signifikan yakni sebesar 0,188 yang sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai yang maksimum, dan yang terakhir pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan hingga mencapai nilai sebesar 0,086.

Dari data diatas terlihat nilai koefisien torsi statis minimum terletak pada sudut putar turbin 0° dikarenakan arah gaya dan torsi statis pada *blade* satu adalah *clock wise* (CW), sehingga torsi statis pada *blade* satu bernilai negatif. Selain itu kondisi *blade* tiga yang terletak pada daerah *downstream*, sehingga mengakibatkan turbin terhalang oleh *blade* dua dan membuat gaya di daerah tersebut tidak optimum. Lalu untuk *blade* dua sendiri tidak dapat memanfaatkan gaya *drag* secara optimal. Sedangkan pada sudut putar turbin 180° yang menghasilkan nilai koefisien torsi statis maksimum, dimana penyebaran aliran angin mengenai bagian dalam permukaan *blade* 1 dan *blade* 3 yang mengakibatkan nilai gaya *drag* yang bekerja pada *blade* tersebut dalam kondisi optimum dan juga pada kedua *blade* tersebut berada pada daerah *upstream*. Dari pernyataan tersebut didapatkan bahwa hasil yang didapatkan sesuai

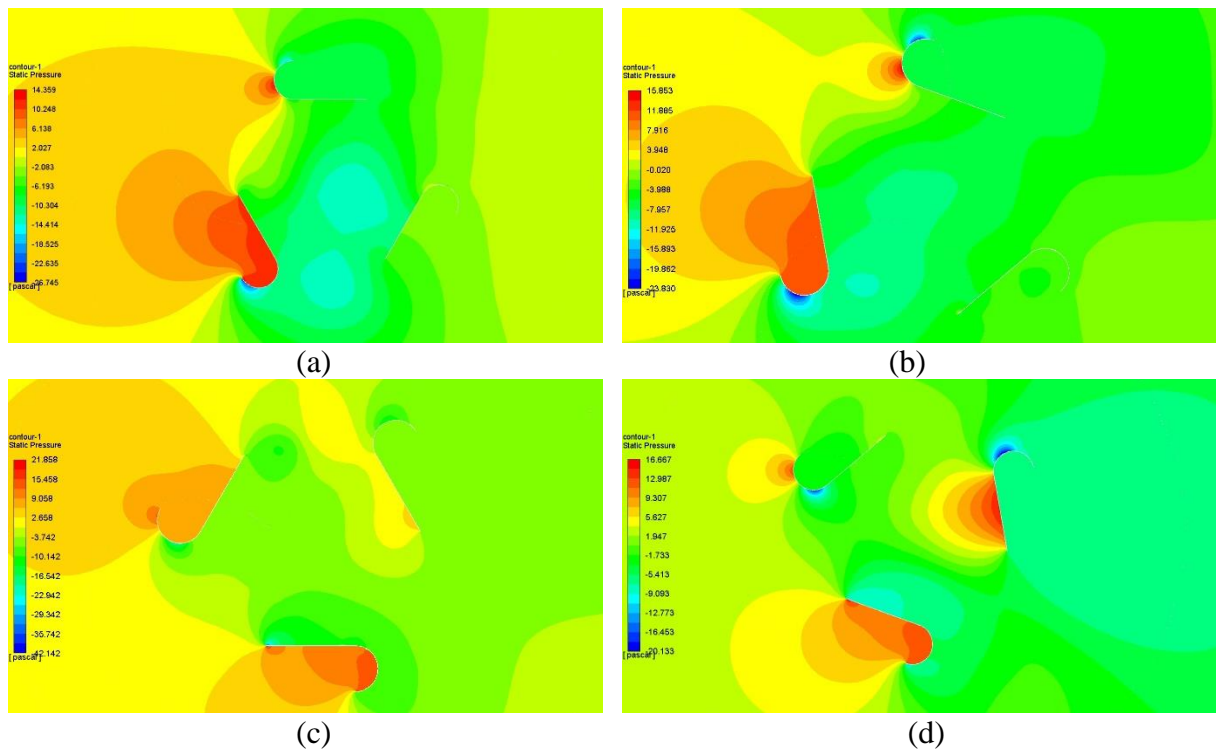
seperti penelitian terdahulu oleh **Feng et al, 2021**, jika dibandingkan *trend* grafik nilai koefisien torsi statis simulasi dan eksperimen, dimana nilai koefisien torsi statis hasil eksperimen akan lebih rendah jika dibandingkan dengan hasil simulasi. Perbedaan hasil koefisien torsi statis antara eksperimen dan simulasi disebabkan oleh beberapa faktor, yakni untuk skala simulasi dikarenakan adanya beberapa aspek yang diabaikan antara lain adalah efek pada ujung *blade* serta pengaruh dari komponen turbin lainnya. Sedangkan pada skala eksperimen disebabkan oleh faktor *human error* serta *bearing* yang digunakan untuk menahan poros turbin tidak dalam keadaan yang optimal.

4.3 Analisa Interaksi Aliran Terhadap Sudut Putar Turbin pada Setiap Variasi Kecepatan Angin

Pada interaksi aliran dalam skala simulasi terdapat beberapa fenomena aliran fluida yang terlihat pada kontur dan vektor, seperti daerah *wake* dan daerah separasi yang nantinya dapat dianalisa secara visual untuk mendapatkan penyebab dari nilai yang didapat. Pada penelitian ini sendiri ditampilkan kontur tekanan dan vektor kecepatan yang bertujuan untuk menganalisa fenomena fluida yang terjadi di sekitar *blade* turbin angin tipe Lenz 2 agar dapat diketahui penyebab dari besaran nilai gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada masing-masing *blade* dan torsi yang dihasilkan pada *blade* tersebut. Berikut merupakan tampilan analisa terkait kontur tekanan dan vektor kecepatan hasil simulasi terhadap sudut putar turbin tertentu untuk masing-masing variasi kecepatan angin:

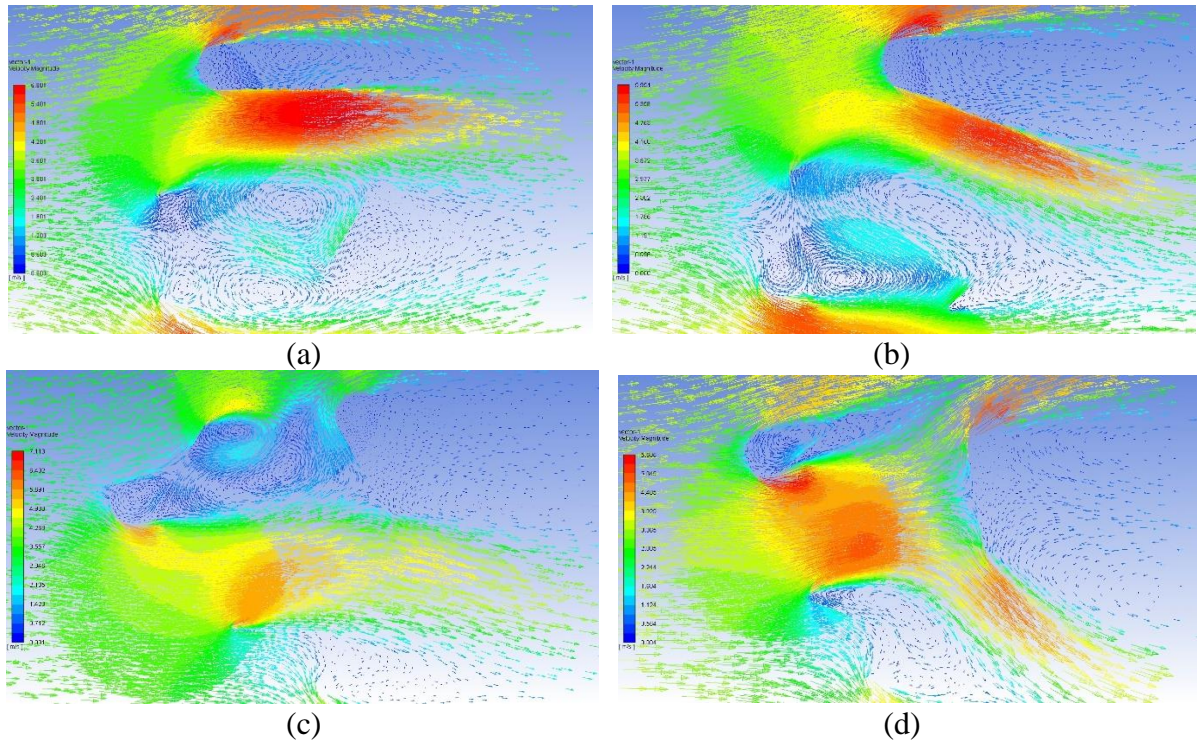
4.3.1 Analisa Kontur Tekanan dan Vektor Kecepatan pada Kecepatan Angin 4 m/s

Berikut merupakan tampilan serta analisa terkait kontur tekanan dan vektor kecepatan hasil simulasi untuk kecepatan angin 4 m/s:



Gambar 4. 3 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Pada gambar 4.3 menampilkan kontur tekanan setiap sudut putar turbin pada kecepatan 4 m/s. Pada gambar 4.3 (a) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 0° yang sekaligus menunjukkan nilai torsi minimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada posisi *blade* dua, dimana arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade* dan angin menabrak langsung sisi bagian dalam *blade* yang menyebabkan tingginya besaran gaya *drag* dan gaya *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tinggi pada *blade* dua jika dibandingkan dengan posisi *blade* lainnya, sedangkan sisi terluar *blade* tidak dikenai aliran angin secara langsung yang menyebabkan tekanan pada bagian tersebut tergolong rendah. Namun, pada posisi *blade* satu terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* dua, dimana pada *blade* satu memiliki gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar, terlebih lagi arah gaya pada *blade* satu adalah *clock wise* (CW), sehingga torsi statis pada *blade* satu bernilai negatif. Begitu pula pada posisi *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan aliran udara yang masuk terhalang oleh posisi *blade* dua di area *upstream* dan juga *blade* tiga terletak pada daerah *downstream*, maka dari itu menyebabkan torsi statis pada *blade* tersebut tergolong rendah. Selanjutnya pada gambar 4.3 (b) yang menunjukkan sudut putar turbin 100° terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada posisi *blade* satu yang sama halnya seperti *blade* dua pada sudut putar turbin 0° , dimana arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade* dan angin menabrak langsung sisi bagian dalam *blade* yang menyebabkan tingginya besaran gaya *drag* dan gaya *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tinggi pada *blade* ini. Sedangkan pada posisi *blade* tiga terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* satu, dimana pada *blade* tiga memiliki gaya *drag* dan *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tidak terlalu besar, terlebih lagi arah gaya dan torsi statis pada *blade* tiga adalah *clock wise* (CW), sehingga torsi statis pada *blade* satu bernilai negatif. Selanjutnya pada posisi *blade* dua tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan posisi *blade* dua berada pada daerah *downstream* dan aliran angin terhalang oleh *blade* satu yang menyebabkan nilai gaya pada *blade* ini rendah. Lalu pada kondisi sudut putar turbin 180° yang ditunjukkan pada gambar 4.3 (c) sekaligus menunjukkan nilai torsi maksimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, dimana posisi *blade* tiga hampir berada tegak lurus dengan arah aliran angin di sisi depan turbin yang memiliki gaya *drag* dan *lift* cukup besar untuk membantu putaran turbin dan membuat besarnya nilai torsi statis, begitu juga pada posisi *blade* satu dapat memanfaatkan gaya *drag* dan *lift* dengan baik sama halnya seperti *blade* tiga yang menyebabkan torsi statis pada *blade* satu tergolong cukup besar pula. Sedangkan pada posisi *blade* dua tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan aliran udara terhalang oleh posisi *blade* tiga di area *upstream* yang membuat aliran angin melalui *blade* dua kurang optimum sehingga menyebabkan gaya *drag* dan *lift* tidak terlalu besar. Yang terakhir pada gambar 4.3 (d) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 280° , dimana pada *blade* tiga dengan posisinya yang berada pada di daerah *upstream* yang hampir sama dengan *blade* satu pada sudut putar turbin 180° mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* tiga sangat besar, dimana gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut juga tergolong besar. Lalu jika kita lihat terdapat ruang yang cukup besar di bagian tengah rotor yang menyebabkan aliran angin yang mengenai *blade* satu yang berada pada daerah *downstream* juga cukup besar. Namun lain halnya pada posisi *blade* dua yang berada pada daerah *upstream*, dimana tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut dikarenakan arah gaya pada *blade* kearah *clock wise* (CW), sehingga gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* dua tidak cukup besar jika dibandingkan dengan kedua *blade* lainnya.



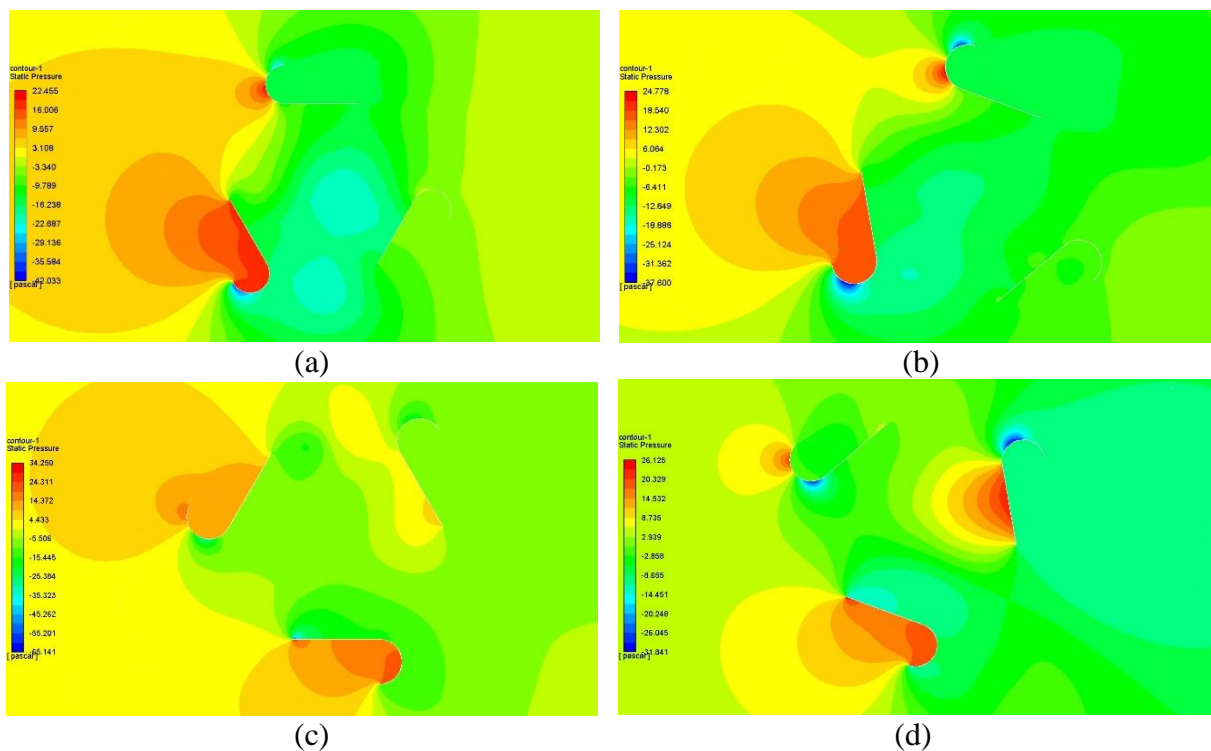
Gambar 4. 4 Tampilan vektor kecepatan pada kecepatan 4 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Adapun pada gambar 4.4 menampilkan vektor kecepatan setiap sudut putar turbin pada kecepatan angin 4 m/s. Pada gambar 4.4 (a) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 0° yang menghasilkan nilai torsi terkecil dan dapat dibuktikan pada *blade* satu terlihat adanya *wake* pada area separasi di belakang *blade*. Lalu pada *blade* dua sama halnya dengan *blade* satu terlihat adanya *wake* dan *vortex* yang terbilang cukup besar pada area separasi di belakang *blade* yang membuat kecepatan angin untuk melewati *blade* tiga di daerah *downstream* terhalang, dimana pada area tersebut tidak tertabrak angin secara langsung, dikarenakan aliran angin sudah terlebih dahulu tertabrak oleh *blade* dua. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut tidak terlalu berpengaruh serta menghasilkan torsi statis yang kecil pula. Selanjutnya pada gambar 4.4 (b) menunjukkan untuk sudut putar turbin 100° , dimana pada *blade* dua tidak dilewati angin dengan kecepatan yang maksimal dikarenakan sama halnya seperti *blade* tiga pada sudut putar turbin 0° sebelumnya, yang terletak pada daerah *downstream* dan aliran anginnya sudah minimum karena terhalang dan tertabrak oleh bagian *blade* satu pada daerah *upstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* dua tergolong kecil. Namun beda halnya dengan *blade* satu dan *blade* tiga, dimana posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* yang dapat langsung bertabrakan langsung dengan *blade* serta aliran angin yang melewati *blade* masih maksimal. Terlebih lagi pada *blade* satu aliran angin langsung menabrak sisi terdalam *blade*. Hal tersebut mengakibatkan besarnya gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada kedua *blade* tersebut, serta menghasilkan nilai torsi statis yang besar. Sedangkan pada gambar 4.4 (c) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 180° yang menghasilkan nilai torsi terbesar dikarenakan pada *blade* tiga berada pada daerah *upstream* dan hampir sejajar dengan aliran angin yang dilewati angin secara langsung. Begitu juga pada *blade* satu yang sama halnya dengan *blade* tiga, dimana *blade* bertabrakan langsung dengan arah aliran angin. Maka dari itu kedua *blade* tersebut mampu menghasilkan gaya *drag* dan *lift* yang besar. Namun untuk *blade* dua terletak pada daerah *downstream* yang membuat aliran angin terlebih dahulu bertabrakan dengan *blade* tiga yang terletak di bagian *upstream* sehingga tidak

memiliki pengaruh yang signifikan. Selanjutnya terlihat pada gambar 4.4 (d) yang menunjukkan vektor kecepatan pada sudut putar turbin 280° yang dapat dilihat bahwa ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, dimana memungkinkan aliran angin masuk melewati rotor dan masuk ke daerah *downstream* dengan kecepatan maksimal, contohnya pada *blade* satu yang terletak pada daerah *downstream* memiliki besaran gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar jika dibandingkan dengan besaran gaya pada daerah *downstream* di sudut putar turbin lainnya. Walaupun pada sudut putar turbin ini daerah *wake* dan daerah separasi yang cukup besar berada di belakang *blade* satu, bukan pada area tengah *blade* yang membuat tidak terlalu berpengaruh pada keseluruhan putaran *blade*. Lalu untuk *blade* dua dan *blade* tiga sama halnya dengan *blade* yang terletak pada daerah *upstream* yang memiliki gaya *drag* dan gaya *lift* yang besar pula.

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

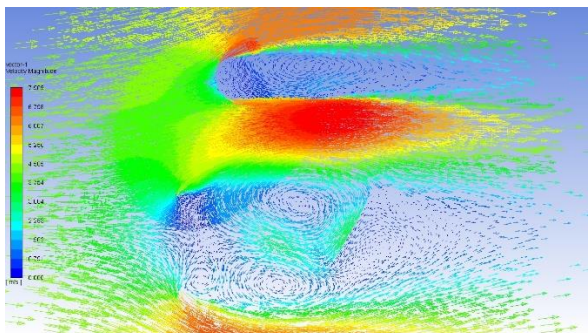
Berikut merupakan tampilan serta analisa terkait kontur tekanan dan vektor kecepatan hasil simulasi untuk kecepatan angin 5 m/s:



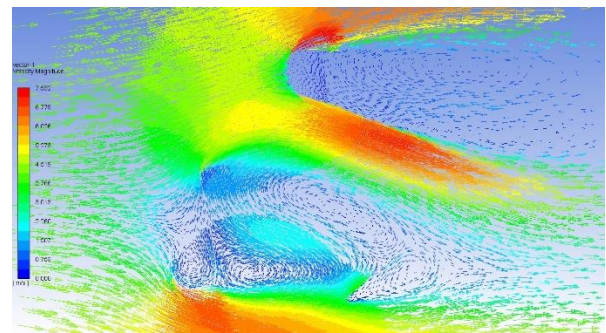
Gambar 4.5 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Pada gambar 4.5 menampilkan kontur tekanan setiap sudut putar turbin pada kecepatan 5 m/s. Pada gambar 4.5 (a) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 0° , dimana nilai torsi minimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, terlihat pada posisi *blade* dua arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade* dan angin menabrak langsung sisi bagian dalam *blade* yang menyebabkan tingginya besaran gaya *drag* dan gaya *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tinggi pada *blade* dua, sedangkan sisi terluar *blade* tidak dikenai aliran angin secara langsung yang menyebabkan tekanan pada bagian tersebut tergolong rendah. Namun, pada *blade* satu terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* dua, dimana pada *blade* satu memiliki gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar. Begitu pula pada *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar,

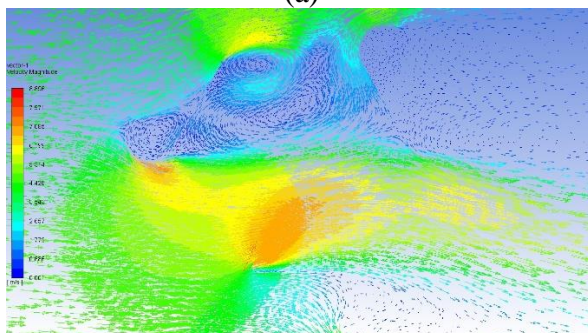
dikarenakan aliran udara yang masuk terhalang oleh posisi *blade* dua di area *upstream* dan juga *blade* tiga terletak pada daerah *downstream*, maka dari itu menyebabkan torsi statis pada *blade* tersebut tergolong rendah. Selanjutnya pada gambar 4.5 (b) yang menunjukkan sudut putar turbin 100° terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada posisi *blade* satu yang sama halnya seperti *blade* dua pada sudut putar turbin 0° , dimana arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade*. Sedangkan pada posisi *blade* tiga terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* satu, dimana pada *blade* tiga memiliki gaya *drag* dan *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tidak terlalu besar. Selanjutnya pada posisi *blade* dua tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan posisi *blade* dua berada pada daerah *downstream* dan aliran angin terhalang oleh *blade* satu. Lalu pada gambar 4.5 (c) menunjukkan sudut putar turbin 180° dan menunjukkan nilai torsi maksimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, dimana posisi *blade* tiga hampir berada tegak lurus dengan arah aliran angin di sisi depan turbin yang memiliki gaya *drag* dan *lift* cukup besar untuk membantu putaran turbin dan membuat besarnya nilai torsi statis, begitu juga pada posisi *blade* satu dapat memanfaatkan gaya *drag* dan *lift* dengan baik. Sedangkan pada posisi *blade* dua tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan aliran udara terhalang oleh posisi *blade* tiga di area *upstream* yang membuat aliran angin melalui *blade* dua kurang optimum sehingga menyebabkan gaya *drag* dan *lift* tidak terlalu besar namun masih dapat membantu menggerakkan *blade* turbin. Yang terakhir pada gambar 4.5 (d) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 280° , dimana pada *blade* tiga dengan posisinya yang berada pada di daerah *upstream* mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* tiga sangat besar, dimana gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut juga tergolong besar. Lalu jika kita lihat terdapat ruang yang cukup besar di bagian tengah rotor yang menyebabkan aliran angin yang mengenai *blade* satu yang berada pada daerah *downstream* juga cukup besar. Namun lain halnya pada posisi *blade* dua yang berada pada daerah *upstream*, dimana tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade* tersebut dikarenakan arah gaya pada *blade* kearah *clock wise* (CW) yang meyebabkan besaran nilai pada sudut putar turbin ini tergolong rendah.



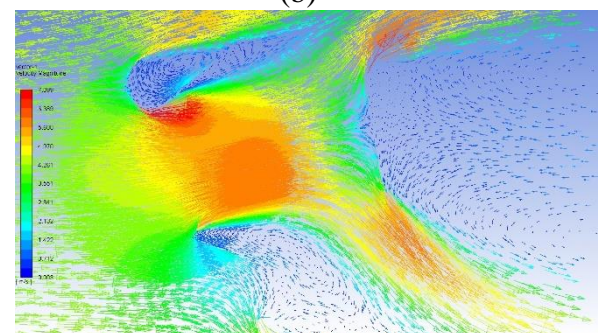
(a)



(b)



(c)



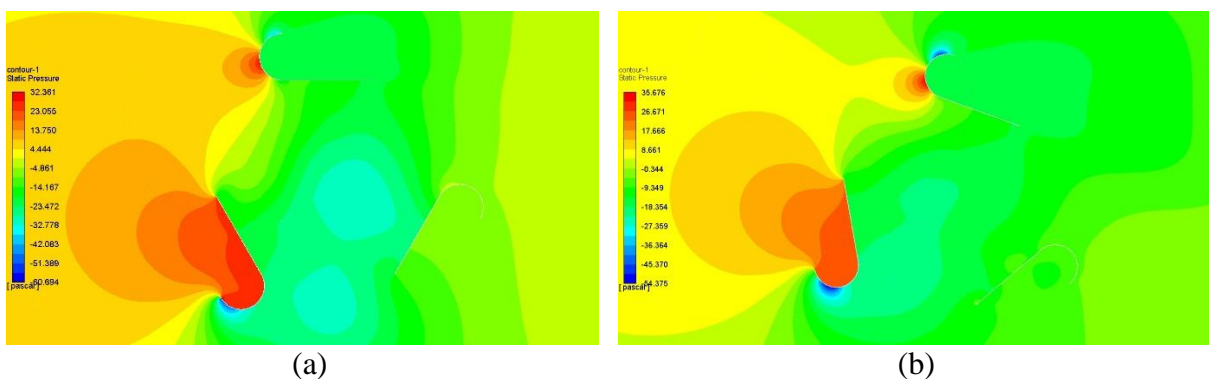
(d)

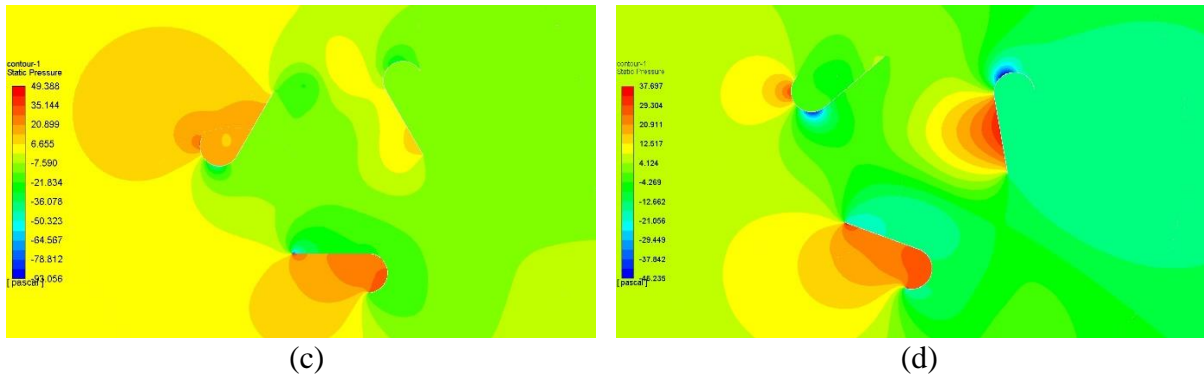
Gambar 4. 6 Tampilan vektor kecepatan pada kecepatan 5 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Berikut merupakan vektor kecepatan setiap sudut putar turbin pada kecepatan angin 5 m/s yang ditampilkan pada gambar 4.6. Pada gambar 4.6 (a) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 0° yang menghasilkan nilai torsi minimum, dimana pada *blade* satu terlihat adanya *wake* pada area separasi di belakang *blade*. Lalu pada *blade* dua juga terlihat adanya *wake* dan *vortex* yang terbilang cukup besar pada area separasi di belakang *blade* yang membuat kecepatan angin untuk melewati *blade* tiga di daerah *downstream* terhalang, dimana pada area tersebut tidak tertabrak angin secara langsung, dikarenakan aliran angin sudah terlebih dahulu tertabrak oleh *blade* dua. Lalu pada gambar 4.6 (b) menunjukkan sudut putar turbin 100°, dimana *blade* dua tidak dilewati angin dengan kecepatan yang maksimal dikarenakan terletak pada daerah *downstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* dua tergolong kecil. Namun beda halnya dengan *blade* satu dan *blade* tiga, dimana posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* yang bertabrakan langsung dengan *blade* serta aliran angin yang melewati *blade* masih maksimal. Terlebih lagi pada *blade* satu aliran angin langsung menabrak sisi terdalam *blade*. Hal tersebut mengakibatkan besarnya gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada kedua *blade* tersebut, serta menghasilkan nilai torsi statis yang besar. Sedangkan pada gambar 4.6 (c) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 180° yang menghasilkan nilai torsi terbesar dikarenakan pada *blade* tiga berada pada daerah *upstream* dan hampir sejajar dengan aliran angin yang dilewati angin secara langsung. Begitu juga pada *blade* satu yang sama halnya dengan *blade* tiga, dimana *blade* bertabrakan langsung dengan arah aliran angin. Maka dari itu kedua *blade* tersebut mampu menghasilkan gaya *drag* dan *lift* yang besar. Namun untuk *blade* dua terletak pada daerah *downstream* yang membuat aliran angin terlebih dahulu bertabrakan dengan *blade* tiga yang terletak di bagian *upstream* sehingga tidak memiliki pengaruh yang signifikan. Selanjutnya terlihat pada gambar 4.6 (d) yang menunjukkan vektor kecepatan pada sudut putar turbin 280° yang dapat dilihat bahwa ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, dimana memungkinkan aliran angin masuk melewati rotor dan masuk ke daerah *downstream* dengan kecepatan maksimal, contohnya pada *blade* satu yang terletak pada daerah *downstream* memiliki besaran gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar jika dibandingkan dengan besaran gaya pada daerah *downstream* di sudut putar turbin lainnya. Walaupun pada sudut putar turbin ini daerah *wake* dan daerah separasi yang cukup besar berada di belakang *blade* satu, bukan pada area tengah *blade* yang membuat tidak terlalu berpengaruh pada keseluruhan putaran *blade*.

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

Berikut merupakan tampilan serta analisa terkait kontur tekanan dan vektor kecepatan hasil simulasi untuk kecepatan angin 6 m/s:

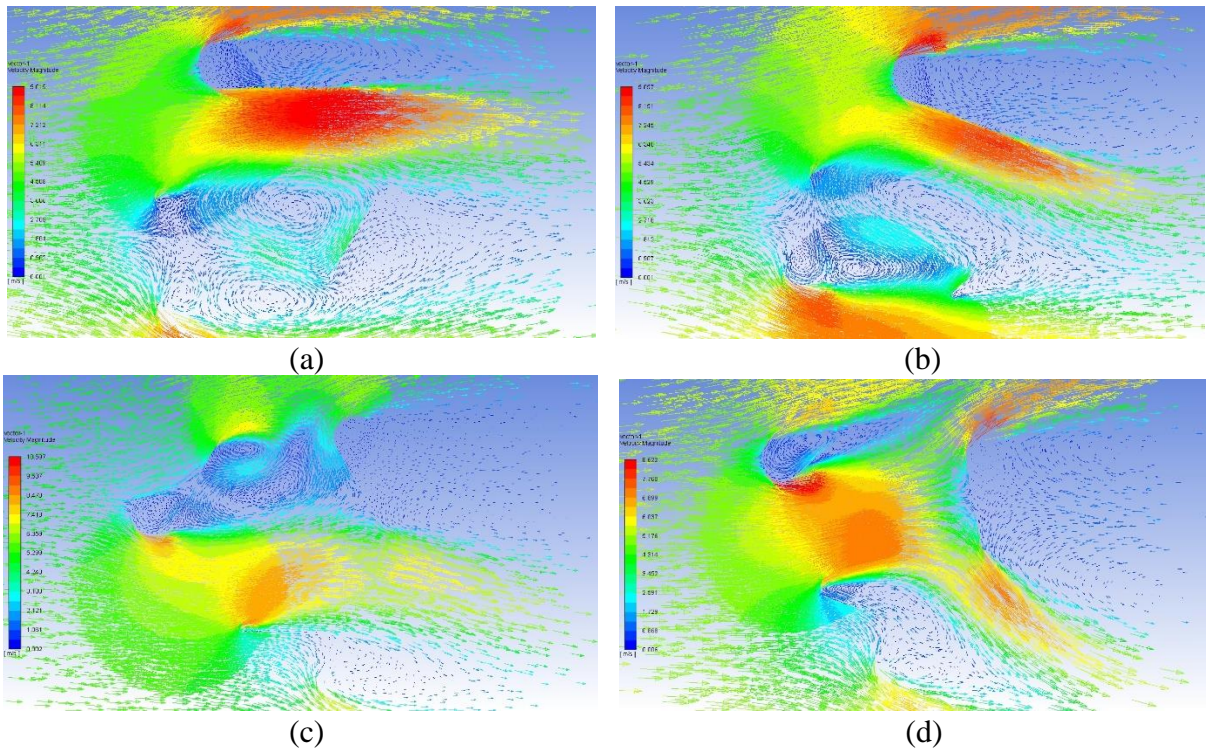




Gambar 4. 7 Tampilan kontur tekanan pada kecepatan 6 m/s (a) sudut putar turbin 0° (b) sudut putar turbin 100° (c) sudut putar turbin 180° (d) sudut putar turbin 280°

Pada gambar 4.7 menampilkan kontur tekanan setiap sudut putar turbin pada kecepatan 6 m/s. Pada gambar 4.7 (a) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 0° yang serta pada sudut putar turbin ini menunjukkan nilai torsi minimum, terlihat perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada posisi *blade* dua, dimana arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade* dan angin menabrak langsung sisi bagian dalam *blade* yang menyebabkan tingginya besaran gaya *drag* dan gaya *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tinggi pada *blade* dua jika dibandingkan dengan posisi *blade* lainnya. Namun, pada posisi *blade* satu terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* dua, dimana pada *blade* satu memiliki gaya *drag* dan *lift* serta torsi statis yang tidak terlalu besar. Begitu pula pada posisi *blade* tiga tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan aliran udara yang masuk terhalang oleh posisi *blade* dua di area *upstream* dan juga *blade* tiga terletak pada daerah *downstream*, maka dari itu menyebabkan torsi statis pada *blade* tersebut tergolong rendah. Lalu pada gambar 4.7 (b) menunjukkan sudut putar turbin 100° yang terlihat bahwa perbedaan tekanan tertinggi terjadi pada posisi *blade* satu, dimana arah aliran angin hampir tegak lurus dengan *blade* dan angin menabrak langsung sisi bagian dalam *blade* yang menyebabkan tingginya besaran gaya *drag* dan gaya *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tinggi pada *blade* ini. Sedangkan pada posisi *blade* tiga terdapat tekanan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan *blade* satu, dimana pada *blade* tiga memiliki gaya *drag* dan *lift* serta menghasilkan torsi statis yang tidak terlalu besar. Selanjutnya pada posisi *blade* dua tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar, dikarenakan posisi *blade* dua berada pada daerah *downstream* dan aliran angin terhalang oleh *blade* satu yang menyebabkan nilai gaya pada *blade* ini rendah. Lalu pada kondisi sudut putar turbin 180° yang ditunjukkan pada gambar 4.7 (c) sekaligus menunjukkan nilai torsi maksimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, dimana posisi *blade* tiga hampir berada tegak lurus dengan arah aliran angin di sisi depan turbin yang memiliki gaya *drag* dan *lift* cukup besar untuk membantu putaran turbin dan membuat besarnya nilai torsi statis, begitu juga pada posisi *blade* satu dapat memanfaatkan gaya *drag* dan *lift* dengan baik sama halnya seperti *blade* tiga yang menyebabkan torsi statis pada *blade* satu tergolong cukup besar pula. Sedangkan pada posisi *blade* dua tidak terdapat pengaruh yang signifikan dikarenakan aliran udara terhalang oleh posisi *blade* tiga di area *upstream* yang membuat aliran angin melalui *blade* dua kurang optimum sehingga menyebabkan gaya *drag* dan *lift* tidak terlalu besar. Yang terakhir pada gambar 4.7 (d) menunjukkan kontur tekanan pada sudut putar turbin 280°, dimana pada *blade* tiga dengan posisinya yang berada pada di daerah *upstream* yang hampir sama dengan *blade* satu pada sudut putar turbin 180° mengakibatkan perbedaan tekanan pada *blade* tiga sangat besar, dimana gaya *drag* dan *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut juga tergolong besar. Lalu jika kita lihat terdapat ruang yang cukup besar di bagian tengah rotor yang menyebabkan aliran angin yang mengenai *blade* satu yang berada pada daerah *downstream* juga cukup besar.

Namun lain halnya pada posisi *blade* dua yang berada pada daerah *upstream*, dimana tidak terjadi perbedaan tekanan yang besar pada *blade*.



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

Selanjutnya pada gambar 4.8 menunjukkan vektor kecepatan setiap sudut putar turbin pada kecepatan angin 6 m/s. Pada gambar 4.8 (a) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 0° yang menghasilkan nilai torsi terkecil dan dapat dibuktikan pada *blade* satu terlihat adanya *wake* pada area separasi di belakang *blade*. Lalu pada *blade* dua sama halnya dengan *blade* satu terlihat adanya *wake* dan *vortex* yang terbilang cukup besar pada area separasi di belakang *blade* yang membuat kecepatan angin untuk melewati *blade* tiga di daerah *downstream* terhalang, dimana pada area tersebut tidak tertabrak angin secara langsung, dikarenakan aliran angin sudah terlebih dahulu tertabrak oleh *blade* dua. Hal tersebut mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* tersebut tidak terlalu berpengaruh serta menghasilkan torsi statis yang kecil pula. Selanjutnya pada gambar 4.8 (b) menunjukkan untuk sudut putar turbin 100°, dimana pada *blade* dua tidak dilewati angin dengan kecepatan yang maksimal dikarenakan sama halnya seperti *blade* tiga pada sudut putar turbin 0° sebelumnya, yang terletak pada daerah *downstream* dan aliran anginnya sudah minimum karena terhalang dan tertabrak oleh bagian *blade* satu pada daerah *upstream*. Hal ini mengakibatkan gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada *blade* dua tergolong kecil. Namun beda halnya dengan *blade* satu dan *blade* tiga, dimana posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* yang dapat langsung bertabrakan langsung dengan *blade* serta aliran angin yang melewati *blade* masih maksimal. Terlebih lagi pada *blade* satu aliran angin langsung menabrak sisi terdalam *blade*. Hal tersebut mengakibatkan besarnya gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja pada kedua *blade* tersebut, serta menghasilkan nilai torsi statis yang besar. Sedangkan pada gambar 4.8 (c) menunjukkan vektor kecepatan untuk sudut putar turbin 180° yang menghasilkan nilai torsi terbesar dikarenakan pada *blade* tiga berada pada daerah *upstream* dan hampir sejajar dengan aliran angin yang dilewati angin secara langsung. Begitu juga pada *blade* satu yang sama halnya dengan *blade* tiga, dimana *blade* bertabrakan langsung dengan arah

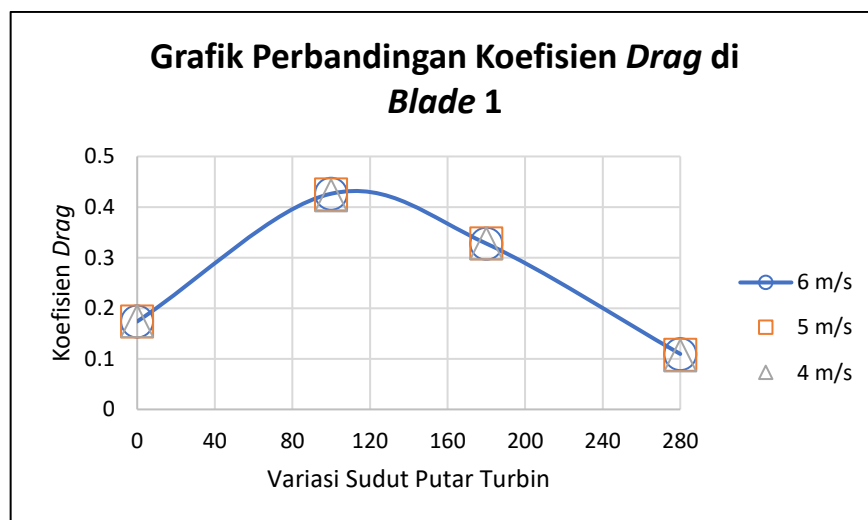
aliran angin. Maka dari itu kedua *blade* tersebut mampu menghasilkan gaya *drag* dan *lift* yang besar. Namun untuk *blade* dua terletak pada daerah *downstream* yang membuat aliran angin terlebih dahulu bertabrakan dengan *blade* tiga yang terletak di bagian *upstream* sehingga tidak memiliki pengaruh yang signifikan. Selanjutnya terlihat pada gambar 4.8 (d) yang menunjukkan vektor kecepatan pada sudut putar turbin 280° yang dapat dilihat bahwa ruang yang terbentuk antar *blade* cukup besar, dimana memungkinkan aliran angin masuk melewati rotor dan masuk ke daerah *downstream* dengan kecepatan maksimal, contohnya pada *blade* satu yang terletak pada daerah *downstream* memiliki besaran gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup besar jika dibandingkan dengan besaran gaya pada daerah *downstream* di sudut putar turbin lainnya. Walaupun pada sudut putar turbin ini daerah *wake* dan daerah separasi yang cukup besar berada di belakang *blade* satu, bukan pada area tengah *blade* yang tidak terlalu berpengaruh pada keseluruhan putaran *blade*. Lalu untuk *blade* dua dan *blade* tiga sama halnya dengan *blade* yang terletak pada daerah *upstream* yang memiliki gaya *drag* dan gaya *lift* yang cukup tinggi.

4.4 Analisa Nilai Koefisien *Drag* dan *Lift* di Tiap Posisi *Blade* pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

Berikut merupakan grafik nilai koefisien *drag* dan *lift* dengan contoh pembahasan disetiap posisi *blade* terhadap variasi kecepatan angin 4, 5 dan 6 m/s:

4.4.1 Analisa Nilai Koefisien serta Gaya *Drag* dan *Lift* di Posisi *Blade* 1 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

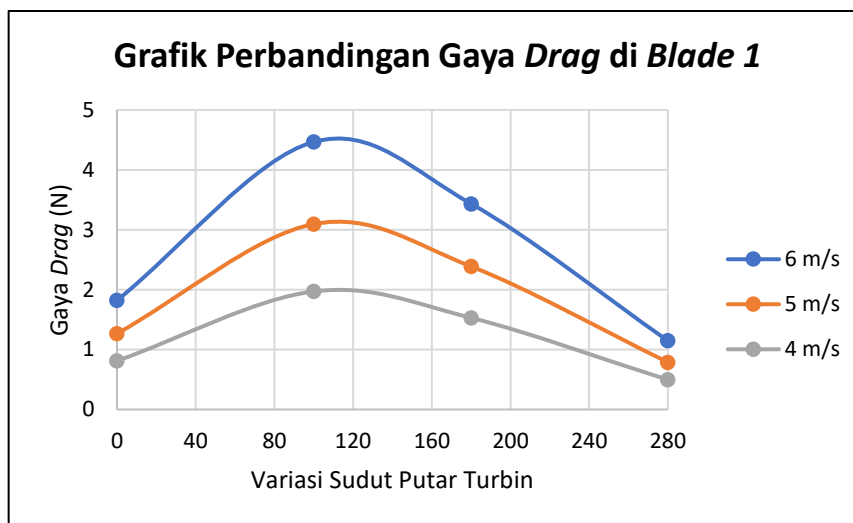
Berikut merupakan grafik nilai koefisien *drag* dan *lift* di posisi *blade* satu yang mengacu pada setiap variasi kecepatan dan sudut putar turbin, dimana posisi *blade* satu untuk setiap variasi sudut putar turbin 0° , 100° , 180° dan 280° masing-masing memiliki posisi yang sama seperti sudut putar turbinnya yakni sebesar 0° , 100° , 180° dan 280° .



Gambar 4. 9 Grafik nilai koefisien *drag* di posisi *blade* 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.9 menunjukkan grafik dari nilai koefisien *drag* di posisi *blade* 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin, dimana dapat dilihat *trend* grafik yang dihasilkan sama untuk seluruh variasi kecepatan angin yang terlihat pada sudut putar turbin 0° menunjukkan nilai koefisien *drag* yang rendah, selanjutnya mengalami kenaikan pada sudut putar turbin 100° sekaligus menjadikan sudut putar ini memiliki nilai koefisien maksimum jika dibandingkan variasi sudut putar turbin lainnya, hal ini disebabkan karena

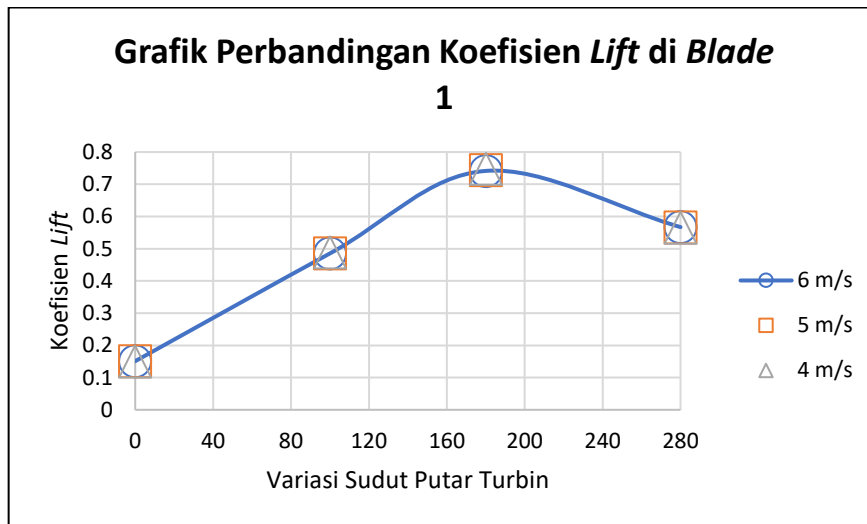
posisi *blade* berada pada daerah *upstream* dan *blade* hampir sejajar dengan arah aliran angin serta angin yang melewati *blade* langsung menabrak sisi terdalam *blade*. Kejadian tersebut menyebabkan perbedaan tekanan di sisi depan dan belakang *blade* yang membuat besarnya nilai *pressure drag* yang bekerja pada *blade* yang jika lihat pada kontur tekanannya. Selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan, hingga pada variasi sudut putar turbin 280° baru mengalami penurunan yang sangat signifikan sekaligus membuat variasi sudut putar turbin ini memiliki nilai yang minimum, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *downstream* yang dimana aliran angin sudah terhalang oleh *blade* pada posisi *upstream* didepannya sehingga aliran angin yang akan menabrak *blade* tersebut sudah mencapai kecepatan angin minimumnya saat mencapai sudut putar turbin 280° . Untuk penjelasan lebih jelas terkait pengaruh kecepatan pada *blade* dapat dilihat melalui grafik perbandingan gaya *drag* berikut:



Gambar 4. 10 Grafik nilai gaya *drag* di posisi *blade* 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.10 terlihat besaran nilai gaya *drag* pada posisi *blade* satu yang dialiri angin dengan variasi kecepatan tertentu, dimana secara keseluruhan terlihat bahwa *trend* grafiknya terbilang sama yakni untuk variasi kecepatan 4 m/s tergolong menghasilkan nilai gaya *drag* minimum jika dibandingkan dengan variasi kecepatan lainnya, yakni pada sudut putar turbin 0° nilai gaya *drag* sebesar 0,811 N, setelah itu pada sudut putar turbin 100° mengalami kenaikan yang signifikan hingga mencapai nilai 1,970 N, sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* maksimum untuk kecepatan 4 m/s, hal ini dikarenakan posisi *blade* berada pada daerah *upstream* dan *blade* hampir sejajar dengan arah aliran angin serta angin yang melewati *blade* langsung menabrak sisi terdalam *blade*. Kejadian tersebut menyebabkan perbedaan tekanan di sisi depan dan belakang *blade* yang membuat besarnya nilai *pressure drag* yang bekerja pada *blade*. Lalu untuk sudut putar turbin 180° mengalami penurunan yang cukup signifikan yakni hingga mencapai nilai gaya *drag* sebesar 1,529 N, begitu pula untuk sudut putar turbin 280° yang mengalami penurunan signifikan hingga mencapai nilai gaya *drag* sebesar 0,496 N yang sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* minimum jika dibandingkan ketiga sudut putar turbin lainnya. Hal ini dipengaruhi karena *blade* ini terletak pada daerah *downstream* yang dimana aliran angin sudah terhalang oleh *blade* pada posisi *upstream* didepannya sehingga aliran angin yang akan menabrak *blade* tersebut sudah mencapai kecepatan angin minimumnya. Hal yang sama berlaku pada kecepatan angin 5 m/s dimana *trend* grafik sama dengan detail pada sudut putar turbin 0° memiliki nilai gaya *drag* sebesar 1,266 N, selanjutnya untuk sudut putar turbin turbin

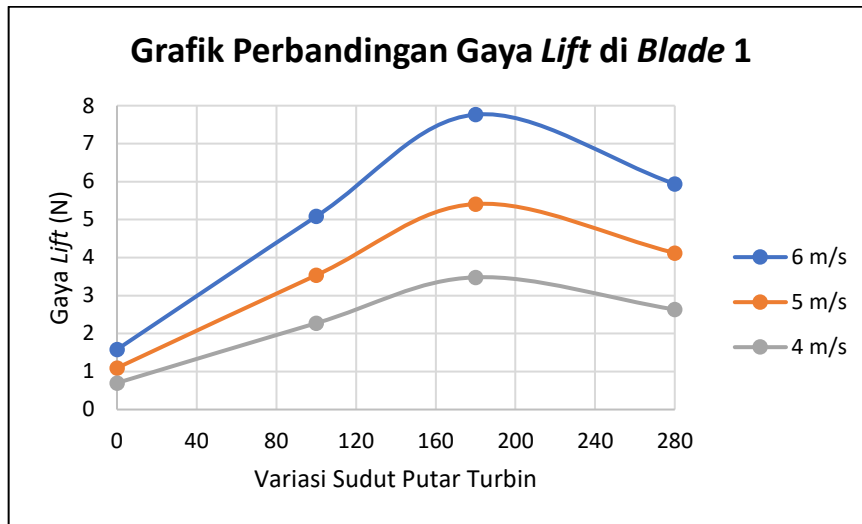
100° mengalami kenaikan hingga mencapai nilai gaya *drag* maksimum sebesar 3,094 N, dimana sama seperti pada sudut putar turbin 100° di kecepatan 4 m/s yang terletak pada daerah *upstream*. Selanjutnya untuk sudut putar turbin 180° mengalami penurunan hingga mencapai nilai gaya *drag* sebesar 2,387 N, begitu pula pada sudut putar turbin 280° yang mengalami penurunan hingga mencapai nilai gaya *drag* sebesar 0,788 N sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* minimum di kecepatan 5 m/s, namun jika dibandingkan besaran nilainya tidak lebih kecil dari besaran nilai gaya *drag* di sudut putar turbin turbin 280° untuk kecepatan 4 m/s. Selanjutnya yang terakhir untuk besaran nilai gaya *drag* pada kecepatan angin 6 m/s yang memiliki besaran nilai gaya *drag* terbesar jika dibandingkan dengan dua variasi kecepatan angin lainnya, begitu pula dengan *trend* yang sama. Pada sudut putar turbin 0° nilai gaya *drag* sebesar 1,820 N, kemudian sama seperti kecepatan lainnya pada sudut putar turbin 100° mengami kenaikan gaya *drag* sebesar 4,465 N yang sekaligus menjadikan pada sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* maksimum dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya dan dibandingkan dengan variasi kecepatan lainnya. Lalu untuk sudut putar turbin turbin 180° mengalami penurunan yang signifikan mencapai nilai 3,433 N, begitu pula pada sudut putar turbin 280° yang mengalami penurunan mencapai nilai gaya *drag* 1,148 N, dimana pada sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* minimum dibandingkan variasi lainnya dan posisinya terletak pada daerah *downstream* sama halnya dengan variasi kecepatan angin lainnya. Namun besaran nilai gaya *drag* ini masih tidak lebih kecil jika dibandingkan nilainya dengan kedua variasi kecepatan angin lainnya. Maka dari itu dapat disimpulkan kenaikan variasi kecepatan angin akan mempengaruhi nilai gaya *drag* yang didapatkan begitu pula berlaku sebaliknya, dimana semakin rendah variasi kecepatan angin maka angin menurunkan nilai gaya *drag*. Selain itu didapatkan pula besaran nilai gaya *drag* dan koefisien *drag* berbanding lurus jika dibandingkan antar keduanya. Adapun grafik yang menampilkan koefisien *lift* di posisi *blade* satu yang mengacu pada setiap variasi kecepatan angin:



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

Pada gambar 4.11 menunjukkan grafik nilai koefisien *lift* di posisi *blade* 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin. Terlihat *trend* yang ditunjukkan tergolong sama diantara masing-masing variasi kecepatan angin, pada sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai koefisien *lift* terendah jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan jika mengacu pada posisi *blade* aliran angin menabrak langsung sisi terluar *blade* yang jika kita lihat pada vektor kecepatannya hal ini menyebabkan terjadinya daerah separasi dibelakang *blade* dan *wake* di belakang *blade* tersebut. Selanjutnya pada sudut putar turbin 100°

mengalami kenaikan namun belum mencapai *peak performance* dari koefisien *lift* di *blade* 1. Pada saat sudut putar turbin 180° baru mencapai nilai koefisien *lift* maksimumnya, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* serta bagian dalam *blade* terkena langsung aliran angin dengan kecepatan yang tinggi, sehingga terjadi perbedaan tekanan dan kecepatan yang signifikan antara bagian dalam dan bagian batang terluar *blade*. Sedangkan pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan namun tidak terlalu signifikan. Dari nilai koefisien *lift* yang telah didapat didapatkan pula besaran nilai gaya *lift* untuk masing-masing sudut putar turbinnya melalui grafik berikut ini:



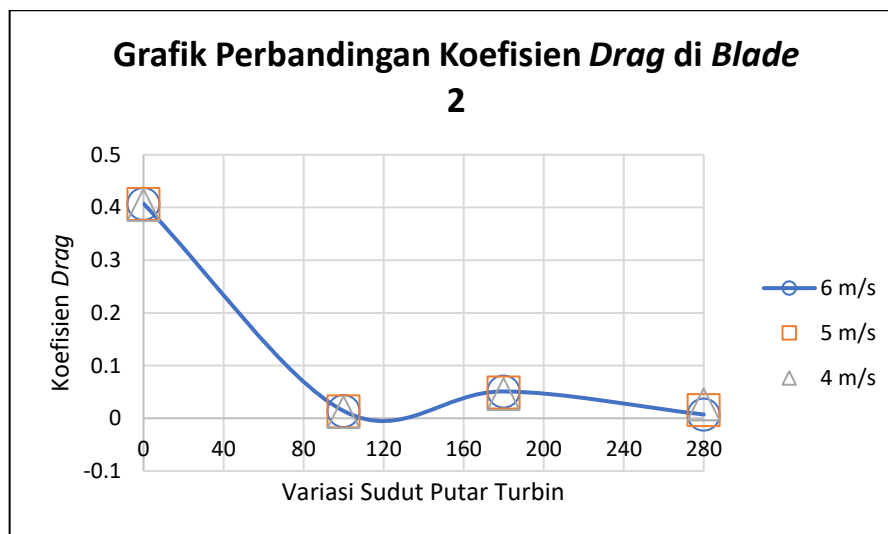
Gambar 4.12 Grafik nilai gaya *lift* di posisi *blade* 1 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.12 yang menunjukkan perbandingan nilai gaya *lift* di *blade* satu dengan variasi kecepatan angin. Pada grafik terlihat *trend* yang terbentuk serupa dengan nilai gaya *lift* maksimum terletak pada kecepatan angin yang menabrak *blade* sebesar 6 m/s sedangkan nilai gaya *lift* minimum terletak pada kecepatan angin yang menabrak *blade* sebesar 4 m/s. Untuk sudut putar turbin 0° menunjukkan besaran nilai gaya *lift* minimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, terlebih pada variasi kecepatan 4 m/s yang menunjukkan nilai terendah dibandingkan kedua variasi kecepatan lainnya, dimana menunjukkan besaran nilai gaya *lift* sebesar 0,069 N. Lalu pada kecepatan 5 dan 6 m/s besaran nilai gaya *lift* bertambah seiring dengan bertambahnya kecepatan angin, dimana masing-masing besaran gaya *lift* sebesar 1,095 N dan 1,580 N. Pada variasi sudut putar turbin ini menunjukkan nilai gaya *lift* yang minimum dikarenakan aliran angin langsung menabrak sisi terluar *blade* dan menyebabkan daerah separasi dan *wake* di belakang *blade* tersebut. Selanjutnya pada sudut putar turbin 100° nilai gaya *lift* meningkat walaupun tidak terlalu signifikan, dimana terlihat *trend* yang ditunjukkan tetap serupa seperti variasi kecepatan sebelumnya. Pada sudut variasi kecepatan 4 m/s masih menunjukkan nilai gaya *lift* minimum dibandingkan kedua variasi kecepatan lainnya dengan nilai gaya *lift* sebesar 2,273 N. Lalu seiring dengan peningkatan kecepatan angin maka nilai gaya *lift* juga meningkat, dimana untuk kecepatan 5 m/s dan 6 m/s masing-masing memiliki nilai gaya *lift* sebesar 3,535 N dan 5,083 N. Kemudian untuk sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan yang cukup signifikan dibandingkan sudut putar turbin sebelumnya dan menunjukkan besaran nilai gaya *lift* maksimum dibandingkan sudut putar turbin lainnya, terlebih lagi pada kecepatan 6 m/s yang menunjukkan variasi kecepatan angin terbesar dengan nilai gaya *lift* sebesar 7,765 N. Lalu dengan seiring rendahnya variasi kecepatan angin, maka besaran nilai gaya *lift* juga semakin kecil, dimana untuk kecepatan 5 m/s memiliki nilai gaya *lift* sebesar 5,411 N dan untuk variasi kecepatan 4 m/s memiliki nilai gaya *lift* sebesar 3,481 N.

Besarnya nilai gaya *lift* pada sudut putar turbin ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* serta bagian dalam *blade* terkena langsung aliran angin dengan kecepatan yang maksimal, sehingga terjadi perbedaan tekanan dan kecepatan yang signifikan antara bagian dalam dan bagian batang terluar *blade*. Hal tersebut membuat nilai gaya *lift* maksimal jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya. Lalu untuk yang terakhir pada sudut putar turbin 280° terlihat bahwa *trend* grafik turun, tetapi tidak terlalu signifikan. Pada kecepatan 4 m/s menghasilkan besaran nilai gaya *lift* sebesar 2,632 N. Sedangkan untuk kecepatan 5 m/s dan 6 m/s sama seperti sebelumnya, dimana nilai gaya *lift* akan seiring bertambah dengan meningkatnya kecepatan angin yang menabrak *blade* turbin. Nilai gaya *lift*-nya masing-masing senilai 4,121 N dan 5,938 N. Maka dari itu dapat disimpulkan pula kenaikan variasi kecepatan angin akan mempengaruhi nilai gaya *lift* begitu pula berlaku sebaliknya, dimana semakin rendah variasi kecepatan angin maka angin menurunkan nilai gaya *lift*. Selain itu didapatkan pula besaran nilai gaya *lift* dan koefisien *lift* berbanding lurus.

4.4.2 Analisa Nilai Koefisien *Drag* dan *Lift* di Posisi *Blade* 2 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

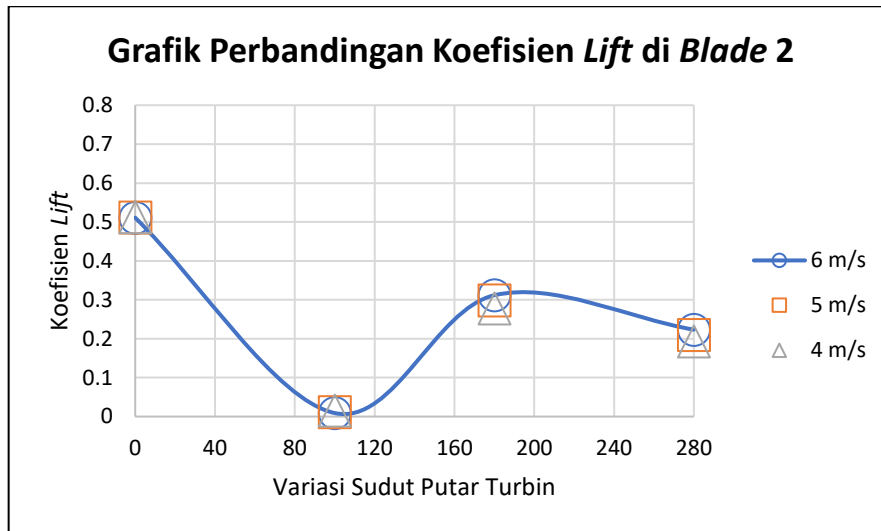
Berikut merupakan grafik nilai koefisien *drag* dan *lift* di posisi *blade* dua yang mengacu pada masing-masing variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin, dimana posisi *blade* dua untuk setiap variasi sudut putar turbin 0° , 100° , 180° dan 280° masing-masing berada pada posisi 120° , 220° , 300° dan 40° .



Gambar 4. 13 Grafik nilai koefisien *drag* di posisi *blade* 2 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.13 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *drag* di *blade* dua. Pada grafik terlihat *trend* yang terbentuk serupa diantara masing-masing variasi kecepatannya. Pada sudut putar turbin 0° menunjukkan besaran nilai koefisien *drag* maksimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan terletak pada daerah *upstream* dan posisi *blade* bertabrakan langsung dengan arah aliran angin yang membuat kecepatan angin masih maksimum di posisi *blade* ini. Selanjutnya pada sudut putar turbin 100° terjadi penurunan yang sangat signifikan dari sudut putar turbin 0° yang sekaligus membuat sudut putar turbin ini tergolong minimum jika dibandingkan lainnya, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *downstream* yang sekaligus membuat sudut putar turbin ini memiliki nilai gaya *drag* minimum. Lalu pada sudut putar turbin 180° terjadi kenaikan nilai koefisien *drag* yang tidak signifikan, dikarenakan posisi dari *blade* masih berada di daerah *downstream*, walaupun terdapat celah untuk angin menabrak *blade* tersebut. Kemudian untuk sudut putar turbin 280°

terjadi penurunan namun tidak serendah pada sudut putar turbin 100° dikarenakan walaupun sudut putar ini terletak pada daerah *downstream*, tetapi masih terkena aliran angin yang dikarenakan diameter rotor turbin tergolong lebar, sehingga aliran angin masih dapat melewati turbin yang ada di daerah *downstream* tersebut. Adapun ditampilkan hasil terkait koefisien *lift* dimasing-masing kecepatan, yang dapat dilihat melalui gambar berikut:

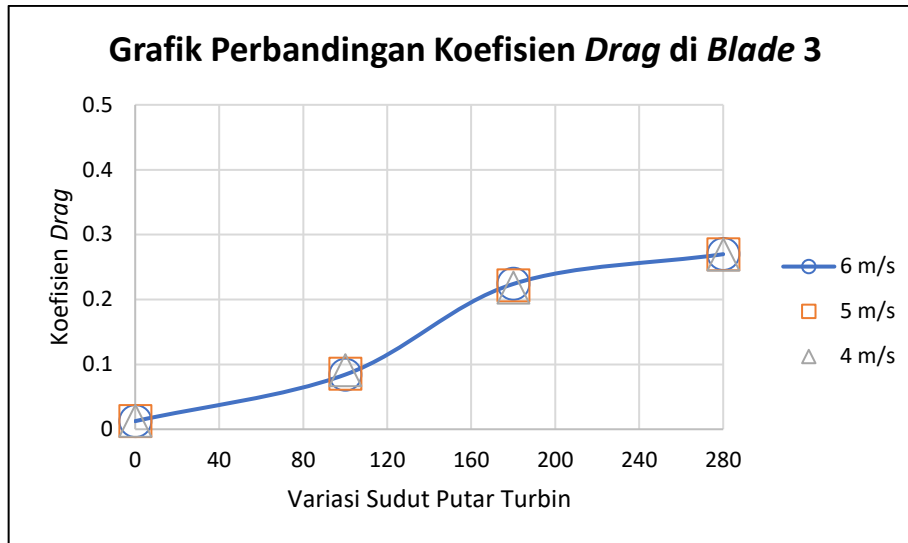


Gambar 4. 14 Grafik nilai koefisien *lift* di posisi *blade* 2 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.14 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *lift* di *blade* dua. Pada grafik terlihat *trend* yang terbentuk serupa dengan nilai koefisien *drag* sebelumnya di masing-masing kecepatan angin. Untuk sudut putar turbin 0° terlihat besaran nilai gaya *lift* maksimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *upstream* serta bagian dalam *blade* terkena langsung aliran angin dengan kecepatan yang maksimal, sehingga terjadi perbedaan tekanan dan kecepatan yang signifikan antara bagian dalam, terlebi lagi pada bagian batang terluar *blade*. Lalu pada sudut putar turbin 100° mengalami penurunan yang signifikan, dimana nilainya tergolong minimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan *blade* terletak pada daerah *downstream* dan juga aliran angin sudah sangat minimum saat melewati posisi *blade* ini. Selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan namun tidak melebihi sudut putar turbin 0° dikarenakan posisi *blade* masih berada pada daerah *downstream*. Terakhir pada sudut putar turbin 280° terjadi penurunan nilai koefisien *lift*, dikarenakan letak posisi *blade* pada daerah *downstream*, namun masih terkena aliran angin sehingga menyebabkan nilai koefisien *lift* tidak serendah pada sudut putar turbin 100° . Lalu dapat disimpulkan terkait besaran nilai gaya *drag* dan *lift*-nya, didapatkan *trend* yang dihasilkan sama seperti nilai koefisien *drag* dan *lift* yang telah ditampilkan, serta dengan nilai yang berbanding lurus.

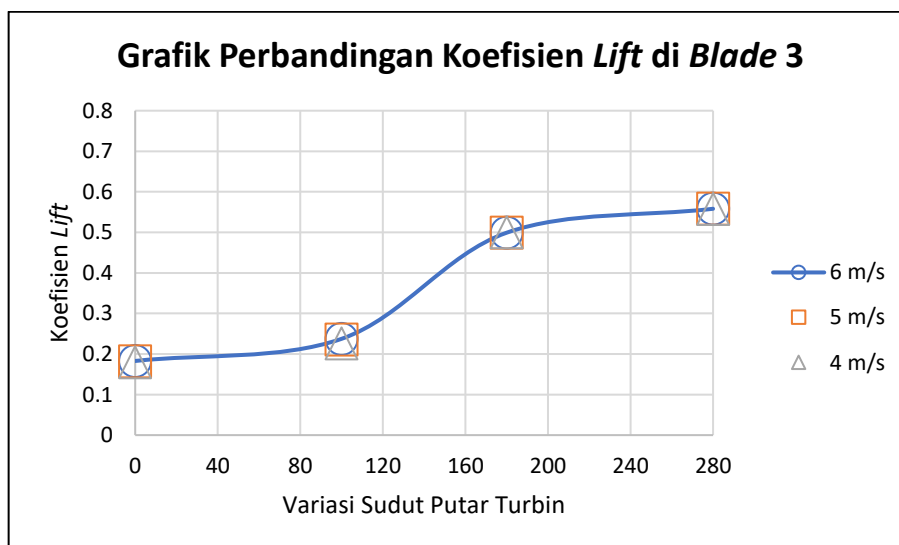
4.4.3 Analisa Nilai Koefisien *Drag* dan *Lift* di Posisi *Blade* 3 pada Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

Adapun ditampilkan grafik dan penjelasan terkait nilai koefisien *drag* dan *lift* di posisi *blade* tiga yang mengacu pada masing-masing variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin 0° , 100° , 180° dan 280° yang masing-masing berada pada posisi 240° , 340° , 60° dan 160° .



Gambar 4. 15 Grafik nilai koefisien *drag* di posisi *blade* 3 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.15 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *drag* di *blade* tiga. Pada grafik terlihat *trend* yang terbentuk terjadi kenaikan seiring dengan bertambahnya sudut putar turbin. Dapat dilihat pada sudut putar turbin 0° menunjukkan besaran nilai koefisien *drag* minimum dikarenakan posisinya terletak pada daerah *downstream* dan aliran angin yang ada sudah menabrak *blade* di daerah *upstream*, sehingga menyebabkan kecilnya besaran nilai pada posisi *blade* ini. Lalu pada sudut putar turbin 100° terjadi kenaikan yang tidak terlalu signifikan, hal ini dikarenakan posisi *blade* pada daerah *downstream* dan aliran angin menabrak sisi terluar *blade* sehingga gaya *drag* tidak terlalu besar. Lalu pada sudut putar turbin 180° terjadi kenaikan nilai koefisien *drag*, namun masih menyentuh titik maksimumnya. Kemudian untuk sudut putar turbin 280° terjadi kenaikan maksimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya. Hal tersebut dikarenakan *blade* terletak pada daerah *upstream*, terlebih lagi arah aliran angin menabrak langsung *blade* yang menyebabkan besarnya nilai pada sudut putar turbin 280° . Selain itu ditampilkan pula penjelasan terkait koefisien *lift* yang berkerja pada *blade* 3 seperti berikut ini:

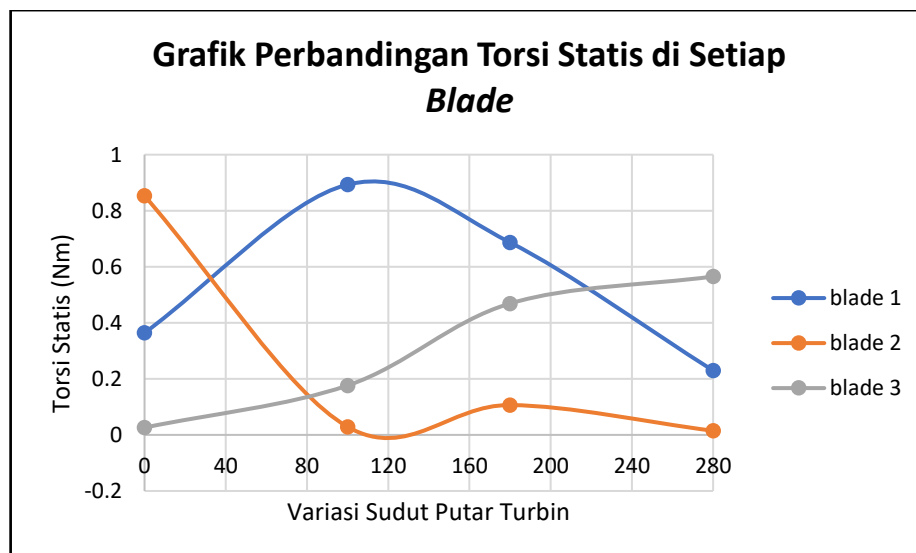


Gambar 4. 16 Grafik nilai koefisien *lift* di posisi *blade* 3 pada setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.16 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *lift* di *blade* tiga. Pada grafik terlihat *trend* yang terbentuk serupa dengan nilai koefisien *drag* sebelumnya, dimana nilai terlihat konstan naik seiring dengan bertambahnya sudut putar turbin. Pada sudut putar turbin 0° terlihat besaran nilai koefisien *lift* menunjukkan nilai minimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *downstream* sehingga tidak terkena aliran angin secara langsung yang membuat perbedaan kecepatan yang signifikan antara bagian dalam dan bagian luar *blade*. Hal tersebut membuat nilai gaya *lift* minimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya. Lalu pada sudut putar turbin 100° mengalami kenaikan, namun nilainya tidak tergolong berbeda jauh jika dibandingkan sudut putar turbin 0°, hal ini dikarenakan terletak pada daerah *downstream* dan juga aliran angin sudah sangat minimum saat melewati posisi *blade* ini. Selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan, namun belum mencapai titik maksimum dari koefisien *lift* di *blade* 3 ini. Pada sudut putar turbin terakhir yakni 280° terjadi kenaikan nilai koefisien *lift*, terlihat letak posisi *blade* berada pada daerah *upstream* dan aliran angin terkena langsung sisi terdalam *blade* sehingga menyebabkan nilai koefisien *lift* maksimal pada sudut putar turbin 280°. Adapun dari *blade* 3 ini nilai koefisien *drag* dan *lift* serta gaya *drag* dan *lift* juga berbanding lurus seperti posisi *blade* lainnya, begitu pula dengan besaran nilainya yang menghasilkan *trend* yang serupa.

4.5 Analisa Perbandingan Nilai Torsi Statis di Setiap *Blade* pada Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan hasil berupa nilai torsi statis terhadap sudut putar turbin 0°, 100°, 180° dan 280° pada setiap kecepatan angin 4, 5 dan 6 m/s. Dimana nilai torsi statis sendiri didapatkan melalui perhitungan yang diolah menggunakan nilai gaya dari hasil simulasi pada *software* ANSYS Fluent 19.2. Adapun hasil grafik dari nilai torsi statis yang didapatkan. Berikut merupakan perbandingan nilai torsi statis di setiap *blade* pada kecepatan angin 6 m/s:



Gambar 4. 17 Grafik perbandingan torsi statis di setiap *blade* pada variasi kecepatan angin 6 m/s dan variasi sudut putar turbin

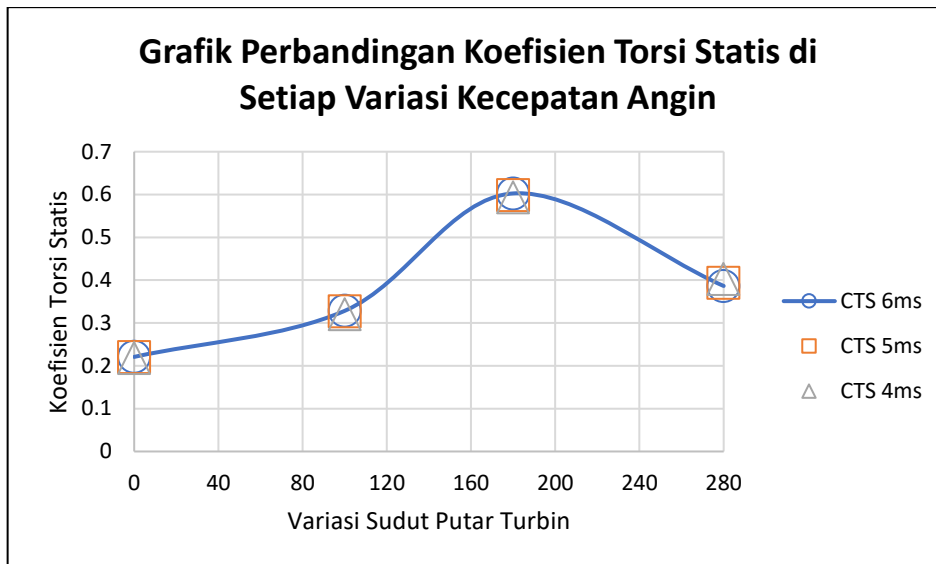
Berdasarkan hasil grafik perbandingan torsi statis tiap *blade* diatas, dapat dilihat bahwa pada *blade* satu untuk sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai torsi statis sebesar 0,364 Nm, lalu jika dilihat pada sudut putar turbin 100° mengalami kenaikan yang cukup signifikan yakni menjadi 0,893 Nm, hal tersebut dikarenakan pada *blade* tersebut berada pada posisi *upstream* dan juga bertabrakan langsung dengan arah aliran angin, maka dari itu menyebabkan nilai torsi

statis pada *blade* ini maksimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya di *blade* satu, lalu pada sudut putar turbin 180° mengalami penurunan nilai menjadi 0,686 Nm, hal tersebut dikarenakan pada *blade* tersebut tidak terlalu tegak lurus dengan arah aliran angin, seperti pada sudut putar turbin 100° sebelumnya, sedangkan pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan nilai yang cukup signifikan yakni menjadi 0,229 Nm, hal tersebut dikarenakan pada *blade* tersebut berada pada daerah *downstream* dan juga pada aliran angin terhalang oleh *blade* di daerah *upstream* yang menyebabkan aliran angin tidak optimum, sekaligus membuat sudut putar turbin ini menjadi yang minimum jika dibandingkan yang lainnya untuk *blade* satu. Selanjutnya untuk nilai torsi statis pada *blade* dua untuk sudut putar turbin 0° terlihat bahwa nilainya sebesar 0,852 Nm yang sekaligus menjadikannya nilai maksimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya, hal ini dikarenakan pada *blade* ini hampir sejajar tegak lurus dengan arah aliran angin yang menyebabkan nilai torsi statis pada daerah ini besar, terlebih lagi *blade* ini terletak pada daerah *upstream*. Lalu untuk sudut putar turbin 100° terlihat bahwa terjadi penurunan yang sangat signifikan yakni mencapai 0,028 Nm, hal ini dikarenakan posisi *blade* terletak pada daerah *downstream* dan juga arah aliran angin terhalang oleh *blade* yang ada didepannya yang menyebabkan nilai torsi statis pada *blade* ini tergolong kecil, selanjutnya untuk sudut putar turbin 180° memiliki nilai torsi statis sebesar 0,106 Nm, pada sudut putar turbin ini tergolong rendah dikarenakan *blade* juga berada pada daerah *downstream* sama halnya dengan sudut putar turbin 100° , namun nilai torsi statisnya masih lebih besar jika dibandingkan dengan sudut sebelumnya. Lalu untuk sudut putar turbin 280° menghasilkan nilai torsi statis minimum jika dibandingkan sudut putar turbin lainnya yakni sebesar 0,014 Nm, hal tersebut dikarenakan angin menabrak langsung sisi terluar *blade* yang menyebabkan nilai torsi statis yang rendah. Selanjutnya yang terakhir untuk *blade* tiga pada sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai minimum jika dibandingkan dengan sudut putar turbin lainnya yakni sebesar 0,026 Nm, hal ini dikarenakan pada *blade* ini terletak pada daerah *downstream* yang menjadikan aliran angin tidak menabrak langsung *blade* tersebut, lalu untuk sudut putar turbin 100° dan 180° secara signifikan nilai torsi statisnya naik yakni masing-masing sebesar 0,176 Nm dan 0,468 Nm. Selanjutnya yang terakhir pada sudut putar turbin 280° menghasilkan nilai torsi statis yang maksimum sebesar 0,565 Nm, hal tersebut dikarenakan posisi *blade* langsung bertabrakan dengan arah aliran angin di sisi dalam *blade* dan juga terletak pada daerah *upstream* yang menjadikan nilai torsi statis pada daerah ini tergolong besar.

Dari penjelasan diatas didapatkan bahwa nilai torsi statis maksimum berada pada posisi sudut putar turbin 100° pada posisi *blade* satu, sudut putar turbin 0° pada posisi *blade* dua dan sudut putar turbin 280° pada posisi *blade* tiga, yang jika dapat disimpulkan posisi *blade* tersebut terletak pada daerah *upstream*. Sedangkan nilai torsi statis minimum berada pada posisi sudut putar turbin 280° pada posisi *blade* satu dan dua, serta sudut putar turbin 0° pada posisi *blade* tiga, yang jika kita lihat bahwa posisi *blade* tersebut terletak pada daerah *downstream*. Jika kita sambungkan bahwa pernyataan tersebut sama halnya seperti penelitian terdahulu yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** yang menyatakan bahwa *blade* yang berada pada daerah *upstream* dan dengan posisi yang tegak lurus dengan arah aliran angin, maka akan menerima gaya *drag* dan gaya *lift* yang besar dan menghasilkan torsi statis yang besar pula begitu juga dengan *blade* yang berada pada daerah *downstream* menghasilkan torsi statis yang kecil dikarenakan angin yang melewati *blade* tersebut terhalang oleh *blade* yang terletak pada daerah *upstream*, dikarenakan telah kehilangan kecepatannya.

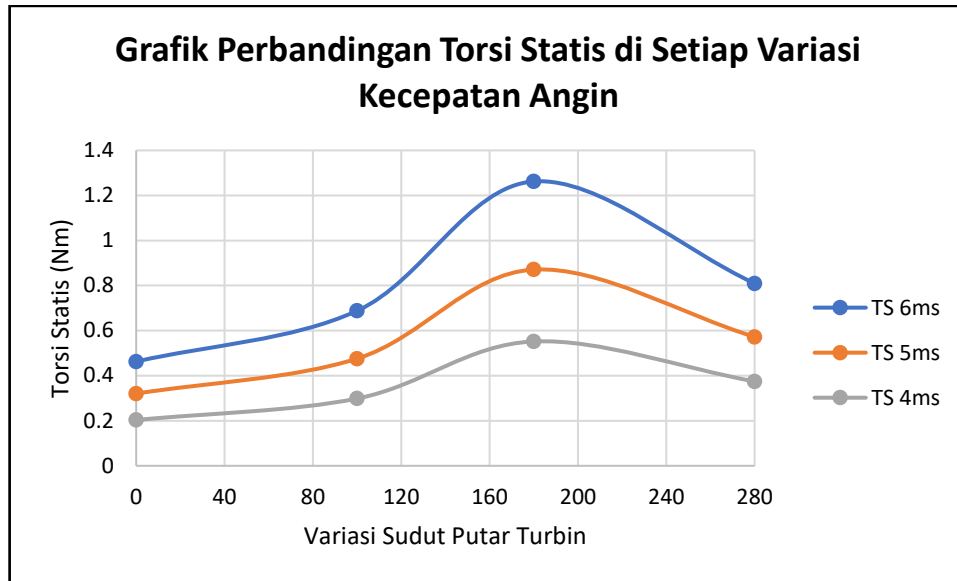
4.6 Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis serta Torsi Statis di Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

Berdasarkan Penelitian secara simulasi, didapatkan hasil berupa nilai torsi statis terhadap sudut putar turbin 0° , 100° , 180° dan 280° pada setiap kecepatan angin 4, 5 dan 6 m/s. Dimana nilai torsi statis sendiri didapatkan melalui perhitungan yang diolah menggunakan nilai gaya dari hasil simulasi pada *software* ANSYS Fluent 19.2. Adapun hasil grafik dari nilai koefisien torsi statis di setiap variasi kecepatan angin yang dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 4. 18 Grafik perbandingan koefisien torsi statis di setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Pada gambar 4.18 menunjukkan grafik dari perbandingan koefisien torsi statis di setiap variasi kecepatan angin dan sudut putar turbin. Terlihat *trend* yang ditunjukkan sama di masing-masing kecepatannya, dimana nilainya minimum pada sudut putar turbin 0° dan maksimum pada sudut putar turbin 180° . Rendahnya nilai koefisien torsi statis yang dihasilkan disebabkan oleh *blade* yang tidak terkena aliran angin secara langsung serta *blade* pada posisi *downstream*. Hal ini bisa dikorelasikan seperti pada sudut putar turbin 0° , dimana posisi *blade* 3 berada pada daerah *downstream* dan tidak terkena aliran angin secara langsung, terlebih lagi pada sudut putar 0° letak posisi *blade* 1 walaupun bertabrakan langsung dengan aliran angin, jika kita lihat pada vektor kecepatannya munculnya daerah separasi dan *wake* di belakang *blade* tersebut. Sedangkan untuk tingginya besaran nilai koefisien torsi statis yang dihasilkan disebabkan oleh beberapa faktor antara lain posisi *blade* berada pada daerah *upstream*, dimana posisi *blade* berbanding lurus dengan arah aliran angin yang melewati turbin, hal ini dapat dikorelasikan pula seperti pada sudut putar turbin 180° , dimana *blade* 1 dan 3 berada pada daerah *upstream*, terlebih lagi *blade* yang ada hampir tegak lurus dengan arah aliran angin yang menyebabkan nilai koefisien torsi statis besar di sudut putar turbin ini. Berikut ditampilkan besaran nilai torsi statis dari masing-masing kecepatan angin, guna melihat pengaruh besaran kecepatan terhadap nilai torsi statis yang didapatkan:



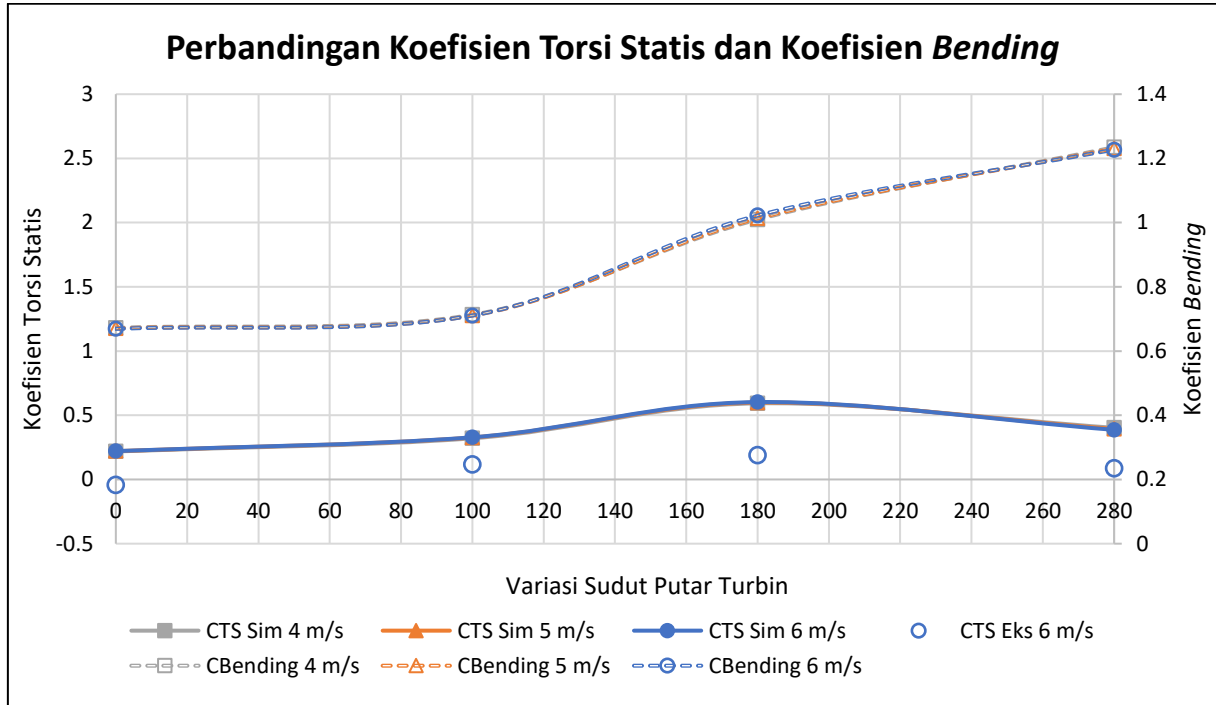
Gambar 4.19 Grafik perbandingan torsi statis di setiap variasi kecepatan angin dan variasi sudut putar turbin

Berdasarkan hasil grafik diatas dapat dilihat bahwa grafik nilai torsi statis yang dihasilkan dari ketiga data diatas memiliki *trend* yang sama. Nilai torsi statis akan mencapai nilai maksimumnya pada sudut putar turbin tertentu, dimana dapat dilihat pada kecepatan angin 4 m/s untuk sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai torsi statis minimum sebesar 0,203 Nm, setelah itu mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada sudut putar turbin 100° yakni menjadi 0,298 Nm, lalu selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan yang signifikan yakni sebesar 0,551 Nm yang sekaligus menjadikan sudut putar turbin ini memiliki nilai yang maksimum, dan yang terakhir pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan hingga mencapai nilai sebesar 0,374 Nm. Selanjutnya untuk kecepatan 5 m/s didapatkan nilai torsi statis minimum untuk sudut putar turbin 0° sebesar 0,320 Nm setelah itu mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada sudut putar turbin 100° yakni menjadi 0,475 Nm, lalu selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan yang signifikan hingga titik maksimum yakni sebesar 0,871 Nm, dan yang terakhir pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan hingga mencapai nilai sebesar 0,572 Nm. Lalu untuk variasi kecepatan yang terakhir yakni 6 m/s untuk sudut putar turbin 0° menghasilkan nilai torsi statis minimum sebesar 0,462 Nm, setelah itu mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan pada sudut putar turbin 100° yakni menjadi 0,687 Nm, lalu selanjutnya pada sudut putar turbin 180° mengalami kenaikan maksimum yang signifikan yakni sebesar 1,262 Nm, dan yang terakhir pada sudut putar turbin 280° mengalami penurunan hingga mencapai nilai sebesar 0,809 Nm.

Dari hasil yang didapat terlihat bahwa semakin besar kecepatan angin yang melewati *blade* turbin maka akan memperbesar nilai torsi statis yang didapat, dimana pada data nilai torsi statis maksimum pada kecepatan 6 m/s dan sudut putar turbin 180° yakni sebesar 1,262 Nm, sedangkan untuk nilai torsi statis minimum didapat pada kecepatan 4 m/s dan pada sudut putar turbin 0° yakni sebesar 0,203 Nm. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh **Taufiqurrahman & Suphandani, 2017** dan **Feng et al, 2021**, yang menyatakan semakin besar kecepatan angin yang melewati *blade* turbin maka akan memperbesar nilai torsi statis yang didapat.

4.7 Analisa Perbandingan Nilai Koefisien Torsi Statis dan Gaya *Lift* di Setiap Variasi Kecepatan Angin dan Sudut Putar Turbin

Berikut ditampilkan grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis dan gaya *lift* yang mengacu pada setiap sudut putar turbin dan variasi kecepatan angin:



Gambar 4. 20 Grafik perbandingan koefisien torsi statis dan koefisien *bending* di setiap variasi sudut putar turbin dan variasi kecepatan angin

Pada gambar 4.20 menunjukkan grafik perbandingan nilai koefisien torsi statis dan koefisien *bending* di setiap variasi sudut putar turbin dan variasi kecepatan angin, dimana *trend* yang dihasilkan antara koefisien torsi statis simulasi dan eksperimen memiliki *trend* yang serupa, namun jika dibandingkan dengan koefisien *bending* tampilan *trend* yang ditunjukkan berbeda. Nilai koefisien torsi statis yang *trend*-nya relatif serupa maksimum pada sudut putar turbin 180° dan minimum pada sudut putar turbin 0° di masing-masing kecepatannya. Sedangkan untuk nilai koefisien *bending* nilainya maksimum pada sudut putar turbin 280° dan minimum pada sudut putar 0° di masing-masing kecepatannya. Dapat dilihat juga pada grafik bahwa nilai koefisien *bending* yang bekerja pada turbin lebih besar dibandingkan nilai koefisien torsi statis yang bekerja pada turbin untuk hasil simulasi maupun eksperimen, sehingga dibutuhkan desain poros dan struktur turbin yang cukup kuat untuk menahan gaya *bending* yang bekerja pada turbin agar tidak terjadi kegagalan pengoprasian pada turbin angin tipe Lenz 2.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan angin sebesar 4, 5, dan 6 m/s terhadap performa turbin angin dengan jumlah *blade* 3 buah, *blade chord length* sebesar 180 mm dan diameter turbin sebesar 400 mm pada turbin angin Lenz 2 skala simulasi, didapatkan beberapa 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 dengan nilai sebesar 1,262 Nm pada kecepatan angin 6 m/s dan sudut putar turbin 180°.
3. Nilai koefisien torsi statis hasil simulasi akan maksimum pada kecepatan angin 6 m/s dan sudut putar turbin 180° dengan nilai sebesar 0,602, serta memiliki *trend* yang relatif serupa dengan koefisien torsi statis hasil eksperimen. Namun nilai untuk hasil simulasi akan lebih besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hal tersebut dikarenakan adanya beberapa faktor yang diabaikan pada metode simulasi.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan agar penelitian selanjutnya dapat berjalan lebih baik dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Melakukan proses simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan cakupan turbin rotasi dan model tiga dimensi agar fenomena aliran, separasi dan turbulensi aliran lebih akurat terhadap performa turbin angin tipe Lenz 2 terutama untuk nilai torsi dinamis, CoP dan C_M .
2. Melakukan studi lebih lanjut menggunakan profil sudut putar turbin yang berbeda agar didapatkan hasil yang dapat dibandingkan dan lebih bervariasi pada turbin angin tipe Lenz 2.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-El-Yazied, T. G., Ali, A. M., Al-Ajmi, M. S., & Hassan, I. M. (2015). Effect of number of blades and blade chord length on the performance of darrieus wind turbine. *American Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2(1): 16-25.
- Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. H., & Hussain, Z. (2012). Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1926-1939.
- 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.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2022). Capaian kinerja sektor ESDM tahun 2021 & rencana 2022. Jakarta, Indonesia.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind energy explained theory, design and application second edition*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Mao, Z., & Bai, J. (2018). Numerical investigation of a small water turbine used for the power supply of underwater vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6). <https://doi.org/10.1177/1687814018783654>
- Nishioka, A. H., & Almeida, O. D. (2018). Study, design and test of a lenz type wind turbine. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 5(3): 2456-1908.
- Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi & Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi. (2021). *Perspektif teknologi energi indonesia: Tenaga surya untuk penyediaan energi charging station*. Jakarta, Indonesia.
- Rahman, L. F., Daniel, G., & Ikhwan, N. (2021). Experimental study of the effect of blade chord length (c) and turbine diameter (d) differences on performance and optimum operating condition of vertical axis wind turbine (VAWT) type lenz 2 on laboratory scale. *Jurnal Teknik Mesin ITS*.
- Taufiqurrahman, R., & Suphandani, V. (2017). Penelitian numerik turbin angin darrieus dengan variasi jumlah sudu dan kecepatan angin. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1): 2337-3539.
- 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. *EDP Sciences*, 02150.

LAMPIRAN

A. Data Hasil Simulasi Koefisien serta Gaya *Drag* dan *Lift* pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 untuk Jumlah *Blade* 3 Buah, *Blade Chord Length* 180 mm dan Diameter Turbin 400 mm pada Variasi Kecepatan Angin 4, 5 dan 6 m/s

Tabel A.1 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 4 m/s

| Kecepatan Angin 4 m/s | | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Sudut Putar | Blade | Fx | Fy | FD | FL | CD | CL |
| 0° | 1 | 0.81151974 | 0.69911832 | -0.81151974 | 0.69911832 | -0.17433292 | 0.150186535 |
| | 2 | 3.0075812 | 0.44194938 | 1.88652999 | 2.383667033 | 0.4052696 | 0.512065958 |
| | 3 | 0.75337151 | 0.36644661 | -0.059333682 | -0.835662171 | -0.01274623 | -0.17951926 |
| 100° | 1 | 2.5811451 | 1.5456533 | 1.970382496 | 2.273531827 | 0.423283028 | 0.488406408 |
| | 2 | 0.090276653 | 0.020776455 | -0.055801081 | -0.073944402 | -0.01198734 | -0.01588494 |
| | 3 | 0.75762246 | 0.84583359 | -0.422640109 | 1.053945725 | -0.09079272 | 0.226411541 |
| 180° | 1 | 1.5296786 | 3.4810495 | 1.5296786 | 3.4810495 | 0.328609796 | 0.7478087 |
| | 2 | 1.0151621 | 0.83279385 | 0.21363958 | 1.295553093 | 0.045894647 | 0.278314306 |
| | 3 | 1.5072666 | 2.0439105 | 1.016445116 | 2.327286416 | 0.218355557 | 0.499954117 |
| 280° | 1 | 2.5065566 | 0.94608725 | 0.496455073 | 2.6327627 | 0.106649855 | 0.565577379 |
| | 2 | 0.67352674 | 0.60864026 | -0.124724999 | 0.899180132 | -0.02679377 | 0.193164368 |
| | 3 | 2.0641945 | 2.0126144 | 1.251353674 | 2.597234999 | 0.268819264 | 0.55794522 |

Tabel A.2 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 5 m/s

| Kecepatan Angin 5 m/s | | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Sudut Putar | Blade | Fx | Fy | FD | FL | CD | CL |
| 0° | 1 | 1.2661456 | 1.0950368 | -1.2661456 | 1.0950368 | -0.17407802 | 0.150552858 |
| | 2 | 4.7014788 | 0.70142815 | 2.958193997 | 3.720886001 | 0.406711957 | 0.511571867 |
| | 3 | 1.1911459 | 0.58331919 | -0.090403713 | -1.323222204 | -0.0124293 | -0.18192529 |
| 100° | 1 | 4.0192064 | 2.4333208 | 3.094281056 | 3.535603901 | 0.4254221 | 0.486098066 |
| | 2 | 0.12550311 | 0.000290167 | -0.095954444 | -0.080894125 | -0.01319245 | -0.01112186 |
| | 3 | 1.1697657 | 1.4000166 | -0.620386318 | 1.7156687 | -0.08529479 | 0.235881411 |
| 180° | 1 | 2.3873855 | 5.4111942 | 2.3873855 | 5.4111942 | 0.328233452 | 0.74396655 |
| | 2 | 1.7050021 | 1.3964666 | 0.356874501 | 2.174808432 | 0.049065452 | 0.29900696 |
| | 3 | 2.340766 | 3.2114276 | 1.610794884 | 3.63287662 | 0.221462669 | 0.499471759 |
| 280° | 1 | 3.9219364 | 1.4921596 | 0.788453234 | 4.121464169 | 0.108401734 | 0.566645987 |
| | 2 | 1.0689791 | 1.0979305 | -0.113149378 | 1.528190079 | -0.01555652 | 0.210105618 |
| | 3 | 3.2300633 | 3.1446399 | 1.959736458 | 4.059741622 | 0.269437451 | 0.558159965 |

Tabel A.3 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 6 m/s

| Kecepatan Angin 6 m/s | | | | | | | |
|-----------------------|-------|------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Sudut Putar | Blade | Fx | Fy | FD | FL | CD | CL |
| 0° | 1 | 1.820918 | 1.580973 | -1.820918 | 1.580973 | -0.1738554 | 0.150946223 |
| | 2 | 6.7679609 | 1.0170049 | 4.264732529 | 5.352723621 | 0.40718296 | 0.511060854 |
| | 3 | 1.7239499 | 0.84454395 | -0.130578435 | -1.915256383 | -0.01246721 | -0.18286253 |
| 100° | 1 | 5.7817128 | 3.5153315 | 4.465909607 | 5.083444682 | 0.426390701 | 0.485350966 |
| | 2 | 0.17144372 | 0.020628151 | -0.144593029 | -0.094399819 | -0.01380528 | -0.00901299 |
| | 3 | 1.6792667 | 2.0356396 | -0.881764779 | 2.487218548 | -0.08418807 | 0.237471636 |
| 180° | 1 | 3.4335044 | 7.7655919 | 3.4335044 | 7.7655919 | 0.327819969 | 0.741433765 |
| | 2 | 2.5616549 | 2.0943667 | 0.532947317 | 3.265641569 | 0.050884098 | 0.311792965 |
| | 3 | 3.3551113 | 4.6445768 | 2.344765849 | 5.227900018 | 0.22387071 | 0.499143098 |
| 280° | 1 | 5.6488179 | 2.1618211 | 1.148071246 | 5.938395958 | 0.109614154 | 0.566978967 |
| | 2 | 1.5598888 | 1.7435321 | -0.074223316 | 2.33830027 | -0.0070866 | 0.223253397 |
| | 3 | 4.6550048 | 4.5273012 | 2.825845455 | 5.846376939 | 0.269802645 | 0.558193287 |

B. Data Hasil Simulasi Torsi Statis (T_s) dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 untuk Jumlah *Blade* 3 Buah, *Blade Chord Length* 180 mm dan Diameter Turbin 400 mm pada Variasi Kecepatan Angin 4, 5 dan 6 m/s

Tabel B.1 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 4 m/s

| Kecepatan Angin 4 m/s | | | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------------------------|--------------|--------------|
| Sudut Putar | Blade | FD | Torsi Statis per Blade | Torsi Statis | CTS Simulasi |
| 0° | 1 | -0.81151974 | -0.162303948 | 0.203135314 | 0.218190455 |
| | 2 | 1.88652999 | 0.377305998 | | |
| | 3 | -0.059333682 | -0.011866736 | | |
| 100° | 1 | 1.970382496 | 0.394076499 | 0.298388261 | 0.320502966 |
| | 2 | -0.055801081 | -0.011160216 | | |
| | 3 | -0.422640109 | -0.084528022 | | |
| 180° | 1 | 1.5296786 | 0.30593572 | 0.551952659 | 0.592859999 |
| | 2 | 0.21363958 | 0.042727916 | | |
| | 3 | 1.016445116 | 0.203289023 | | |
| 280° | 1 | 0.496455073 | 0.099291015 | 0.374506749 | 0.402262888 |
| | 2 | -0.124724999 | 0.024945 | | |
| | 3 | 1.251353674 | 0.250270735 | | |

Tabel B.2 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 5 m/s

| Kecepatan Angin 5 m/s | | | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------------------------|--------------|--------------|
| Sudut Putar | Blade | FD | Torsi Statis per Blade | Torsi Statis | CTS Simulasi |
| 0° | 1 | -1.2661456 | -0.25322912 | 0.320328937 | 0.22020464 |
| | 2 | 2.958193997 | 0.591638799 | | |
| | 3 | -0.090403713 | -0.018080743 | | |
| 100° | 1 | 3.094281056 | 0.618856211 | 0.475588059 | 0.326934863 |
| | 2 | -0.095954444 | -0.019190889 | | |
| | 3 | -0.620386318 | -0.124077264 | | |
| 180° | 1 | 2.3873855 | 0.4774771 | 0.871010977 | 0.598761574 |
| | 2 | 0.356874501 | 0.0713749 | | |
| | 3 | 1.610794884 | 0.322158977 | | |
| 280° | 1 | 0.788453234 | 0.157690647 | 0.572267814 | 0.393395705 |
| | 2 | -0.113149378 | 0.022629876 | | |
| | 3 | 1.959736458 | 0.391947292 | | |

Tabel B.3 Data Hasil Simulasi Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 6 m/s

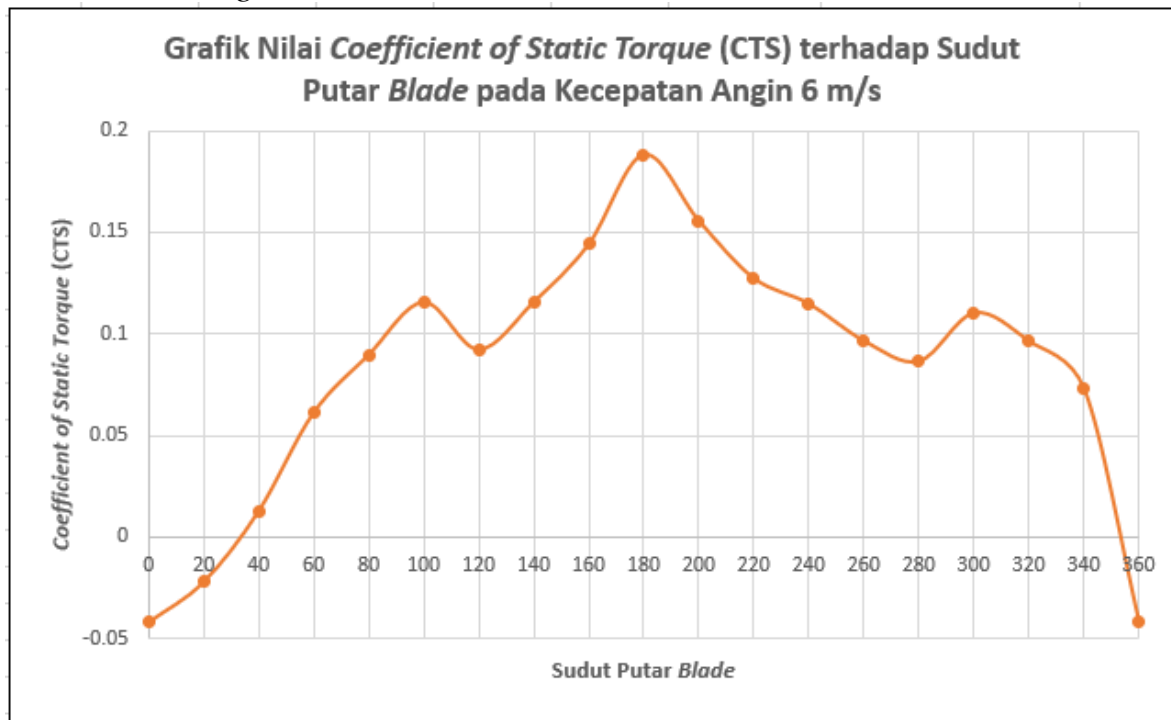
| Kecepatan Angin 6 m/s | | | | | | |
|-----------------------|-------|--------------|------------------------|--------------|--------------|----------------|
| Sudut Putar | Blade | FD | Torsi Statis per Blade | Torsi Statis | CTS Simulasi | CTS Eksperimen |
| 0° | 1 | -1.820918 | -0.3641836 | 0.462647219 | 0.22086035 | -0.041735393 |
| | 2 | 4.264732529 | 0.852946506 | | | |
| | 3 | -0.130578435 | -0.026115687 | | | |
| 100° | 1 | 4.465909607 | 0.893181921 | 0.68791036 | 0.328397355 | 0.115709502 |
| | 2 | -0.144593029 | -0.028918606 | | | |
| | 3 | -0.881764779 | -0.176352956 | | | |
| 180° | 1 | 3.4335044 | 0.68670088 | 1.262243513 | 0.602574777 | 0.188184136 |
| | 2 | 0.532947317 | 0.106589463 | | | |
| | 3 | 2.344765849 | 0.46895317 | | | |
| 280° | 1 | 1.148071246 | 0.229614249 | 0.809628003 | 0.386503403 | 0.086719648 |
| | 2 | -0.074223316 | 0.014844663 | | | |
| | 3 | 2.825845455 | 0.565169091 | | | |

C. Data Hasil Eksperimen Torsi Statis (T_s) dan *Coefficient of Static Torque* (C_{TS}) pada Turbin Angin Tipe Lenz 2 untuk Jumlah *Blade* 3 Buah, *Blade Chord Length* 180 mm dan Diameter Turbin 400 mm pada Variasi Kecepatan Angin 6 m/s (Rahman & Ikhwan, 2021)

Tabel C.1 Data Hasil Eksperimen Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 6 m/s

| Kecepatan Angin 6 m/s | | | | | | | |
|-----------------------|------|------|------|------|------|-----------|----------------|
| Sudut Putar | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Rata-Rata | CTS Eksperimen |
| 0° | -4.8 | -3.3 | -2 | -3.7 | -2.9 | -3.34 | -0.041735393 |
| 20° | 2.4 | -3.5 | -2.2 | -4 | -1.5 | -1.76 | -0.021992303 |
| 40° | -1.3 | -0.8 | 3.5 | 2.1 | 1.6 | 1.02 | 0.012745539 |
| 60° | 6.1 | 5.6 | 4.2 | 4.7 | 3.9 | 4.9 | 0.06122857 |
| 80° | 7.5 | 8.2 | 7.1 | 6.3 | 6.8 | 7.18 | 0.089718598 |
| 100° | 11.1 | 9.2 | 9.6 | 8.5 | 7.9 | 9.26 | 0.115709502 |
| 120° | 8.4 | 8.6 | 7.5 | 5.8 | 6.7 | 7.4 | 0.092467636 |
| 140° | 9.5 | 9.8 | 8.7 | 10.3 | 8 | 9.26 | 0.115709502 |
| 160° | 13.7 | 10.5 | 11.9 | 9.3 | 12.3 | 11.54 | 0.14419953 |
| 180° | 15.8 | 14 | 13.8 | 15.1 | 16.6 | 15.06 | 0.188184136 |
| 200° | 11.6 | 14.5 | 10.2 | 12.7 | 13.3 | 12.46 | 0.155695507 |
| 220° | 9.4 | 10.7 | 10.2 | 12 | 8.7 | 10.2 | 0.127455391 |
| 240° | 10.7 | 9.6 | 9.9 | 8.2 | 7.6 | 9.2 | 0.114959764 |
| 260° | 6.4 | 7.2 | 7.7 | 8.9 | 8.5 | 7.74 | 0.096716149 |
| 280° | 6.8 | 8.1 | 7.6 | 5.7 | 6.5 | 6.94 | 0.086719648 |
| 300° | 8.8 | 7.5 | 10.6 | 7.9 | 9.4 | 8.84 | 0.110461339 |
| 320° | 8.3 | 9.2 | 7 | 7.6 | 6.5 | 7.72 | 0.096466237 |
| 340° | 6.9 | 5.7 | 6.5 | 4.8 | 5.3 | 5.84 | 0.072974459 |
| 360° | -4.8 | -3.3 | -2 | -3.7 | -2.9 | -3.34 | -0.041735393 |

Gambar C.1 Grafik Hasil Eksperimen Turbin Angin Tipe Lenz 2 pada Kecepatan Angin 6 m/s



BIODATA PENULIS



Penulis yang memiliki nama lengkap Muhammad Rionaldi Dwi Putra, dilahirkan di Palembang, 9 Mei 2000. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Taufiqurrahman dan Ibu Anita Mutiarsih. Penulis memulai jenjang pendidikan formal di TK YSP Pusri Palembang pada 2004 – 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan sekolah dasar di SD YSP Pusri Palembang pada 2006 - 2012. Lalu melanjutkan pendidikan sekolah menengah di SMP YSP Pusri Palembang pada 2012 - 2015. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan sekolah menengah atas di SMA Negeri 5 Palembang pada 2015 - 2018. Setelah lulus SMA pada tahun 2018, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan terdaftar dengan NRP. 02111840000037.

Di Departemen Teknik Mesin ITS sendiri, penulis mengambil bidang studi Konversi Energi. Selain itu penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non-akademik, seperti bergabung menjadi pengurus organisasi di Departemen Komunikasi dan Informasi UKM Basket ITS dan Departemen Ukhuwah Usaha Ash-Shaff Teknik Mesin ITS, ITS *Basketball League* dan Dies Natalis Basket ITS. 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 email rionaldidwi@gmail.com.