

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH *BLADE SURFACE CAVITY*
PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI
POSISI *CAVITY***

DANINDRA ADI PRATAMA

NRP 02111840000062

Dosen Pembimbing

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

NIP 198105292003122001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH *BLADE SURFACE CAVITY*
PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI
POSISI *CAVITY***

DANINDRA ADI PRATAMA

NRP 02111840000062

Dosen Pembimbing

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

NIP 198105292003122001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**NUMERICAL STUDY OF BLADE SURFACE CAVITY
EFFECTS ON DARRIEUS TURBINE PERFORMANCE WITH
VARIATIONS IN CAVITY POSITION**

DANINDRA ADI PRATAMA

NRP 02111840000062

Advisor

Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

NIP 198105292003122001

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH *BLADE SURFACE CAVITY* PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI POSISI *CAVITY*

TUGAS AKHIR

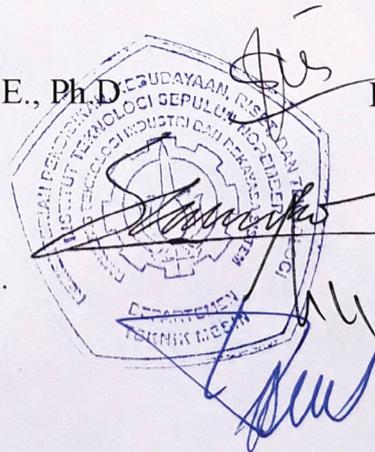
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **DANINDRA ADI PRATAMA**

NRP. 0211184000062

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

1. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. Pembimbing
2. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko Penguji
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. Penguji
4. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. Penguji



SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF BLADE SURFACE CAVITY EFFECTS ON DARRIEUS TURBINE PERFORMANCE WITH VARIATIONS IN CAVITY POSITION

FINAL PROJECT

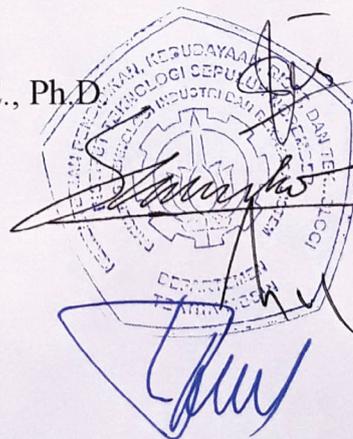
Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a bachelor's degree in Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **DANINDRA ADI PRATAMA**

NRP. 02111840000062

Approved by Final Project Examiner Team:

- | | | |
|----|--|----------|
| 1. | Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. | Advisor |
| 2. | Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko | Examiner |
| 3. | Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. | Examiner |
| 4. | Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. | Examiner |



SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Danindra Adi Pratama / 0211184000062

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /
198105292003122001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK PENGARUH *BLADE SURFACE CAVITY* PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI POSISI *CAVITY*” 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 yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 Juli 2022

Mengetahui

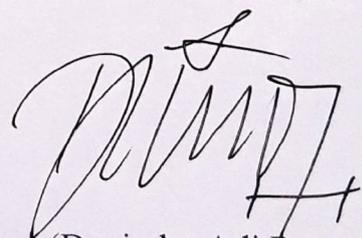
Dosen Pembimbing



(Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.)

NIP. 198105292003122001

Mahasiswa,



(Danindra Adi Pratama)

NRP. 0211184000062

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Danindra Adi Pratama / 0211184000062
Department : Teknik Mesin
Advisor / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /
198105292003122001

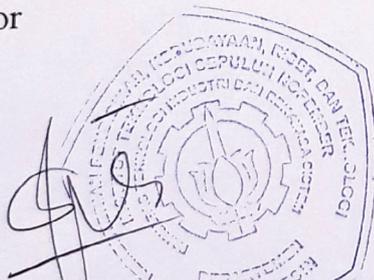
Hereby declare that the Final Project with the title of “NUMERICAL STUDY OF BLADE SURFACE CAVITY EFFECTS ON DARRIEUS TURBINE PERFORMANCE WITH VARIATIONS IN CAVITY POSITION” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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, 20 Juli 2022

Acknowledged

Advisor



(Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.)

NIP. 198105292003122001

Student

(Danindra Adi Pratama)

NRP. 0211184000062

STUDI NUMERIK PENGARUH *BLADE SURFACE CAVITY* PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI POSISI *CAVITY*

Nama Mahasiswa / NRP : Danindra Adi Pratama / 0211184000062
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

Abstrak

Kebutuhan energi di Indonesia terus bertambah dari tahun ke tahun. Berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2019*, kenaikan kebutuhan energi listrik selama periode 2018 - 2050 sekitar 7% per tahunnya apabila menggunakan skema *Business as Usual*. Pembangkitan energi listrik yang dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan di berbagai sektor di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil. Energi fosil merupakan energi yang tidak terbarukan dan tidak bersih serta memiliki dampak terhadap pemanasan global. Pemerintah melalui Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menargetkan bauran energi baru dan terbarukan setidaknya 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Salah satu sumber energi yang bersih dan terbarukan adalah angin. Indonesia memiliki potensi angin sebesar 60,6 GW berdasarkan data Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Konversi energi angin dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Turbin angin Darrieus tipe H-rotor cocok untuk kecepatan angin yang rendah serta konstruksi dan operasi yang mudah. Salah satu upaya peningkatan performa turbin Darrieus yaitu dengan memberikan *cavity* pada permukaan sudu turbin. Posisi *cavity* yang menghasilkan peningkatan performa yang optimum pada kecepatan angin yang rendah merupakan fokus pada penelitian ini.

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah studi numerik dua dimensi pada turbin Darrieus tipe H-rotor dengan tiga sudu. Studi numerik dilakukan dengan menggunakan Ansys Fluent 2021 R2. Pemberian *cavity* dilakukan pada *inner* dan *outer side* sudu turbin dan dibandingkan performanya dengan sudu turbin tanpa *cavity*. Perbandingan performa turbin Darrieus tanpa dan dengan *cavity* dilihat dari nilai koefisien daya dan torsi turbin pada rentang nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) 0,9 – 1,7. Selain itu juga akan dilihat kontur kecepatan relatif dan koefisien tekanan serta struktur *streamline* di sekitar *cavity* pada sudu turbin. Simulasi numerik dilakukan dengan menyelesaikan persamaan *Unsteady Reynold-Averaged Navier-Stokes* (URANS) menggunakan model turbulensi $k-\omega$ SST dengan kecepatan angin konstan 5 m/s.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan *cavity* yang terletak pada *inner side* dan dekat dengan *trailing edge* memberikan kenaikan performa di seluruh operasional TSR yang diuji. Koefisien daya maksimal didapatkan pada rentang TSR 1,7 – 1,9 dengan kenaikan koefisien daya tertinggi turbin Darrieus dengan *cavity* terjadi pada TSR = 0,9 sebesar 6,87%.

Kata kunci: Koefisien Daya, Koefisien Torsi, Posisi *Cavity*, Studi Numerik, *Tip Speed Ratio*, Turbin Darrieus, *Unsteady*

NUMERICAL STUDY OF BLADE SURFACE CAVITY EFFECTS ON DARRIEUS TURBINE PERFORMANCE WITH VARIATIONS IN CAVITY POSITION

Student Name / NRP : Danindra Adi Pratama / 0211184000062
Department : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisor : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

Abstract

Energy needs in Indonesia continue to grow from year to year. Based on Indonesia's Energy Outlook 2019, the increase in electricity demand during the 2018-2050 period is around 7% per year when using the *Business-as-Usual* scheme. The generation of electrical energy produced to meet the needs of various sectors in Indonesia is still dominated by fossil energy. Fossil energy is non-renewable and unclean energy and has an impact on global warming. The government through Government Regulation No. 79 of 2014 concerning the National Energy Policy targets a new and renewable energy mix of at least 23% by 2025 and 31% by 2050. One of the clean and renewable sources of energy is wind. Indonesia has a wind potential of 60.6 GW based on data from the National Energy General Plan (RUEN). The conversion of wind energy can be carried out using wind turbines. The H-rotor type Darrieus wind turbine is suitable for low wind speeds and easy construction and operation. One of the efforts to improve the performance of the Darrieus turbine is by providing *cavity* on the turbine blade surface. The position of *the cavity* that resulted in an increase in optimum performance at low wind speeds was the focus of this study.

The method used in this study was a two-dimensional numerical study on an H-rotor type Darrieus turbine with three blades. Numerical studies were conducted using Ansys Fluent 2021 R2. *Cavity feeding* is carried out on the *inner* and *outer sides* of the turbine blade and compared its performance with turbine blades without *cavity*. The comparison of the performance of Darrieus turbines without and with *cavity* is seen from the value of the coefficient of power and torque of the turbine in the tip *speed ratio* (TSR) value range of 0.9 – 1.7. In addition, it will also be seen the contours of the relative velocity and coefficient of pressures and streamlined structures around the *cavity* in the turbine blade. Numerical simulations were performed by solving the *Unsteady Reynold-Averaged Navier-Stokes* (URANS) equation using the k- ω SST turbulence model with a constant wind speed of 5 m/s.

The results obtained from this study showed that the addition of *cavities* located on *the inner side* and close to *the trailing edge* provided an increase in performance throughout the TSR operations tested. The maximum power coefficient is obtained in the TSR range of 1.7 – 1.9 with an increase in the highest power coefficient of the Darrieus turbine with *cavity* occurring at TSR = 0.9 by 6.87%.

Keywords: Cavity Position, Coefficient of Power, Coefficient of Torque, Darrieus Turbine, Numerical Study, Tip Speed Ratio, Unsteady

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“STUDI NUMERIK PENGARUH BLADE SURFACE CAVITY PADA PERFORMA TURBIN DARRIEUS DENGAN VARIASI POSISI CAVITY”**. Tugas akhir ini disusun 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.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, oleh sebab itu dengan kerendahan hati penulis mohon maaf atas segala kekurangan yang ada didalam tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini dapat diselesaikan karena dukungan dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan doa dan dukungan sehingga terwujudnya tugas akhir ini. Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan doa dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Ibu Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu sabar memberikan saran, motivasi, dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
3. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko, Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., dan Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. selaku dosen penguji tugas akhir penulis yang telah bersedia memberikan kritik dan saran yang membangun dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama menjalani perkuliahan di Departemen Teknik Mesin, ITS.
5. Semua warga Laboratorium Mekanika dan Mesin – Mesin Fluida yang telah memberikan kebermanfaatan bagi penulis.
6. Keluarga M61 yang telah memberikan kesan bermakna selama berkuliah di Departemen Teknik Mesin, ITS.
7. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin, ITS yang baik dan ramah.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu oleh penulis.

Surabaya, 17 Juni 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iv
APPROVAL SHEET	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	vi
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Vertical Axis Wind Turbine</i>	5
2.2 Turbin Angin Darrieus.....	6
2.3 Aerodinamika Turbin Darrieus.....	8
2.4 Parameter Performa Pada Turbin Darrieus.....	10
2.4.1 <i>Tip Speed Ratio (TSR)</i>	10
2.4.2 <i>Coefficient of Torque</i>	11
2.4.3 <i>Coefficient of Power</i>	11
2.4.4 <i>Coefficient of Pressure</i>	11
2.4.5 <i>Drag Coefficient</i>	12
2.5 <i>Time Step Size</i>	12
2.6 <i>Number of Time Step</i>	13
2.7 <i>Sliding Mesh (SM)</i>	13
2.8 Data Acuan Validasi.....	13
2.9 Penelitian Terdahulu.....	14
2.9.1 <i>Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine</i>	14
2.9.2 <i>Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine</i> 15	15
2.9.3 <i>Performance improvement of Darrieus wind turbine using different cavity layouts</i> 16	16
2.9.4 <i>Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines</i>	18
2.9.5 <i>Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade</i>	20
BAB III METODOLOGI	23
3.1 Variasi dan Domain Simulasi.....	23
3.1.1 Variasi.....	23
3.1.2 Domain Simulasi.....	23
3.2 <i>Pre-processing</i>	24
3.2.1 Pembuatan Geometri Benda Uji dan Domain Simulasi.....	24

3.2.2	Proses <i>Meshing</i>	25
3.2.3	Penentuan Kondisi Batas	28
3.3	<i>Processing</i>	28
3.3.1	<i>Models</i>	28
3.3.2	<i>Materials</i>	29
3.3.3	<i>Cell Zone Conditions</i>	29
3.3.4	<i>Boundary Conditions</i>	29
3.3.5	<i>Reference Values</i>	29
3.3.6	<i>Solution Methods</i>	30
3.3.7	<i>Residual Monitors</i>	30
3.3.8	<i>Initialization</i>	30
3.4	<i>Post-processing</i>	31
3.5	<i>Sensitivity Analysis</i>	31
3.5.1	<i>Grid Sensitivity Analysis</i>	31
3.5.2	<i>Time Step Sensitivity Analysis</i>	32
3.5.3	<i>Revolution Convergence Analysis</i>	33
3.6	Studi Validasi	34
3.7	Diagram Alir Penelitian	36
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1	Efek Posisi <i>Cavity</i> Terhadap Performa Turbin Darrieus	39
4.1.1	Efek Posisi <i>Cavity</i> Terhadap <i>Power Coefficient</i>	39
4.1.2	Efek Posisi <i>Cavity</i> Terhadap <i>Torque Coefficient</i>	41
4.2	Analisis Torsi	42
4.3	Analisis Kontur	44
4.3.1	Kontur Kecepatan Relatif dan Struktur <i>Streamline</i>	45
4.3.2	Kontur <i>Coefficient of Pressure</i>	48
4.4	Analisis <i>Coefficient of Pressure</i>	50
4.5	Analisis Karakteristik Pada <i>Drag Reduction</i>	51
BAB V	PENUTUP	54
5.1	Kesimpulan	54
5.2	Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
BIODATA PENULIS	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Profil <i>cavity</i> airfoil NACA 0015 pada <i>pressure side</i>	2
Gambar 2.1 VAWT (a) Turbin Savonius (b) Turbin Darrieus H-rotor (Bhutta <i>et al.</i> , 2012).....	6
Gambar 2.2 Ilustrasi asli paten George Darrieus pada 1931: <i>curved blades</i> (kiri) dan <i>straight blades</i> (kanan)	7
Gambar 2.3 Perkembangan Turbin Darrieus (Tjiu <i>et al.</i> , 2015).....	8
Gambar 2.4 Vektor gaya dan kecepatan pada turbin Darrieus (Hand <i>et al.</i> , 2021).....	10
Gambar 2.5 Kurva C_p hasil pengukuran <i>wind tunnel</i> (Castelli <i>et al.</i> , 2010).....	14
Gambar 2.6 Perbandingan analisa numerik dan eksperimen lorong angin (Lee dan Lim, 2015)	14
Gambar 2.7 Karakteristik airfoil dengan <i>cavity</i> (Sobhani <i>et al.</i> , 2017).....	15
Gambar 2.8 Perbandingan <i>power coefficient</i> sudu NACA 0021 dan NACA 0021 dengan <i>cavity</i> (Sobhani <i>et al.</i> , 2017)	16
Gambar 2.9 konfigurasi posisi <i>cavity</i> (Roshan <i>et al.</i> , 2021)	16
Gambar 2.10 Pengaruh posisi <i>cavity</i> terhadap C_m fungsi TSR (Roshan <i>et al.</i> , 2021).....	17
Gambar 2.11 Pengaruh posisi <i>cavity</i> terhadap C_p fungsi TSR (Roshan <i>et al.</i> , 2021).....	17
Gambar 2.12 <i>Groove</i> pada permukaan airfoil NACA 4415 (Liu <i>et al.</i> , 2020).....	18
Gambar 2.13 Variasi <i>groove</i> yang disimulasikan (Liu <i>et al.</i> , 2020)	18
Gambar 2.14 Grafik <i>lift-to-drag ratio</i> terhadap posisi <i>groove</i> (Liu <i>et al.</i> , 2020).....	19
Gambar 2.15 Distribusi <i>vorticity</i> didalam <i>groove</i> (Liu <i>et al.</i> , 2020).....	20
Gambar 2.16 Domain komputasi dan sketsa <i>transverse groove structure</i> (Wu <i>et al.</i> , 2019)...	20
Gambar 2.17 Kontur tekanan statik pada permukaan <i>groove</i> (a) $s = 0.1$ mm, $U = 10$ m/s; (b) $s = 0.1$ mm, $U = 22$ m/s; (c) $s = 0.1$ mm, $U = 40$ m/s; (d) $s = 1$ mm, $U = 10$ m/s; (e) $s = 1$ mm, $U = 22$ m/s; (f) $s = 1$ mm, $U = 40$ m/s. (Wu <i>et al.</i> , 2019).....	21
Gambar 2.18 <i>Total drag coefficient</i> pada beberapa ukuran struktur <i>groove</i> . (a) $U = 22$ m/s (b) $U = 40$ m/s. (Wu <i>et al.</i> , 2019).....	22
Gambar 2.19 Vektor kecepatan di dekat struktur <i>groove</i> pada $U = 22$ m/s dan $h = s = d = 1$ mm (Wu <i>et al.</i> , 2019).....	22
Gambar 3.1 Geometri sudu turbin dengan <i>cavity</i>	24
Gambar 3.2 Ukuran domain dan kondisi batas (bukan skala sebenarnya).....	25
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> seluruh domain.....	26
Gambar 3.4 <i>Meshing</i> pada <i>stationary subdomain</i>	26
Gambar 3.5 <i>Meshing</i> pada <i>rotating subdomain</i>	27
Gambar 3.6 <i>Meshing</i> pada <i>blade subdomain</i>	27
Gambar 3.7 Rekomendasi kualitas <i>mesh</i> (Ansys, Inc., 2013).....	28
Gambar 3.6 Koefisien torsi maksimum untuk satu sudu turbin Darrieus pada jumlah <i>mesh</i> yang bervariasi	32
Gambar 3.7 Koefisien torsi terhadap sudut azimuth untuk satu sudu turbin Darrieus pada <i>time step</i> yang berbeda – beda.....	33
Gambar 3.8 Koefisien torsi tiga sudu pada 30 putaran turbin Darrieus	34
Gambar 3.9 Perbandingan C_p hasil simulasi numerik dengan eksperimen Castelli <i>et al.</i> , (2010)	35
Gambar 3.10 Diagram alir metode penelitian	38
Gambar 4.1 Perbandingan koefisien daya pada beberapa TSR.....	40
Gambar 4.2 Kenaikan koefisien daya pada beberapa TSR	40
Gambar 4.3 Koefisien torsi pada beberapa TSR	41
Gambar 4.4 Kenaikan koefisien torsi pada beberapa TSR.....	42
Gambar 4.5 Variasi C_m sesaat terhadap sudut azimuth pada $TSR = 0,9$	43

Gambar 4.6 Variasi C_m sesaat terhadap sudut azimuth pada $TSR = 1,7$	44
Gambar 4.7 Gaya tangensial dengan satu sudu pada $TSR = 0,9$	45
Gambar 4.8 Kontur kecepatan relatif dan struktur <i>streamline</i> pada $TSR = 0,9$	47
Gambar 4.9 Kontur <i>coefficient of pressure</i> pada $TSR = 0,9$	49
Gambar 4.10 Grafik <i>coefficient of pressure</i> pada $TSR = 0,9$	51
Gambar 4.11 <i>Viscous, pressure, dan total drag coefficient</i> sebagai fungsi sudut azimuth	53
Gambar 4.12 Vektor kecepatan relatif disekitar <i>cavity</i> pada $\theta = 292^\circ$	53

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keunggulan VAWT terhadap HAWT (Bhutta <i>et al.</i> , 2012)	5
Tabel 3.1 Variasi sudut turbin dengan <i>cavity</i>	23
Tabel 3.3 Kondisi Batas Simulasi	29
Tabel 3.4 <i>Reference value</i> simulasi numerik.....	30
Tabel 3.5 Metode Solusi Simulasi Numerik.....	30

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

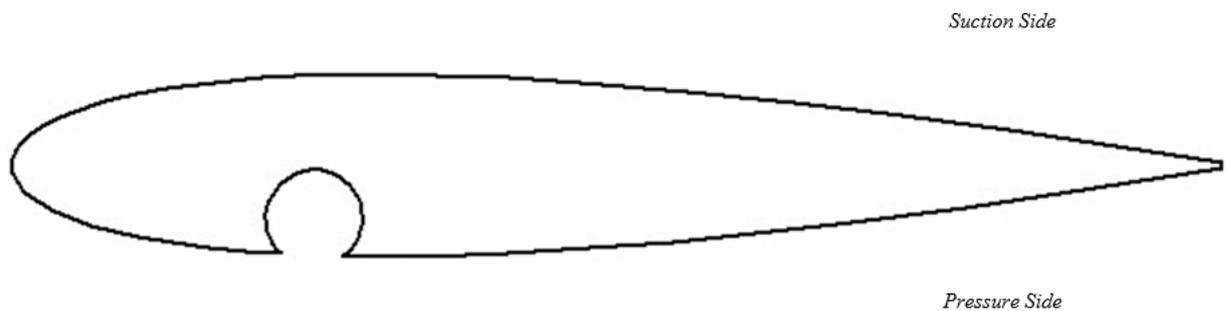
Kebutuhan energi di Indonesia terus bertambah dari tahun ke tahun seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan peningkatan produk domestik bruto. Menurut *Outlook Energi Indonesia 2019*, kebutuhan energi listrik pada tahun 2050 diproyeksikan mencapai 2.214 TWh (*Business as Usual*), 1.918 TWh (Pembangunan Berkelanjutan), 1.626 TWh (Rendah Karbon). Jumlah tersebut naik sembilan kali lebih besar dibandingkan dengan kebutuhan energi listrik pada tahun 2018 sebesar 254,6 TWh. Berdasarkan ketiga skenario tersebut maka laju permintaan listrik per tahun selama periode 2018 - 2050 berturut - turut sebesar 7% (*Business as Usual*), 6,5% (Pembangunan Berkelanjutan), dan 6% (Rendah Karbon).

Pembangkitan energi listrik di Indonesia dan dunia pada umumnya masih didominasi dari bahan bakar fosil. Pelepasan CO₂ dari pembangkitan energi berbahan bakar fosil menghasilkan dampak terhadap pemanasan global. Menurut dokumen *National Determined Contributions* (NDC) yang ditujukan kepada *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) pada tahun 2030 target emisi turun 29% dari skenario dasar tahun 2010 untuk skenario CM1 (tanpa bantuan internasional) dan penurunan 41% dari skenario dasar untuk skenario CM2 (dengan bantuan internasional).

Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menargetkan bauran energi baru dan terbarukan setidaknya 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Hal ini merupakan upaya pemerintah dalam komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca serta usaha diversifikasi sumber energi akibat berkurangnya produksi energi fosil. Produksi energi fosil yang semakin menurun dapat ditopang dengan memaksimalkan potensi energi baru dan terbarukan. Indonesia memiliki potensi energi baru dan terbarukan yang cukup besar salah satunya tenaga angin/bayu. Potensi angin di Indonesia pada umumnya berkecepatan tiga sampai enam meter per detik. Beberapa wilayah di Indonesia seperti Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa memiliki kecepatan angin diatas lima meter per detik berdasarkan hasil pemetaan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) pada 120 lokasi. Dari 34 provinsi di Indonesia potensi energi angin sesuai dengan data yang disebutkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) sebesar 60,6 GWp.

Proses konversi energi angin dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Salah satu model turbin angin yang umum digunakan yaitu turbin angin sumbu vertikal. Ada dua macam turbin angin sumbu vertical yaitu turbin Savonius dan turbin Darrieus. Turbin Savonius memanfaatkan gaya drag sedangkan turbin Darrieus memanfaatkan gaya angkat. Turbin Darrieus lebih efisien dan torsi awal yang rendah dibandingkan turbin Savonius (Dessoky *et al.*, 2019; Fatahian *et al.*, 2018). Turbin Darrieus merupakan turbin angin sumbu vertical yang mampu menerima angin dari berbagai arah, kecepatan tinggi, torsi rendah yang umumnya terdiri dari dua atau tiga sudu. Salah satu tipe turbin angin Darrieus yang sering dipertimbangkan yaitu tipe H-rotor karena cocok untuk kecepatan angin yang rendah serta konstruksi dan operasi yang mudah (Mohamed, 2019). Turbin Darrieus memiliki dua kekurangan utama yaitu performa yang rendah dan kemampuan *self-starting* yang buruk (Mohamed, 2013).

Salah satu cara untuk meningkatkan performa turbin Darrieus adalah dengan mengganti profil airfoil konvensional dengan profil airfoil yang diberi *cavity*. *Cavity* dapat dibuat dengan cara memotong sebagian dari permukaan airfoil seperti ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Profil *cavity* airfoil NACA 0015 pada *pressure side*

Gambar 1.1 menunjukkan airfoil NACA 0015 yang diberi *cavity* pada bagian *pressure side* dekat dengan daerah *leading edge*. Pada bagian yang diberi *cavity* akan mendapatkan keuntungan berupa kenaikan rasio antara gaya *lift* dengan gaya *drag*.

Sobhani *et al.* (2017) melakukan investigasi numerik untuk mengetahui pengaruh posisi *cavity*, diameter *cavity*, dan profil *cavity* terhadap torsi *start up* dan daya output yang dihasilkan. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan hasil bahwa diameter *cavity* sebesar delapan persen panjang chord yang berada pada bagian *pressure side* memberikan performa optimum dalam hal torsi *start up* dan daya output yang dihasilkan dengan kenaikan 18% dan 25% dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity* pada *tip speed ratio* 2,6.

Roshan *et al.* (2021) melakukan penelitian tentang desain turbin Darrieus yang mampu melakukan *self-starting* pada kecepatan angin yang rendah tanpa penambahan komponen lain ke dalam turbin Darrieus. Upaya yang dilakukan berfokus pada modifikasi profil sudu turbin Darrieus. Modifikasi profil sudu turbin Darrieus yang dilakukan berupa bentuk *cavity*, jumlah, ukuran, dan posisi pada permukaan sudu turbin Darrieus. Hasil yang didapatkan berupa kenaikan koefisien torsi dan daya menggunakan *cavity* tunggal yang berada pada *suction side* dekat *trailing edge* dengan kenaikan koefisien daya maksimum sebesar 18% didapatkan pada *Tip Speed Ratio* (TSR) 3,5. Namun airfoil dengan dua *cavity* pada sisi *suction* dan *pressure* yang terletak pada *trailing edge* menghasilkan kenaikan koefisien daya sebesar 17% dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*.

Studi numerik pengaruh *surface grooves* pada performa aerodinamika NACA 4415 untuk turbin angin skala kecil dilakukan oleh Liu *et al.* (2020). Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut yaitu *recess depth ratio* merupakan faktor utama yang paling berpengaruh dengan nilai yang paling efektif berada diantara 1,0 dan 1,5. Aspek rasio yang lebih kecil diperlukan untuk menjebak vortex untuk *recess depth* yang kecil, sedangkan untuk aspek rasio yang besar bisa menstabilkan vortex. Posisi *endpoint* dari *groove* yang paling optimum terletak disekitar 16% dari panjang chord. Pada *recess depth ratio* 1.2 – 1.5 *rectangular grooves* menghasilkan performa aerodinamika yang lebih baik dibandingkan dengan *arc groove*.

Wu *et al.* (2019) melakukan penelitian tentang pengaruh *groove structural size* pada *turbulent drag* sudu airfoil NACA 0012. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *transverse groove* dengan ukuran 0,1 mm menghasilkan *drag reduction rate* sebesar 9,65%. Airfoil dengan *transverse groove* menurunkan *viscous drag* yang akhirnya akan menurunkan *total drag*.

Penelitian terkait turbin Darrieus yang diberi *cavity* belum banyak dilakukan dan menarik perhatian banyak peneliti akhir – akhir ini sehingga konfigurasi *cavity* yang optimum pada turbin Darrieus yang bekerja pada kecepatan angin dan *Tip Speed Ratio* (TSR) yang rendah belum banyak diteliti. Mempertimbangkan hal tersebut dan yang sudah disebutkan diatas maka dipandang perlu dilakukan penelitian peningkatan performa turbin dengan optimasi letak *cavity* pada airfoil turbin Darrieus. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode numerik

Computational Fluid Dynamics (CFD). Hasil yang didapatkan dari penelitian ini akan bermanfaat dalam desain turbin Darrieus yang optimum yang dapat beroperasi pada kecepatan angin dan Tip Speed Ratio (TSR) yang rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Kebutuhan energi terus bertambah dari tahun ke tahun sedangkan produksi energi fosil semakin menurun. Pemanfaatan energi baru dan terbarukan dapat dimanfaatkan dalam menopang kebutuhan energi. Salah satu sumber energi bersih dan terbarukan adalah energi angin/bayu. Konversi energi angin/bayu dapat dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Turbin Darrieus merupakan turbin angin sumbu vertikal yang mampu menerima angin dari berbagai arah, kecepatan tinggi, torsi rendah yang umumnya terdiri dari dua atau tiga sudu. Turbin Darrieus memiliki kekurangan performa yang rendah dan kemampuan *self-starting* yang buruk. Salah satu cara meningkatkan performa dan kemampuan *self-starting* turbin Darrieus adalah dengan mengganti airfoil konvensional dan airfoil yang diberi *cavity*. Namun penelitian tentang *cavity* pada turbin Darrieus belum banyak dilakukan dan menjadi perhatian banyak peneliti akhir – akhir ini. Oleh sebab itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis lebih jauh bagaimana efek posisi *cavity* pada performa turbin Darrieus pada kecepatan angin dan Tip Speed Ratio (TSR) yang rendah. Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi posisi *cavity* pada performa turbin Darrieus apabila dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity*?
2. Bagaimana konfigurasi *cavity* yang optimum pada turbin Darrieus dengan kecepatan angin dan TSR yang rendah?
3. Bagaimana karakteristik aliran disekitar sudu turbin Darrieus dengan dan tanpa penambahan *cavity*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi posisi *cavity* pada nilai *Coefficient of Power* (C_p) dan *Coefficient of Torque* (C_m) apabila dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity*.
2. Mengetahui konfigurasi *cavity* yang optimum pada turbin Darrieus dengan kecepatan angin dan TSR yang rendah.
3. Mendapatkan data kualitatif berupa kontur kecepatan relatif, kontur *coefficient of pressure* dan struktur *streamline* serta pada turbin Darrieus dengan dan tanpa penambahan *cavity*.

1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini dalam mencapai tujuan penelitian, diantaranya:

1. Penelitian dilakukan dengan menggunakan *software* numerik komersial Ansys Fluent dengan pemodelan *unsteady* dua dimensi.
2. Tipe turbin angin yang digunakan adalah turbin Darrieus tipe H-Rotor tanpa poros dan *connecting rod* dengan profil airfoil sudu sesuai NACA 0015.
3. Studi numerik dua dimensi menggunakan penampang pada bagian *midspan* turbin Darrieus.
4. Turbin Darrieus berputar berlawanan dengan arah jarum jam.
5. Fluida yang digunakan adalah udara dengan kondisi *incompressible* dan *viscous*.
6. Aliran pada inlet bersifat uniform dan searah.
7. Kondisi awal turbin sudah berputar dengan kecepatan sudut konstan.

8. Struktur turbin tidak mengalami deformasi selama berputar.
9. Pengaruh gravitasi diabaikan.
10. Studi numerik tidak mempertimbangkan bahan yang dipakai pada turbin Darrieus.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan gambaran terkait performa turbin Darrieus dengan *cavity* dibandingkan dengan tanpa *cavity*.
2. Memberikan gambaran mengenai pengaplikasian turbin Darrieus dengan *cavity* di wilayah dengan kecepatan angin rendah seperti di Indonesia.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

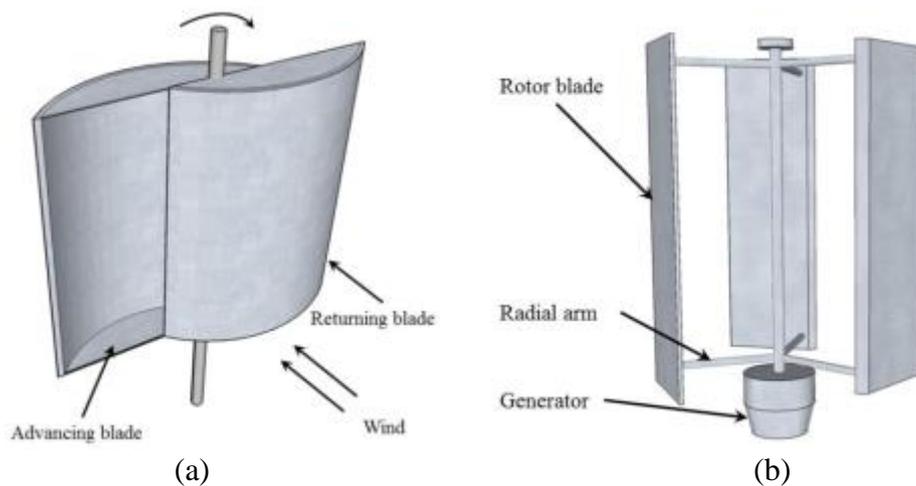
2.1 *Vertical Axis Wind Turbine*

Turbin angin dapat dikelompokkan menjadi dua tipe utama berdasarkan arah aksial dari sumbu poros rotor yaitu *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT). HAWT modern memiliki dua atau tiga sudu yang terpasang secara radial dari rotor. HAWT telah banyak digunakan dalam pembangkitan listrik skala besar. Berbeda dengan HAWT, penggunaan VAWT masih terbatas dan baru akhir – akhir ini digunakan dalam skala besar (Herbert *et al.*, 2007). Penelitian telah menunjukkan bahwa VAWT memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan HAWT seperti terlihat pada Tabel 2.1. Selain itu juga VAWT dapat di pasang dengan jarak yang lebih berdekatan dibandingkan dengan HAWT sehingga *power density* tiap meter persegi dapat lebih besar (Dabiri, 2011).

Tabel 2.1 Keunggulan VAWT terhadap HAWT (Bhutta *et al.*, 2012)

Parameter	<i>Vertical axis wind turbine</i> (VAWT)	<i>Horizontal Axis wind turbine</i> (HAWT)
<i>Tower sway</i>	Kecil	Besar
Mekanisme Yaw	Tidak	Ya
<i>Self-starting</i>	Tidak	Ya
Formasi keseluruhan	Sederhana	Komplek
Lokasi generator	diper permukaan tanah	Tidak diper permukaan tanah
Tinggi dari tanah	Rendah	Tinggi
Area operasi sudu	Kecil	Besar
Kebisingan yang dihasilkan	Lebih rendah	Lebih tinggi
Arah angin	Independen	Dependen
Obstruksi untuk burung	Rendah	Tinggi
Efisiensi ideal	Lebih dari 70%	50-60%

Ada dua macam model VAWT berdasarkan pada bentuk sudu yang digunakan yaitu Savonius dan Darrieus. Turbin Savonius memiliki sudu melengkung berbentuk setengah silinder yang prinsip kerjanya berdasarkan pada gaya *drag*. Sedangkan turbin Darrieus memiliki sudu berupa airfoil yang prinsip kerjanya berdasarkan gaya angkat. Turbin Darrieus memiliki efisiensi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan turbin Savonius namun memiliki kelemahan dalam *self starting* dibandingkan dengan turbin Savonius. Bentuk turbin angin sumbu vertikal dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.



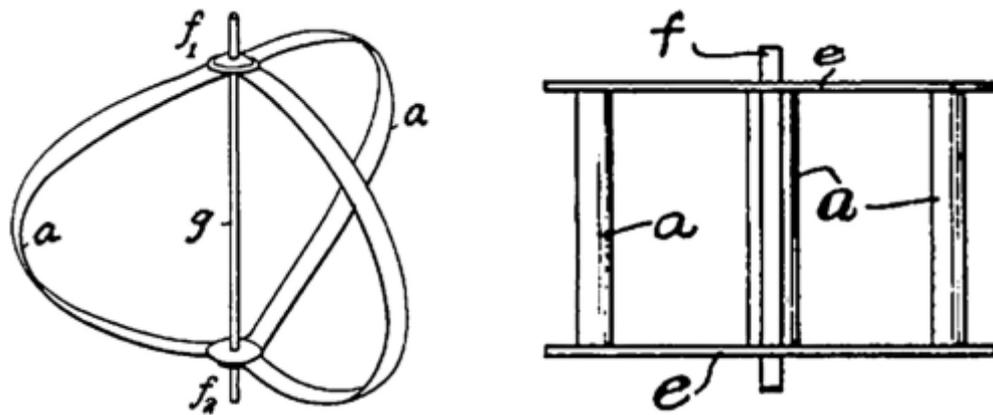
Gambar 2.1 VAWT (a) Turbin Savonius (b) Turbin Darrieus H-rotor (Bhutta *et al.*, 2012)

2.2 Turbin Angin Darrieus

Turbin angin Darrieus merupakan salah satu turbin angin sumbu vertical yang paling banyak diteliti dan dikembangkan diantara jenis turbin angin sumbu vertical lainnya. Turbin Darrieus dipatenkan diperancis pada 1927 oleh insinyur aeronotika perancis, Georges Darrieus. Turbin Darrieus adalah VAWT yang memiliki efisiensi tinggi serta torsi yang dihasilkan cukup besar pada putaran dan kecepatan tinggi namun memiliki kemampuan *self starting* yang rendah. Prinsip kerja turbin Darrieus yaitu dengan memanfaatkan gaya *lift* yang dihasilkan pada permukaan sudu turbin akibat perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah sudu turbin ketika dikenai aliran fluida.

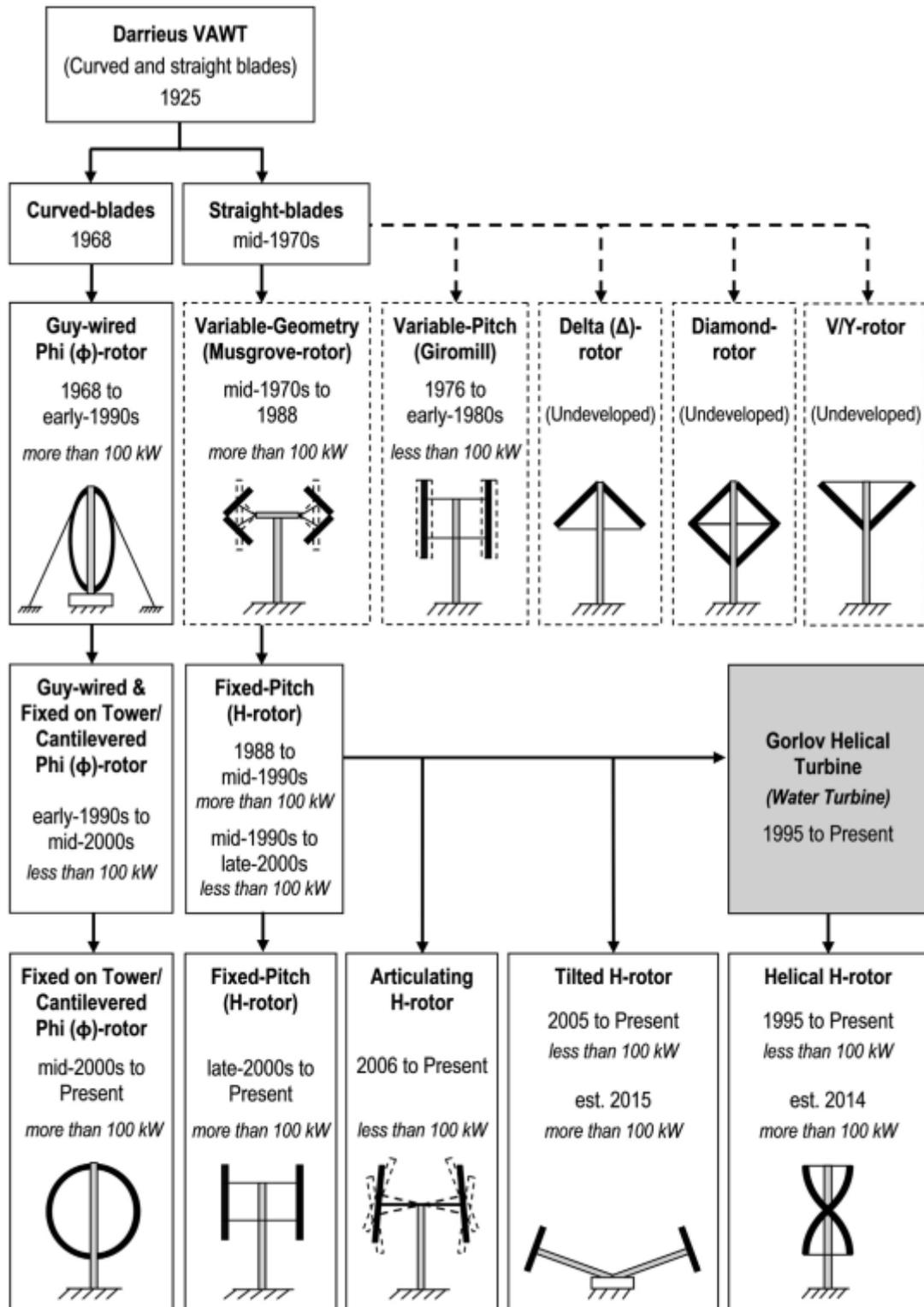
Desain turbin Darrieus yang ditemukan oleh Georges Darrieus lebih dikenal dengan nama *eggbeater* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 (kiri). Desain ini menggunakan basis *curved blades* dengan profil sudu berupa airfoil. Turbin Darrieus tipe *eggbeater* lebih efisien dibandingkan turbin Savonius namun cenderung menghasilkan torsi yang fluktuatif dan vibrasi pada sudu turbin akibat turbulensi yang dihasilkan dari sudu turbin itu sendiri. Masalah ini dapat diatasi dengan membentuk profil sudu menjadi bentuk helix.

Georges Darrieus juga mematenkan turbin VAWT dengan bentuk sudu lurus yang ditopang dari pusat sumbu. Turbin ini dikenal dengan nama turbin Giromill yang terlihat seperti Gambar 2.2 (kanan). Turbin ini memiliki potensi lebih baik dibandingkan dengan turbin Darrieus tipe *eggbeater* akan tetapi turbin ini juga memiliki beberapa kelemahan. Ada tipe turbin yang memiliki potensi performa lebih baik lagi yaitu *cycloturbine*. *Cycloturbine* mampu mengubah arah sudunya ketika berputar agar mendapatkan sudut yang optimum terhadap angin. Kekurangan dari turbin ini yaitu kompleksitas dan biaya yang tinggi sehingga masih sebatas tahap prototipe dan belum dalam skala komersial yang besar.



Gambar 2.2 Ilustrasi asli paten George Darrieus pada 1931: *curved blades* (kiri) dan *straight blades* (kanan)

Konfigurasi turbin Darrieus terus mengalami perkembangan menjadi beberapa variasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Konfigurasi *eggbeater* atau *phi-rotor* memiliki beberapa variasi seperti *guy-wired*, *fixed-on-tower* dan versi *cantilevered*. Lalu *straight-blades* mengalami beberapa modifikasi menjadi *V/Y-rotor*, *Diamond-rotor*, *Delta-rotor*, *Giromill*, dan *Musgroove-rotor*. Dari beberapa model *straight-blades* hanya *Musgroove-rotor* yang terus dilanjutkan penelitiannya menjadi *H-rotor*. Versi lain dari turbin Darrieus adalah *Gorlov Helical Turbine* yang digunakan sebagai turbin air.



Gambar 2.3 Perkembangan Turbin Darrieus (Tjiu *et al.*, 2015)

2.3 Aerodinamika Turbin Darrieus

Sudu pada turbin angin Darrieus berputar dari 0° - 360° . Selama putaran tersebut besar *angle of attack* pada masing – masing sudu bervariasi. Selain itu, sudu turbin yang berada pada sisi *downwind* akan menerima energi yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan sudu yang berada pada posisi *upwind* dikarenakan ekstraksi energi oleh sudu sisi *upwind* mengurangi

kecepatan angin pada sisi *downwind* sehingga pembangkitan daya oleh sudu bagian *downwind* lebih kecil daripada *upwind*.

Gambar 2.4 menunjukkan vektor kecepatan dan gaya yang bekerja pada sudu turbin Darrieus yang berputar dengan kecepatan sudut konstan ω dengan asumsi aliran udara *steady* dan uniform. Pada masing – masing sudu akan mengalami gaya tangensial akibat putaran turbin $V = \omega.R$ dan kecepatan lokal udara U . Sehingga kecepatan relatif sudu turbin terhadap aliran udara yaitu:

$$W = U + V \quad 2.1$$

Kecepatan relatif yang terjadi pada sudu turbin terjadi pada *angle of attack* tertentu. *Geometrical angle of attack* dapat dirumuskan oleh persamaan 2.2 berikut.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\text{TSR} + \cos \theta} \right) \quad 2.2$$

Dimana:

α : *angle of attack* ($^{\circ}$)

θ : sudut azimut ($^{\circ}$)

Berdasarkan persamaan 2.2 diatas maka dapat diketahui bahwa *angle of attack* bergantung pada nilai sudut azimut dan TSR. Variasi tersebut mengisyaratkan adanya perubahan gaya *lift* (F_L) dan gaya *drag* (F_D) yang bekerja pada sudu turbin. Nilai *angle of attack* pada sisi *upwind* bernilai positif dan negatif pada sisi *downwind* sehingga sisi *suction* pada turbin Darrieus berubah dari *outer side* pada sisi *upwind* menjadi *inner side* pada sisi *downwind*. Namun gaya *lift* yang dihasilkan akan selalu menghasilkan torsi positif seperti terlihat pada Gambar 2.4. Uraian gaya yang bekerja pada turbin Darrieus dapat dipecah menjadi gaya tangensial (F_T) yang menghasilkan torsi dan gaya normal (F_N) dengan perumusan sebagai berikut.

$$F_N = F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha \quad 2.3$$

$$F_T = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad 2.4$$

Apabila sudu turbin berputar selama satu putaran penuh, maka nilai gaya tangensial rata – rata (F_{Ta}) yang bekerja dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$F_{Ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad 2.5$$

Apabila turbin Darrieus terdiri dari sebanyak N sudu turbin, maka besar torsi total yang dihasilkan dinyatakan oleh persamaan 2.6 dan daya (P) yang dihasilkan dinyatakan oleh persamaan 2.7.

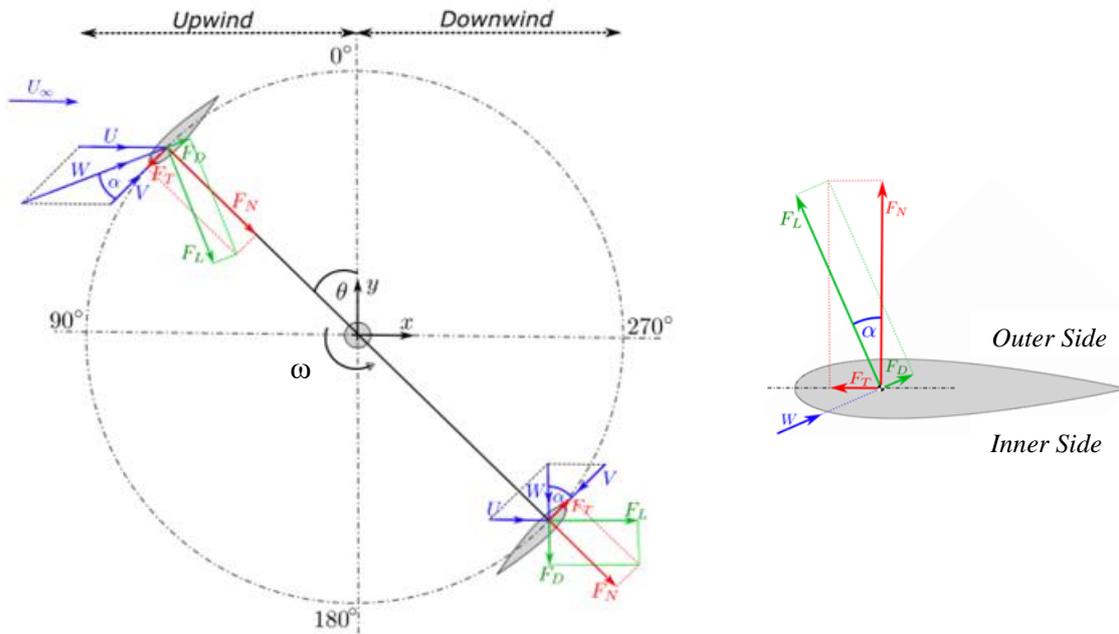
$$M_t = NF_{Ta}R \quad 2.6$$

Dimana:

M_t : torsi total (Nm)

R : radius rotor (m)

$$P = M_t\omega \quad 2.7$$



Gambar 2.4 Vektor gaya dan kecepatan pada turbin Darrieus (Hand *et al.*, 2021)

2.4 Parameter Performa Pada Turbin Darrieus

Dalam mencapai tujuan penelitian diperlukan persamaan – persamaan matematis yang digunakan untuk mendapatkan data kuantitatif yang diinginkan. Data kuantitatif digunakan sebagai acuan dalam perbandingan variasi yang dilakukan pada penelitian ini. Terdapat beberapa data kuantitatif yang digunakan dalam analisis turbin Darrieus seperti berikut:

2.4.1 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara kecepatan sudu rotor dengan kecepatan *freestream*. TSR adalah parameter penting dalam turbin angin dimana menyatakan seberapa cepat rotor berputar dibandingkan dengan kecepatan angin. Apabila kecepatan sudu rotor terlalu cepat maka turbin akan bertindak seperti *solid wall* yang akan membuat sedikit aliran udara. Hal ini tentu akan menurunkan jumlah energi dari udara yang mampu ditangani oleh turbin sehingga efisiensi turbin akan turun. Sedangkan apabila sudu rotor berputar terlalu rendah maka udara akan banyak melewati ruang diantara rotor turbin. Supaya turbin dapat mengekstrak daya secara efisien maka diperlukan nilai TSR yang optimum pula. Hal ini karena apabila sudu rotor bergerak akan menghasilkan *wake*, *wake* tersebut dapat mengenai sudu rotor yang lainnya yang mana menyebabkan turbin tidak mampu mengekstrak daya secara efisien. Sehingga TSR dipilih sehingga sudu rotor tidak banyak melewati udara yang turbulen. Formulasi dari TSR adalah sebagai berikut.

$$TSR = \frac{R \cdot \omega}{U_{\infty}} \quad 2.8$$

Dimana:

TSR : *Tip Speed Ratio*

R : radius rotor (m)

ω : kecepatan sudut rotor (rad/s)

U_{∞} : kecepatan angin (m/s)

2.4.2 Coefficient of Torque

Coefficient of torque atau koefisien torsi merupakan bilangan tak berdimensi yang menyatakan perbandingan antara torsi aktual dengan torsi yang tersedia. Torsi sendiri adalah gaya yang bekerja secara tegak lurus terhadap arah radial dari pusat massa. Koefisien torsi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$C_m = \frac{M_t}{0,5\rho AU_\infty^2 R} \quad 2.9$$

A merupakan luas penampang turbin yang tersapu oleh angin.

$$A = D \cdot H \quad 2.10$$

Dimana:

- C_m : koefisien torsi
- M_t : torsi (Nm)
- ρ : massa jenis udara (kg/m^3)
- A : luas sapuan angin (m^2)
- U_∞ : kecepatan angin (m/s)
- R : radius rotor (m)
- D : diameter rotor (m)
- H : tinggi rotor (m)

Ada dua macam istilah torsi yang digunakan dalam penelitian turbin angin yaitu torsi statis dan torsi dinamis. Torsi statis memberikan informasi tentang kemampuan *self-starting* dari turbin angin. Torsi statis dapat dihitung dengan memosisikan turbin angin dalam keadaan diam pada sudut azimuth tertentu. Pada saat turbin dikenai angin maka akan didapatkan nilai torsi maksimum yang dihasilkan pada kondisi tersebut yang mengindikasikan nilai torsi statis. Sedangkan torsi dinamis adalah torsi dari turbin angin yang didapatkan pada saat kondisi turbin bebas berputar.

2.4.3 Coefficient of Power

Power atau daya merupakan energi yang dihasilkan per satu satuan waktu. *Coefficient of power* adalah bilangan tak berdimensi yang merupakan pembagian antara daya actual yang dihasilkan oleh turbin dengan total daya angin yang tersedia. Nilai maksimum *coefficient of power* yang dapat dihasilkan oleh turbin angin maksimal hanya sebesar 59,26% berdasarkan Betz's limit. Formulasi dari *coefficient of power* dinyatakan oleh persamaan dibawah ini.

$$C_P = \frac{M_t \omega}{0,5\rho AU_\infty^3} = \text{TSR} \cdot C_m \quad 2.11$$

Dimana C_p adalah *coefficient of power*.

2.4.4 Coefficient of Pressure

Coefficient of pressure merupakan pembagian antara *pressure force* dengan *inertial force*. *Coefficient of pressure* adalah bilangan tak berdimensi yang menjelaskan tekanan relatif pada medan aliran. *Coefficient of pressure* banyak digunakan dalam hal aerodinamika dan hidrodinamika. *Coefficient of pressure* dapat diekspresikan dengan persamaan berikut.

$$CoP = \frac{P_i - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad 2.12$$

Dimana:

CoP : *coefficient of pressure*

P_i : tekanan statik di titik yang diinginkan (Pa)

P_∞ : tekanan statik *free stream* (Pa)

2.4.5 Drag Coefficient

Suatu *body* yang bergerak didalam suatu fluida akan mengalami gaya *drag*. Secara umum ada dua macam gaya *drag* yaitu gaya *viscous* dan gaya *pressure*. Gaya *viscous* bekerja pada *body* disebabkan oleh viskositas fluida sehingga menghasilkan *wall shear stress* pada permukaan *body*. Sedangkan gaya *pressure* disebabkan oleh perbedaan tekanan statik disekitar *body*. Kedua gaya *drag* tersebut dapat dinyatakan dalam parameter tak berdimensi sebagai berikut:

$$C_{dt} = \frac{F_D}{0,5\rho AU_\infty^2} \quad 2.13$$

$$C_{dp} = \frac{F_{DP}}{0,5\rho AU_\infty^2} \quad 2.14$$

$$C_{dv} = \frac{F_{DV}}{0,5\rho AU_\infty^2} \quad 2.15$$

Dimana:

C_{dt} : *total drag coefficient*

C_{dp} : *pressure drag coefficient*

C_{dv} : *viscous drag coefficient*

F_D : *total drag*

F_{DP} : *pressure drag*

F_{DV} : *viscous drag*

Untuk mengetahui penurunan gaya *drag* yang terjadi pada turbin Darrieus yang ditambahkan dengan *cavity* apabila dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity* maka digunakan parameter tak berdimensi *drag reduction rate* yang dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$\eta = \frac{C_{dts} - C_{dtc}}{C_{dts}} \times 100\% \quad 2.16$$

Dimana η adalah *drag reduction rate*, C_{dts} merupakan *total drag coefficient* untuk airfoil tanpa *cavity*, dan C_{dtc} adalah *total drag coefficient* untuk airfoil dengan *cavity*.

2.5 Time Step Size

Perhitungan *time step size* diperlukan untuk menentukan berapa besarnya waktu yang diperlukan untuk setiap langkah putaran turbin dalam satu putaran penuh. Nilai *time step size* dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$t = \frac{\theta - \theta_0}{\omega} \quad 2.17$$

Dimana:

t : waktu satu putaran (s)
 θ : sudut satu putaran penuh ($^{\circ}$)
 θ_0 : sudut nol putaran ($^{\circ}$)

$$time\ step\ size = \frac{t}{\text{jumlah frame}} \quad 2.18$$

2.6 Number of Time Step

Number of time step merupakan banyaknya *time step size* yang dilakukan selama beberapa putaran turbin yang ditentukan. Persamaan *number of time step* diperlukan ketika simulasi numerik *unsteady* menggunakan solver komersial Ansys Fluent. Perhitungan *number of time step* adalah sebagai berikut.

$$number\ of\ time\ step = N \frac{360^{\circ}}{\text{azimuthal increment}} \quad 2.19$$

Dimana N adalah jumlah putaran turbin.

2.7 Sliding Mesh (SM)

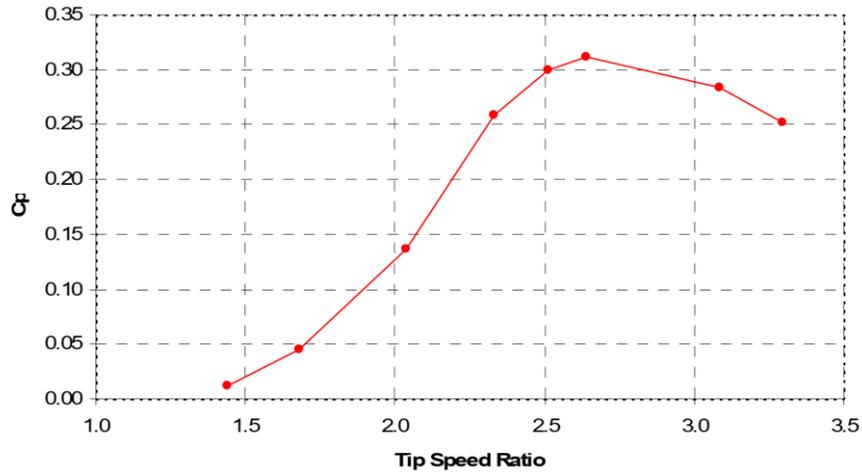
Sliding mesh technique secara teoretis mampu menjelaskan secara akurat proses simulasi yang meliatkan aliran yang berotasi dan mampu mendeskripsikan medan aliran secara keseluruhan dalam kondisi transien namun juga biaya komputasi yang mahal. Umumnya solusi *unsteady* yang didapatkan dengan menggunakan *sliding mesh technique* merupakan *time-periodic* sehingga solusi *unsteady* yang didapatkan periodik dengan pergerakan domain simulasi.

Pada *sliding mesh technique* menggunakan dua atau lebih *cell zone*. *Cell zone* tersebut akan bergerak translasi maupun rotasi relative satu dengan yang lainnya. Diantara zona sell tersebut dipisahkan oleh sebuah *interface*. Selama proses perhitungan berlangsung, *cell zone* bergerak dengan ukuran step tertentu.

2.8 Data Acuan Validasi

Pada penelitian ini akan divalidasi dengan data eksperimen turbin Darrieus yang telah dilakukan oleh Castelli *et al.* (2010). Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mengevaluasi distribusi nodal grid yang optimum pada analisis CFD dengan validasi data eksperimen *wind tunnel*. Turbin Darrieus yang digunakan pada penelitian Castelli *et al.* (2010) menggunakan tiga sudu NACA 0021 dengan Panjang chord 85,8 mm, diameter rotor 1.030 mm, ketinggian rotor 1.456,4 mm, dan *spoke-blade connection* pada 0,5c.

Eksperimen yang dilakukan dengan memvariasikan nilai TSR pada kecepatan angin konstan 9 m/s menghasilkan kurva *coefficient of power* (C_p) seperti terlihat pada Gambar 2.4. data yang didapatkan pada Gambar 2.4 tidak melibatkan koreksi atas *wind tunnel blockage*.



Gambar 2.5 Kurva Cp hasil pengukuran *wind tunnel* (Castelli *et al.*, 2010)

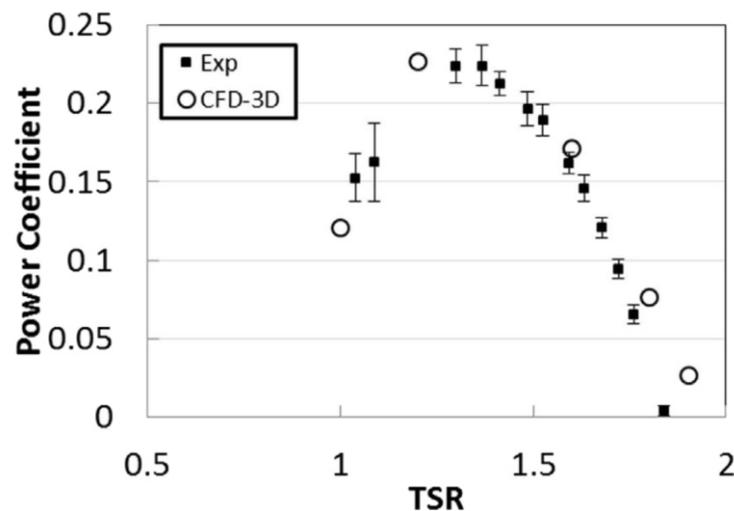
Penelitian ini akan menggunakan eksperimen turbin Darrieus yang digunakan Castelli *et al.* (2010) sebagai acuan validasi. Kecepatan inlet yang digunakan 9 m/s dengan rentang TSR yang sama dengan eksperimen Castelli *et al.* (2010). Data validasi yang digunakan adalah nilai Cp terhadap TSR. Nilai TSR yang berbeda – beda didapatkan dengan mengubah nilai kecepatan sudut turbin Darrieus.

2.9 Penelitian Terdahulu

2.9.1 Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine

Lee dan Lim (2015) melakukan penelitian studi numerik pengaruh berbagai parameter yang mempengaruhi performa turbin Darrieus meliputi *blade thickness ratio*, *pitch angle*, *solidity*, dan *helical angle* dan eksperimen lorong angin sebagai validasi. Turbin Darrieus yang digunakan menggunakan profil sudu airfoil simetris NACA 0015 dengan tiga sudu, panjang chord 150 mm, diameter rotor 740 mm, panjang turbin 600 mm, dan aspek rasio 0,81.

Eksperimen dilakukan menggunakan *open large scale boundary layer wind tunnel* di Universitas Nasional Pusan. Dimensi Lorong angin yang digunakan berukuran 2 m x 2,1 m x 20 m. Eksperimen dilakukan pada kecepatan angin 12 m/s. berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan didapatkan data grafik koefisien daya terhadap TSR seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.6 Perbandingan analisa numerik dan eksperimen lorong angin (Lee dan Lim, 2015)

Berdasarkan Gambar 2.5 terlihat bahwa nilai grafik *power coefficient* berbentuk parabolic dengan nilai *power coefficient* maksimum berada pada rentang TSR 1,2 – 1,4. Pada nilai TSR kurang dari 1,2 terjadi penurunan yang tajam dari *power coefficient* hal ini dapat dijelaskan karena perubahan besar gaya lift yang menyebabkan turbin berputar.

2.9.2 Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine

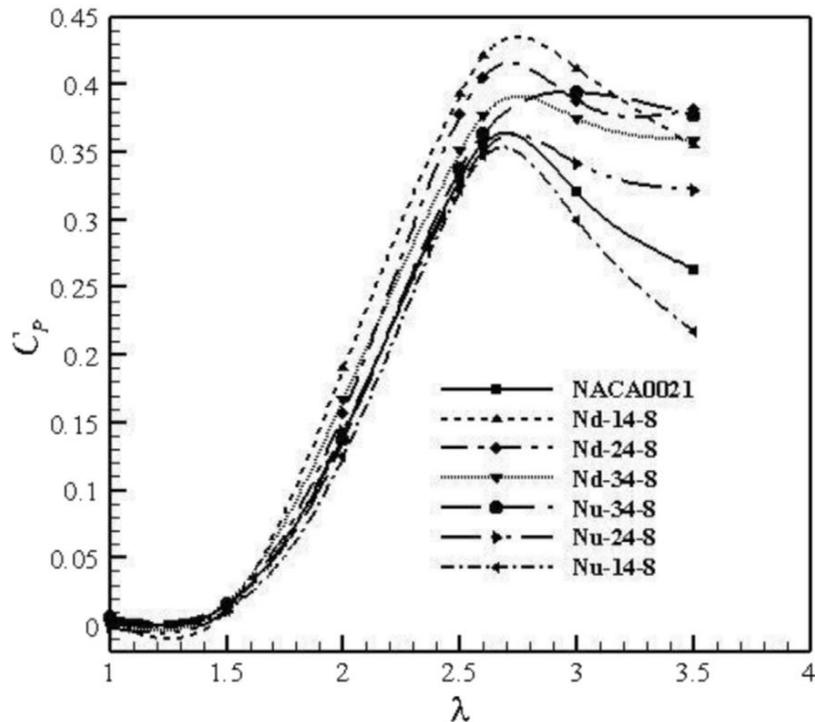
Sobhani *et al.* (2017) melakukan penelitian dengan tujuan meningkatkan performa turbin Darrieus dengan penambahan *cavity* pada permukaan sudu turbin dengan variasi diameter *cavity*, bentuk profil *cavity*, dan lokasi *cavity*. Untuk mencapai tujuan penelitian tersebut, digunakan *computational fluid dynamics*. Metode numerik yang digunakan berupa aliran *unsteady* dua dimensi yang disimulasikan menggunakan *software* Open Foam. Geometri turbin yang digunakan adalah turbin Darrieus tiga sudu dengan profil airfoil NACA 0021, panjang *chord* 0,0858 m, diameter rotor 1,03 m, dan tinggi rotor 1,46 m.

Investigasi pengaruh posisi *cavity* pada performa turbin dilakukan untuk mengetahui kenaikan torsi *start up* dan daya output turbin. Konfigurasi *cavity* yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 2.6. Tujuan pemberian *cavity* pada permukaan sudu turbin adalah untuk mengurangi kecepatan aliran dan meningkatkan tekanan sehingga meningkatkan gaya angkat pada airfoil yang menghasilkan torsi pada turbin.

Shape of the Section	Diameter of cavity	Position of Section	Section Name
	0.08c	$\frac{1}{4}c$	Nu-14-8
	0.08c	$\frac{2}{4}c$	Nu-24-8
	0.08c	$\frac{3}{4}c$	Nu-34-8
	0.08c	$\frac{1}{4}c$	Nd-14-8
	0.08c	$\frac{2}{4}c$	Nd-24-8
	0.08c	$\frac{3}{4}c$	Nd-34-8

Gambar 2.7 Karakteristik airfoil dengan *cavity* (Sobhani *et al.*,2017)

Gambar 2.7 dibawah menunjukkan performa turbin Darrieus dengan *cavity* terhadap airfoil referensi NACA 0021. Berdasarkan Gambar 2.7 terlihat bahwa penggunaan sudu dengan profil Nd-14-8, Nd-24-8, dan Nd-34-8 meningkatkan performa turbin tanpa mengurangi rentang operasi. Penggunaan sudu dengan profil airfoil Nu-14-8 menurunkan performa turbin pada rentang TSR yang tinggi. Sebaliknya penggunaan profil sudu airfoil Nu-24-8 dan Nu-34-8 meningkatkan performa turbin pada rentang TSR yang tinggi tanpa mempengaruhi rentang operasional turbin Darrieus. Pada Gambar 2.7 juga terlihat bahwa semakin dekat *cavity* dengan *trailing edge* kontribusi terhadap peningkatan performa semakin besar hanya pada TSR yang tinggi dan tidak berpengaruh secara signifikan pada rentang TSR yang rendah. Berdasarkan berbagai konfigurasi *cavity* yang dilakukan, dapat dipertimbangkan bahwa model sudu dengan profil Nd-14-8 adalah yang paling optimum karena secara signifikan meningkatkan performa turbin hampir diseluruh rentang TSR. Peningkatan performa ini sebagai akibat dari menurunnya kecepatan aliran sehingga menaikkan tekanan pada sisi *pressure side*. Hal ini akan berimbas pada kenaikan gaya angkat yang menghasilkan torsi untuk memutar turbin Darrieus.



Gambar 2.8 Perbandingan *power coefficient* sudu NACA 0021 dan NACA 0021 dengan *cavity* (Sobhani *et al.*, 2017)

2.9.3 Performance improvement of Darrieus wind turbine using different cavity layouts

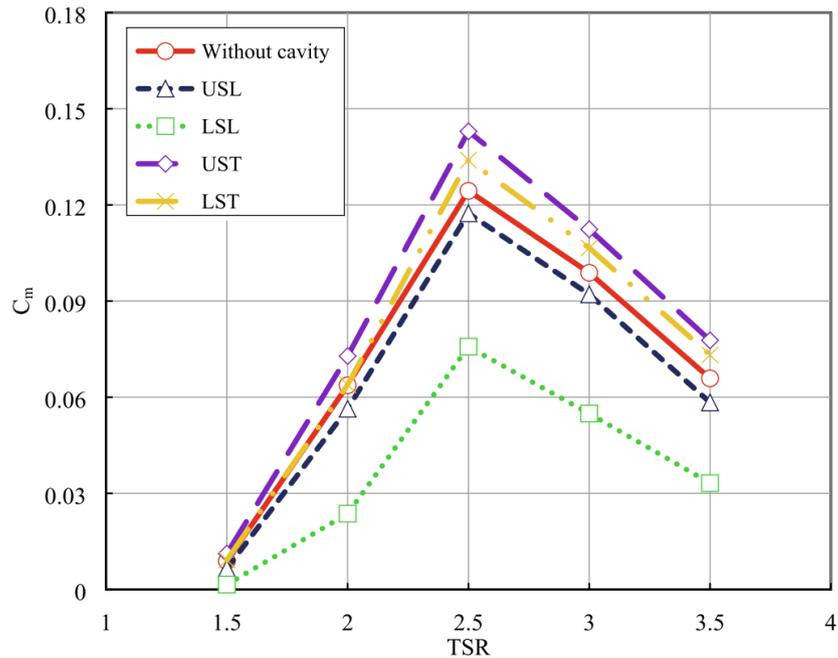
Roshan *et al.* (2021) melakukan penelitian dengan tujuan untuk mendapatkan desain turbin Darrieus yang mampu melakukan *self-starting* pada kecepatan angin rendah tanpa penambahan komponen lain pada turbin Darrieus. Modifikasi profil airfoil sudu dilakukan untuk mencapai tujuan tersebut. Variasi yang dilakukan meliputi bentuk, jumlah, ukuran, dan posisi *cavity* pada permukaan sudu turbin. Turbin Darrieus yang digunakan memiliki karakteristik geometri yaitu profil sudu NACA 0021 dengan jumlah tiga sudu, panjang *chord* 0,0858 m dan diameter rotor 1,03 m. Untuk mencapai tujuan yang telah disebutkan, studi numerik dilakukan dengan menggunakan *software* komersial ANSYS FLUENT. Penyelesaian studi numerik dilakukan dengan menggunakan persamaan inkompresibel *Unsteady Reynold Averaged Navier Stokes* (URANS) dengan model turbulensi $k-\omega$ SST.

Variasi posisi *cavity* dilakukan seperti terlihat pada Gambar 2.8. Terdapat empat konfigurasi yang berbeda dengan posisi *cavity* berada pada bagian *pressure side* dan *suction side*. Keempat konfigurasi tersebut yaitu USL, LSL, UST, dan LST. Setiap *cavity* memiliki diameter sama dengan 8% dari panjang *chord*.

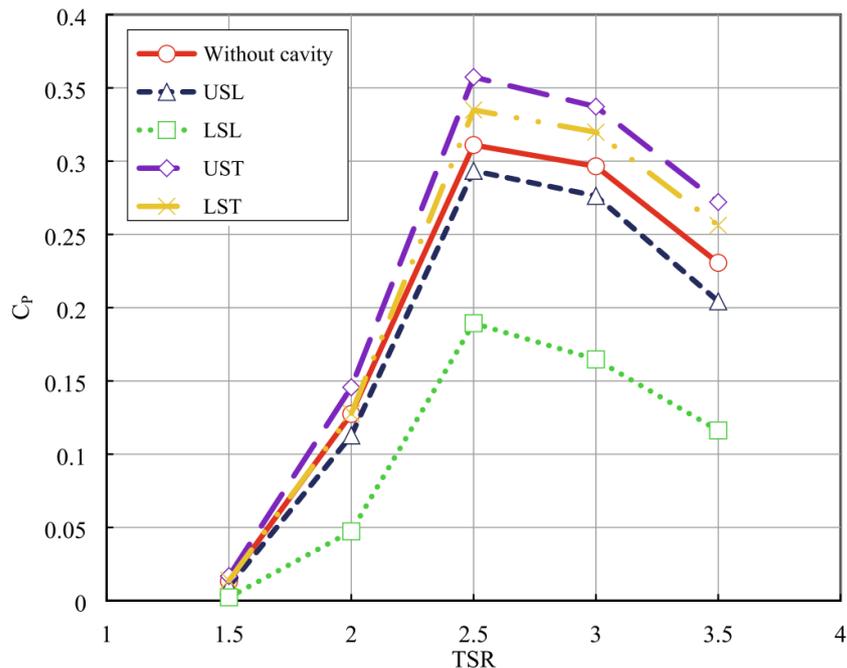
Configuration	Airfoil shape	Cavity position	Airfoil name
#1		Upper surface (leading edge)	USL
#2		Lower surface (leading edge)	LSL
#3		Upper surface (trailing edge)	UST
#4		Lower surface (trailing edge)	LST

Gambar 2.9 konfigurasi posisi *cavity* (Roshan *et al.*, 2021)

Performa turbin Darrieus tanpa *cavity* dan dengan *cavity* ditunjukkan oleh Gambar 2.9 dan 2.10. Pada Gambar 2.9 terlihat bahwa C_m turbin secara linear seiring dengan bertambahnya TSR. Nilai maksimum C_m didapatkan pada $TSR = 2,5$. Performa turbin tampak meningkat manakala *cavity* terletak pada bagian *upper surface trailing edge* (UST). Terjadi penurunan performa turbin Ketika posisi *cavity* berada pada bagian *upper* dan *lower surface leading edge*. Gambar 2.10 menunjukkan bahwa airfoil dengan *cavity* yang terletak pada *upper surface trailing edge* (UST) menghasilkan *power coefficient* paling optimum sebesar 0,36 pada $TSR = 2,5$.



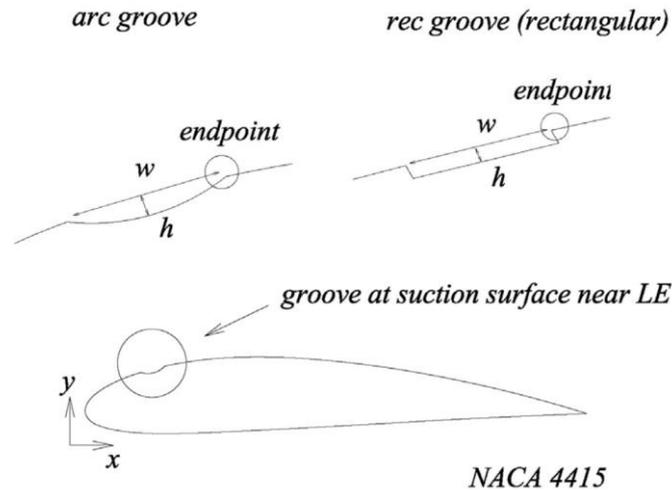
Gambar 2.10 Pengaruh posisi *cavity* terhadap C_m fungsi TSR (Roshan et al., 2021)



Gambar 2.11 Pengaruh posisi *cavity* terhadap C_p fungsi TSR (Roshan et al., 2021)

2.9.4 Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines

Penelitian tentang studi numerik dua dimensi pada airfoil NACA 4415 dengan *groove* yang digunakan untuk turbin angin skala kecil telah diteliti oleh Liu *et al.*, (2020). Pengaruh dari karakteristik *groove* berupa *recess depth*, *aspect ratio*, *crossprofile*, dan *groove position* terhadap performa aerodinamika dilakukan dengan simulasi dua dimensi dan divalidasi dengan eksperimen. Geometri *groove* seperti terlihat pada Gambar 2.11 disimulasikan pada sudut serang 10° dengan nilai $Re = 2 \times 10^5$.

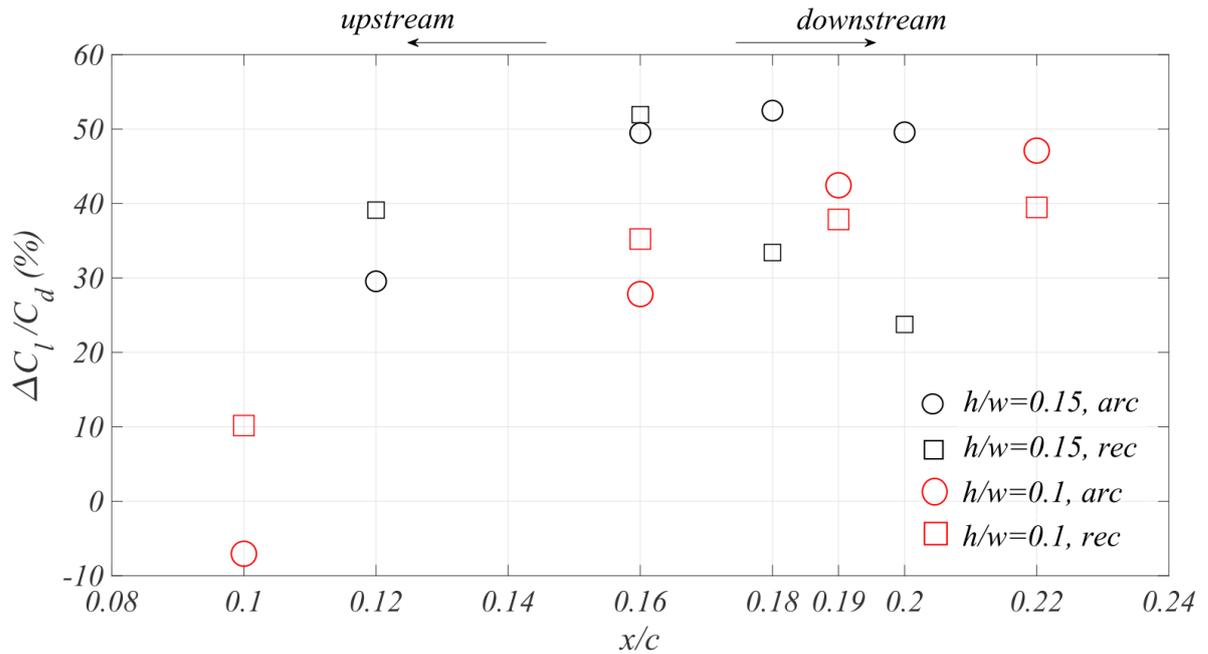


Gambar 2.12 Groove pada permukaan airfoil NACA 4415 (Liu *et al.*, 2020)

Berbagai parameter *groove* diselidiki pengaruhnya terhadap performa aerodinamika pada airfoil NACA 4415. Variasi yang dilakukan terlihat pada Gambar 2.12. Gambar 2.13 menunjukkan nilai *lift-to-drag ratio* terhadap posisi *groove* pada nilai optimum *recess depth* sebesar 1,2. Ketika *groove* menuju ke arah *downstream* terlihat bahwa *groove* dengan aspek rasio 0,1 memberikan performa yang lebih baik. Posisi yang paling optimum untuk *rec groove* dengan $h/w = 0,15$ adalah pada $x = 0,16c$.

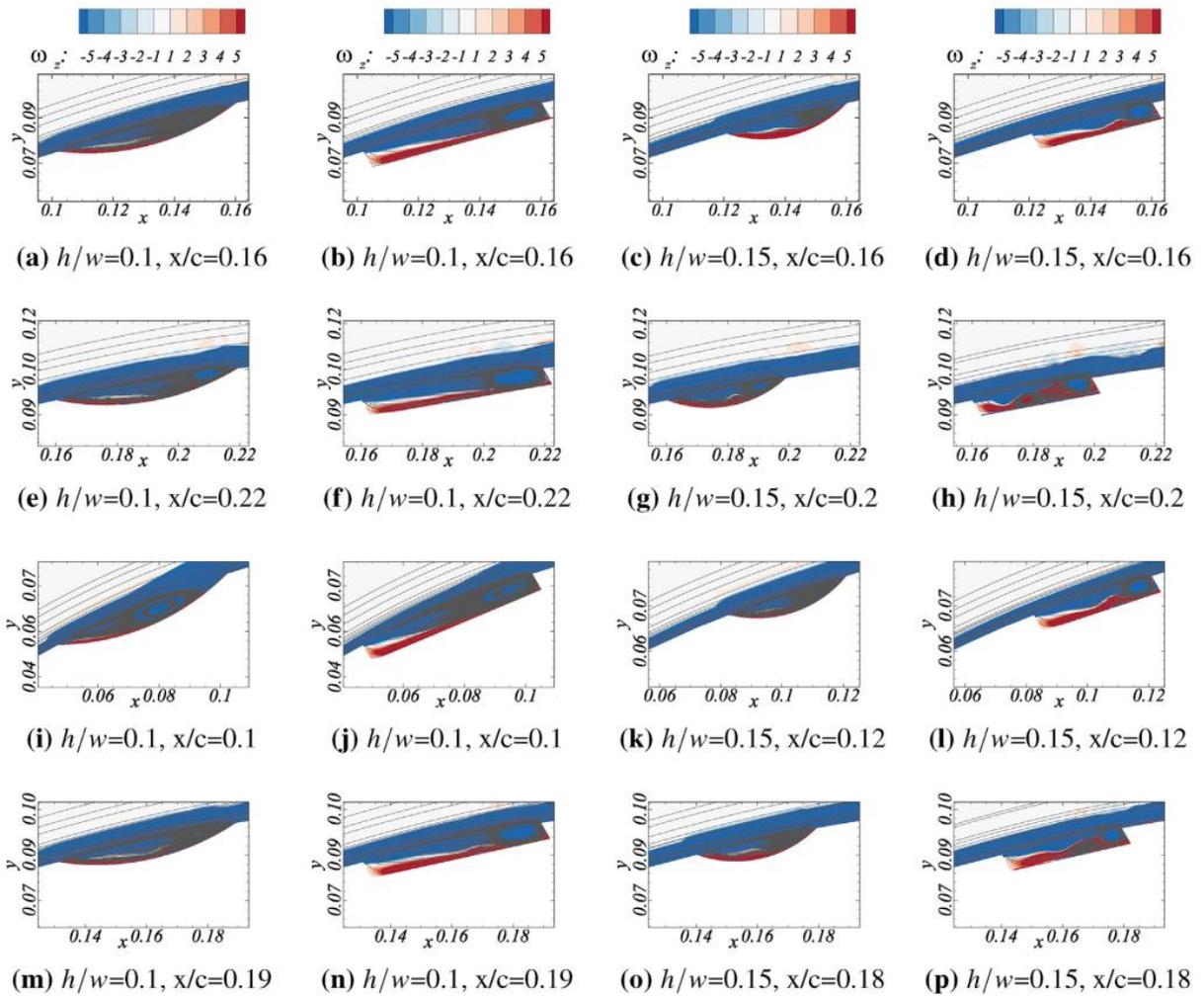
Parameters	Value
Recess depth ratio (h/ δ)	0.5, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0
Aspect ratio (h/ w)	0.1, 0.15
Crossprofile	arc, rec
Endpoint position (x/ c)	0.1, 0.12, 0.16, 0.18, 0.19, 0.2, 0.22

Gambar 2.13 Variasi *groove* yang disimulasikan (Liu *et al.*, 2020)



Gambar 2.14 Grafik *lift-to-drag ratio* terhadap posisi *groove* (Liu *et al.*, 2020)

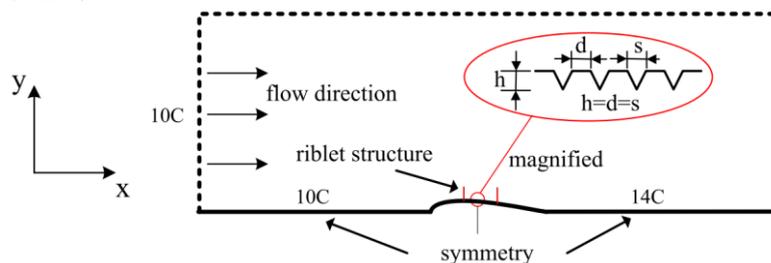
Gambar 2.14 memperlihatkan distribusi *vorticity* dan *streamline* pada posisi yang berbeda – beda. Pada Gambar 2.14 baris kedua dan keempat dapat dilihat bahwa posisi *groove* di *downstream* memberikan peningkatan ketebalan *boundary layer* sisi *leading edge* dari *groove*. Semakin posisi *groove* kearah *downstream*, vortex yang dihasilkan semakin besar. Gambar 2.14 e,g,h,p menunjukkan adanya vortex kedua didekat pusat vortex. Hal ini dikarenakan *groove* tidak mampu mengakomodasi vortex yang terbentuk akibat *groove* terlalu kecil sehingga vortex pusat terdistorsi dan menghasilkan vortex kedua. Gambar 2.14 i menunjukkan bahwa vortex yang terjebak didalam *groove* tidak memenuhi seluruh area di sekitar *groove* sehingga menghasilkan performa turbin yang buruk. Posisi *groove* sangat berpengaruh terhadap vortex yang terbentuk didalam *groove* dan ketebalan *boundary layer* lokal.



Gambar 2.15 Distribusi vorticity didalam groove (Liu *et al.*, 2020)

2.9.5 Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade

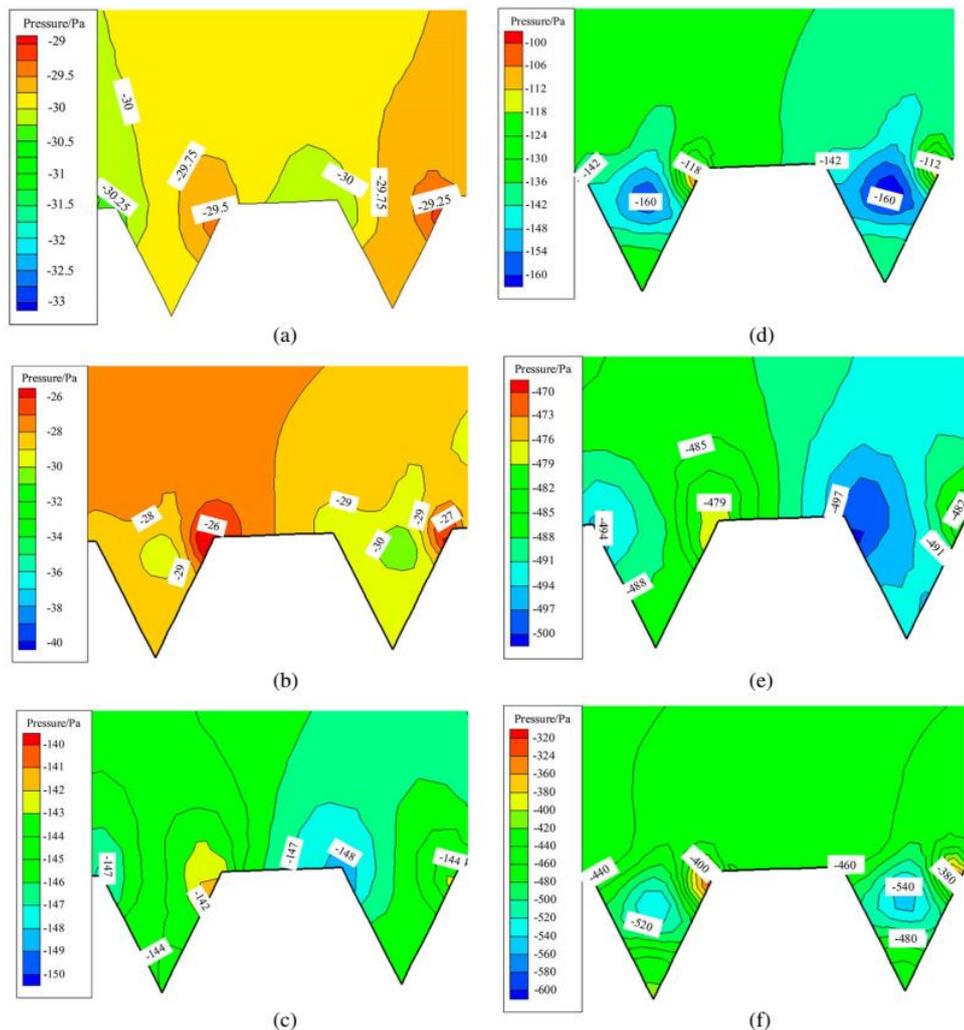
Wu *et al.* (2019) melakukan penelitian tentang pengaruh *groove structural size* pada *turbulent drag* sudu airfoil NACA0012. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik 2D menggunakan *software* komersial ANSYS Fluent. Gambar 2.16 menunjukkan geometri airfoil yang digunakan dalam penelitian. Hanya bagian *upper section* airfoil yang digunakan dalam perhitungan. Panjang *chord* airfoil adalah 20 cm dan panjang *transverse groove* sebesar 8 cm. *transverse groove* diletakkan pada bagian tengah airfoil dengan empat variasi *transverse groove structure* yaitu $s = 0,1$ mm; $s = 0,2$ mm; $s = 0,5$ mm dan $s = 1$ mm. Sudut dari *groove* yaitu $53,14^\circ$ dengan nilai $d=h=s$.



Gambar 2.16 Domain komputasi dan sketsa *transverse groove structure* (Wu *et al.*, 2019)

Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan model turbulensi dua persamaan RNG $k-\epsilon$. Dengan model turbulensi tersebut, *enhanced wall function* digunakan. Pilihan *second order upwind* digunakan untuk semua persamaan perintah. *Pressure velocity coupling* menggunakan metode SIMPLEC. Nilai residual yang digunakan sebesar 10^{-5} .

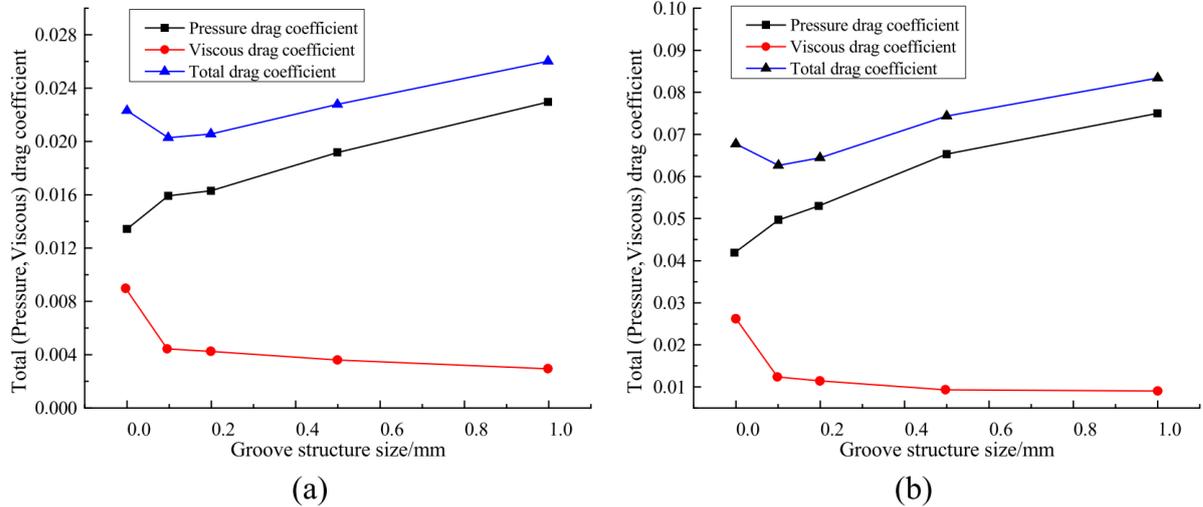
Gambar 2.17 menunjukkan tekanan statik pada permukaan *transverse groove*. Terdapat perbedaan distribusi tekanan akibat perubahan struktur *transverse groove*. *Pressure different* terbentuk diantara *windward* dan *leeward* sehingga menghasilkan *backward pressure drag*.



Gambar 2.17 Kontur tekanan statik pada permukaan *groove* (a) $s = 0.1$ mm, $U = 10$ m/s; (b) $s = 0.1$ mm, $U = 22$ m/s; (c) $s = 0.1$ mm, $U = 40$ m/s; (d) $s = 1$ mm, $U = 10$ m/s; (e) $s = 1$ mm, $U = 22$ m/s; (f) $s = 1$ mm, $U = 40$ m/s. (Wu *et al.*, 2019)

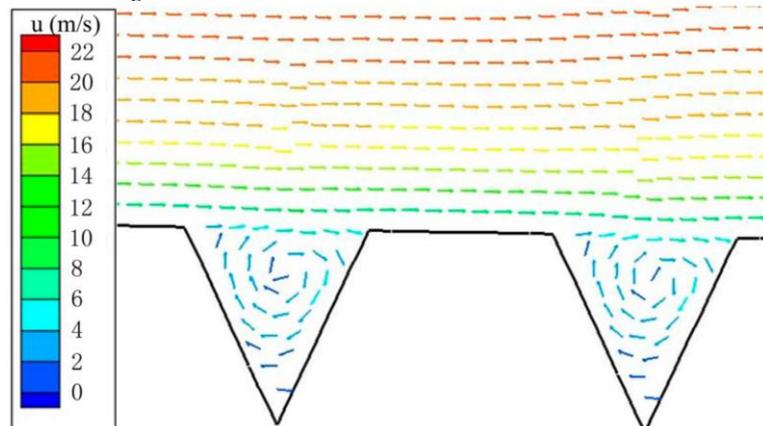
Gambar 2.18 menunjukkan hubungan antara *total drag coefficient* dengan ukuran struktur *transverse groove* pada kecepatan 22 dan 40 m/s. *Pressure drag coefficient* terlihat mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya ukuran struktur *transverse groove*. Hal ini dikarenakan *pressure different* diantara *windward surface* dan *leeward surface* pada *transverse groove*. Semakin besar area yang terpengaruh oleh *pressure different* maka *pressure drag coefficient* juga akan naik. Pada kecepatan yang sama, terlihat juga pada Gambar 2.18 nilai *viscous drag coefficient* menurun secara perlahan. Gambar 2.18 (a) dan Gambar 2.18 (b) menunjukkan bahwa kenaikan kecepatan aliran menyebabkan kenaikan pada ketiga parameter. Hal tersebut karena dengan meningkatnya kecepatan maka baik *turbulent kinetic energy* dan *turbulent*

intensity akan meningkat juga sehingga ketidakstabilan aliran meningkat. Hal tersebut juga berpengaruh terhadap naiknya *viscous drag coefficient*. Selain itu *pressure drag coefficient* juga meningkat karena distribusi tekanan yang ikut berubah seiring dengan perubahan kecepatan aliran. Kenaikan *viscous drag coefficient* dan *pressure drag coefficient* tersebut secara bersama – sama meningkatkan *total drag coefficient*.



Gambar 2.18 Total drag coefficient pada beberapa ukuran struktur groove. (a) $U = 22$ m/s (b) $U = 40$ m/s. (Wu *et al.*, 2019)

Vortex yang terbentuk didalam *transverse groove* yang terlihat pada Gambar 2.19 menyebabkan arah *viscous drag* berlawanan dengan *viscous drag* pada aliran *upper side*. Hal tersebut bertindak seperti “*rolling bearing*” yang mana menurunkan *viscous drag*. *Secondary vortices* yang ada didalam *groove* menyebabkan tekanan di sisi kiri dan kanan berbeda sehingga menghasilkan *pressure drag*.



Gambar 2.19 Vektor kecepatan di dekat struktur groove pada $U = 22$ m/s dan $h = s = d = 1$ mm (Wu *et al.*, 2019)

BAB III METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan menggunakan *software* komersial Solidworks 2021 untuk membuat geometri dan domain simulasi, ICEM CFD 2021 R2 untuk proses meshing, Fluent 2021 R2 untuk tahap *processing*, dan Tecplot 360 EX 2021 R2 serta CFD-Post untuk tahap *post-processing*. Secara umum penelitian dilakukan dengan tiga tahapan yaitu *Pre-processing*, *Processing*, dan *Post-processing*.

Model penelitian berupa turbin angin Darrieus tipe H-rotor dengan tiga sudu. Fluida kerja yang digunakan adalah angin dengan kecepatan *inlet* konstan 5 m/s dengan nilai TSR yang bervariasi. Simulasi dilakukan secara *unsteady* dua dimensi.

3.1 Variasi dan Domain Simulasi

3.1.1 Variasi

Penelitian ini menggunakan turbin angin Darrieus tiga sudu tipe H-rotor dengan studi numerik dua dimensi *unsteady*. Variasi yang dilakukan meliputi posisi *cavity* pada permukaan sudu turbin dan nilai TSR seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1. Bentuk *cavity* berupa sirkular, kecepatan angin yang melalui *inlet* dibuat konstan 5 m/s dengan nilai TSR yang digunakan yaitu 0,9; 1,1; 1,3; 1,5; 1,7; 1,9; dan 2,1.

Tabel 3.1 Variasi sudu turbin dengan *cavity*

Bentuk airfoil	Diameter <i>cavity</i>	Posisi <i>cavity</i>	<i>Cavity mouth</i>	Nama airfoil
	0,08c	0,25c	0,05c	OS-25
	0,08c	0,15c	0,05c	IS-15
	0,08c	0,20c	0,05c	IS-20
	0,08c	0,25c	0,05c	IS-25
	0,08c	0,75c	0,05c	OS-75
	0,08c	0,75c	0,05c	IS-75

3.1.2 Domain Simulasi

Model CFD yang digunakan menggunakan turbin Darrieus tipe H-rotor yang terdiri dari tiga *subdomain* utama yaitu *stationary subdomain*, *rotating subdomain*, dan *blade subdomain*. *Stationary subdomain* adalah domain terluar yang dialiri oleh fluida dan domain ini tidak bergerak. Domain ini berbentuk persegi panjang yang mengelilingi *rotating subdomain*. *Rotating subdomain* merupakan bagian domain yang berbentuk lingkaran dan berputar relatif terhadap pusat koordinat dengan *time step* tertentu. *Blade subdomain* berbentuk lingkaran dan melingkupi sudu turbin, dibuat dengan tujuan mengontrol *mesh* disekitar sudu turbin sehingga hasil *mesh* yang diperoleh berkualitas bagus yang mana dapat meningkatkan laju konvergensi dan akurasi hasil simulasi.

3.2 Pre-processing

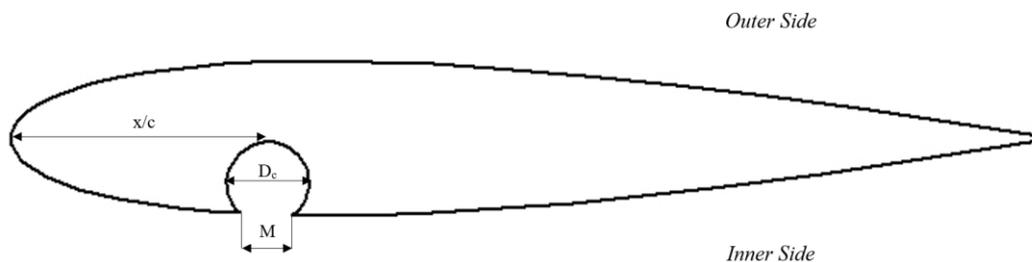
Pada tahap *pre-processing* terdapat tiga langkah utama yang dilakukan. Tahap pertama yaitu pembuatan geometri benda uji dan domain simulasi. Tahap kedua yaitu melakukan *meshing* pada benda uji. Tahap ketiga yaitu memberikan kondisi batas yang sesuai yang kemudian akan disimulasikan pada tahap *processing*.

3.2.1 Pembuatan Geometri Benda Uji dan Domain Simulasi

Pembuatan geometri turbin Darrieus dilakukan dengan menggunakan *software* Solidworks 2021. Geometri turbin yang dibuat berupa dua dimensi yang terdiri dari sudu turbin. Komponen poros turbin dan lengan turbin tidak ikut disimulasikan sebagai simplifikasi geometri. Tabel 3.2 menyajikan ukuran geometri turbin Darrieus yang digunakan. Geometri tersebut sama dengan geometri pada penelitian Lee *et al.*, (2015). Pemberian *cavity* pada sudu turbin tampak terlihat pada Gambar 3.1 dengan ukuran dan letak *cavity* terlihat pada Gambar 3.1. Karakteristik geometri *cavity* mengacu pada penelitian Fatehi *et al.*, (2019).

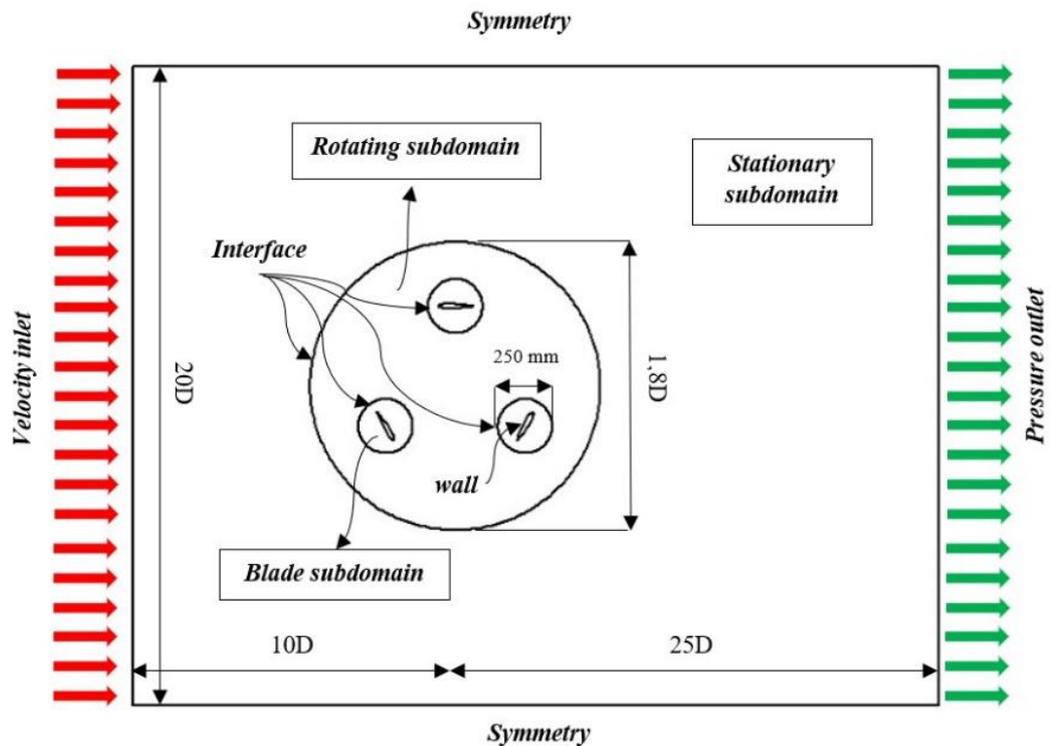
Tabel 3.2 Karakteristik geometri turbin Darrieus pada penelitian ini.

Parameter	Nilai
Profil sudu	NACA 0015
Panjang chord (c)	150 mm
Diameter rotor (D)	740 mm
Tinggi rotor (H)	600 mm
Jumlah sudu (N)	3
<i>Cavity position</i> (x/c)	15%, 20%, 25%, dan 75%
<i>Cavity diameter</i> (D_c)	8% c
<i>Cavity mouth</i> (M)	5% c



Gambar 3.1 Geometri sudu turbin dengan *cavity*

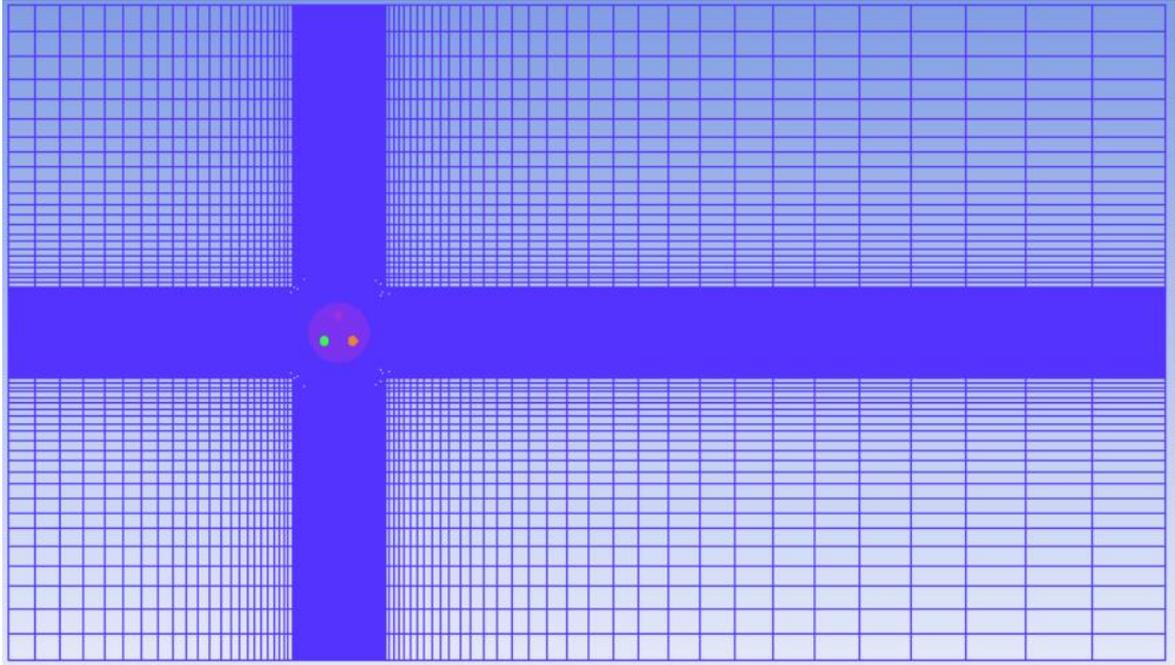
Domain simulasi terdiri dari tiga bagian yaitu *stationary subdomain*, *rotating subdomain*, dan *blade subdomain* seperti terlihat pada Gambar 3.2. Ukuran domain dibuat dengan mengacu pada penelitian Rezaeiha *et al.*, (2018). Jarak *inlet* domain dengan pusat rotor adalah sepuluh kali diameter rotor, jarak *outlet* dengan pusat rotor adalah 25 kali diameter rotor, dan jarak sisi atas dan bawah sebesar 20 kali diameter rotor.



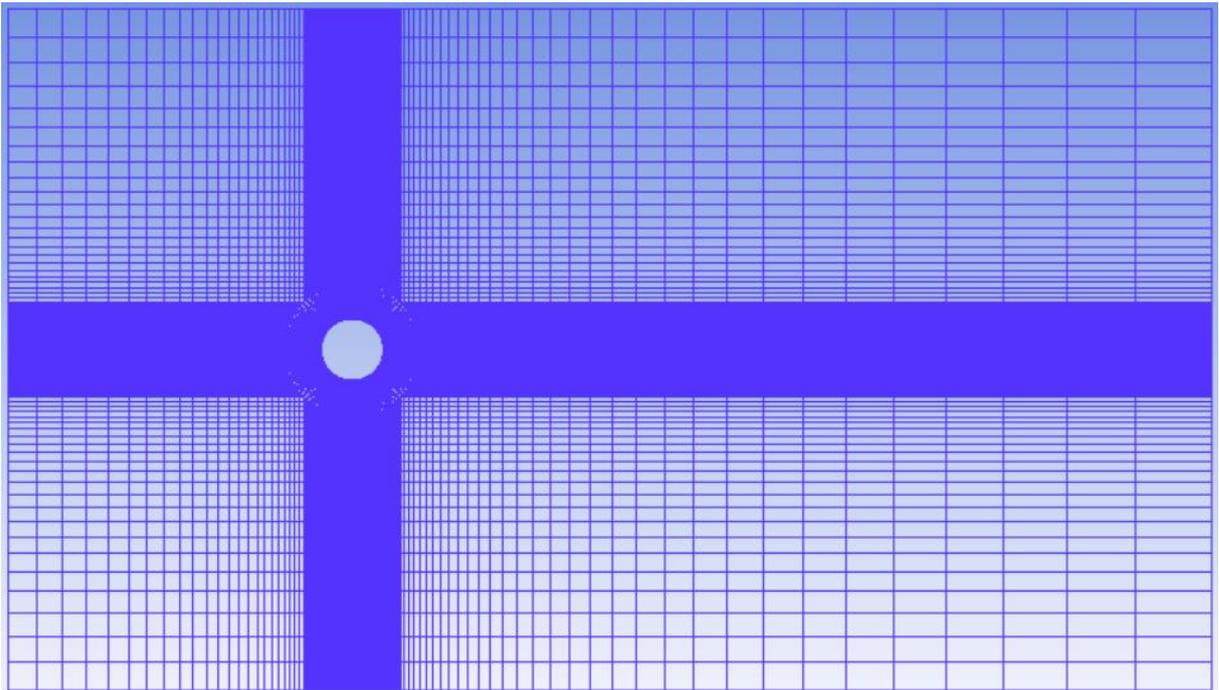
Gambar 3.2 Ukuran domain dan kondisi batas (bukan skala sebenarnya)

3.2.2 Proses Meshing

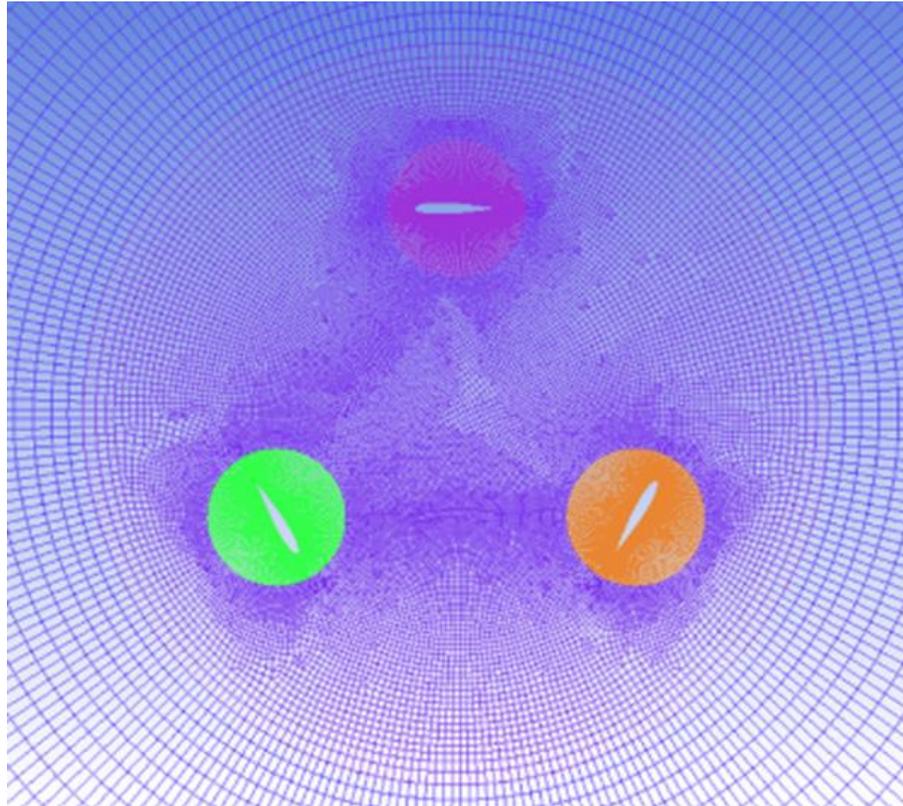
Pada proses *meshing*, domain yang telah dibuat akan dibagi menjadi daerah yang lebih kecil sehingga nantinya pada tahap *processing* persamaan perintah dapat diaplikasikan pada setiap elemen *mesh* yang telah dibuat. Proses diskretisasi atau membagi domain menjadi bagian yang lebih kecil dilakukan dengan menggunakan *hybrid mesh* yang mana pada *stationary subdomain* dan *blade subdomain* menggunakan tipe *structured mesh*, sedangkan pada *rotating subdomain* menggunakan *unstructured mesh* dengan tipe elemen *all quad*. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan akurasi hasil yang tinggi namun dengan biaya komputasi seminimal mungkin. *Structured mesh* pada *blade subdomain* menjamin keakuratan medan aliran di sekitar sudu mengingat turbin Darrieus berdasarkan gaya angkat yang sensitif terhadap *mesh* disekitar sudu turbin dan fenomena aliran yang cukup kompleks di sekitar sudu turbin. Daerah *stationary subdomain* juga menggunakan *structured mesh* agar jumlah elemen *mesh* tidak terlalu banyak dan kontrol terhadap *mesh* lebih mudah dilakukan dengan *structured mesh* dibandingkan dengan *unstructured mesh*. Pada *rotating subdomain* menggunakan tipe *unstructured mesh* karena geometri yang cukup rumit. Pada daerah *interface* menggunakan *conformal mesh* sehingga nodal dari *mesh* yang berdekatan saling berhimpit satu sama lain. Upaya ini dimaksudkan agar tidak diperlukan interpolasi perhitungan sehingga mempercepat komputasi ketika tahap *processing*. Proses *meshing* dilakukan dengan menggunakan ICEM CFD 2021 R2. Gambar 3.6 menunjukkan rentang nilai *skewness* dan *orthogonal quality* yang direkomendasikan oleh Ansys, Inc. *Mesh* yang telah dibuat memiliki nilai *skewness* sebesar 0,59 dan *orthogonal quality* sebesar 0,39. Berdasarkan Gambar 3.6, maka nilai *skewness* dan *orthogonal quality* berada pada rentang spektrum *good*. Dengan demikian maka *mesh* yang dibuat sesuai dengan rekomendasi dan dapat memberikan hasil yang akurat.



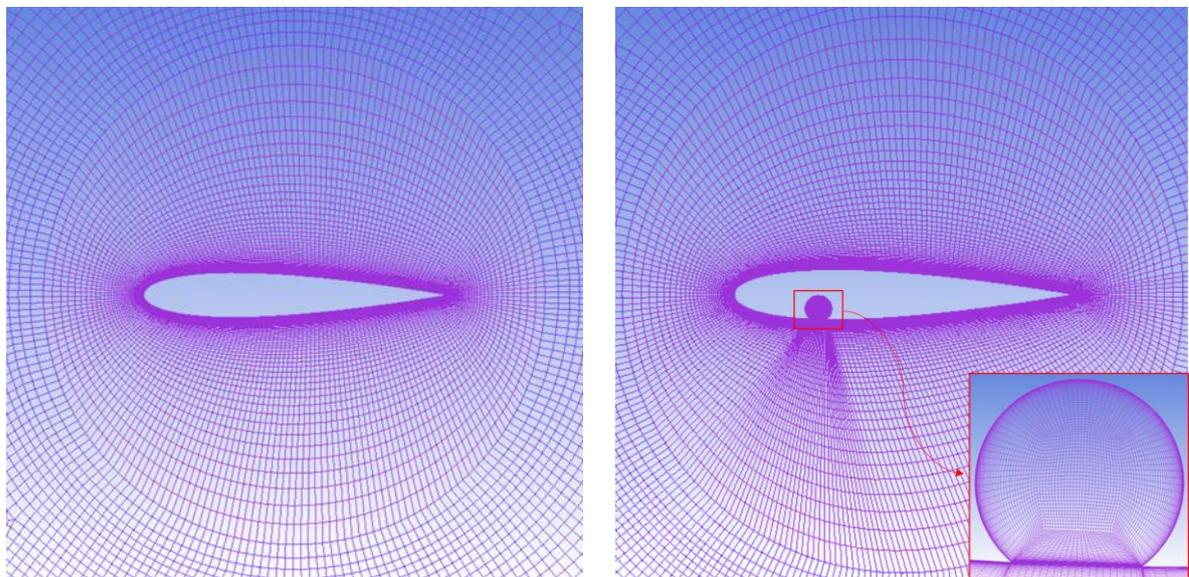
Gambar 3.3 *Meshing* seluruh domain



Gambar 3.4 *Meshing* pada *stationary subdomain*



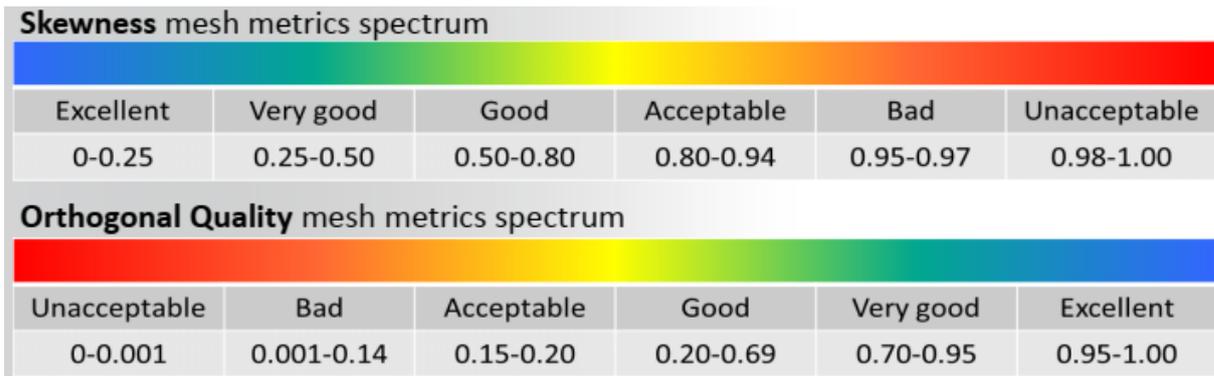
Gambar 3.5 Meshing pada rotating subdomain



(a) Tanpa cavity

(b) Dengan cavity

Gambar 3.6 Meshing pada blade subdomain



Gambar 3.7 Rekomendasi kualitas *mesh* (Ansys, Inc., 2013)

3.2.3 Penentuan Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan pada model CFD dapat dilihat pada Gambar 3.2. Sisi *inlet* diberikan kondisi batas *velocity inlet* dengan kecepatan konstan searah sumbu x sebesar 5 m/s. Kemudian sisi atas dan bawah berupa *symmetry* sehingga kecepatan arah normal adalah nol. Sisi *outlet* dengan kondisi batas *pressure outlet* dengan nilai *pressure gage* adalah nol. Kondisi batas *no slip wall* pada semua permukaan sudu turbin. Kondisi batas *interface* diterapkan pada pertemuan diantara dua zona yang berbeda. Kondisi batas *interface* menjamin kontinuitas aliran antara zona *cell* yang berbeda sehingga seolah – olah tidak ada pembatas antara kedua zona *cell* yang bersebelahan.

3.3 Processing

Setelah tahap *pre-processing* selesai, langkah selanjutnya yaitu *processing*. Pada tahap ini, *mesh* yang telah dibuat beserta dengan parameter pemodelan CFD yang digunakan akan dijalankan dengan menggunakan proses iterasi sampai kondisi konvergen tercapai. Jumlah iterasi tiap *timestep* dibatasi maksimal 50 iterasi. Penentuan parameter pemodelan CFD pada tahap *processing* atau solver meliputi *models*, *materials*, *cell zone conditions*, *boundary conditions*, *solution methods*, *residual monitors*, dan *initialization*. Penjelasan lebih lanjut masing – masing parameter adalah sebagai berikut.

3.3.1 Models

Studi numerik pada penelitian ini dilakukan dengan menyelesaikan persamaan *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (URANS) bersamaan dengan model turbulensi $k - \omega$ *Shear Stress Transport* (SST) dengan dua persamaan *transport* sehingga waktu komputasi relatif lebih singkat. $k - \omega$ SST merupakan kombinasi dari model turbulensi $k - \epsilon$ dan $k - \omega$. Pada bagian *boundary layer* model $k - \omega$ digunakan sehingga dapat diaplikasikan hingga daerah lapis batas turbulen *viscous sub-layer*, sedangkan pada daerah *freestream* menggunakan model $k - \epsilon$ standar untuk mengatasi ketidakakuratan model $k - \omega$ (Menter, 1994). Sehingga model turbulensi $k - \omega$ SST dapat digunakan pada *Reynold number* yang rendah tanpa perlu *damping function* (D’Alencon & Silva-Llanca, 2016). Selain itu model turbulensi $k - \omega$ SST mampu memprediksi *adverse pressure gradient* dan *moderate separated flow* dengan sangat baik (Menter, 1993).

Model turbulensi $k - \omega$ SST telah digunakan di banyak studi baik dua dimensi maupun tiga dimensi dan memberikan hasil yang dapat diterima. Beberapa penelitian yang menggunakan model turbulensi ini diantaranya Sobhani *et al* (2017), Rezaeiha *et al* (2018), dan Roshan *et al* (2021). Selain itu McLaren *et al* (2012) telah melakukan studi numerik medan aliran disekitar *small-scale, high solidity H-type Darrieus vertical axis wind turbine* pada *Reynold number* $3,6 \times 10^5$ dengan menggunakan model turbulensi yang berbeda – beda.

Diantara model turbulensi $k - \omega$, $k - \omega$ SST, dan $k - \epsilon$, penelitian tersebut menunjukkan bahwa model turbulensi $k - \omega$ SST memberikan hasil yang cukup baik terhadap data hasil eksperimen yang dilakukan Sheldahl *et al* (1981). Selain itu Daroczy *et al* (2015) juga memverifikasi bahwa model turbulensi $k - \omega$ SST memberikan prediksi yang bagus untuk simulasi turbin Darrieus tipe H-rotor. Sehingga berdasarkan kajian tersebut maka pada penelitian ini digunakan model turbulensi $k - \omega$ SST dengan nilai *Reynold number* yang berdasarkan diameter rotor adalah $2,53 \times 10^5$.

3.3.2 Materials

Simulasi numerik yang dilakukan menggunakan fluida kerja berupa udara dengan kerapatan konstan sebesar $1,225 \text{ kg/m}^3$ dan *dynamic viscosity* konstan sebesar $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

3.3.3 Cell Zone Conditions

Pada *stationary subdomain* diberikan kondisi diam relatif terhadap pusat koordinat. Sedangkan untuk *rotating subdomain* dan *blade subdomain* mengaktifkan fitur *mesh motion* dengan kecepatan sudut terhadap pusat koordinat sesuai dengan nilai TSR yang diinginkan. Dengan pengaturan ini, maka turbin Darrieus akan berputar selama proses solusi iterasi berlangsung.

3.3.4 Boundary Conditions

Pengaturan *boundary condition* atau kondisi batas dilakukan pada domain penelitian seperti Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Kondisi Batas Simulasi

Daerah Batas	Boundary Condition	Input	Nilai
<i>Inlet</i>	<i>Velocity Inlet</i>	Kecepatan	5 m/s
		<i>Turbulent Intensity</i>	1%
		<i>Turbulent Length Scale</i>	0,01 m
<i>Interface</i>	<i>Interface</i>	-	-
<i>Outlet</i>	<i>Pressure Outlet</i>	<i>Gauge Pressure</i>	0 Pa
		<i>Backflow Turbulent Intensity</i>	1%
		<i>Backflow Turbulent Length Scale</i>	0.01 m
<i>Symmetry</i>	<i>Symmetry</i>	-	-
<i>Wall</i>	<i>Moving Wall</i>	<i>Shear Condition</i>	<i>No Slip</i>
		<i>Motion (Rotational)</i>	<i>0 rad/s Relative to Adjacent Cell Zone</i>

3.3.5 Reference Values

Reference value yang digunakan dalam simulasi numerik terlihat pada Tabel 3.4 dibawah ini. *Reference value* yang digunakan dihitung dari sisi inlet seperti pada penelitian Vaishnav (2010).

Tabel 3.4 *Reference value* simulasi numerik

Parameter <i>reference value</i>	Nilai
Panjang <i>chord</i> (c) [m]	0,150
Tinggi turbin (H) [m]	1 (2D)
Diameter rotor (D) [m]	0,740
Area (D.H) [m ²]	0,740
<i>Density</i> [kg/m ³]	1,225
<i>Depth</i> (H) [m]	1
<i>Enthalpy</i> [J/kg]	0
<i>Length</i> (R) [m]	0,370
<i>Pressure</i> [atm]	1
<i>Temperature</i> [K]	288,16
<i>Velocity</i> [m/s]	5
<i>Viscosity</i> [kg/(m.s)]	1,7894 x 10 ⁻⁵
<i>Ratio of Specific Heats</i>	1,4
<i>Yplus for Heat Tran. Coef.</i>	300

3.3.6 Solution Methods

Metode solusi yang digunakan pada penelitian studi numerik ini dijabarkan pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Metode Solusi Simulasi Numerik

Metode Solusi	Parameter	Keterangan
<i>Pressure-Velocity Coupling</i>	<i>Scheme</i>	SIMPLE
<i>Spatial Discretization</i>	<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>Specific Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>
	<i>Transient Formulation</i>	<i>Second Order Implicit</i>

3.3.7 Residual Monitors

Untuk mengurangi waktu simulasi numerik, pada 12 putaran awal turbin digunakan nilai residual untuk persamaan *continuity* sebesar 0,001 sedangkan persamaan lainnya menggunakan 10⁻⁵, namun pada putaran ke-13 sampai ke-17 digunakan residual sebesar 10⁻⁵ untuk seluruh persamaan, hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa hasil yang didapatkan akurat.

3.3.8 Initialization

Sebelum simulasi CFD dilakukan, diperlukan *initial guess* untuk mendapatkan solusi medan aliran. Inisialisasi dilakukan sebelum proses iterasi dijalankan. Metode inisialisasi yang digunakan adalah *Hybrid Initialization* yang melakukan sepuluh kali iterasi pada persamaan sistem yang disederhanakan. Setelah *Hybrid Initialization* selesai dilakukan, selanjutnya dilakukan simulasi *steady* untuk memperoleh hasil yang lebih baik sehingga mempercepat mendapatkan *periodic solution* ketika simulasi *unsteady*.

3.4 Post-processing

Tahap *post-processing* merupakan tahapan simulasi numerik yang bertujuan untuk mendapatkan data yang diinginkan. Data yang didapatkan dapat berupa data kualitatif maupun data kuantitatif. Pada penelitian ini, data kualitatif yang didapatkan berupa kontur kecepatan relatif, kontur *coefficient of pressure*, vektor kecepatan relatif, dan *streamline* aliran. Sedangkan data kuantitatif yang diperoleh berupa grafik koefisien daya dan koefisien torsi pada berbagai nilai TSR serta grafik *coefficient of pressure* sehingga dapat diketahui pengaruh posisi *cavity* pada performa turbin Darrieus. Selain itu juga didapatkan nilai koefisien torsi terhadap sudut azimuth untuk menganalisis pengaruh *cavity* di setiap posisi sudut azimuth pada turbin dengan dan tanpa *cavity*. Gaya *drag* juga didapatkan untuk mengetahui pengaruh *cavity* terhadap reduksi gaya *drag* yang terjadi.

3.5 Sensitivity Analysis

Sensitivity analysis dilakukan atas dasar untuk mengetahui ketergantungan hasil simulasi numerik dengan parameter lain seperti jumlah elemen *mesh*, ukuran *time step*, dan jumlah putaran turbin Darrieus ketika simulasi numerik berlangsung.

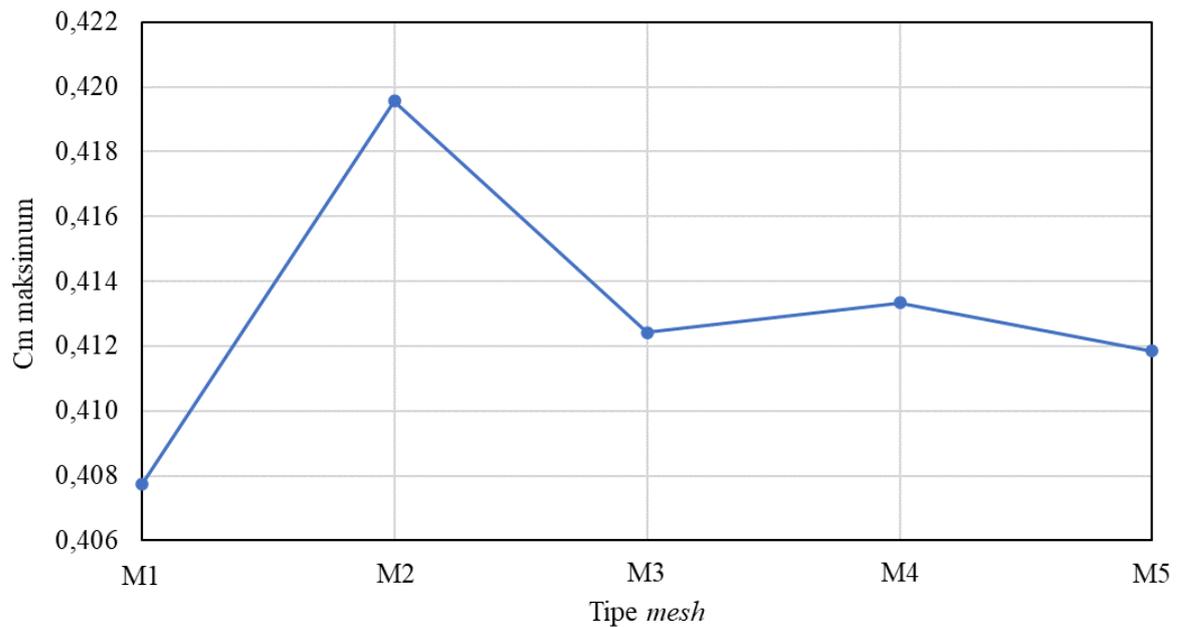
3.5.1 Grid Sensitivity Analysis

Grid sensitivity analysis dilakukan untuk mendapatkan jumlah *mesh* yang optimal namun dengan hasil yang masih relatif akurat. *Grid sensitivity analysis* dilakukan dengan cara meningkatkan jumlah *mesh* di sekitar sudu turbin Darrieus. Metode yang digunakan dalam *grid sensitivity analysis* yaitu *conventional grid refinement*. Parameter yang diamati dalam *grid sensitivity analysis* yaitu nilai koefisien torsi (C_m) maksimum pada satu sudu. Hasil pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.6 di bawah ini. Terlihat bahwa nilai C_m maksimum untuk mesh M3 sampai M5 sudah tidak ada perbedaan yang signifikan.

Tabel 3.6 *Grid Sensitivity Analysis* Turbin Darrieus

<i>Mesh</i>	Elemen	Y+ maksimum	C_m maksimum	Error relatif (%)
M1	53818	0,40	0,408	-
M2	73538	0,38	0,420	2,89
M3	87367	0,39	0,412	1,70
M4	106122	0,36	0,413	0,22
M5	126861	0,40	0,412	0,36

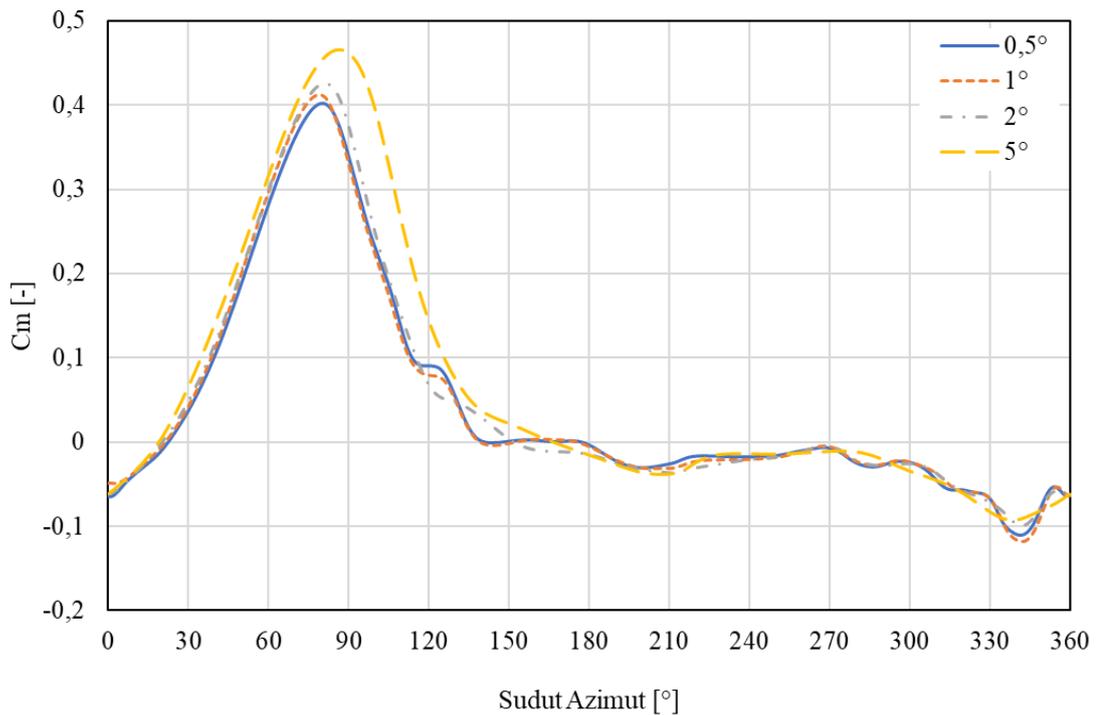
Pada Gambar 3.6 terlihat bahwa grafik koefisien torsi antara *mesh* M3, M4, dan M5 sudah saling mendekati sehingga *mesh* M3 dipilih untuk mengurangi waktu dan biaya komputasi simulasi. Selain itu perbedaan nilai koefisien torsi maksimum antara mesh M3 dan M5 hanya sebesar 0,14%.



Gambar 3.6 Koefisien torsi maksimum untuk satu sudu turbin Darrieus pada jumlah *mesh* yang bervariasi

3.5.2 Time Step Sensitivity Analysis

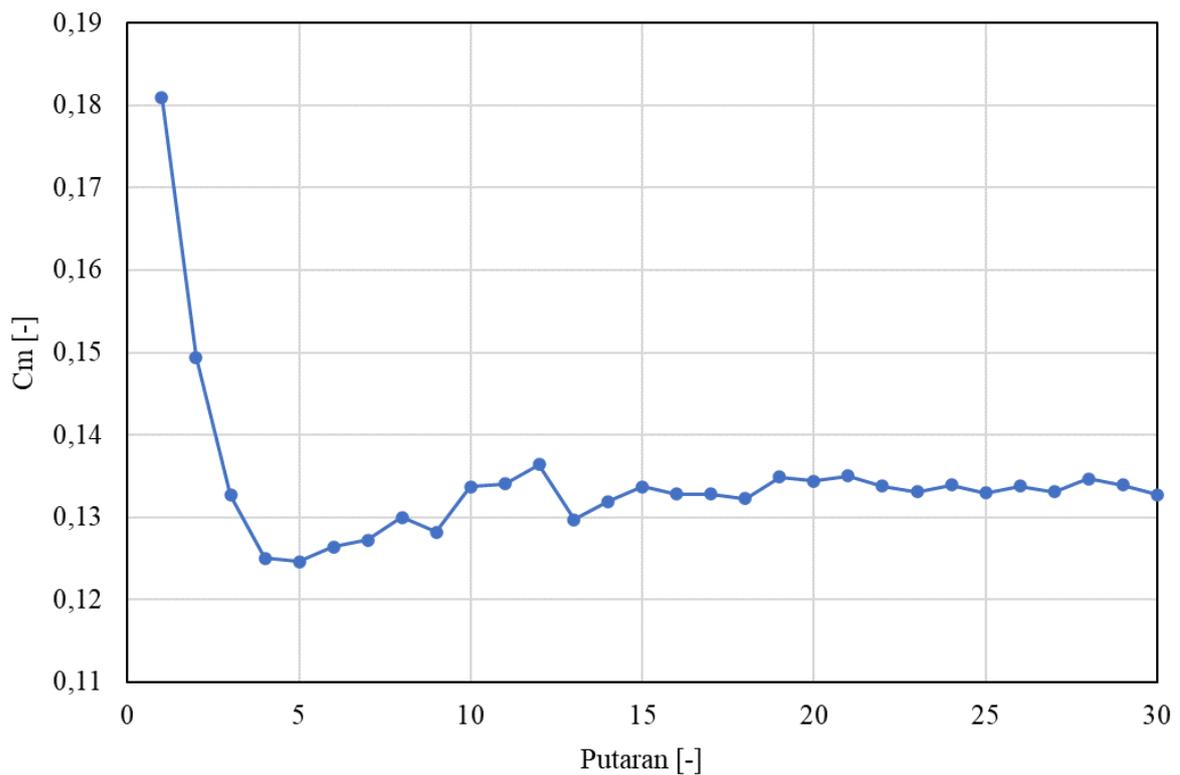
Time step sensitivity analysis dilakukan dalam upaya untuk menyelidiki sensitivitas hasil simulasi terhadap *time step* yang digunakan. Pada analisis ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan *time step* yang berbeda – beda yaitu 5° , 2° , 1° , dan $0,5^\circ$. Seperti terlihat pada Gambar 3.7 bahwa *time step* 1° dan $0,5^\circ$ memiliki nilai C_m yang sama hampir di seluruh rentang sudut azimut. Perbedaan nilai C_m antara 1° dan $0,5^\circ$ hanya sekitar 0,35%. Dengan demikian *time step* 1° digunakan pada simulasi numerik penelitian ini untuk memperkecil waktu dan biaya komputasi simulasi numerik.



Gambar 3.7 Koefisien torsi terhadap sudut azimut untuk satu sudu turbin Darrieus pada *time step* yang berbeda – beda

3.5.3 Revolution Convergence Analysis

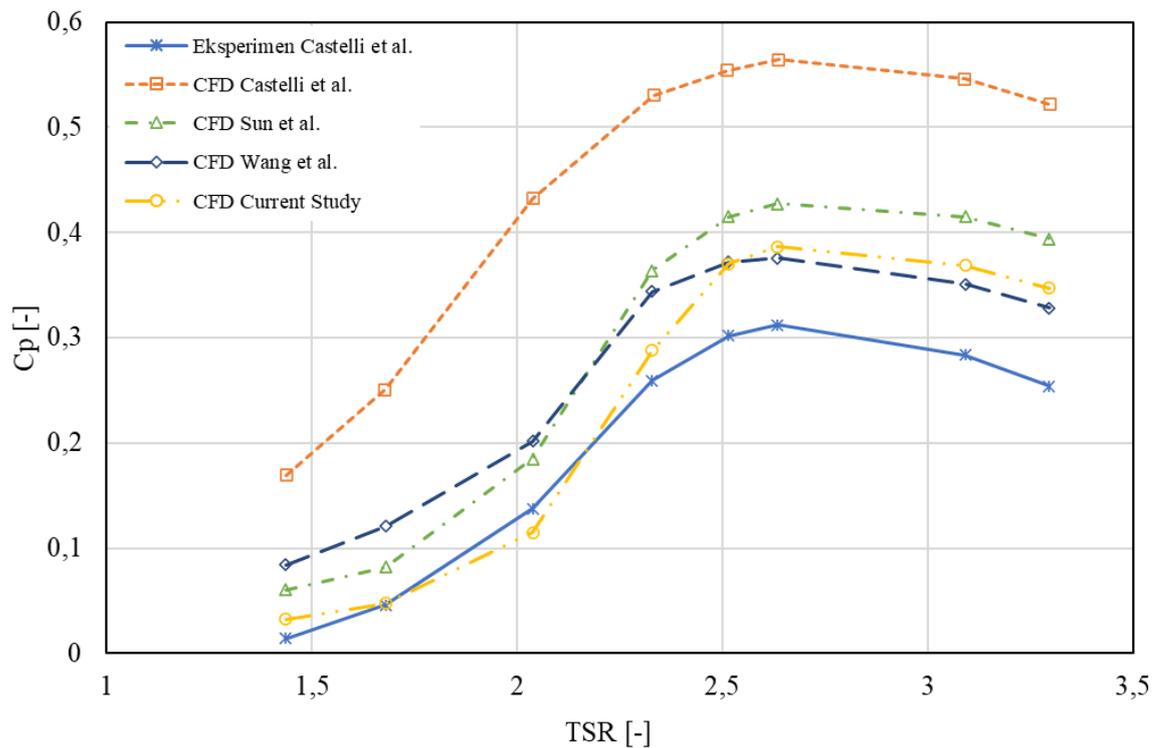
Hasil simulasi *unsteady* pada penelitian ini dipengaruhi salah satunya oleh jumlah putaran turbin pada saat data diambil. Pengambilan data pada saat turbin belum dalam keadaan *statistically steady state* dapat menyebabkan hasil yang didapatkan lebih besar maupun lebih kecil dari nilai yang sesungguhnya. Gambar 3.8 menunjukkan grafik nilai koefisien torsi sebagai fungsi jumlah putaran turbin. Terlihat bahwa pada putaran awal sampai putaran ke-4 nilai C_m mengalami penurunan secara drastis. Kemudian pada putaran ke-5 sampai ke-12 mengalami kenaikan C_m secara linier. Barulah pada putaran ke-13 nilai C_m sudah relatif stabil sampai dengan putaran ke-30. Sehingga digunakan 13 putaran ditambah 5 putaran lagi untuk memastikan bahwa turbin sudah dalam kondisi stabil diseluruh TSR yang disimulasikan sehingga total putaran turbin yang digunakan adalah 17 putaran dengan pengambilan data dilakukan pada putaran ke-17. Perbedaan nilai koefisien torsi pada putaran ke-17 dengan putaran ke-30 sebesar 0,05%. Nilai tersebut sudah sangat kecil (dibawah 1%) sehingga dapat diterima.



Gambar 3.8 Koefisien torsi tiga sudu pada 30 putaran turbin Darrieus

3.6 Studi Validasi

Studi validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik yang didapatkan cukup akurat. Validasi dilakukan berdasarkan hasil eksperimen Castelli *et al.*, (2010). Turbin Darrieus yang digunakan adalah tipe H-rotor tiga sudu dengan profil sudu NACA 0021, diameter rotor 1,03 m, panjang *chord* 0,0858 m, tinggi rotor 1,4564 m. Kecepatan angin yang digunakan adalah 9 m/s. Hasil pengukuran yang didapatkan berupa nilai koefisien daya (C_p) pada beberapa nilai TSR. Pada studi validasi ini turut dibandingkan juga simulasi numerik dari Castelli *et al* (2010), Sun *et al* (2020), dan Wang *et al* (2018) dengan penelitian saat ini yang sama – sama menggunakan hasil eksperimen dan geometri turbin dari Castelli *et al.*, (2010).

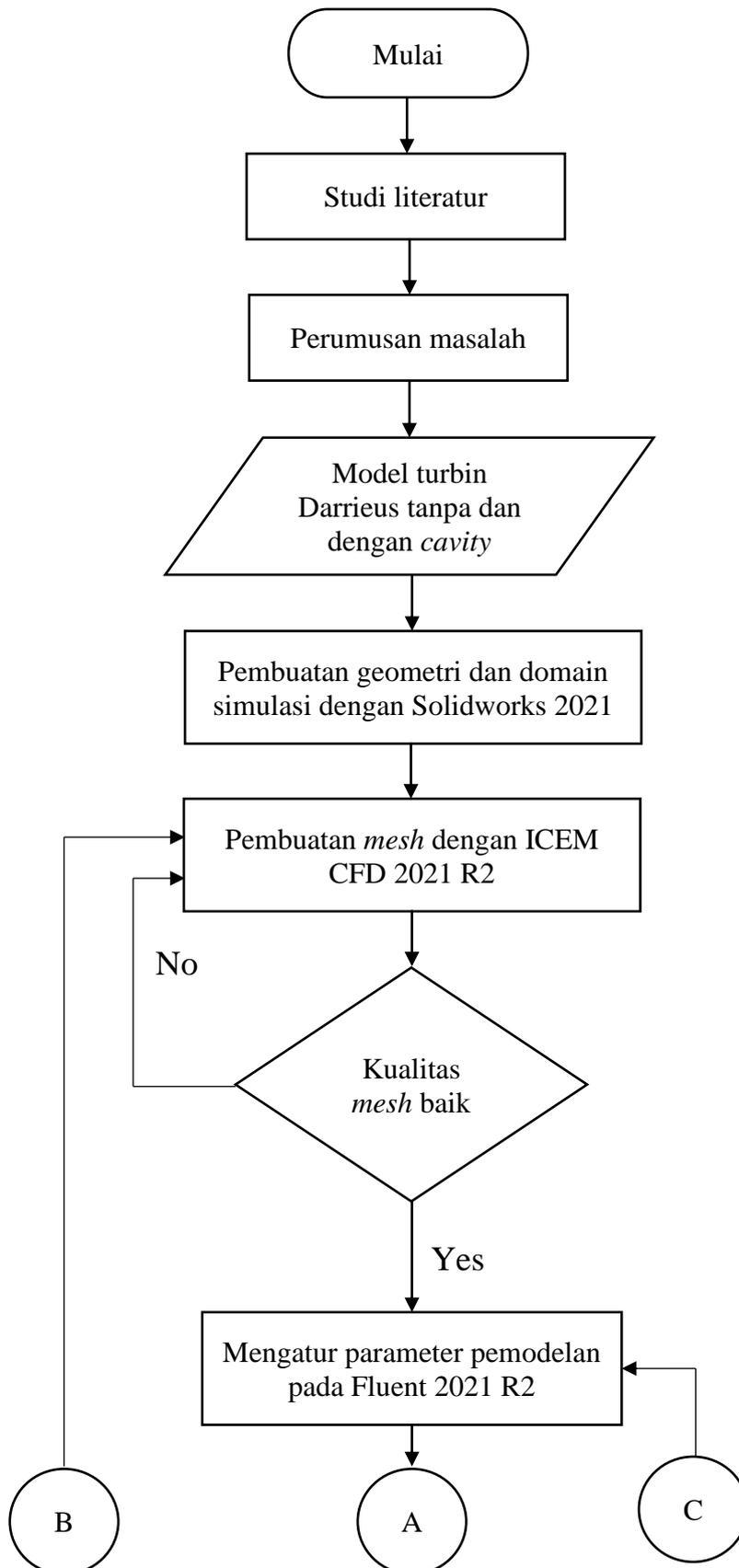


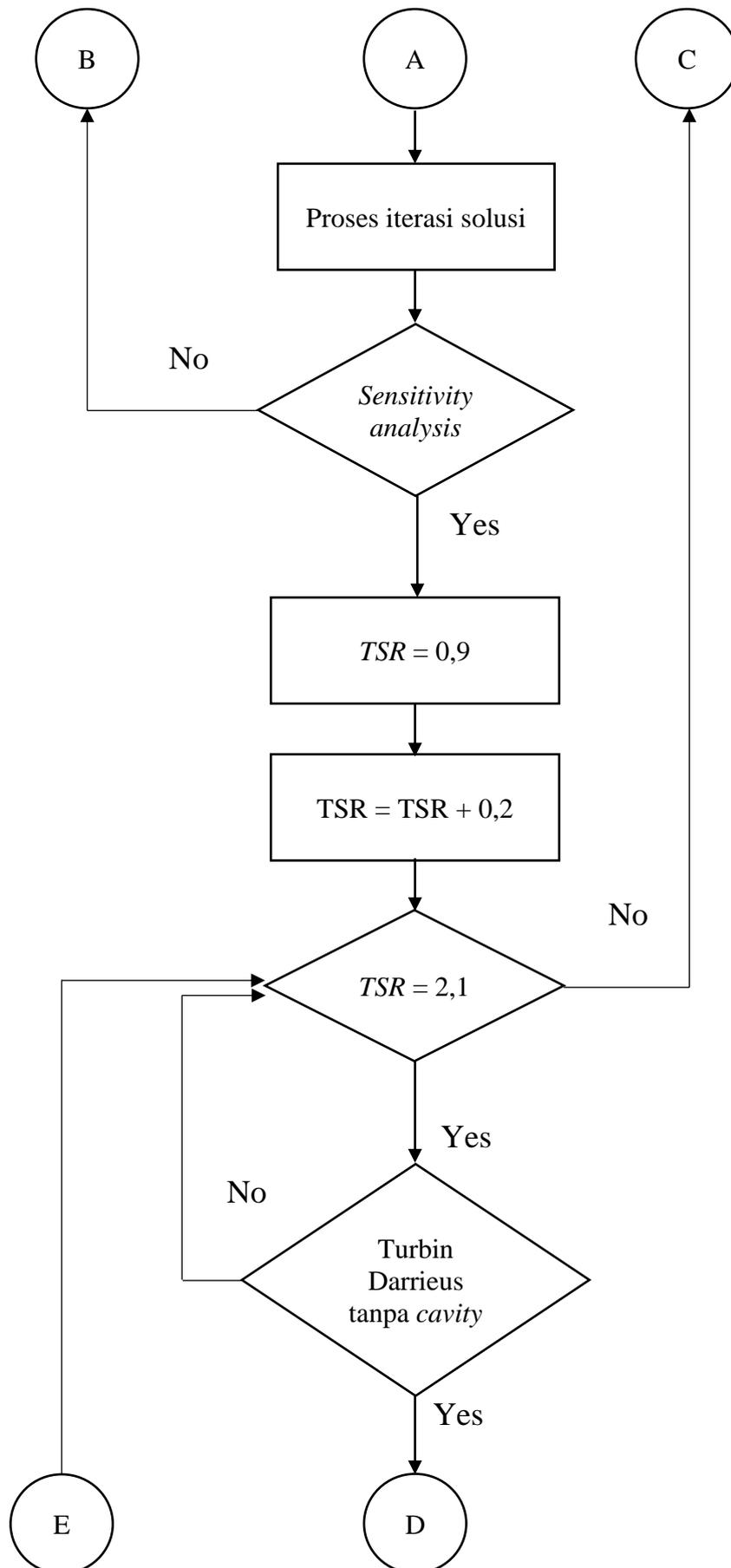
Gambar 3.9 Perbandingan C_p hasil simulasi numerik dengan eksperimen Castelli *et al.*, (2010)

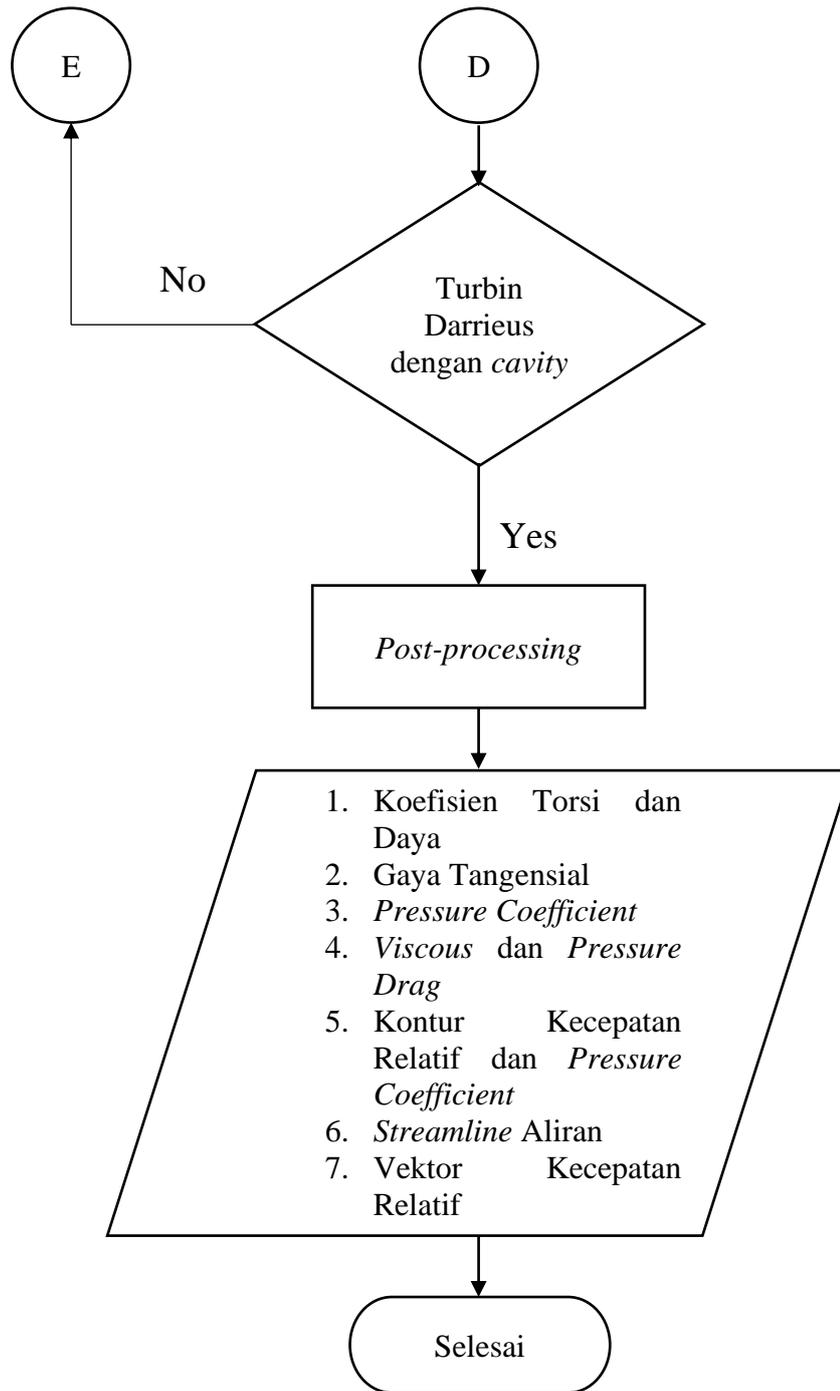
Berdasarkan Gambar 3.9 diatas dapat dilihat bahwa tren grafik CFD *Current Study* mampu menduplikasi tren grafik C_p eksperimen. Nilai maksimum C_p juga terletak pada nilai TSR yang sama. Namun nilai C_p pada TSR menengah ke tinggi lebih besar dibandingkan data eksperimen hal ini karena tidak terhitungnya gaya *drag* akibat simplifikasi geometri seperti *connecting rod* dan poros turbin. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian Elkhoury *et al* (2015). Selain itu *blade tip losses* tidak tertangkap dengan simulasi numerik dua dimensi. Berdasarkan penelitian Siddiqui *et al* (2015), nilai C_p yang didapat 32% lebih tinggi apabila tidak memperhitungkan *blade tip losses*. Alasan lainnya yaitu data hasil eksperimen *wind tunnel* tidak dikoreksi dengan *wind tunnel blockage* (sekitar 10%) dan *turbulent intensity* tidak dilaporkan dalam eksperimen.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.10 merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan.







Gambar 3.10 Diagram alir metode penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Efek Posisi *Cavity* Terhadap Performa Turbin Darrieus

Pada subbab ini akan menganalisis pengaruh peletakan posisi *cavity* terhadap performa turbin Darrieus. Peletakan posisi *cavity* yang divariasikan adalah seperti pada Tabel 3.1. Pengaruh posisi *cavity* akan dianalisis terhadap nilai koefisien daya (C_p) dan koefisien torsi (C_m). Berdasarkan simulasi numerik yang telah dilakukan, didapatkan grafik nilai C_p dan C_m terhadap TSR. Analisis pada grafik tersebut akan dapat menjelaskan peningkatan maupun penurunan performa turbin Darrieus dan pengaruh terhadap rentang operasional dari turbin Darrieus dengan penambahan *cavity* apabila dibandingkan dengan tanpa *cavity*.

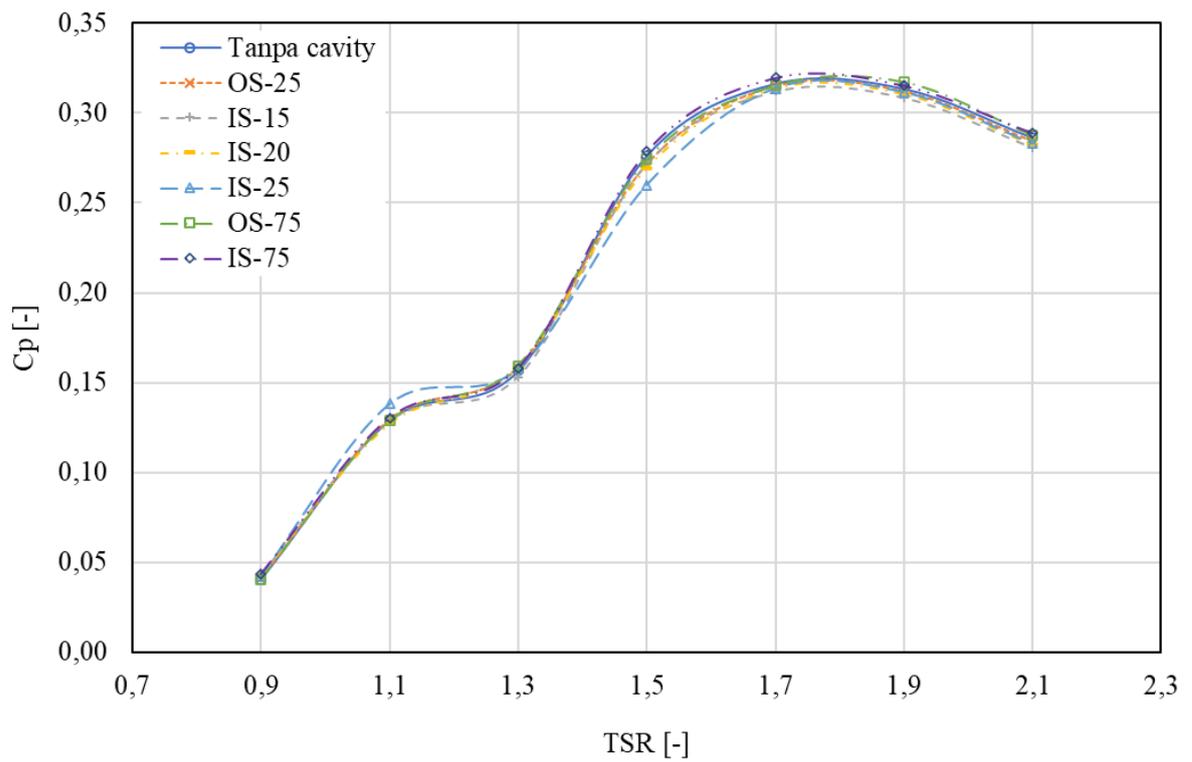
4.1.1 Efek Posisi *Cavity* Terhadap *Power Coefficient*

Pengaruh posisi *cavity* terhadap koefisien daya akan dianalisis pada bagian ini. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui posisi *cavity* yang memberikan kenaikan performa paling tinggi tanpa menurunkan rentang operasional TSR sehingga dapat meningkatkan daya output yang dihasilkan oleh turbin Darrieus dan adanya kemungkinan juga kenaikan kemampuan *self-starting*.

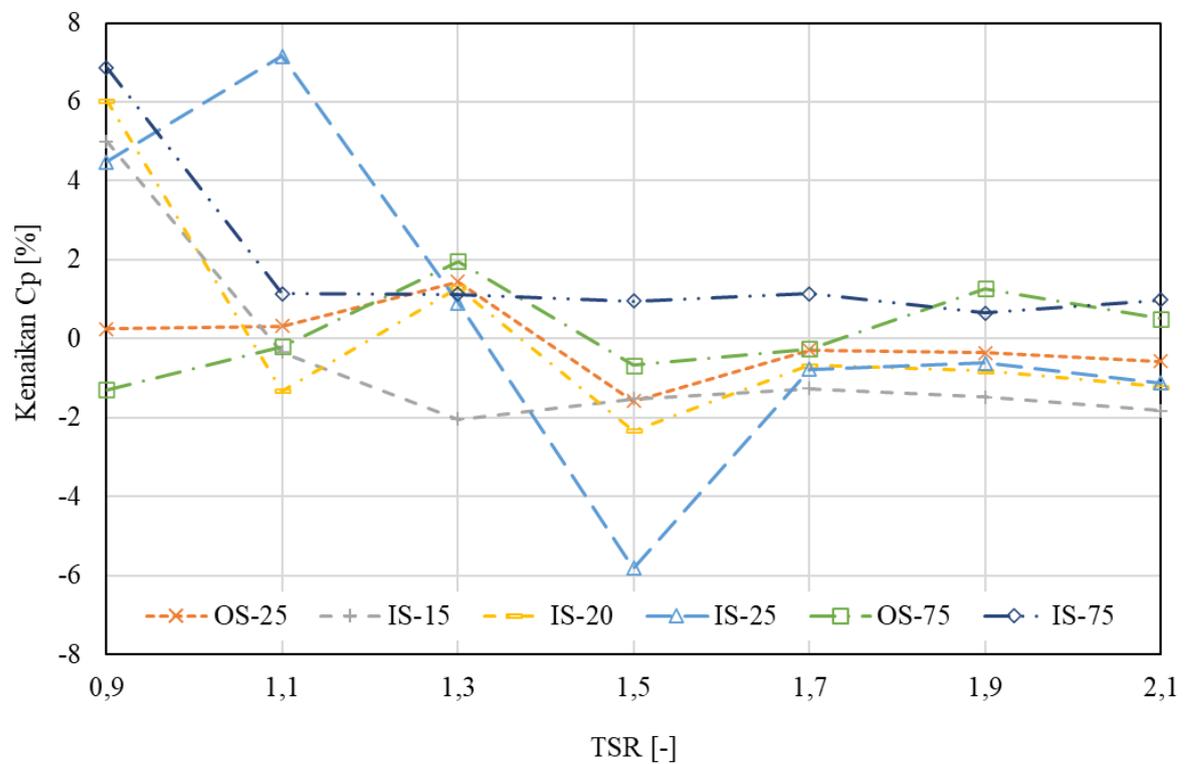
Untuk mengakomodasi tujuan tersebut, berbagai variasi posisi *cavity* dilakukan seperti ditunjukkan oleh Tabel 3.1. Semua variasi tersebut akan dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa penambahan *cavity*. Turbin Darrieus dengan dan tanpa *cavity* tersebut disimulasikan untuk mendapatkan nilai koefisien daya (C_p) pada beberapa nilai TSR.

Gambar 4.1 menampilkan grafik *power coefficient* (C_p) pada beberapa nilai TSR dari berbagai macam konfigurasi turbin Darrieus dengan *cavity* dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity*. Terlihat bahwa tren nilai *power coefficient* terus mengalami kenaikan dari TSR 0,9 sampai dengan 1,7. Puncak nilai *power coefficient* berada diantara TSR 1,7 dan 1,9. Pada TSR lebih dari 1,9 terjadi penurunan *power coefficient* yang diakibatkan oleh durasi dari *dynamic stall peak* pada bagian *upwind* yang meningkat (Zamani *et al.*, 2016).

Kenaikan nilai *power coefficient* dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 4.2. Terlihat bahwa pada TSR 0,9 konfigurasi IS-75 memberikan kenaikan *power coefficient* yang paling tinggi dibandingkan dengan konfigurasi lainnya yaitu sebesar 6,87%. Pada TSR ini konfigurasi IS-20, IS-15, IS-25, dan OS-25 juga mengalami kenaikan *power coefficient* berturut – turut sebesar 6,03%; 5%; 4,48%; dan 0,24% relatif terhadap turbin Darrieus tanpa *cavity*. Secara umum, dari berbagai konfigurasi yang ada, hanya konfigurasi IS-75 yang memberikan kenaikan *power coefficient* diseluruh rentang TSR yang diamati. Konfigurasi OS-25, IS-25, IS-20, dan IS-15 mengalami penurunan nilai *power coefficient* pada TSR lebih dari 1,3. Sedangkan konfigurasi OS-75 hanya memberikan kenaikan nilai *power coefficient* di TSR 1,3; 1,9; dan 2,1. Pada konfigurasi IS-75, *power coefficient* pada TSR lebih dari 0,9 mengalami kenaikan yang berfluktuasi di sekitar 1% dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity*. Dengan demikian, maka konfigurasi IS-75 merupakan konfigurasi yang paling optimum karena memberikan kenaikan performa tanpa mengurangi rentang operasional TSR dari turbin Darrieus.



Gambar 4.1 Perbandingan koefisien daya pada beberapa TSR

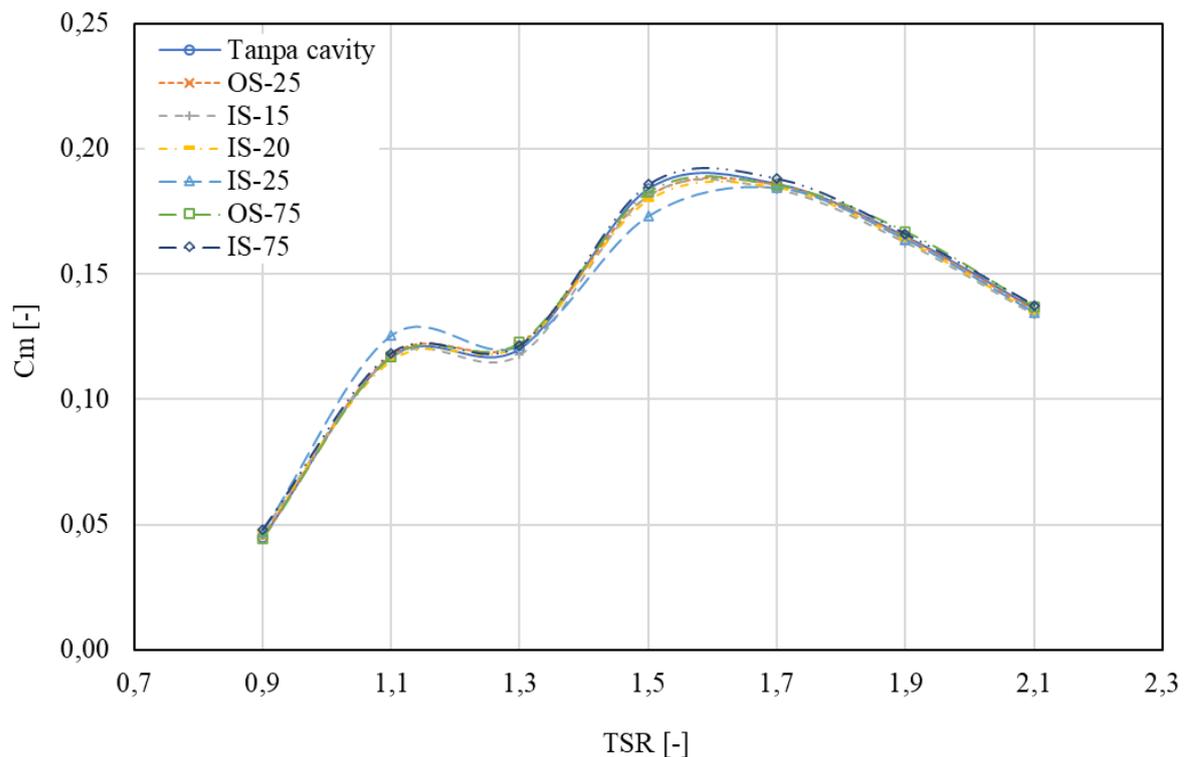


Gambar 4.2 Kenaikan koefisien daya pada beberapa TSR

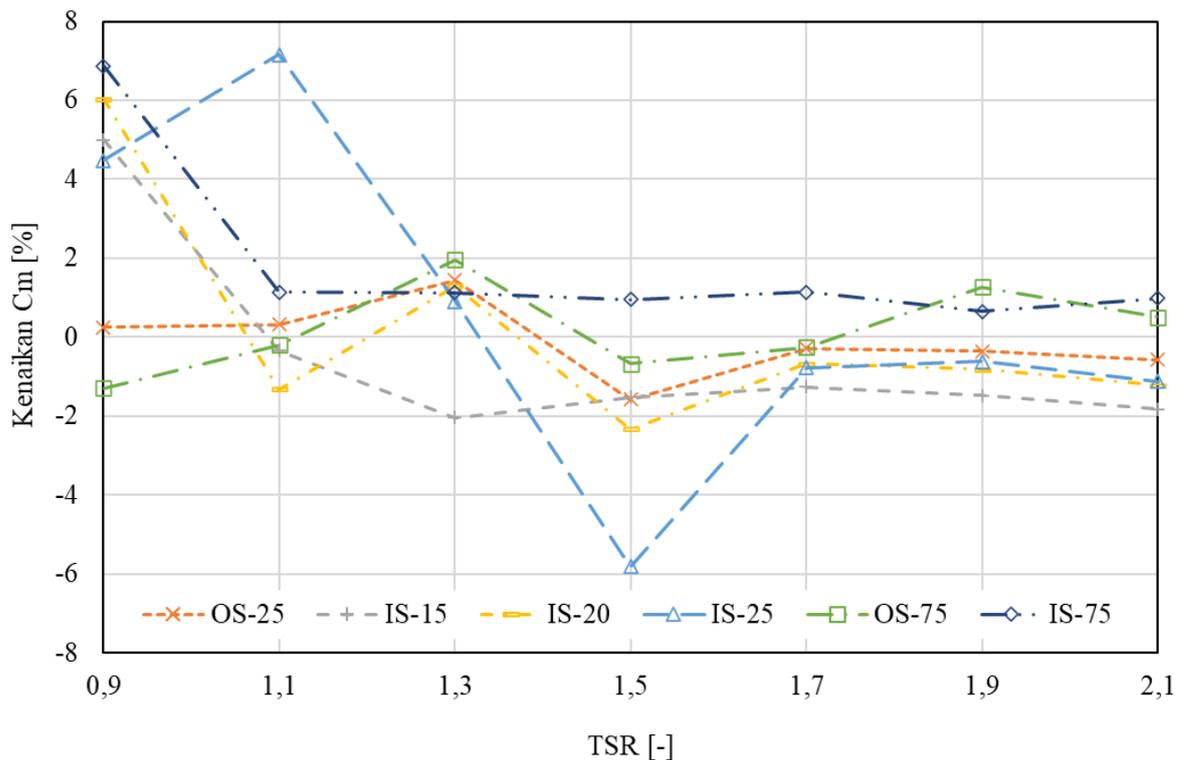
4.1.2 Efek Posisi *Cavity* Terhadap *Torque Coefficient*

Perbandingan nilai koefisien torsi pada beberapa TSR dari turbin Darrieus dengan dan tanpa *cavity* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Berdasarkan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa nilai koefisien torsi maksimum berada pada diantara TSR 1,5 dan 1,7. Hal ini berbeda dengan grafik nilai koefisien daya terhadap TSR pada Gambar 4.1, yang mana nilai maksimumnya berada pada rentang TSR 1,7 sampai 1,9. Perbedaan ini dikarenakan korelasi antara koefisien daya dan koefisien torsi memenuhi persamaan 2.11. Terlihat pada Gambar 4.3, nilai koefisien torsi mengalami kenaikan dari TSR 0,9 sampai dengan 1,5. Kemudian memiliki nilai maksimum diantara TSR 1,5 dan 1,7. Pada TSR lebih dari 1,7 nilai koefisien torsi mengalami penurunan. Pada Gambar 4.3 terlihat pula nilai koefisien torsi pada TSR 0,9 bernilai positif. Hal tersebut memungkinkan bahwa torsi yang dihasilkan secara aerodinamika dapat melawan gaya gesek dan *losses* pada kondisi *start up* sehingga turbin Darrieus dapat berputar.

Gambar 4.4 menunjukkan secara lebih jelas mengenai kenaikan nilai koefisien torsi pada beberapa nilai TSR dari turbin Darrieus dengan dan tanpa *cavity*. Berdasarkan Gambar 4.4 terlihat bahwa dari beberapa konfigurasi *cavity* yang digunakan, konfigurasi IS-75 memberikan kenaikan koefisien torsi tertinggi pada TSR 0,9 sebesar 6,87% kemudian konfigurasi IS-20, IS-15, IS-25, dan OS-25 juga memberikan kenaikan berturut – turut sebesar 6,03%; 5%; 4,48%; dan 0,24%. Dari berbagai konfigurasi yang ada, terlihat pada Gambar 4.4 bahwa konfigurasi IS-75 memberikan kenaikan koefisien torsi di seluruh rentang TSR. Dengan demikian maka konfigurasi IS-75 merupakan posisi *cavity* yang paling optimum.



Gambar 4.3 Koefisien torsi pada beberapa TSR



Gambar 4.4 Kenaikan koefisien torsi pada beberapa TSR

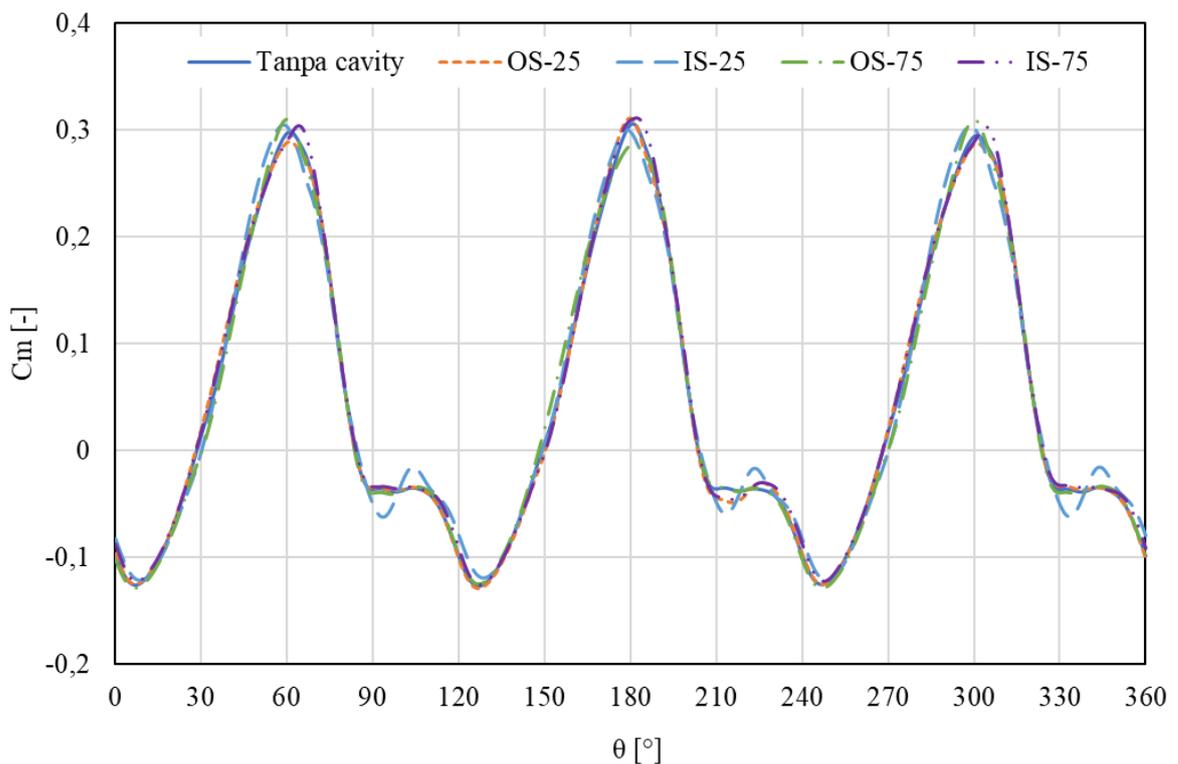
4.2 Analisis Torsi

Pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa sudu yang diberikan *cavity* dengan konfigurasi IS-75 memberikan kenaikan performa yang paling optimum tanpa mengurangi operasional TSR. Pada subbab ini akan dianalisis lebih detail kenaikan performa turbin Darrieus pada setiap sudut azimuth. Gambar 4.5 dan 4.6 merupakan grafik nilai sesaat koefisien torsi sebagai fungsi sudut azimuth pada TSR = 0,9 dan TSR = 1,7. Pada TSR = 0,9 turbin Darrieus dengan konfigurasi *cavity* IS-75 memberikan kenaikan performa tertinggi, sedangkan nilai koefisien daya maksimum dicapai kurang lebih pada TSR = 1,7.

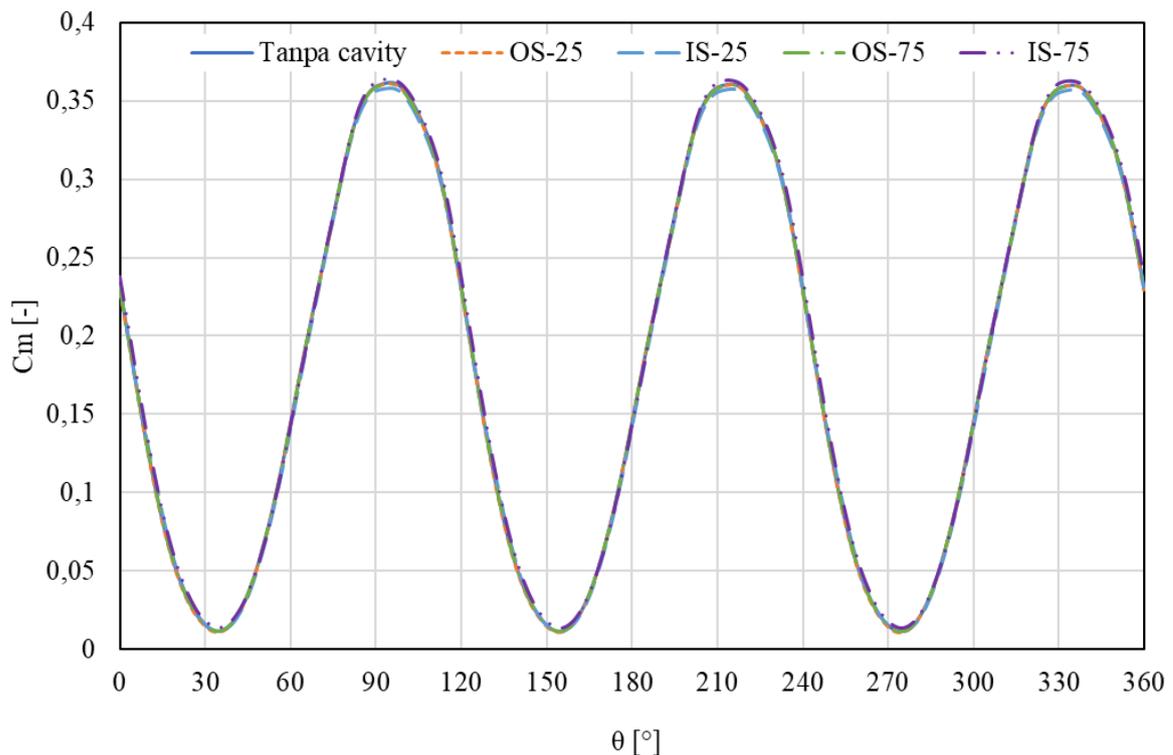
Gambar 4.5 menampilkan grafik nilai sesaat koefisien torsi sebagai fungsi sudut azimuth pada TSR = 0,9. Terlihat bahwa tren nilai koefisien torsi untuk semua variasi posisi *cavity* hampir sama kecuali konfigurasi IS-25 yang sedikit berfluktuasi pada saat sebelum mencapai titik dengan nilai koefisien torsi terendah, contohnya pada sudut azimuth $90^\circ < \theta < 120^\circ$. Konfigurasi IS-75 memberikan kenaikan nilai *peak* dengan nilai rata – rata kenaikan 3,95% pada rentang sudut azimuth $163^\circ < \theta < 203^\circ$. Konfigurasi IS-75 juga memberikan kenaikan pada nilai maksimum koefisien torsi sesaat pada ketiga nilai puncak (disudut azimuth 61° , 181° , dan 301°) apabila dibandingkan dengan sudu tanpa *cavity* dengan rata – rata kenaikan sebesar 2,17%. Konfigurasi OS-25, IS-25, dan OS-75 juga memberikan kenaikan pada nilai puncak koefisien torsi sesaat, namun tidak disemua nilai puncak. Konfigurasi OS-25 hanya meningkatkan nilai puncak pada sudut azimuth 181° . Sedangkan konfigurasi IS-25 dan OS-75 menaikkan nilai puncak koefisien torsi sesaat pada sudut azimuth 61° dan 301° . Sebaliknya untuk nilai minimum koefisien torsi sesaat, dari konfigurasi – konfigurasi tersebut hanya konfigurasi IS-25 dan IS-75 yang memberikan kenaikan nilai minimum koefisien torsi sesaat di semua titik terendah (disudut azimuth 7° , 127° , dan 247°). Kenaikan torsi negatif dengan nilai rata – rata 8,21% pada rentang sudut azimuth $78^\circ < \theta < 134^\circ$. Sedangkan OS-25 memberikan kenaikan pada saat nilai minimum berada pada sudut azimuth 7° dan 247° dan konfigurasi OS-75 hanya memberikan kenaikan nilai minimum pada sudut azimuth 127° . Dapat dilihat pula

bahwa pada Gambar 4.5 bahwa dengan penambahan *cavity* IS-75 tren grafik yang dihasilkan sama dan memberikan peningkatan nilai negatif koefisien torsi sesaat sehingga *startup torque* yang dihasilkan oleh turbin Darrieus dengan *cavity* IS-75 lebih tinggi apabila dibandingkan dengan turbin Darrieus tanpa *cavity*.

Grafik koefisien torsi sesaat pada $TSR = 1,7$ terlihat pada Gambar 4.6. Terlihat bahwa tren grafik sudu dengan dan tanpa *cavity* sama. Nilai puncak koefisien torsi sesaat pada beberapa konfigurasi menunjukkan bahwa hanya IS-75 yang memberikan kenaikan di seluruh titik puncak koefisien torsi sesaat. Titik – titik puncak tersebut berada disekitar sudut azimuth 95° , 215° , dan 335° . Kenaikan rata – rata pada ketiga titik puncak untuk IS-75 sebesar 0,58%. Sedangkan untuk konfigurasi IS-25 dan OS-75 mengalami penurunan nilai puncak. Konfigurasi OS-25 hanya memberikan kenaikan nilai puncak pada sudut azimuth 335° . Sebaliknya untuk nilai minimum koefisien torsi sesaat, dari beberapa konfigurasi terlihat bahwa hanya IS-75 yang meningkatkan nilai minimum koefisien torsi sesaat diketiga sudut azimuth 34° , 154° , 275° . Rata – rata kenaikan nilai minimum koefisien torsi sesaat dengan konfigurasi IS-75 sebesar 17,68%. Kontribusi terbesar kenaikan nilai koefisien torsi sesaat terjadi pada sudut azimuth antara 119° sampai 287° . Selain itu dengan konfigurasi IS-75 nilai koefisien torsi sesaat naik di hampir seluruh sudut azimuth.



Gambar 4.5 Variasi C_m sesaat terhadap sudut azimuth pada $TSR = 0,9$

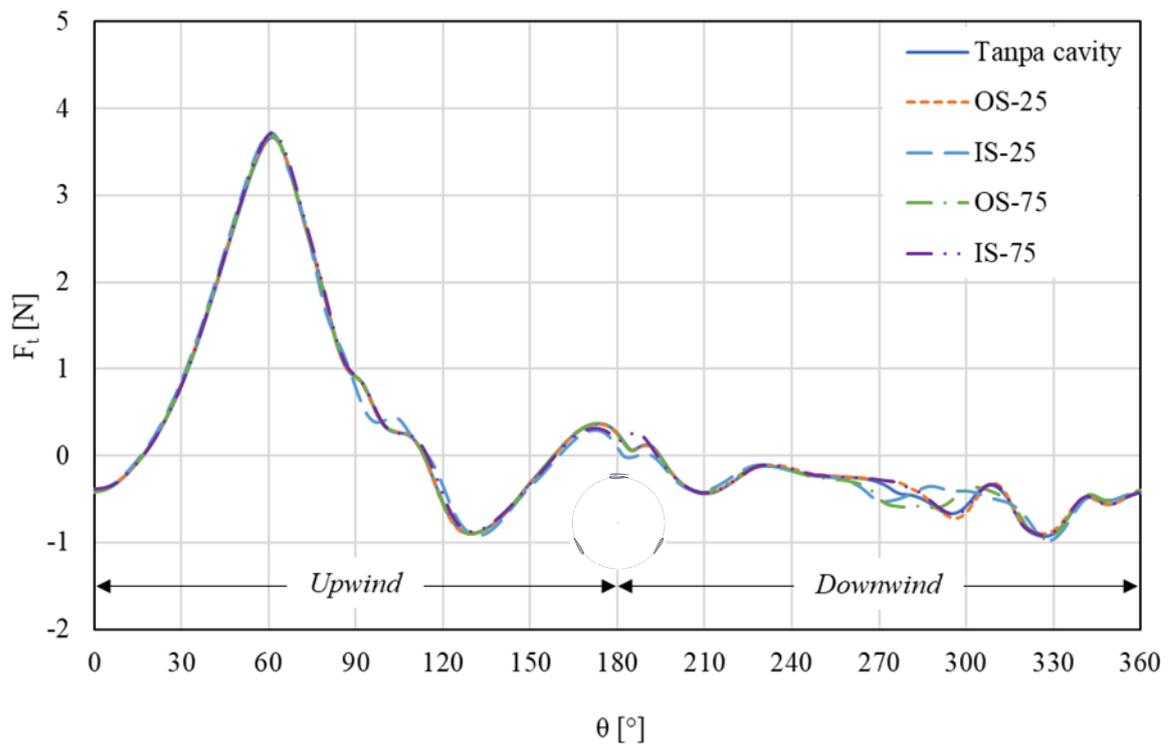


Gambar 4.6 Variasi C_m sesaat terhadap sudut azimuth pada $TSR = 1,7$

4.3 Analisis Kontur

Berdasarkan pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa turbin Darrieus yang ditambahkan *cavity* dengan konfigurasi IS-75 mampu memberikan kenaikan performa di seluruh operasional TSR yang diuji. Kenaikan performa tertinggi terjadi pada $TSR = 0,9$. Gambar 4.7 memperlihatkan pengaruh variasi posisi *cavity* terhadap gaya tangensial yang dihasilkan turbin Darrieus pada berbagai posisi sudut azimuth. Terlihat bahwa tren grafik untuk beberapa macam konfigurasi hampir sama dengan beberapa posisi memberikan kenaikan terhadap gaya tangensial. Selain itu, pada Gambar 4.7 terlihat bahwa gaya tangensial yang dihasilkan oleh bagian *upwind* cenderung lebih tinggi apabila dibandingkan dengan bagian *downwind*. Hal tersebut dikarenakan energi aliran yang mengalir ke bagian *downwind* telah diekstraksi terlebih dahulu pada bagian *upwind*. Nilai puncak pada bagian *upwind* (disudut azimuth 61°) untuk semua konfigurasi OS-25, IS-25, OS-75, dan IS-75 memberikan peningkatan terhadap gaya tangensial. Sedangkan nilai terendah pada bagian *upwind*, hanya konfigurasi IS-75 yang memberikan peningkatan gaya tangensial. Selain itu, pada bagian *downwind* terlihat bahwa ada peningkatan yang cukup signifikan di sekitar sudut azimuth $270^\circ < \theta < 300^\circ$.

Pada subbab ini analisis data kualitatif berupa kontur kecepatan relatif dan *coefficient of pressure* dilakukan berdasarkan pada kontribusi turbin Darrieus dengan *cavity* terhadap gaya tangensial yang dihasilkan. Berdasarkan Gambar 4.7 maka analisis kontur akan dilakukan pada dua titik di bagian *upwind* dan dua titik di bagian *downwind*. Untuk bagian *upwind* dipilih sudut azimuth 61° dan 130° yang mana titik tersebut merupakan titik maksimum dan minimum pada bagian *upwind*. Sedangkan untuk bagian *downwind* dipilih pada sudut azimuth 185° dan 292° yang nampak memberikan kenaikan gaya tangensial yang relatif lebih besar.



Gambar 4.7 Gaya tangensial dengan satu sudu pada TSR = 0,9

4.3.1 Kontur Kecepatan Relatif dan Struktur *Streamline*

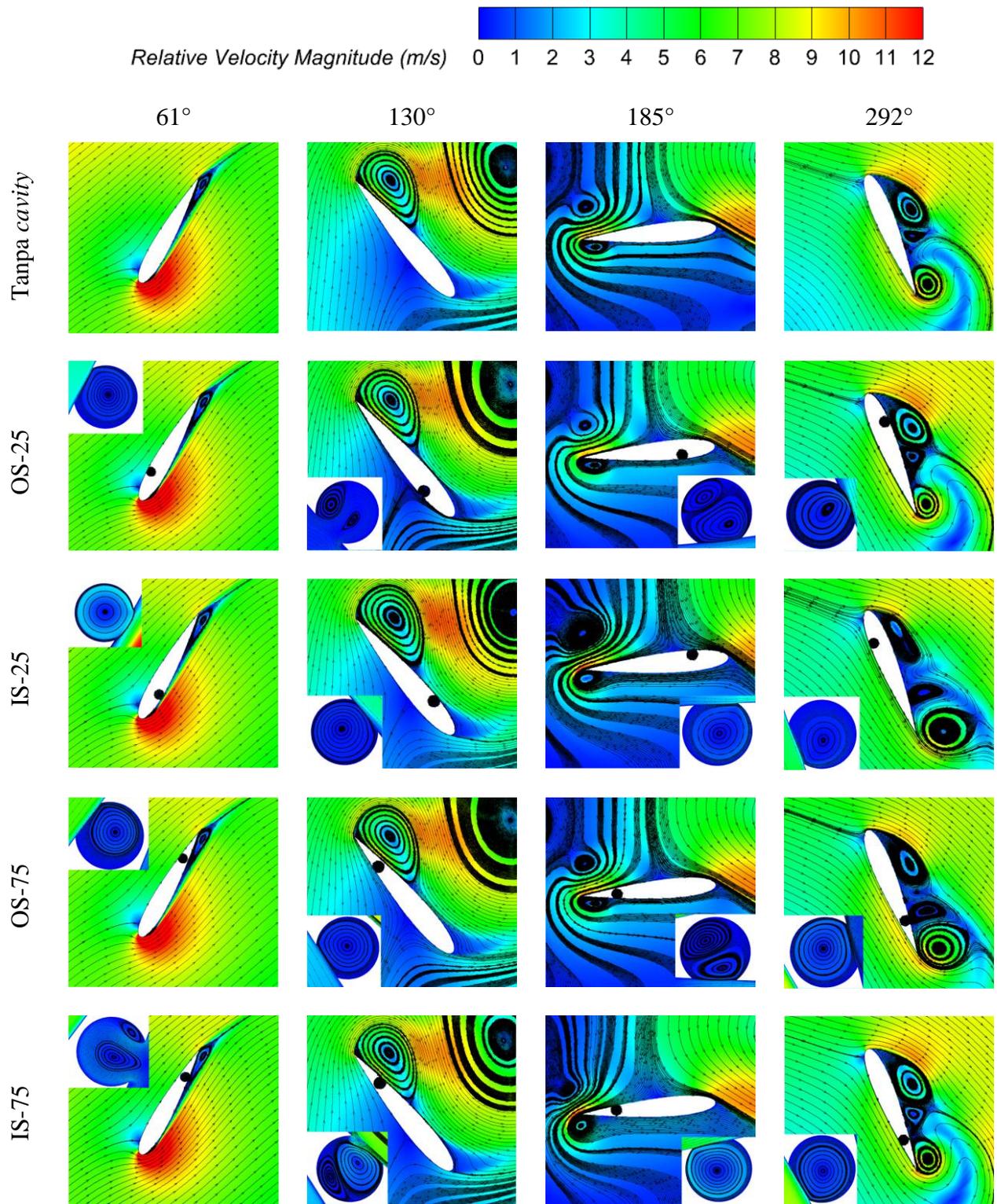
Pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa pemberian *cavity* memberikan dampak terhadap gaya tangensial yang dihasilkan oleh turbin Darrieus. Untuk mengamati lebih jelas fenomena aliran yang terjadi di sekitar sudu turbin maka diperlukan analisis kontur kecepatan relatif dan struktur *streamline*. Gambar 4.8 menampilkan kontur kecepatan relatif dan struktur *streamline* pada sudut azimut 61° , 130° , 185° , dan 292° dengan TSR = 0,9.

Pada sudut azimut 61° , terlihat bahwa *vortex* yang terbentuk berada pada *inner side* dekat *trailing edge* dari airfoil. Pemberian *cavity* dengan konfigurasi OS-25 dan OS-75 tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Pemberian *cavity* akan lebih berdampak apabila diletakkan di bagian *inner side* daripada *outer side*. Berdasarkan Gambar 4.7 pemberian *cavity* pada *inner side* dengan konfigurasi IS-25 dan IS-75 memberikan efek yang relatif lebih baik dibandingkan dengan pemberian *cavity* pada *outer side*. Peningkatan gaya tangensial dengan konfigurasi *cavity* IS-25 dan IS-75 berturut – turut sebesar 1,43% dan 1,29%. Kenaikan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut. Pada sudu turbin Darrieus yang dilengkapi dengan IS-25 terlihat bahwa *vortex* yang terjebak di dalam *cavity* memenuhi ruangan *cavity* namun ada sedikit bagian keluar dari *cavity*, hal ini dikarenakan ukuran *cavity* kurang besar. Meskipun demikian terlihat adanya *streamline reattachment*. Pusat *vortex* juga terlihat berada hampir di pusat dari geometri *cavity*. Dengan adanya *streamline reattachment* kemungkinan mampu menekan separasi aliran yang terjadi dengan mekanisme penambahan momentum oleh *vortex*. Dengan demikian maka nilai gaya tangensial juga akan meningkat. Sedangkan untuk turbin Darrieus yang dilengkapi dengan IS-75, terlihat bahwa posisi *cavity* berada pada area separasi aliran. Pemberian *cavity* pada posisi ini akan memperkecil *vortex area* yang terbentuk sehingga menurunkan *pressure drag*. Terlihat pula bahwa *vortex* yang terbentuk di dalam *cavity* terdistorsi menjadi dua buah *vortex*. Hal tersebut kemungkinan terjadi karena ukuran geometri *cavity* yang terlalu kecil sehingga tidak mampu mengakomodasi *trailing edge vortex* yang

sangat besar sehingga memicu adanya *secondary vortex* di dalam *cavity*. Fenomena yang terjadi pada sudut azimut 61° mirip dengan sudut azimut 130° . Yang membedakan bahwa *trailing edge vortex* yang terbentuk pada sudut azimut 130° lebih besar. Pada kondisi ini, turbin Darrieus dengan penambahan *cavity* IS-75 memberikan kenaikan gaya tangensial sebesar 2,22%. Terlihat pada Gambar 4.8 bahwa terdapat dua *vortex* yang terbentuk di dalam *cavity* pada konfigurasi OS-25 dan IS-75 dengan sudut azimut 130° . Hal tersebut karena seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa ukuran *cavity* yang terlalu kecil.

Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa pada sudut azimut 185° pemberian *cavity* memiliki dampak baik peningkatan maupun penurunan terhadap gaya tangensial. Terlihat bahwa *vortex* yang terbentuk di dalam *cavity* dengan konfigurasi OS-25 dan OS-75 terdistorsi menjadi dua buah *vortex* di dalam *cavity*. Hal tersebut terjadi karena ukuran geometri *cavity* yang terlalu kecil sehingga menciptakan *vortex* yang tidak stabil dan memicu munculnya *secondary vortex*. Konfigurasi *cavity* IS-25 menghasilkan *vortex* di dalam *cavity* dengan pusat *vortex* yang juga hampir di tengah geometri *cavity*. Selain itu juga nampak adanya *streamline reattachment*. Pada konfigurasi IS-25 terlihat juga bahwa *trailing edge vortex* yang terbentuk relatif lebih sedikit mengenai permukaan airfoil sehingga daerah yang bertekanan rendah akibat *trailing edge vortex* juga mengecil. *Trailing edge vortex* terlihat sedikit bergeser kebelakang airfoil diakibatkan adanya *dynamic stall vortex* yang sangat besar dan mendekati airfoil sehingga mempengaruhi aliran di sekitarnya, terlihat bahwa pada *inner side* bagian *trailing edge* memiliki kecepatan yang lebih tinggi yang ditunjukkan oleh warna merah. Dengan kecepatan yang lebih tinggi itu pula mampu menginduksi *trailing edge vortex* sehingga terjadi pergeseran lebih ke belakang airfoil. Konfigurasi IS-75 mampu menghasilkan *vortex* yang stabil dengan pusat *vortex* yang hampir berhimpit dengan pusat geometri *cavity* dengan *streamline* yang masih menunjukkan adanya *streamline reattachment* akibat adanya kemungkinan kenaikan momentum aliran.

Fenomena aliran yang terjadi pada saat sudut azimut 292° pada $TSR = 0,9$ dapat dilihat pada Gambar 4.8. Dari gambar tersebut terlihat bahwa terdapat beberapa *vortex* di sepanjang permukaan *outer side* dari sudu turbin Darrieus. Dari beberapa konfigurasi yang ada, IS-25 memberikan kenaikan gaya tangensial sebesar 41,57%. Hal tersebut kemungkinan karena adanya penundaan separasi aliran. Terlihat bahwa pada *inner side* berwarna lebih hijau apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Terlihat juga bahwa *vortex* di dalam *cavity* mampu memenuhi ruangan yang ada di dalam *cavity* meskipun pusat *vortex* tidak berada tepat di pusat geometri *cavity* namun adanya *vortex* tersebut kemungkinan mampu memberi tambahan momentum. Selain itu *trailing edge vortex* yang terbentuk di bagian *outer side* berada pada posisi yang relatif agak jauh dan terlepas dari permukaan airfoil, berbeda dengan airfoil tanpa *cavity* yang mana *trailing edge vortex* cenderung masih berada di permukaan airfoil. Hal yang sama juga terjadi pada konfigurasi *cavity* OS-75 yang mana *trailing edge vortex* sudah hampir terlepas dan juga *vortex* yang dihasilkan di dalam *cavity* cukup stabil. IS-75 juga memberikan kenaikan gaya tangensial karena *vortex* di dalam *cavity* yang dihasilkan terlihat stabil dan memenuhi ruangan *cavity* dengan baik sehingga dapat dilihat bahwa warna kontur pada bagian *inner side* terlihat lebih hijau dibandingkan dengan tanpa *cavity*. Hal yang berbeda terjadi pada OS-25 dimana pemberian *cavity* tidak memberikan keadaan yang lebih baik. Terlihat bahwa ukuran *cavity* jauh lebih kecil dibandingkan dengan ukuran *leading edge vortex* yang terbentuk di *outer side* sudu turbin Darrieus. Selain itu terlihat pula bahwa porsi *vortex* yang melekat dengan permukaan sudu turbin lebih banyak dibandingkan dengan sudu turbin tanpa *cavity* dengan begitu maka kemungkinan akan menghasilkan *pressure drag* yang relatif lebih besar sehingga gaya tangensial yang dihasilkan juga menurun.



Gambar 4.8 Kontur kecepatan relatif dan struktur *streamline* pada TSR = 0,9

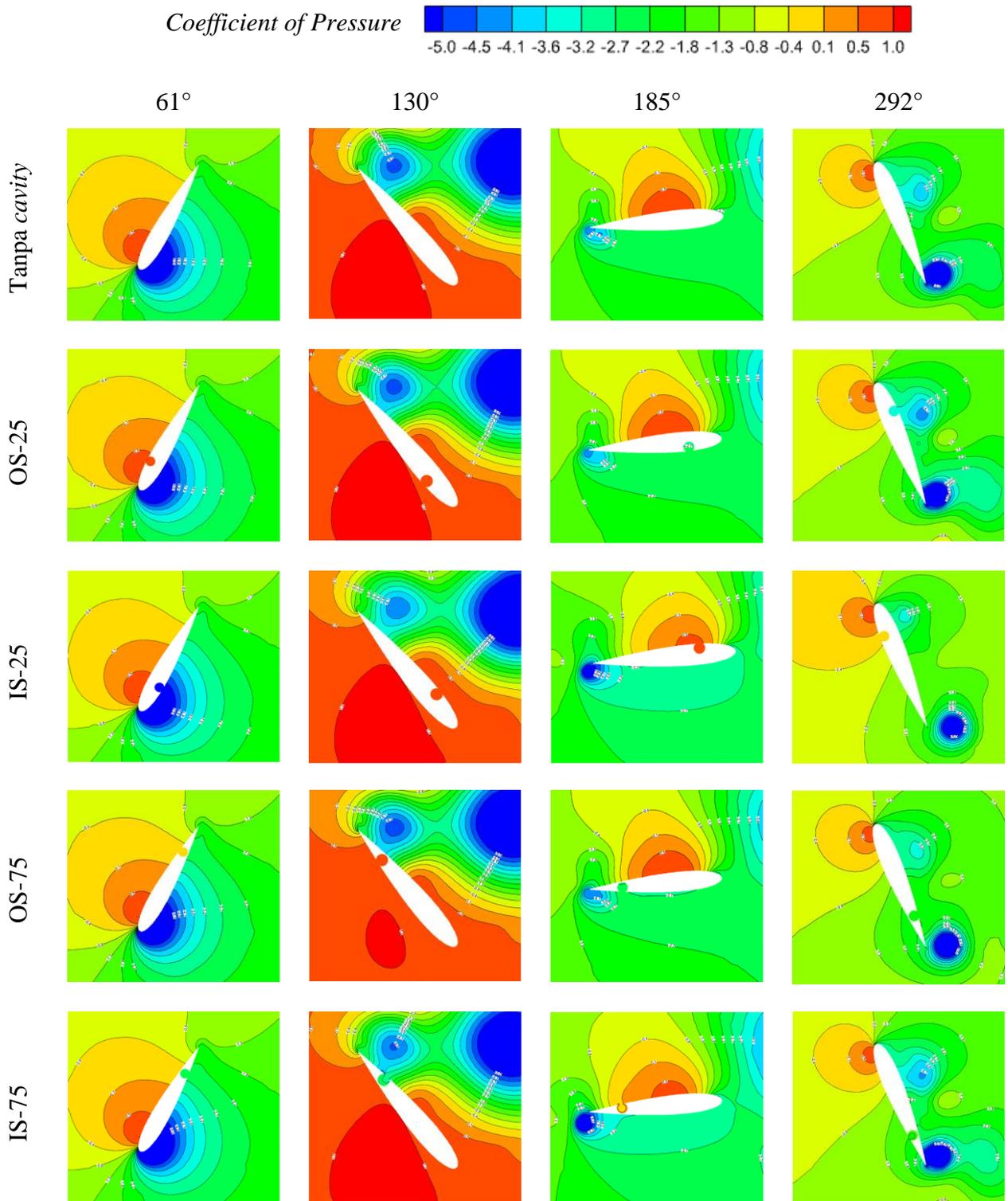
4.3.2 Kontur *Coefficient of Pressure*

Pada subbab ini akan dianalisis kontur *coefficient of pressure* untuk melengkapi pembahasan sebelumnya. Gambar 4.9 menampilkan kontur *coefficient of pressure* pada sudut azimut 61° , 130° , 185° , dan 292° di $TSR = 0,9$. Pada sudut azimut 61° terlihat bahwa secara umum tidak ada perbedaan yang signifikan pada kontur *coefficient of pressure*. Terlihat bahwa pada bagian *outer side* memiliki nilai *coefficient of pressure* yang lebih besar dibandingkan bagian *inner side*. Hal tersebut karena arah aliran datang dari arah kiri sehingga airfoil bagian *outer side* akan memiliki kecepatan yang lebih rendah sehingga nilai *coefficient of pressure* akan naik. Sementara itu pada bagian *inner side* dekat dengan *leading edge* terlihat berwarna biru yang menandakan nilai *coefficient of pressure* yang rendah. Selain itu terlihat bahwa daerah berwarna hijau pada bagian *inner side* konfigurasi IS-25 sedikit lebih jauh apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*.

Pada sudut azimut 130° terlihat bahwa pada konfigurasi *cavity* OS-75 memiliki kontur *coefficient of pressure* yang lebih rendah pada bagian *outer side* tengah airfoil dimana kontur berwarna merah menjauh dari permukaan airfoil. Sementara bagian *inner side* dekat *trailing edge* pada konfigurasi IS-75 tampak bahwa area yang berwarna biru muda sedikit mengecil, hal ini seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa *cavity* membuat area *vortex* yang ada menjadi lebih kecil karena terjebak di dalam *cavity*. Sedangkan pada IS-25 terlihat bahwa pada bagian *inner side* memiliki nilai *coefficient of pressure* yang lebih besar yang tergambarkan dengan warna oranye yang lebih luas dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity* yang berada didekat *leading edge* yang mana pada daerah juga terdapat *cavity*. Hal tersebut memungkinkan bahwa dengan adanya *cavity* dapat memungkinkan adanya penambahan momentum aliran sehingga dapat menekan separasi aliran. Pada *cavity* dengan konfigurasi OS-25 terlihat bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan sudu turbin tanpa *cavity*.

Secara umum Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pada sudut azimut 185° pada bagian *inner side* memiliki tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *outer side*. Seperti pada Gambar 4.8 hal ini tampak bahwa pada sisi *inner side* memiliki kecepatan yang relatif rendah. Pada Gambar 4.9 terlihat bahwa terbentuk *trailing edge vortex* pada bagian *outer side* yang ditunjukkan oleh kontur berwarna biru didekat *trailing edge*. Penambahan *cavity* dengan konfigurasi IS-75 memberikan pengaruh bahwa daerah berwarna oranye dan kuning mengalami perluasan hingga lebih dekat ke *trailing edge* apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Sementara itu terlihat bahwa untuk konfigurasi IS-25 dan IS-75, kontur pada bagian *outer side* berwarna hijau kebiruan yang menandakan memiliki *coefficient of pressure* yang lebih rendah. Hal tersebut karena *trailing edge vortex* yang sudah berkembang cukup besar menginduksi aliran ke arah *leading edge*. Meskipun ada penurunan *coefficient of pressure*, namun kenaikan *coefficient of pressure* pada bagian *inner side* pada konfigurasi IS-75 terlihat cukup besar hingga mendekati *trailing edge*. Selain itu juga area *vortex* yang berwarna biru tua sudah relatif lebih jauh dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*.

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa pada sudut azimut 292° , konfigurasi IS-25 memberikan peningkatan gaya tangensial dikarenakan adanya *cavity* kemungkinan mampu menahan separasi aliran lebih ke belakang. Hal ini terlihat bahwa daerah berwarna kuning berada lebih dekat dengan *trailing edge* apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Selain itu *trailing edge vortex* yang terbentuk juga semakin menjauhi permukaan airfoil. Hal ini juga terjadi pada *cavity* dengan konfigurasi OS-75, terlihat bahwa *vortex* yang menempel pada bagian *outer side* dekat dengan *trailing edge* memiliki porsi yang lebih sedikit apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Konfigurasi IS-75 juga membuat daerah bertekanan rendah pada bagian *inner side* dekat *trailing edge* menjadi lebih sedikit apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Hal ini menunjukkan kemungkinan adanya penambahan momentum oleh *vortex* di dalam *cavity*.



Gambar 4.9 Kontur *coefficient of pressure* pada TSR = 0,9

4.4 Analisis Coefficient of Pressure

Pada subbab ini akan ditunjukkan secara kuantitatif pengaruh *cavity* pada berbagai konfigurasi *cavity* sebagai bukti lanjutan mengenai efek *cavity* yang sudah disebutkan sebelumnya. Gambar 4.10 menunjukkan grafik *coefficient of pressure* di sepanjang arah *chord* airfoil pada beberapa sudut azimut di $TSR = 0,9$.

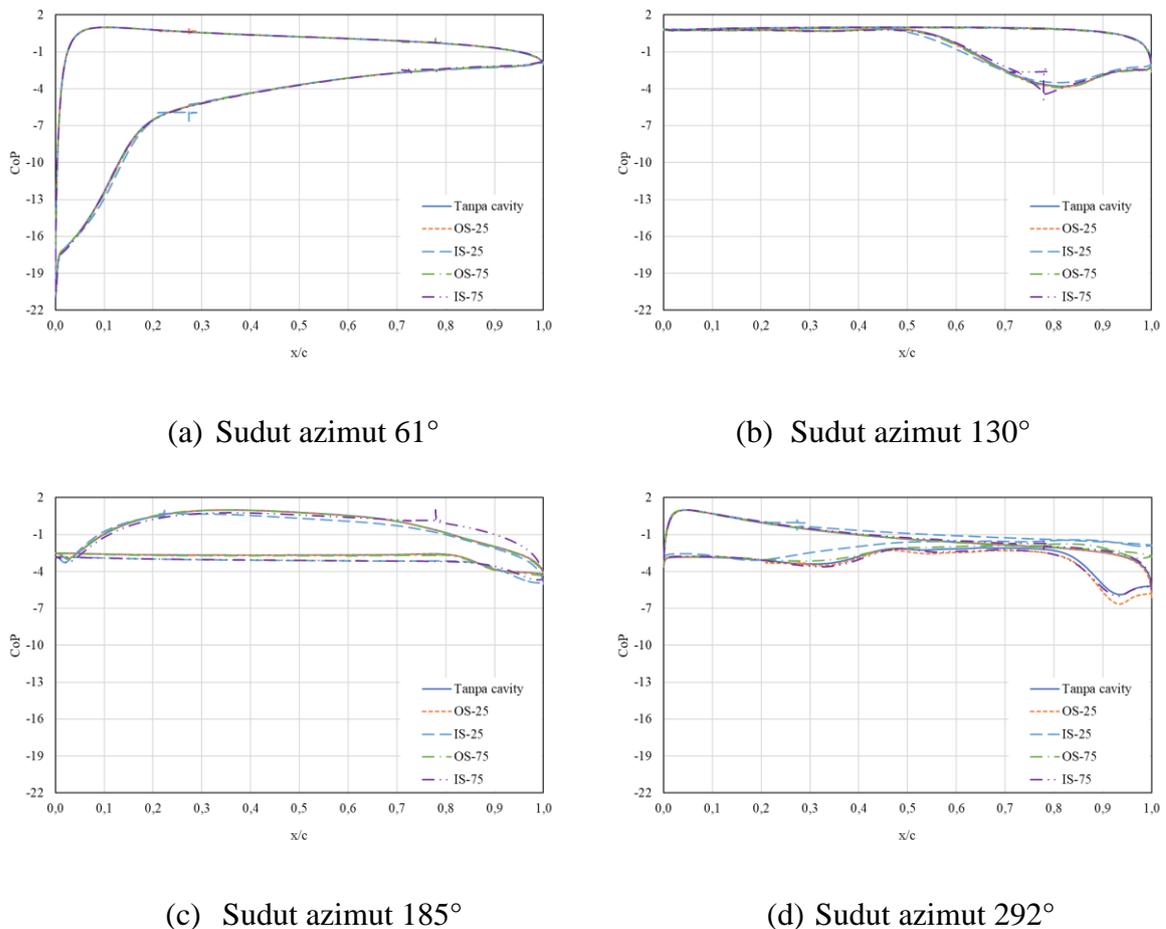
Gambar 4.10 (a) menunjukkan bahwa tren grafik secara umum sama untuk semua variasi konfigurasi *cavity*. Nilai *coefficient of pressure* pada posisi x/c mendekati 0 terlihat hampir mendekati -21. Dapat dilihat juga pada Gambar 4.8 bahwa pada posisi tersebut kecepatan pada airfoil relatif lebih tinggi sehingga *coefficient of pressure* akan semakin rendah. Pada posisi $x/c = 0,25$ terlihat ada sedikit ketidakteraturan pada grafik *coefficient of pressure* dengan konfigurasi IS-25 dikarenakan pada posisi tersebut terdapat *cavity*. Hal yang sama juga terjadi pada posisi $x/c = 0,75$ karena adanya *cavity* pada konfigurasi IS-75 dan OS-75. Konfigurasi IS-25 pada $0 < x/c < 0,2$ bagian *inner side* mengalami sedikit penurunan *coefficient of pressure*.

Gambar 4.10 (b) memperlihatkan bahwa *cavity* dengan konfigurasi IS-25 memberikan kenaikan nilai *coefficient of pressure* pada $0 < x/c < 0,5$ bagian *inner side*. Hal ini juga terlihat dengan cukup jelas pada Gambar 4.9. Selain itu, konfigurasi IS-75 juga memberikan kenaikan nilai *coefficient of pressure* di sekitar posisi $0,5 < x/c < 1$ bagian *inner side*. Hal ini dikarenakan ada sebagian *trailing edge vortex* yang terjebak di dalam *cavity* sehingga luasan *vortex* menjadi sedikit lebih kecil yang mengakibatkan *pressure drag* menjadi lebih rendah. Pada posisi $x/c = 0,75$ terlihat juga ketidakteraturan pada IS-75 dikarenakan adanya *cavity*. Sementara itu, untuk konfigurasi OS-25 dan OS-75 memiliki tren yang sama dengan airfoil tanpa *cavity* sehingga tidak terjadi perbedaan yang berarti. Hal ini karena *vortex* yang terbentuk berada pada *inner side* sehingga pemberian *cavity* pada *outer side* tidak berpengaruh secara signifikan.

Gambar 4.10 (c) menggambarkan bahwa *cavity* dengan konfigurasi IS-75 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *coefficient of pressure* pada rentang posisi $0,7 < x/c < 1$ bagian *inner side*. Kenaikan nilai *coefficient of pressure* yang signifikan tersebut karena seperti terlihat pada Gambar 4.8 *vortex* yang terbentuk di dalam *cavity* cukup stabil sehingga mampu memberikan tambahan momentum yang juga menunjukkan adanya *streamline reattachment* pada gambar 4.8. Selain itu, pada Gambar 4.10 (c) untuk IS-75 juga ada kenaikan nilai *coefficient of pressure* di rentang $0,85 < x/c < 0,95$. Kenaikan ini karena pemberian *cavity* pada posisi tersebut kemungkinan mampu menekan separasi aliran, terlihat pada Gambar 4.9 bahwa luasan berwarna oranye dan kuning lebih kebelakang menuju *trailing edge* dibandingkan dengan tanpa *cavity*. Untuk *cavity* dengan konfigurasi IS-25 terlihat adanya kenaikan *coefficient of pressure* pada rentang posisi $0 < x/c < 0,3$ bagian *inner side*. Kenaikan tersebut dikarenakan *vortex* yang tercipta di dalam *cavity* cukup stabil sehingga ada kemungkinan menambah momentum aliran. Selain itu juga dapat dilihat pada Gambar 4.8 bahwa terdapat *streamline reattachment* sehingga mampu menekan separasi aliran. Disisi lain, *cavity* dengan konfigurasi OS-25 dan OS-75 tidak memberikan pengaruh yang signifikan dan memiliki tren yang sama dengan airfoil tanpa *cavity* seperti terlihat pada Gambar 4.10 (c). *Vortex* yang terbentuk pada konfigurasi ini juga terlihat adanya distorsi sehingga menghasilkan *vortex* kedua.

Gambar 4.10 (d) merupakan grafik *coefficient of pressure* pada sudut azimut 292° . Terlihat bahwa ada perbedaan yang sangat signifikan khususnya untuk *cavity* dengan konfigurasi IS-25. Terlihat bahwa kenaikan yang terjadi dimulai dari posisi $0,25 < x/c < 1$. Peningkatan ini seperti pada penjelasan sebelumnya, terlihat pada Gambar 4.7 bahwa pada bagian *inner side* berwarna lebih hijau yang menandakan adanya kemungkinan bahwa aliran masih *attach* dengan permukaan airfoil. Selain itu juga *vortex* didalam *cavity* cukup stabil dengan mampu memenuhi ruangan *cavity* meskipun pusat dari *vortex* tidak berada tepat di pusat geometri *cavity*. Adanya *vortex* tersebut juga memungkinkan adanya penambahan momentum sehingga dapat menekan separasi aliran. Selain itu *trailing edge vortex* yang terbentuk juga

sudah menjauh dari permukaan sudu turbin dan sudah terlepas. Konfigurasi OS-75 juga mengalami hal yang demikian sehingga terjadi peningkatan nilai *coefficient of pressure* di sekitar posisi $0,75 < x/c < 1$. Lain halnya dengan *cavity* dengan konfigurasi OS-25 dan IS-75 yang memiliki tren yang mirip dengan sudu tanpa *cavity*. Namun demikian IS-75 mampu memberikan sedikit kenaikan nilai *coefficient of pressure* pada bagian *inner side* karena adanya *cavity* yang kemungkinan mampu menambah momentum aliran. Sebaliknya untuk konfigurasi OS-25 disekitar $0,45 < x/c < 1$ terjadi penurunan nilai *coefficient of pressure*. Terlihat pada Gambar 4.8 bahwa pada sudut azimuth 292° , *trailing edge vortex* yang terbentuk pada bagian *outer side* sudu turbin dengan konfigurasi *cavity* OS-25 lebih besar dan berada pada permukaan sudu turbin.



Gambar 4.10 Grafik *coefficient of pressure* pada $TSR = 0,9$

4.5 Analisis Karakteristik Pada Drag Reduction

Analisis karakteristik reduksi gaya *drag* yang terjadi akibat penambahan *cavity* pada airfoil memberikan dampak pada gaya tangensial yang dihasilkan yang secara tidak langsung juga berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan oleh turbin Darrieus. Pada subbab sebelumnya telah banyak disinggung terkait peningkatan performa pada airfoil dengan *cavity* apabila dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity*. Secara umum, output daya yang dihasilkan oleh *cavity* dengan konfigurasi peletakan IS-75 memberikan kenaikan pada *power coefficient* di seluruh rentang TSR yang diuji dengan kenaikan tertinggi terjadi pada $TSR = 0,9$. Analisis saat ini dapat menjelaskan lebih jauh daripada apa yang sudah disebutkan pada subbab sebelumnya.

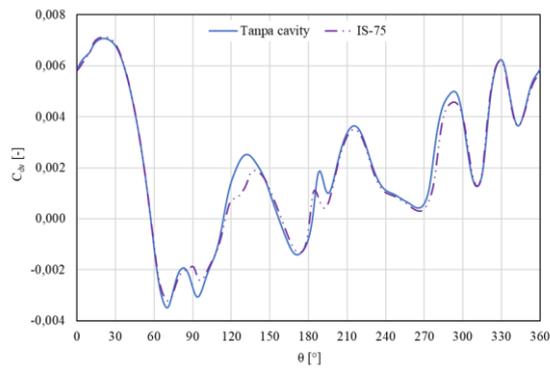
Mekanisme peningkatan performa pada turbin Darrieus dengan *cavity* dikonsentrasikan pada upaya reduksi gaya *drag* yang ada dengan pemberian *cavity*.

Gambar 4.11 menampilkan grafik *drag coefficient* (*viscous*, *pressure*, dan *total*) satu sudu turbin pada satu putaran penuh. *Viscous drag* atau *friction drag* merupakan gaya hambat yang disebabkan oleh viskositas fluida (dalam hal ini udara) sedangkan *pressure drag* atau *form drag* disebabkan oleh perbedaan tekanan statik disekitar sudu turbin Darrieus.

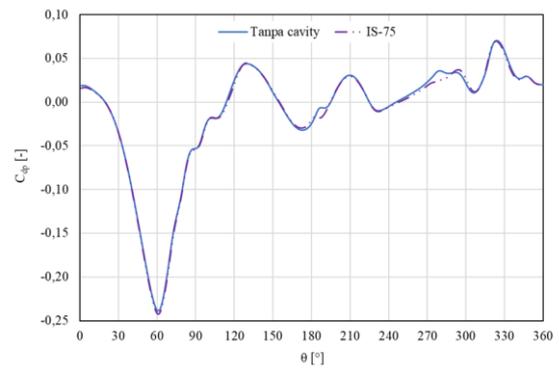
Gambar 4.11 (a) menunjukkan bahwa terdapat penurunan *viscous drag coefficient* di mayoritas sudut azimut. Penurunan *viscous drag coefficient* terlihat signifikan pada rentang sudut azimut $120^\circ < \theta < 140^\circ$. Hal tersebut juga didukung bahwa terdapat penurunan terhadap nilai rata – rata *viscous drag coefficient* di seluruh sudut azimut sebesar 4,76%. Penurunan *viscous drag coefficient* yang terjadi lebih didominasi pada daerah *downwind* dibandingkan daerah *upwind*. Sekitar 66% penurunan yang terjadi merupakan kontribusi pada daerah *downwind*. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan pemberian *cavity* dengan konfigurasi IS-75 memberikan dampak hilangnya sebagian permukaan solid menyebabkan *viscous force* juga berkurang. Fluida yang mengalir diatas *cavity* juga bertindak layaknya “*rolling bearing*” yang mana *vortex* di dalam *cavity* kemungkinan mampu memberikan tambahan momentum sehingga *viscous drag* yang terjadi malah searah dengan arah aliran seperti terlihat pada Gambar 4.12 yang menunjukkan vektor kecepatan relatif berwarna biru muda mendekati hijau di sepanjang bagian solid airfoil yang hilang.

Grafik *pressure drag coefficient* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11 (b) memperlihatkan bahwa secara umum terjadi penurunan *pressure drag coefficient* meskipun kecil. Pada posisi sudut azimut penurunan ini terlihat cukup signifikan seperti pada $240^\circ < \theta < 300^\circ$. Penurunan *pressure drag coefficient* lebih besar terjadi pada daerah *upwind* dibandingkan dengan daerah *downwind*. Seperti terlihat pada Gambar 4.8, bahwa pada sudut azimut 61° dan 130° terdapat *trailing edge vortex* yang besar pada *inner side* airfoil. Peletakan *cavity* pada posisi ini (konfigurasi IS-75) memberikan pengaruh terhadap berkurangnya luasan *trailing edge vortex* yang terjadi. Dengan demikian *pressure force* pun juga akan berkurang. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.11 (b) bahwa grafik IS-75 pada 61° sedikit lebih rendah dibandingkan dengan grafik tanpa *cavity*.

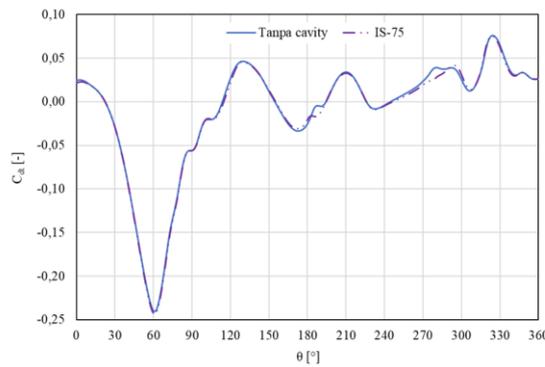
Gambar 4.11 (c) merupakan grafik *total drag coefficient* sebagai fungsi sudut azimut. Nilai *total drag coefficient* merupakan gabungan antara *viscous drag coefficient* dan *pressure drag coefficient*. Terlihat bahwa tren grafik *total drag coefficient* lebih mirip dengan *pressure drag coefficient*. Hal ini menandakan bahwa gaya *drag* yang dialami turbin Darrieus didominasi oleh *pressure drag*. *Total drag coefficient* mengalami penurunan pada airfoil dengan konfigurasi *cavity* IS-75 dibandingkan dengan airfoil tanpa *cavity* dengan nilai rata – rata *drag reduction rate* sebesar 11,12%. Adanya penurunan *total drag coefficient* tersebut berkontribusi terhadap naiknya gaya tangensial yang dialami oleh turbin Darrieus seperti pada Gambar 4.7. Dengan demikian maka torsi yang dihasilkan akan lebih besar yang akhirnya daya output yang dihasilkan juga akan lebih besar.



(a) *Viscous drag coefficient*

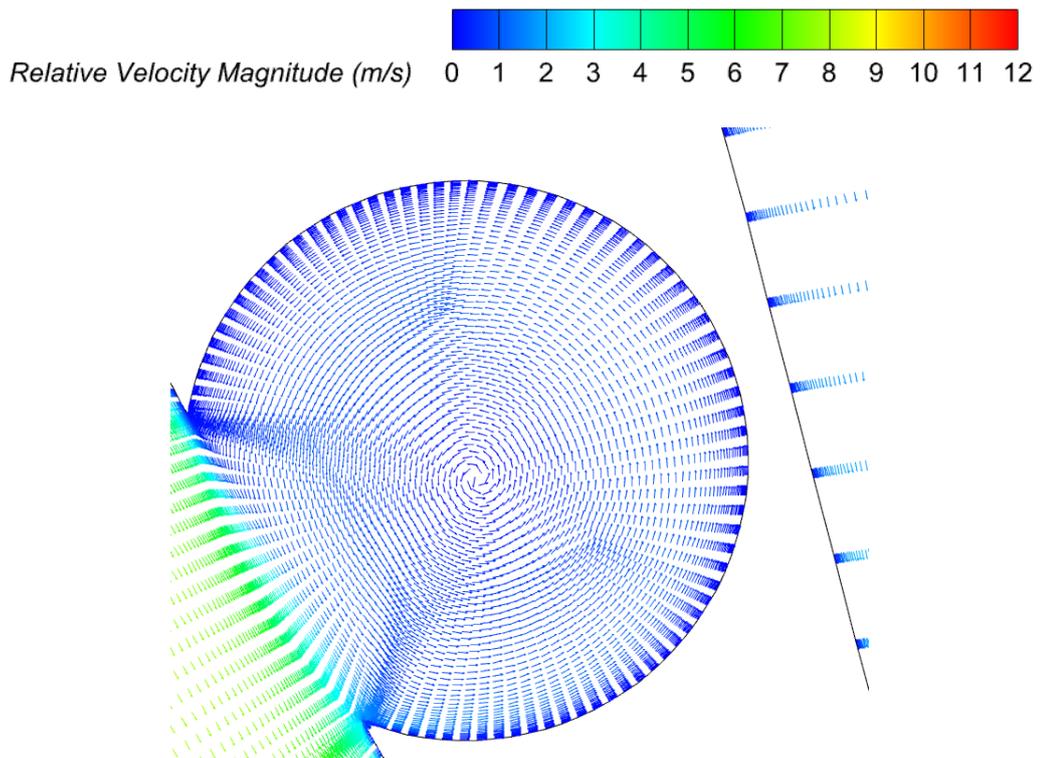


(b) *Pressure drag coefficient*



(c) *Total drag coefficient*

Gambar 4.11 *Viscous, pressure, dan total drag coefficient sebagai fungsi sudut azimuth*



Gambar 4.12 *Vektor kecepatan relatif disekitar cavity pada $\theta = 292^\circ$*

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pengaruh variasi posisi *blade surface cavity* pada performa turbin Darrieus telah dilakukan pada penelitian ini sehingga dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pemberian *cavity* yang terletak pada *inner side* dekat dengan *trailing edge* (IS-75) memberikan kenaikan baik pada *coefficient of power* (C_p) maupun *coefficient of torque* (C_m) diseluruh rentang TSR yang diuji. Kenaikan C_p dan C_m tertinggi terjadi pada $TSR = 0,9$ sebesar 6,87%.
2. *Cavity* dengan konfigurasi IS-75 memberikan peningkatan performa tanpa menurunkan rentang operasional TSR sehingga konfigurasi ini dipertimbangkan sebagai konfigurasi yang paling optimal.
3. *Vortex* di dalam *cavity* mampu menahan separasi aliran yang ditunjukkan dengan adanya *streamline reattachment*. Selain itu, area separasi juga tampak berkurang.
4. *Cavity* dengan konfigurasi IS-75 mampu menurunkan gaya *drag* (*viscous drag* dan *pressure drag*) dengan nilai rata – rata *drag reduction rate* sebesar 11,12%.

5.2 Saran

Berikut adalah saran – saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya, diantaranya:

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait parameter geometri *cavity* seperti diameter *cavity*, posisi *cavity*, *cavity mouth*, jumlah *cavity*, dan bentuk *cavity* sehingga didapatkan geometri yang optimum.
2. Perlu adanya penelitian tentang *cavity* sebagai *active flow control* sehingga didapatkan peningkatan performa yang lebih tinggi.
3. Perlu dilakukan penelitian dengan simulasi numerik 3D sehingga akurasi hasil meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Almotairi, A., Mustapha, F., Ariffin, M., & Zahari, R. (2016). Synergy of Savonius and Darrieus types for vertical axis wind turbine. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 3, 25-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.21833/ijaas.2016.10.005>
- ANSYS, Inc. (2013). Mesh Metric. Dalam I. ANSYS, *ANSYS Meshing User's Guide* (hal. 136-141).
- Bhutta, M. M., Hayat, N., Farooq, A. U., Ali, Z., Jamil, S. R., & Hussain, Z. (2012). Vertical axis wind turbine—A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1926-1939. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.004>
- Castelli, M. R., Ardizzon, G., Battisti, L., Benini, E., & Pavesi, G. (2010). Modeling strategy and numerical validation for a darrieus vertical axis micro-wind turbine. *Proceedings of the ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress & Exposition*. Vancouver, British Columbia, Canada.
- Dabiri, J. O. (2011). Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of renewable and sustainable energy*, 3(4), 043104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/1.3608170>
- d'Alencon, J. P., & Silva-Llanca, L. (2016). Two-dimensional numerical analysis of a low-re turbulent impinging synthetic jet. *2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. Las Vegas, Nevada, USA: IEEE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ITHERM.2016.7517644>
- Daroczy, L., Janiga, G., Petrasch, K., Webner, M., & Thevenin, D. (2015). Comparative analysis of turbulence models for the aerodynamic simulation of H-Darrieus rotors. *Energy*, 90, 680-690. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.102>
- Dessoky, A., Bangga, G., Lutz, T., & Kramer, E. (2019). Aerodynamic and aeroacoustic performance assessment of H-rotor darrieus VAWT equipped with wind-lens technology. *Energy*, 175, 76-97. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.066>
- Elkhoury, M., Kiwata, T., & Aoun, E. (2015). Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 139, 111-123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.004>
- Fatehi, M., Nili-Ahmadabadi, M., Nematollahi, O., Minaiean, A., & Kim, K. C. (2019). Aerodynamic performance improvement of wind turbine blade by cavity shape optimization. *Renewable Energy*, 132, 773-785. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.047>
- Hand, B., Kelly, G., & Cashman, A. (2021). Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110699, 139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110699>
- Herbert, G. M., Iniyar, S., Sreevalsan, E., & Rajapandian, S. (2007). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy Reviews*, 11(6), 1117-1145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.004>
- Jain, S., & Saha, U. K. (2020). On the influence of blade thickness-to-chord ratio on dynamic stall phenomenon in H-type Darrieus wind rotors. *Energy Conversion and Management*, 218(113024). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113024>

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2020). *Rencana strategis direktorat jenderal energi baru terbarukan dan konservasi energi 2020-2024*. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi.
- Lee, Y.-T., & Lim, H.-C. (2015). Numerical study of the aerodynamic performance of a 500 W Darrieus-type vertical-axis wind turbine. *Renewable Energy*, *83*, 407-415. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.043>
- Liu, Y., Li, P., He, W., & Jiang, K. (2020). Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, *206*, 104263. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104263>
- Lynn, P. (2012). *Onshore and offshore wind energy an introduction*. John Wiley & Sons Ltd.
- McLaren, K., Tullis, S., & Ziada, S. (2012). Computational fluid dynamics simulation of the aerodynamics of a high solidity, small-scale vertical axis wind turbine. *Wind Energy*, *15*(3), 349-361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/we.472>
- Menter, F. (1993). Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows. *23rd fluid dynamics, plasmadynamics, and lasers conference*. Orlando, Florida. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, *32*(8), 1598-1605. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Mohamed, M. (2013). Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance. *Energy*, *57*, 495-504. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.004>
- Mohamed, M. (2019). Criticism study of J-Shaped darrieus wind turbine: Performance evaluation and noise generation assessment. *Energy*, *177*, 367-385. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.102>
- Rezaeiha, A., Montazeri, H., & Blocken, B. (2018). Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: Guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. *Energy Conversion and Management*, *156*, 301-316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.026>
- Roshan, M. Y., Khaleghinia, J., Nimvari, M. E., & Salarian, H. (2021). Performance improvement of Darrieus wind turbine using different cavity layouts. *Energy Conversion and Management*, *246*, 114693. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114693>
- Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). *Outlook Energi Indonesia 2019*. <https://doi.org/https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-outlook-energi-indonesia-2019-bahasa-indonesia.pdf>
- Sheldahl, R. (1981). Comparison of field and wind-tunnel Darrieus wind-turbine data. *Journal of Energy*, *5*(4), 254-256. <https://doi.org/https://doi.org/10.2514/3.48036>
- Siddiqui, M. S., Durrani, N., & Akhtar, I. (2015). Quantification of the effects of geometric approximations on the performance of a vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, *74*, 661-670. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.068>
- Sobhani, E., Ghaffari, M., & Maghrebi, M. J. (2017). Numerical investigation of dimple effects on darrieus vertical axis wind turbine. *Energy*, *133*, 231-241. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.105>
- Tjiu, W., Marnoto, T., Mat, S., Ruslan, M. H., & Sopian, K. (2015). Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations.

- Renewable energy*, 75, 50-67.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.038>
- Vaishnav, E. (2010). *An investigation on the aerodynamic performance of a vertical axis wind turbine*. Oklahoma State University.
- Wu, Z., Li, S., Liu, M., Wang, S., Yang, H., & Liang, X. (2019). Numerical research on the turbulent drag reduction mechanism of a transverse groove structure on an airfoil blade. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 13(1), 1024-1035.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19942060.2019.1665101>
- Zamani, M., Maghrebi, M. J., & Varedi, S. R. (2016). Starting torque improvement using J-shaped straight-bladed Darrieus vertical axis wind turbine by means of numerical simulation. *Renewable Energy*, 95, 109–126.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.069>

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Banyuwangi, 28 November 1999, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal yaitu di SDN 1 Karang Sari, SMPN 1 Genteng, dan SMAN 1 Genteng. Setelah lulus dari SMAN 1 Genteng pada tahun 2018, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 0211184000062. Di Departemen Teknik Mesin Penulis mengambil Bidang Studi Konversi Energi. Selama menempuh perkuliahan, Penulis turut aktif dalam berbagai kegiatan baik dalam dan luar kampus. Pada tahun pertama perkuliahan Penulis menjadi salah satu dari tujuh perwakilan ITS dalam kompetisi ONMIPA – PT Tahun 2019 Tingkat Nasional pada bidang Fisika. Pada tahun ketiga perkuliahan Penulis mendapat amanah untuk menjadi wakil ketua BLM FTIRS. Penulis juga aktif sebagai Asisten Praktikum Mekanika Fluida Dasar II dan Perpindahan Panas serta Grader mata kuliah Analisa Numerik dan Mesin Konversi Energi. Pada tahun keempat perkuliahan penulis terlibat dalam program MBKM Kedaireka antara PT PJB UP. Paiton dengan ITS sebagai tim mechanical yang bertanggung jawab dalam perancangan sistem mekanik dan *maintenance* turbin Hidrokinetik. Selain itu Penulis juga aktif baik sebagai panitia maupun peserta di beberapa kegiatan kepanitiaan dan pengembangan diri.