



TUGAS AKHIR - MN 184802

**ANALISIS PENGARUH *DIMPLED SURFACE* PADA  
*FLETTNER ROTOR SAIL* TERHADAP KOEFISIEN *LIFT*  
DAN *DRAG* MENGGUNAKAN SIMULASI  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

Aditya Bagaskara  
NRP 0411154000011

Dosen Pembimbing  
Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019





**TUGAS AKHIR - MN 184802**

**ANALISIS PENGARUH *DIMPLED SURFACE* PADA  
*FLETTNER ROTOR SAIL* TERHADAP KOEFISIEN *LIFT*  
DAN *DRAG* MENGGUNAKAN SIMULASI  
*COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

**Aditya Bagaskara  
NRP 0411154000011**

**Dosen Pembimbing  
Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2019**



**FINAL PROJECT - MN 184802**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF DIMPLED SURFACE ON  
LIFT AND DRAG COEFFICIENT OF FLETTNER ROTOR  
SAIL USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC**

**Aditya Bagaskara  
NRP 0411154000011**

**Supervisor  
Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
SURABAYA  
2019**

# LEMBAR PENGESAHAN

## **ANALISIS PENGARUH *DIMPLED SURFACE* PADA *FLETTNER ROTOR SAIL* TERHADAP KOEFISIEN *LIFT* DAN *DRAG* MENGGUNAKAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

### TUGAS AKHIR

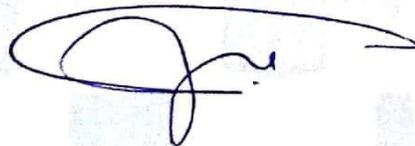
Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ADITYA BAGASKARA**  
NRP 0411154000011

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

Dosen Pembimbing



Aries Sulisetyono, S.T., MA.Sc., Ph.D.  
NIP 19710320 199512 1 002

Mengetahui,  
Kepala Departemen Teknik Perkapalan



Inde Wasis Dwi Aryawan, M.Sc., Ph.D.  
NIP 19640210 198903 1 001

SURABAYA, 15 JULI 2019

# LEMBAR REVISI

## **ANALISIS PENGARUH *DIMPLED SURFACE* PADA *FLETTNER ROTOR SAIL* TERHADAP KOEFISIEN *LIFT* DAN *DRAG* MENGGUNAKAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

### **TUGAS AKHIR**

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 01 Juli 2019

Program Sarjana Departemen Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**ADITYA BAGASKARA**  
NRP 0411154000011

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Hasanudin, S.T., M.T.

  
.....

2. Prof. Ir. I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.

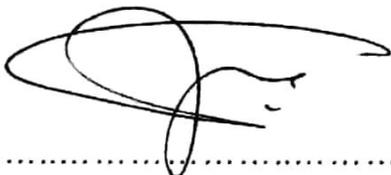
  
.....

3. Ahmad Nasirudin, S.T., M.Eng.

  
.....

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.

  
.....

SURABAYA, 15 JULI 2019

Dipersembahkan kepada kedua orang tua atas segala dukungan dan doanya

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh *Dimpled Surface* Pada *Flettner Rotor Sail* Terhadap Koefisien *Lift* dan *Drag* Menggunakan Simulasi *Computational Fluid Dynamic*” ini dengan baik.

Pada kesempatan ini Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu penyelesaian Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Kedua orang tua yang selalu memberikan semangat dan bantuan serta doa selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
2. Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.d. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan dan motivasinya selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
3. Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan sarannya untuk perbaikan Laporan Tugas Akhir ini;
4. Teman-teman seperjuangan Tugas Akhir, Aditya Prakosa Wibawa, Zambilly Ahmad W, dan Ihsan F yang selalu menemani dan bisa diajak diskusi selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
5. Arek – arek Gang Makam H18, Aditya Prakosa Wibawa, Dendy Satriyo W, Agam Aditya W, Bagaskoro Dwi P, dan Fathan Nurudin yang selalu menemani dan bisa diajak untuk berdiskusi dan memberikan saran selama pengerjaan dan penyusunan Tugas Akhir ini;
6. Teman-teman angkatan P55 Samudra Raksa yang selama ini selalu menemani dikala suka dan duka ketika kuliah;
7. Pihak-pihak lain yang turut membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis tuliskan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 15 Juli 2019

Aditya Bagaskara

# **ANALISIS PENGARUH *DIMPLED SURFACE* PADA *FLETTNER ROTOR SAIL* TERHADAP KOEFISIEN *LIFT* DAN *DRAG* MENGGUNAKAN SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC***

Nama Mahasiswa : Aditya Bagaskara  
NRP : 0411154000011  
Departemen / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : Aries Sulistyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.

## **ABSTRAK**

Krisis energi yang sedang terjadi dan pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan bahan bakar fosil membuat industri transportasi termasuk bidang perkapalan mulai melakukan penghematan bahan bakar salah satunya dengan cara mengkombinasikan penggunaan bahan bakar minyak dan sumber energi yang terbarukan. Di Indonesia sendiri telah dikembangkan kapal KLM Maruta Jaya 900 DWT, kapal ini merupakan kapal *general cargo* yang menggunakan sistem penggerak layar dan motor DC. Hal tersebut yang mendasari penelitian ini untuk membuat sebuah desain sistem penggerak tenaga angin yang dalam penelitian ini adalah *Flettner Rotor* untuk mendapatkan koefisien *lift* dan *drag* yang paling optimum. Desain *Flettner Rotor* yang dibuat terdapat cekungan pada permukaan (*dimpled surface*). Terdapat 3 model *Flettner Rotor* yaitu satu *smooth surface* dan dua model dengan ukuran cekungan (*dimpled*) yang berbeda. Kecepatan angin dan putaran rotor divariasikan berdasarkan *spin ratio*. Variasi *spin ratio* yang digunakan adalah 1, 1.5, 2, 3, dan 4. Sedangkan variasi sudut angin yang digunakan adalah 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, dan 330°. Analisis dilakukan secara 2 dimensi menggunakan simulasi dengan *software* CFD. Validasi dilakukan dengan menggunakan data hasil pengujian dari *wind tunnel* yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya. Penerapan *dimpled surface* pada rotor dapat meningkatkan koefisien *lift* sebesar 69,6% dan menurunkan koefisien *drag* sebesar 14,76%. Hasil ini dapat dicapai pada Model C dengan *Spin Ratio* 4. Verifikasi gaya dorong rotor dilakukan pada KLM Maruta Jaya 900 DWT dan dapat menghasilkan kecepatan maksimal kapal sebesar 8,514 knot. Kecepatan ini dicapai dengan penggunaan dua rotor Model C dengan *Spin Ratio* 4 pada sudut angin 90° dan 270°.

Kata kunci : koefisien *lift*, koefisien *drag*, *Flettner rotor sail*, CFD

# **ANALYSIS OF THE EFFECT OF DIMPLED SURFACE ON LIFT AND DRAG COEFFICIENT OF FLETTNER ROTOR SAIL USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC**

Author : Aditya Bagaskara  
Student Number : 0411154000011  
Department / Faculty : Naval Architecture / Marine Technology  
Supervisor : Aries Sulisetyono, S.T., M.A.Sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Energy crisis and environmental pollution caused by the use of fossil fuels make the transportation industry, including the shipping sector start to save fuel. One of the way to save fuel is by combining the use of fuel oil and renewable resources. In Indonesia, KLM Maruta Jaya 900 DWT have been developed to answer the problems. KLM Maruta Jaya 900 DWT is a general cargo ship that use sail and DC motor as a propulsion system. This is what underlies this research to create a design of a wind powered propulsion system which in this study is Flettner Rotor to obtain the most optimum lift and drag coefficients. There are three models of Flettner Rotor which are one model smooth surface and two models with different dimpled surface size. The variation of wind speed and rotation speed of rotor based on spin ratio. The variation of spin ratio are 1, 1.5, 2, 3, and 4. While the variation of apparent wind angle are 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, and 330°. The analysis is carried on 2 dimension using computational fluid dynamic *software* CFD. Validation is done using data from wind tunnel testing that have been carried out in previous studies. The application of dimpled surface on the rotor can increase lift coefficient by 69.6 % and reduce the drag coefficient by 14.76 %. This result can be achieved on Model C at spin ratio 4. Verification of the thrust that produced by rotor is carried out on KLM Maruta Jaya 900 DWT and can produce maximum ship speed at 8.514 knots. This speed is achieved using two rotors Model C on deck with spin ratio 4 at 90° and 270° wind angle.

Keywords: lift coefficient, drag coefficient, flettner rotor sail, CFD

# DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR REVISI .....	iv
HALAMAN PERUNTUKAN.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR SIMBOL .....	xvi
BAB I PENDAHULUAN .....	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Perumusan Masalah .....	2
I.3. Tujuan .....	2
I.4. Batasan Masalah.....	3
I.5. Manfaat .....	3
I.6. Hipotesis.....	3
BAB II STUDI LITERATUR .....	5
II.1. Dasar Teori.....	5
II.1.1. <i>Magnus Effect</i> .....	5
II.1.2. <i>Lift dan Drag</i> .....	8
II.1.3. <i>Computational Fluid Dynamic</i> .....	9
II.2. Tinjauan Pustaka .....	14
II.2.1. KLM Maruta Jaya 900 DWT.....	14
II.2.2. Jenis – Jenis Alat Penggerak Tenaga Angin.....	15
II.2.3. <i>Flettner Rotor Sail</i> .....	19
II.2.4. Konfigurasi <i>Flettner Rotor Sail</i> .....	24
II.2.5. Gaya – gaya yang Bekerja Pada <i>Flettner Rotor</i> .....	26

II.2.6. Parameter yang Mempengaruhi performa <i>Flettner Rotor</i> .....	27
II.2.7. Karakteristik Aerodinamika Benda dengan <i>Dimpled Surface</i> .....	29
BAB III METODOLOGI .....	33
III.1. Studi Literatur .....	33
III.2. Pengumpulan Data .....	33
III.3. Pemodelan Rotor .....	33
III.4. Simulasi Pada <i>software</i> CFD .....	34
III.4.1. Tahap <i>Pre-Processor</i> .....	35
III.4.2. Tahap <i>Solver Set-Up</i> .....	42
III.4.3. Tahap <i>Post Processor</i> .....	52
III.5. Validasi .....	58
III.6. Analisis Data dan Pembahasan .....	58
III.7. Kesimpulan .....	59
III.8. Bagan Alir .....	59
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....	61
IV.1. <i>Grid Independence Study</i> .....	61
IV.2. Validasi .....	63
IV.3. Hasil Simulasi CFD .....	65
IV.4. Analisis Pengaruh <i>Dimpled Surface</i> .....	70
IV.5. <i>Layout</i> Pemasangan Rotor Pada Kapal .....	78
IV.6. Pengaruh Pemasangan Rotor Terhadap Hambatan Kapal .....	83
IV.7. Analisis Kontribusi Gaya Dorong pada Kapal .....	86
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	101
V.1. Kesimpulan .....	101
V.2. Saran .....	101
DAFTAR PUSTAKA .....	103
LAMPIRAN	
LAMPIRAN A KONTUR KECEPATAN	
LAMPIRAN B KONTUR TEKANAN	
LAMPIRAN C <i>STREAMLINE</i>	
LAMPIRAN D GRAFIK KOEFISIEN <i>LIFT</i>	
LAMPIRAN E GRAFIK KOEFISIEN <i>DRAG</i>	
BIODATA PENULIS	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Ilustrasi <i>Magnus Effect</i> .....	5
Gambar II. 2 <i>Kutta – Joukowski Lift Theorem for a Cylinder</i> .....	6
Gambar II. 3 <i>Rotor Plane Model</i> .....	7
Gambar II. 4 <i>Flettner Rotor Ship</i> .....	7
Gambar II. 5 Gaya <i>Lift</i> dan <i>Drag</i> .....	8
Gambar II. 6 Metode Pemodelan Aliran Pada CFD.....	11
Gambar II. 7 KLM Maruta Jaya 900 DWT.....	15
Gambar II. 8 Kapal <i>Wind Star</i> .....	16
Gambar II. 9 Kapal <i>Usuki Poineer</i> .....	17
Gambar II. 10 Kapal <i>Shin Aitoku Maru</i> .....	17
Gambar II. 11 Kapal <i>E-Ship</i> .....	18
Gambar II. 12 Kapal dengan <i>turbosail</i> .....	18
Gambar II. 13 Kapal dengan <i>skysail</i> .....	19
Gambar II. 14 Kapal <i>Schooner Buckau</i> .....	20
Gambar II. 15 Kapal <i>Barbara</i> .....	20
Gambar II. 16 Kapal <i>Tracker</i> .....	21
Gambar II. 17 Model kapal <i>Greenwave</i> .....	22
Gambar II. 18 Kapal <i>E-Ship 1</i> .....	22
Gambar II. 19 Perbandingan Dimensi Layar dan Rotor.....	23
Gambar II. 20 Koefisien <i>Lift</i> Alat Penggerak Tenaga Angin.....	23
Gambar II. 21 Komponen <i>Flettner Rotor</i> .....	24
Gambar II. 22 Konfigurasi Sistem Pada <i>Flettner Rotor</i> .....	25
Gambar II. 23 Gaya – Gaya yang Bekerja Saat Kapal Berlayar.....	26
Gambar II. 24 Komponen Gaya Pada <i>Flettner Rotor Sail</i> .....	28
Gambar II. 25 Variasi variabel.....	28
Gambar II. 26 Potongan Melintang Bola Golf.....	30
Gambar II. 27 Perbandingan <i>Cd</i> (tanpa putaran).....	30
Gambar II. 28 Perbandingan <i>Cl</i> dan <i>Cd</i> (dengan putaran).....	31
Gambar III. 1 Potongan Melintang Model Rotor.....	34
Gambar III. 2 Model Rotor yang Sudah di Impor.....	36

Gambar III. 3 Domain Satu Rotor .....	37
Gambar III. 4 Domain Dua Rotor.....	37
Gambar III. 5 <i>Named Selection</i> Model Satu Rotor.....	38
Gambar III. 6 <i>Named Selection</i> Model Dua Rotor .....	39
Gambar III. 7 Hasil <i>Meshing</i> Satu Rotor .....	41
Gambar III. 8 Hasil <i>Meshing</i> Dua Rotor .....	42
Gambar III. 9 Detail <i>Meshing</i> Pada Rotor.....	42
Gambar III. 10 Pengaturan pada <i>General</i> .....	43
Gambar III. 11 Pengaturan <i>Viscous Model</i> .....	44
Gambar III. 12 Pengaturan <i>Velocity Inlet</i> .....	45
Gambar III. 13 Pengaturan <i>Pressure Outlet</i> .....	45
Gambar III. 14 Pengaturan <i>Wall</i> .....	46
Gambar III. 15 Pengaturan <i>Mesh Interfaces</i> .....	47
Gambar III. 16 <i>Script</i> pada UDF .....	48
Gambar III. 17 Pengaturan <i>Compiled UDFs</i> .....	48
Gambar III. 18 Pengaturan <i>Mesh Method</i> pada <i>Dynamic Mesh</i> .....	49
Gambar III. 19 Pengaturan <i>Dynamic Mesh Zones</i> .....	50
Gambar III. 20 Pengaturan <i>Solution Methods</i> .....	51
Gambar III. 21 Pengaturan <i>Solution Initialization</i> .....	51
Gambar III. 22 Pengaturan <i>Run Calculation</i> .....	52
Gambar III. 23 Pengaturan Kontur Kecepatan .....	53
Gambar III. 24 Hasil Visualisasi Kontur Kecepatan .....	54
Gambar III. 25 Pengaturan Kontur Tekanan .....	55
Gambar III. 26 Hasil Visualisasi Kontur Tekanan .....	56
Gambar III. 27 Pengaturan <i>Streamline</i> .....	57
Gambar III. 28 Hasil Visualisasi <i>Streamline</i> .....	58
Gambar III. 29 Bagan Alir.....	60
Gambar IV. 1 Grafik <i>Grid Independence</i> Model Satu Rotor.....	61
Gambar IV. 2 Grafik <i>Grid Independence</i> $C_L$ Model Dua Rotor .....	62
Gambar IV. 3 Grafik <i>Grid Independence</i> $C_D$ Model Dua Rotor .....	63
Gambar IV. 4 Grafik Validasi .....	64
Gambar IV. 5 Perbandingan SR – $C_l$ Model A .....	66
Gambar IV. 6 Perbandingan SR – $C_d$ Model A .....	66

Gambar IV. 7 Perbandingan SR – Cl Model B .....	67
Gambar IV. 8 Perbandingan SR – Cd Model B .....	67
Gambar IV. 9 Perbandingan SR – Cl Model C .....	68
Gambar IV. 10 Perbandingan SR – Cd Model C .....	68
Gambar IV. 11 Perbandingan SR – Cl Tiap Model.....	69
Gambar IV. 12 Perbandingan SR – Cd Tiap Model.....	69
Gambar IV. 13 Kontur <i>Turbulent Kinetic Energy</i> Model A dan Model C Pada SR 1 .....	71
Gambar IV. 14 Kontur <i>Vorticity Magnitude</i> Model A dan Model C Pada SR 1.....	72
Gambar IV. 15 Kontur <i>Turbulent Kinetic Energy</i> Model A dan Model C Pada SR 4.....	73
Gambar IV. 16 Kontur <i>Vorticity Magnitude</i> Model A dan Model C Pada SR 4.....	74
Gambar IV. 17 Kontur Tekanan Model A dan Model C Pada SR 1 .....	75
Gambar IV. 18 Distribusi Tekanan Model A dan Model C Pada SR 1.....	75
Gambar IV. 19 Kontur Tekanan Model A dan Model C Pada SR 4 .....	76
Gambar IV. 20 Distribusi Tekanan Model A dan Model C Pada SR 4.....	77
Gambar IV. 21 <i>Layout</i> Pemasangan Rotor Pada Kapal .....	79
Gambar IV. 22 Perbandingan Cl Rotor 1 dan Rotor 2 .....	80
Gambar IV. 23 Perbandingan Cd Rotor 1 dan Rotor 2 .....	81
Gambar IV. 24 Kontur Tekanan Rotor 1 dan 2 Pada Sudut Angin 0°.....	82
Gambar IV. 25 Kontur Kecepatan Rotor 1 dan 2 Pada Sudut Angin 0° .....	82
Gambar IV. 26 Diagram Polar <i>Driving Force</i> .....	89
Gambar IV. 27 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 0°.....	90
Gambar IV. 28 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 30°.....	91
Gambar IV. 29 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 60°.....	93
Gambar IV. 30 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 90°.....	94
Gambar IV. 31 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 120°.....	95
Gambar IV. 32 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 150°.....	96
Gambar IV. 33 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 180°.....	98
Gambar IV. 34 Diagram Polar Kecepatan Kapal .....	99

## DAFTAR TABEL

Tabel III. 1 Detail Variasi Model Rotor .....	34
Tabel III. 2 Detail Variasi <i>Spin Ratio</i> .....	34
Tabel III. 3 Spesifikasi Teknis Komputer .....	35
Tabel III. 4 Detail <i>Global Meshing</i> .....	40
Tabel III. 5 Detail <i>Meshing</i> Tiap Bagian .....	41
Tabel IV. 1 <i>Grid Independence</i> Model Satu Rotor.....	61
Tabel IV. 2 <i>Grid Independence</i> Model Dua Rotor.....	62
Tabel IV. 3 <i>Operating Condition</i> Pada <i>Wind Tunnel</i> .....	64
Tabel IV. 4 Validasi.....	64
Tabel IV. 5 Hasil $C_l$ dan $C_d$ Model.....	65
Tabel IV. 6 Ukuran Utama KLM Maruta Jaya 900 DWT .....	78
Tabel IV. 7 Titik Berat Layar Terhadap Dek Kapal.....	78
Tabel IV. 8 Hasil $C_l$ dan $C_d$ Simulasi Dua Rotor .....	80
Tabel IV. 9 Dimensi dan Berat Rotor.....	83
Tabel IV. 10 Berat Total Tiang Layar dan Layar .....	84
Tabel IV. 11 Selisih Berat Rotor dan Layar (Termasuk Tiang) .....	84
Tabel IV. 12 Data Hambatan KLM Maruta Jaya 900 DWT .....	85
Tabel IV. 13 Hambatan Angin Satu Rotor .....	85
Tabel IV. 14 Hambatan Angin Dua Rotor.....	86
Tabel IV. 15 Hambatan Total Kapal .....	86
Tabel IV. 16 Nilai $C_R$ dan $C_H$ 1 Rotor.....	87
Tabel IV. 17 Nilai $C_R$ dan $C_H$ 2 Rotor.....	87
Tabel IV. 18 Nilai $F_R$ dan $F_H$ 1 Rotor.....	88
Tabel IV. 19 Nilai $F_R$ dan $F_H$ 2 Rotor.....	88
Tabel IV. 20 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 0^\circ$ ) .....	90
Tabel IV. 21 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 30^\circ$ ) .....	91
Tabel IV. 22 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 60^\circ$ ) .....	92
Tabel IV. 23 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 90^\circ$ ) .....	93
Tabel IV. 24 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 120^\circ$ ) .....	95

Tabel IV. 25 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 150^\circ$ ) .....	96
Tabel IV. 26 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 180^\circ$ ) .....	97
Tabel IV. 27 Rekapitulasi Kecepatan Kapal .....	98

## DAFTAR SIMBOL

$C_L$	= koefisien <i>lift</i>
$C_D$	= koefisien <i>drag</i>
$F_L$	= gaya <i>lift</i> (N)
$F_D$	= gaya <i>drag</i> (N)
$V$	= kecepatan aliran (m/s)
$A$	= <i>frontal area</i> (m <sup>2</sup> )
$\rho$	= massa jenis fluida (kg/m <sup>3</sup> )
$Re$	= <i>Reynolds number</i>
$V$	= kecepatan fluida (m/s)
$f$	= gaya dari luar
$t$	= waktu
$SR$	= <i>spin ratio</i>
$U$	= kecepatan angin
$\Omega$	= kecepatan putar rotor (rad/s)
$F_R$	= <i>driving force</i> (N)
$F_H$	= <i>heeling force</i> (N)
$C_R$	= koefisien <i>driving force</i>
$C_H$	= koefisien <i>heeling force</i>
$\beta$	= sudut datangnya angin (°)
$D$	= diameter atau panjang benda (m)
$\mu$	= viskositas dinamis fluida (kg/m.s)
$\nabla$	= perpindahan

# BAB I

## PENDAHULUAN

### I.1. Latar Belakang Masalah

Pada kondisi sekarang ini dunia sedang menuju pada kondisi krisis energi. Termasuk juga negara Indonesia, seperti yang dikatakan oleh Direktur Hulu PT Pertamina, Syamsu Alam bahwa saat ini Indonesia sudah mengalami defisit minyak. Indonesia memang kaya akan potensi energi seperti energi surya, angin, dan air, ataupun panas bumi, tetapi tidak untuk minyak. Di dunia cadangan minyak mencapai 1.700 miliar barel. Sementara cadangan minyak di Indonesia hanya 3,7 juta barel saja atau hanya 0,2 persen dari total cadangan minyak di dunia. Hal ini dapat terjadi karena semakin berkurangnya ketersediaan sumber daya alam minyak bumi dan bertambahnya industri – industri yang membutuhkan pasokan minyak bumi. Dalam kondisi yang seperti ini, banyak negara – negara di dunia berlomba untuk mencari dan memanfaatkan sumber energi alternatif untuk menghadapi krisis energi terutama minyak. Kondisi yang seperti ini sangat berdampak bagi dunia perkapalan karena bahan bakar fosil masih menjadi sumber bahan bakar utama untuk menggerakkan kapal. Selain itu permasalahan yang terjadi yaitu terjadinya pencemaran lingkungan (pencemaran udara maupun pencemaran air laut) akibat dari penggunaan bahan bakar fosil yang menghasilkan gas buang SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub>.

Pada bidang perkapalan banyak negara – negara maju yang mengembangkan desain – desain kapal *Hybrid System Vessel* yang memanfaatkan sumber energi alternatif seperti energi angin dan energi matahari yang dikombinasikan dengan mesin diesel konvensional. Di negara Indonesia sendiri sebenarnya juga telah mengembangkan kapal *Hybrid System Vessel* contohnya adalah KLM. Maruta Jaya 900 DWT, kapal ini merupakan kapal *general cargo* yang menggunakan dua kombinasi sistem penggerak yaitu layar sebagai penggerak utama dan motor DC sebagai penggerak bantu. Sistem penggerak dengan memanfaatkan tenaga angin banyak sekali macamnya. Dari eksperimen yang telah dilakukan oleh Bergeson dan Greewald didapatkan hasil bahwa *Flettner Rotor Sail* memiliki performa yang lebih bagus daripada layar konvensional. Jika dibandingkan dengan jenis layar yang lain, *Flettner Rotor Sail* juga memiliki beberapa keunggulan yaitu tidak memakan banyak tempat pada dek kapal, tidak

memerlukan banyak kru untuk pengoperasiannya dan menghasilkan gaya dorong yang lebih besar.

Pengembangan desain dari *Flettner Rotor Sail* sudah banyak dilakukan baik itu dengan menggunakan metode analisis maupun eksperimen. Dari penelitian dan teori – teori menunjukkan bahwa gaya dorong dan koefisien *lift* dari *Flettner Rotor Sail* dipengaruhi oleh faktor desain dari *Flettner Rotor Sail* (diameter rotor, tinggi rotor, dan kecepatan putar/rpm dari rotor serta bentuk dari rotor itu sendiri), kondisi alam (kecepatan dan densitas udara), dan kecepatan dari kapal itu sendiri. Pemodelan desain *Flettner Rotor Sail* dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* ini diharapkan dapat mengatasi permasalahan di atas. Untuk memastikan ketepatan dari simulasi *Computational Fluid Dynamic* maka perlu dilakukan validasi dengan cara membandingkan dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Sehubungan dengan latar belakang di atas maka permasalahan yang akan dikaji dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh *dimpled surface* terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada *Flettner Rotor Sail*?
2. Bagaimana pengaruh SR (*Spin Ratio*) terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada *Flettner Rotor Sail*?
3. Bagaimana perbandingan koefisien *lift* dan koefisien *drag* antara *smooth surface Flettner Rotor Sail* dengan *dimpled surface Flettner Rotor Sail*?
4. Berapa besar gaya dorong yang dihasilkan oleh *Flettner Rotor Sail* dengan *dimpled surface*?

## **I.3. Tujuan**

Tujuan dari Tugas Akhir kali ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh *dimpled surface* terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada *Flettner Rotor Sail*
2. Mengetahui pengaruh SR (*Spin Ratio*) terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada *Flettner Rotor Sail*
3. Mengetahui perbandingan koefisien *lift* dan koefisien *drag* antara *smooth surface Flettner Rotor Sail* dengan *dimpled surface Flettner Rotor Sail*

4. Menghitung besar gaya dorong yang dihasilkan oleh *Flettner Rotor Sail* dengan *dimpled surface*

#### **I.4. Batasan Masalah**

Batasan – batasan masalah yang ada pada Tugas Akhir kali ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian yang dilakukan hanya membahas tentang aspek teknis
2. Tidak menghitung tentang stabilitas kapal yang dipasang *Flettner Rotor*
3. Tidak menghitung besar perubahan hambatan kapal akibat adanya perubahan sarat kapal karena pemasangan *Flettner Rotor*
4. Besarnya kecepatan angin dianggap sama disepanjang rotor
5. Analisis dilakukan secara 2 dimensi

#### **I.5. Manfaat**

Manfaat yang diharapkan dari Tugas Akhir kali ini adalah sebagai berikut :

1. Secara akademis, diharapkan hasil pengerjaan Tugas Akhir ini dapat menunjang proses belajar dan mengajar serta turut memajukan pendidikan yang ada di Indonesia.
2. Menjadi masukan dan referensi penelitian bagi pihak galangan ataupun desainer kapal dalam mendesain kapal yang menggunakan *Flettner Rotor Sail* sebagai system penggerak tambahan.

#### **I.6. Hipotesis**

Dari Tugas Akhir ini akan didapatkan *dimpled surface* pada *Flettner Rotor Sail* dapat meningkatkan koefisien *lift* dan mengurangi koefisien *drag*.

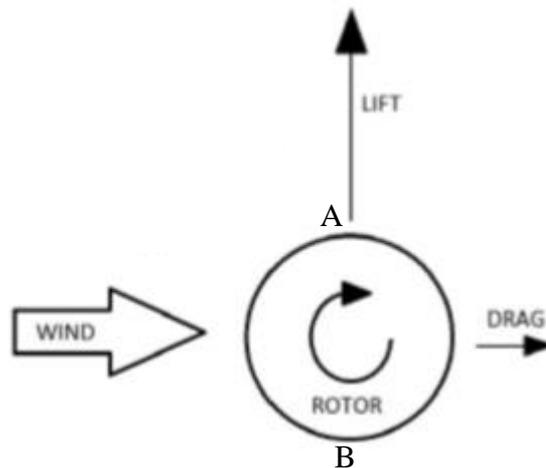
Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB II STUDI LITERATUR

### II.1. Dasar Teori

#### II.1.1. *Magnus Effect*

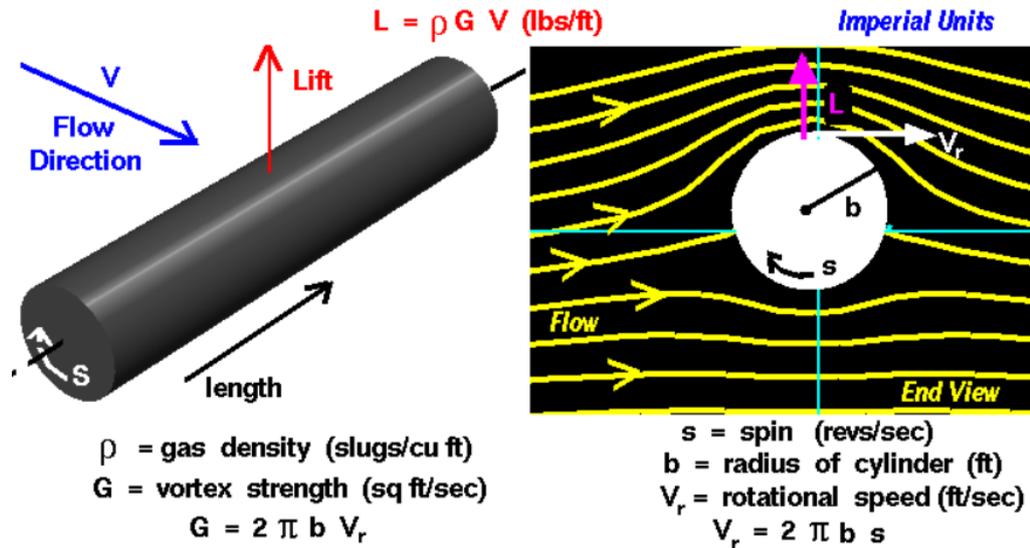
*Magnus Effect* ditemukan pada tahun 1852 oleh ilmuwan asal Jerman yang bernama Heinrich Gustav Magnus (Prandtl, 1925). *Magnus Effect* adalah sebuah fenomena yang terjadi pada sebuah benda yang berputar dan bergerak melalui sebuah aliran fluida sehingga benda tersebut akan mengalami perubahan (defleksi) arah gerak. *Magnus effect* umumnya terjadi pada sebuah benda yang berbentuk bulat seperti bola dan silinder. Fenomena ini disebabkan karena adanya perbedaan tekanan dan perbedaan kecepatan aliran fluida pada kedua sisi benda sebagai akibat dari gerakan putar benda. Perbedaan ini kemudian menghasilkan sebuah gaya *lift* yang tegak lurus terhadap arah aliran fluida dan arahnya tergantung oleh arah putaran benda. Selain gaya *lift*, pada benda juga dikenai gaya *drag* yang searah dengan arah aliran fluida. Gaya *drag* ini biasanya lebih kecil daripada gaya *lift* (Suominen, 2015). Kedua gaya tersebut diilustrasikan pada gambar berikut ini.



Gambar II. 1 Ilustrasi *Magnus Effect*  
(Suominen, 2015)

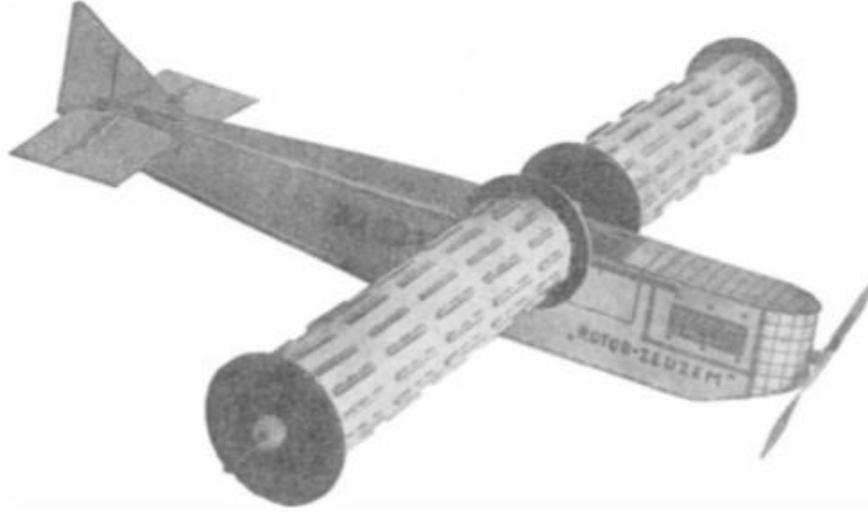
Pada sisi A kecepatan fluida dipercepat karena pada sisi ini putaran dari rotor searah dengan aliran fluida sehingga terjadi tekanan rendah. Sebaliknya pada sisi B kecepatan fluida diperlambat karena pada sisi ini putaran dari rotor berlawanan arah dengan aliran fluida sehingga terjadi tekanan tinggi pada sisi ini. Kedua hal ini mengakibatkan adanya gaya *lift*

yang arahnya ke atas (dari B ke A) atau dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Besarnya gaya *lift* yang dihasilkan dapat dihitung secara numerik dengan menggunakan Kutta – Joukowski *Lift Theorem for a Cylinder* seperti pada gambar berikut ini.



Gambar II. 2 Kutta – Joukowski *Lift Theorem for a Cylinder* (NASA, 2018)

*Magnus effect* dapat dilihat pada kehidupan sehari – hari salah satunya pada olahraga sepakbola dimana ketika seorang pemain menendang bola maka bola tersebut bergerak melengkung atau tidak lurus. Pemanfaatan *magnus effect* juga dilakukan pada bidang penerbangan dan perkapalan. Pada bidang penerbangan *magnus effect* dimanfaatkan sebagai *lifting device* agar pesawat dapat terbang. Pada gambar dapat dilihat model pesawat yang menggunakan silinder berputar yang berperan sebagai sayap pesawat. Pemanfaatan *magnus effect* pada bidang penerbangan hanya sebatas konsep saja sehingga tidak digunakan secara massal.



Gambar II. 3 *Rotor Plane Model*  
(J Seifert, 2012)

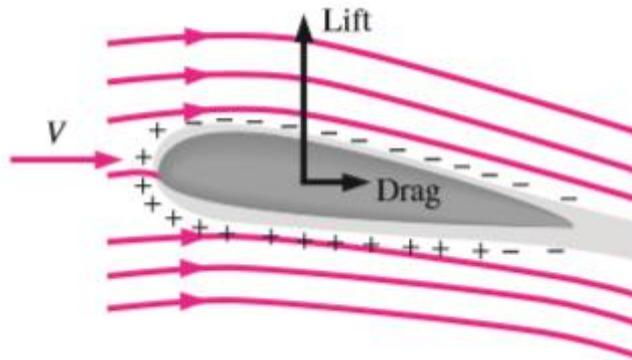
*Magnus effect* pada bidang perkapalan dimanfaatkan untuk menggerakkan kapal. Pada gambar menunjukkan sebuah kapal yang dipasang silinder di atas deknya. Silinder ini berperan sebagai alat penggerak untuk menggerakkan kapal dengan memanfaatkan *magnus effect*. Alat penggerak ini biasa disebut dengan alat penggerak system rotor atau biasa disebut dengan *Flettner Rotor Sail*. Alat penggerak seperti ini masih digunakan hingga sekarang karena memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan alat penggerak sejenis yang memanfaatkan tenaga angin.



Gambar II. 4 *Flettner Rotor Ship*  
(Seybold, 1925)

## II.1.2. Lift dan Drag

Sebuah benda yang berada atau bergerak di dalam sebuah fluida yang mengalir akan dikenai dua buah gaya yaitu *lift* dan *drag*. *Lift* adalah sebuah gaya yang merupakan gabungan dari komponen – komponen tekanan dan gaya geser yang arahnya tegak lurus (normal) terhadap arah aliran dan memiliki kecenderungan untuk menggerakkan benda kearah tersebut. Sedangkan *drag* adalah total gaya dari gaya geser dan gaya tekanan yang memiliki arah searah dengan aliran. *Drag* terdiri dari dua komponen yaitu *skin friction drag* dan *pressure drag*. *Skin friction drag* disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida dengan benda. Sedangkan *pressure drag* disebabkan oleh tekanan yang sangat tergantung dari bentuk benda sehingga biasa disebut dengan *form drag* (Cengel, 2004).



Gambar II. 5 Gaya *Lift* dan *Drag*  
(Cengel, 2004)

Gaya *lift* dan *drag* dari sebuah benda tergantung pada massa jenis fluida, kecepatan aliran, ukuran dan bentuk benda. Besarnya gaya *lift* dan *drag* dapat dinyatakan dalam bentuk koefisien yaitu koefisien *lift* ( $C_L$ ) dan koefisien *drag* ( $C_D$ ). Secara matematis, koefisien *lift* ( $C_L$ ) dan koefisien *drag* ( $C_D$ ) diformulasikan pada persamaan berikut ini (Cengel, 2004).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.1)$$

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

Dimana:

$C_L$  = koefisien *lift*

- $C_D$  = koefisien *drag*
- $F_L$  = gaya *lift* (N)
- $F_D$  = gaya *drag* (N)
- $V$  = kecepatan aliran (m/s)
- $A$  = *frontal area* (m<sup>2</sup>)
- $\rho$  = massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

Dimana  $A$  adalah *frontal area* atau area dari benda yang dilihat dari arah datangnya aliran fluida. Contohnya sebuah silinder dengan panjang  $L$  dan diameter  $D$  maka  $A$  dari silinder adalah perkalian antara  $L$  dengan  $D$ . Koefisien *lift* dan *drag* merupakan fungsi dari bentuk benda, tetapi pada beberapa kasus tertentu juga tergantung pada *Reynolds number* dan kekasaran permukaan (*surface roughness*) dari benda. *Reynolds number* berpengaruh terhadap nilai koefisien *lift* dan *drag* dari suatu benda karena *Reynolds number* menunjukkan jenis aliran yang terjadi (*laminar*, *transitional*, dan *turbulent*). Aliran dikatakan *laminar* jika memiliki *Reynolds number* kurang dari 2300. Untuk aliran *transitional* besarnya *Reynolds number* terletak diantara 2300 sampai 4000. Sedangkan aliran *turbulent* memiliki *Reynolds number* lebih dari 4000. Secara matematis, *Reynolds number* dapat dihitung melalui persamaan berikut ini (Cengel, 2004).

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.3)$$

Dimana:

- $Re$  = *Reynolds number*
- $V$  = kecepatan fluida (m/s)
- $D$  = diameter atau panjang benda (m)
- $\rho$  = massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  = viskositas dinamis fluida (kg/m.s)

### II.1.3. Computational Fluid Dynamic

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah ilmu sains yang dipakai untuk menentukan penyelesaian terkait dinamika fluida secara numerik. Pemodelan CFD didefinisikan sebagai teknik perhitungan atau pendekatan untuk memprediksi fenomena – fenomena dasar dari aliran menggunakan komputer berkemampuan tinggi sebagai alat untuk

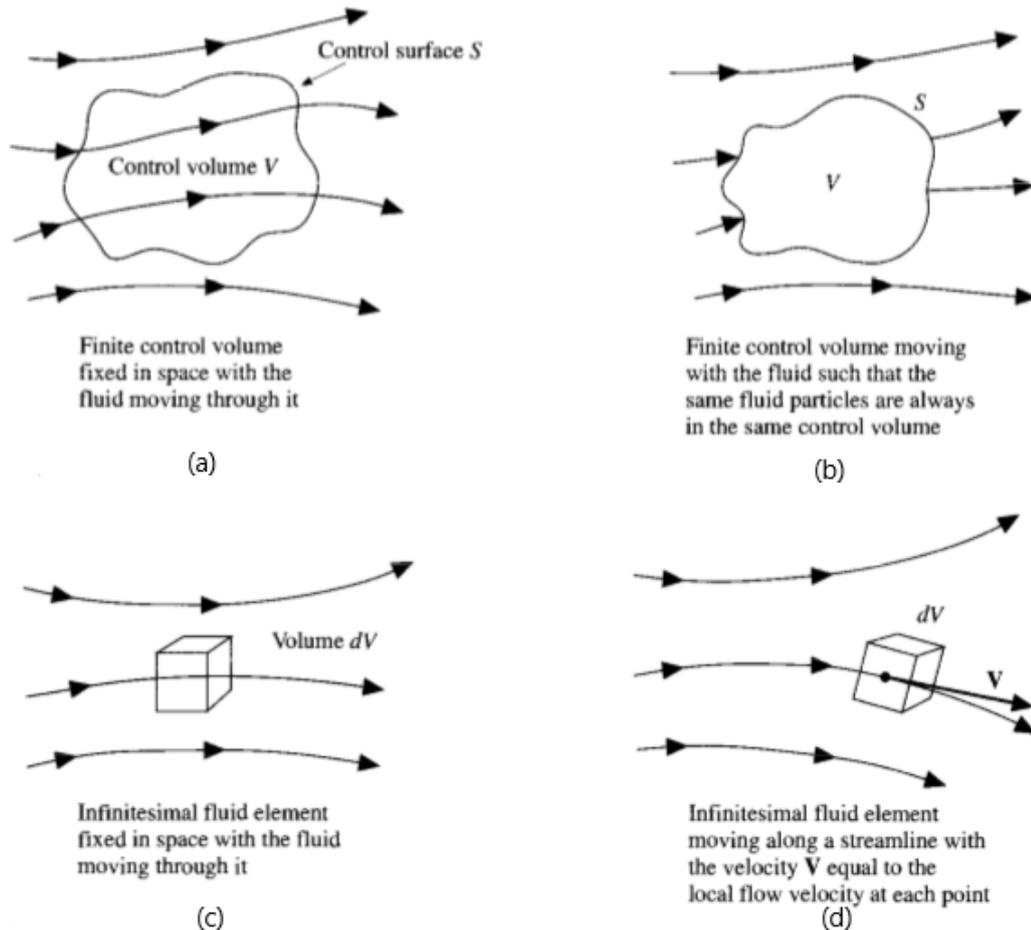
analisis (Morgan dan Lin, 1987). CFD juga didefinisikan sebagai suatu analisis terhadap sistem yang melibatkan masalah aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena sejenisnya yang menggunakan simulasi komputer (Versteeg dan Malalasekera, 1995). Awal mula perkembangan CFD dimulai dari studi dan praktik dalam dinamika fluida yang melibatkan penggunaan teori murni dan eksperimen murni. Seiring dengan perkembangan ilmu dan teknologi, CFD modern bisa diterapkan dalam semua disiplin ilmu yang mementingkan analisis aliran fluida. Pada saat ini terdapat banyak perangkat lunak CFD yang dapat digunakan dalam analisis fluida diantaranya *SOFTWARE* CFD, ICEM, CFX, dan masih banyak lagi.

CFD menggunakan persamaan – persamaan dasar (*governing equation*) dinamika fluida dalam proses analisisnya, yaitu persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Persamaan – persamaan ini merupakan pernyataan matematis untuk tiga prinsip dasar fisika:

1. Hukum kekekalan massa
2. Hukum kedua Newton
3. Hukum kekekalan energi

Dalam mendapatkan persamaan gerak fluida, filosofi yang selalu digunakan dalam CFD adalah sebagai berikut ini.

1. Memilih prinsip fisika dasar dari hukum – hukum fisika
2. Menetapkan prinsip – prinsip fisika ini dalam model aliran
3. Dari penerapan ini, diuraikan persamaan matematis yang meliputi prinsip – prinsip fisika



Gambar II. 6 Metode Pemodelan Aliran Pada CFD

Terdapat beberapa metode yang digunakan untuk menghasilkan model aliran, yaitu metode kontrol volume dan metode elemen fluida seperti yang ditunjukkan pada Gambar II. 6.

1. (a) adalah kontrol volume hingga yang diam dengan fluida yang bergerak melaluinya
2. (b) adalah kontrol volume hingga yang bergerak bersama fluida
3. (c) adalah elemen fluida kecil tak hingga yang diam dengan fluida yang bergerak melaluinya
4. (d) adalah elemen fluida kecil tak hingga yang bergerak sepanjang *streamline* dengan kecepatan  $V$ , yang sama dengan kecepatan aliran lokal pada tiap titik

Dari penurunan model (a) dan (c) akan didapatkan persamaan yang disebut dengan *conservation form*, sedangkan penurunan dari model (b) dan (d) akan didapatkan persamaan yang disebut dengan *nonconservation form*. Hasil penurunan dari keempat model ini pada dasarnya akan menghasilkan persamaan yang sama, hanya berbeda dalam bentuk manipulasi matematisnya saja.

CFD juga menggunakan persamaan aliran viscous yaitu persamaan Navier Stokes. Persamaan aliran viscous merupakan persamaan aliran yang mengikutsertakan fenomena pemindahan gesekan (*friction*), konduksi / hantaran panas dan atau penyebaran masa. Dalam persamaan Navier Stokes diasumsikan fluida *incompressible* atau tidak dapat dimampatkan. Berikut ini merupakan bentuk umum dari persamaan Navier Stokes.

$$\rho \left( \frac{\delta V}{\delta t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (2.4)$$

Dimana:

- $V$  = Kecepatan aliran
- $\nabla$  = Perpindahan
- $\rho$  = Massa jenis fluida
- $\mu$  = Gaya gesek
- $f$  = Gaya dari luar
- $t$  = Waktu

CFD menggunakan kode yang terstruktur diantara algoritma-algoritma numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan aliran fluida. Pada umumnya, *software-software* CFD menggunakan kode yang terdiri dari tiga elemen yaitu sebagai berikut.

#### 1. *Pre-Processor*

Proses *Pre-Processor* yaitu terdiri dari *input* permasalahan fluida ke program CFD. Kegiatan yang termasuk dalam *Pre-Processor* yaitu sebagai berikut.

- Pendefinisian geometri dari objek yang diteliti dan domain komputasi
- Pembuatan *grid* (pembagian domain menjadi beberapa sub-domain yang lebih kecil yang disebut dengan *grid* atau *mesh* dari elemen-elemen kecil)
- Pemilihan fenomena fisik yang perlu dimodelkan
- Pendefinisian sifat fluida
- Penjabaran kondisi batas yang sesuai pada elemen-elemen yang bersinggungan dengan domain

#### 2. *Solver*

Aktivitas yang dilakukan pada tahap *solver* yaitu sebagai berikut (Versteeg & Malalasekera, 1995).

- Pendekatan dari variabel aliran yang tidak diketahui menggunakan fungsi-fungsi sederhana
- Diskritisasi dengan melakukan substitusi dari pendekatan tersebut ke persamaan-persamaan aliran dan dilanjutkan dengan manipulasi matematis
- Penyelesaian persamaan aljabar

Terdapat empat teknik dasar dalam CFD yaitu *Boundary Element Method* (BEM), *Finite Element Method* (FEM), *Finite Difference Method* (FDM), dan *Finite Volume Method* (FVM) (Bertram, 2000).

- *Boundary Element Method* (BEM)

BEM digunakan untuk aliran-aliran potensial. BEM sering digunakan untuk permasalahan aliran-aliran potensial pada kapal seperti permasalahan hambatan gelombang. BEM juga disebut dengan metode panel (*panel method*). Metode panel membagi permukaan kapal dalam beberapa elemen (panel). Tiap elemen secara otomatis memenuhi persamaan Laplace. BEM kurang cocok digunakan untuk permasalahan dengan kondisi batas yang memerlukan penurunan potensial yang lebih tinggi. Akan tetapi, BEM memiliki akurasi yang tinggi untuk aliran-aliran *lift*. BEM tidak dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan *Reynold Averaged Navier Stokes* (RANS) atau persamaan Euler.

- *Finite Element Method* (FEM)

FEM umumnya digunakan untuk analisis struktural. Dalam bidang hidrodinamika kapal, FEM memiliki peran yang sedikit. Tidak seperti di analisis struktural, fungsi elementer tidak dapat digunakan sebagai fungsi berat untuk menentukan *residual* berat pada metode Galerkin. Hal ini mengurangi kebagusan dari metode FEM.

- *Finite Difference Method* (FDM)

FDM membagi domain fluida menjadi beberapa elemen sama seperti FEM. Turunan dari persamaan-persamaan dalam domain didekati dengan beda hingga. Kesalahan pembagian elemen (diskritisasi) dapat menyebabkan tidak terpenuhinya persamaan konservasi massa atau momentum.

- *Finite Volume Method* (FVM)

FVM juga membagi domain fluida menjadi beberapa elemen seperti FDM. Akan tetapi, FVM mengintegrasikan persamaan konservasi massa dan momentum pada tiap elemen sebelum variabel-variabel penelitian diperkirakan pada tiap titik tengah elemen. Hal ini memastikan sifat kekonservasian tidak berubah karena *error* pada permukaan elemen.

FVM umumnya digunakan pada aplikasi-aplikasi CFD yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan *Reynold Averaged Navier Stokes* (RANS).

### 3. *Post-Processor*

Hasil simulasi yang telah didapatkan dalam simulasi CFD kemudian dapat disajikan dalam bentuk gambar, grafik dan animasi dengan pola-pola tertentu. Data – data yang dapat disajikan yaitu massa jenis, *eddy viscosity*, tekanan, gradient tekanan, laju tegangan regangan, suhu, tekanan total, *turbulent kinetic energy*, kecepatan, gaya, gaya normal, tampilan geometri dan *grid*, kontur, bentuk aliran fluida (*streamline*), dan *vector plot* (Versteeg & Malalasekera, 1995).

## II.2. Tinjauan Pustaka

### II.2.1. KLM Maruta Jaya 900 DWT

Konsep kapal hemat energi dan ramah lingkungan telah banyak dikembangkan di negara – negara maju. Salah satu konsep untuk mendapatkan kapal yang hemat energi dan ramah lingkungan adalah dengan cara mencari alternative sistem propulsi yang dipakai di kapal. Hal ini disebabkan semakin mahal dan langkanya bahan bakar minyak. Diperkirakan di masa akan datang harga BBM meningkat rata – rata sebesar 3% per tahun. Studi mengenai berbagai cara yang dapat digunakan untuk mengurangi penggunaan energi terutama bahan bakar minyak sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah dengan penggunaan alat – alat elektronik di kapal yang efisien. Selain itu untuk mengurangi penggunaan bahan bakar minyak pada kapal bisa dilakukan dengan mengaplikasikan sistem propulsi tenaga angin dan tenaga surya.

Di Indonesia telah dikembangkan KLM Maruta Jaya 900 DWT untuk menjawab permasalahan mengenai kapal hemat energi dan ramah lingkungan. Kapal ini merupakan kapal bertiang tinggi termuda di dunia yang dibangun atas kerjasama antara Kementerian Riset dan Teknologi (Kemenristek) dengan Hamburg University yang dibangun di PT PAL. Kapal ini adalah jenis kapal angkutan barang (*cargo ship*) yang mulai beroperasi secara resmi pada tanggal 20 Mei 1990 dan didesain mampu mengangkut kargo maksimal 900 ton. Kapal ini memiliki dua sistem penggerak yaitu layar dan motor DC. Kapal ini dilaporkan mampu menghemat konsumsi bahan bakar minyak hingga 70% dibandingkan kapal sejenisnya. Jika kapal sejenis mengkonsumsi bahan bakar minyak sebanyak 3000 liter/hari, KLM Maruta Jaya hanya memerlukan 900 liter/hari. Tenaga angin digunakan sebagai tenaga peggerak utama kapal dengan penggunaan layar seluas 1200 m<sup>2</sup> yang terdiri dari 1 buah layar jib (*jib sail*)

berbentuk segitiga yang terletak di haluan (*bowsprit*), 2 buah layar utama (*main sail*) yang berbentuk segi empat, dan 1 buah layar mizzen (*mizzen sail*) yang terpasang pada tiang belakang kapal (BPPT, 2009). Gambar II. 7 adalah KLM Maruta Jaya 900 DWT.



Gambar II. 7 KLM Maruta Jaya 900 DWT  
(Marinetraffic.com, 2017)

### II.2.2. Jenis – Jenis Alat Penggerak Tenaga Angin

Jenis alat penggerak kapal yang memanfaatkan tenaga angin sudah banyak macamnya seiring dengan pesatnya ilmu dan teknologi. Telah banyak alat penggerak tenaga angin yang sudah dikembangkan agar memiliki performa yang optimum sehingga gaya dorong yang dihasilkan dapat optimum dan mudah dalam pengoperasiannya. Berikut ini merupakan berbagai macam system penggerak tenaga angin yang telah dikembangkan sampai saat ini (Yoshimura, 2002).

#### 1. Layar Fleksibel (*Soft Sail*)

Jenis layar fleksibel banyak digunakan pada kapal – kapal tradisional. Penelitian dan pengembangan terhadap layar fleksibel pernah dilakukan Jerman pada tahun 1955 dengan nama proyek “*Dynaship*”. Proyek ini mengembangkan sebuah desain layar fleksibel dengan bentuk persegi (*square sail*). Sedangkan untuk bentuk layar dengan jenis *fore/aft sail* banyak digunakan pada kapal – kapal layar tradisional dan kapal layar yang dilombakan seperti pada tipe kapal untuk *America’s Cup*. Selain kapal – kapal tradisional, layar jenis ini juga digunakan pada kapal penumpang modern yaitu “*Wind Star*”, “*Wind Song*”, dan “*Wind*

*Spirit*". Kapal - kapal ini merupakan kapal yang dikembangkan oleh Wartsila Ab pada tahun 1986 sampai tahun 1988. Gambar II. 8 menunjukkan desain layar yang digunakan pada kapal – kapal tersebut.



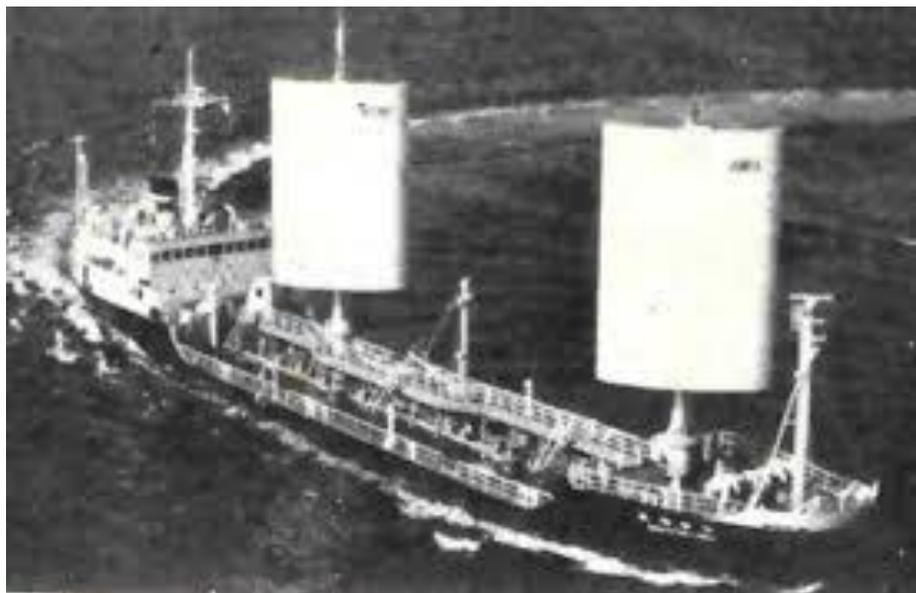
Gambar II. 8 Kapal *Wind Star*  
(Yoshimura, 2002)

## 2. Layar Kaku (*Rigid Sail*)

Pada tahun 1980-an layar jenis ini pernah dikembangkan oleh Jepang dengan memasang layar jenis ini pada kapal *tanker* “*Shin Aitoku Maru*” dan “*Usuki Pioneer*” (*Fujiwara, 2003*). Pada Gambar II. 9 menunjukkan kapal “*Usuki Pioneer*” yang merupakan kapal muatan curah dengan Panjang 152 meter dan memiliki dua buah layar kaku berbentuk persegi dengan luas total layar 640 m<sup>2</sup>. Gambar II. 10 menunjukkan kapal “*Shin Aitoku Maru*” yang merupakan kapal *tanker* dengan Panjang 66 meter dan memiliki dua layar kaku berbentuk persegi yang memiliki luas total layar 200 m<sup>2</sup>.



Gambar II. 9 Kapal *Usuki Poineer*  
(Fujiwara, 2003)



Gambar II. 10 Kapal *Shin Aitoku Maru*  
(Fujiwara, 2003)

### 3. Layar Mekanik (*Mechanical Sail*)

Layar mekanik telah lama dikembangkan di Jerman terutama dengan sistem rotor yang disebut juga dengan *Flettner Rotor Sail*. Prinsip kerja dari layar ini adalah perputaran silinder pada kondisi adanya kecepatan angin, sehingga menghasilkan gaya dorong karena adanya "*Magnus Effect*" yang bekerja pada silinder tersebut. Kapal yang telah menggunakan layar jenis ini adalah kapal "*Buchau*" yaitu kapal barang berukuran 455 GT dan kapal "*Barbara*"

yang juga merupakan jenis kapal barang yang berukuran 2077 GT. Kapal – kapal tersebut dibangun pada tahun 1924 dan 1926. Gambar II. 11 menunjukkan kapal yang menggunakan *Flettner Rotor Sail*.



Gambar II. 11 Kapal *E-Ship*  
(Enercon, 2013)

Tipe layar mekanik yang lainnya adalah *Turbo Sail*. Layar tipe ini memiliki keunikan yaitu dapat mengarahkan dan mengatur aliran udara dibelakang layar dengan kipas angin elektrik agar gaya dorong yang dihasilkan bisa maksimal. Gambar II. 12 menunjukkan kapal dengan layar tipe *Turbo Sail*.



Gambar II. 12 Kapal dengan *turbosail*  
(David, 2011)

#### 4. Turbin Angin (*Wind Turbine*) dan Tipe Layar yang lain

Turbin angin (*Wind Turbine*) dan tipe – tipe layar yang lain telah banyak dikembangkan mulai tahun 1980-an. Namun pengaplikasian untuk layar jenis ini banyak dipakai untuk kapal – kapal kecil saja, serta masih dalam tataran konsep. Gambar II. 13 menunjukkan sebuah konsep layar jenis “*sky sail*”.



Gambar II. 13 Kapal dengan *skysail*  
(Fujiwara, 2003)

#### II.2.3. *Flettner Rotor Sail*

*Flettner Rotor Sail* pertama kali ditemukan dan dipatenkan oleh Anton Flettner pada tahun 1922 (Tradt, 1925). *Flettner rotor* adalah sebuah alat penggerak kapal yang menggunakan tenaga angin yang memanfaatkan fenomena *Magnus Effect* sehingga dapat menghasilkan gaya dorong untuk menggerakkan kapal. *Flettner rotor* ini berupa sebuah silinder vertical yang dipasang pada dek kapal. Silinder ini harus diputar dengan mesin agar dapat menghasilkan gaya dorong. Mesin yang digunakan biasanya adalah motor listrik dengan kecepatan putaran rendah sekitar 100 rpm sampai 400 rpm (Martin, 1926). Penggunaan Flettner rotor pada industri perkapalan dimulai pada tahun 1924 oleh Germania Shipyard yang mengganti layar dengan memasang 2 buah rotor dengan tinggi 15 m dan diameter 3 m yang digerakan oleh motor listrik dengan daya 37 kW pada kapal berukuran 2000 ton, *schooner Buckau* (Seybold, 1925). Gambar II. 14 menunjukkan kapal *Schooner Buckau*.



Gambar II. 14 Kapal *Schooner Buckau*  
(Seybold, 1925)

Dari pemasangan rotor ini pada *Schooner Buckau*, kecepatan kapal meningkat menjadi sekitar 8 knot dari 6,5 knot sehingga dapat disimpulkan bahwa performa rotor lebih baik daripada layar (Seybold, 1925). Kemudian pada tahun 1926 kapal ini berubah nama menjadi *Baden Baden* dan berlayar menuju New York melalui Amerika Selatan dengan jarak 6200 *nautical mile* (Craft dkk, 2012). Dengan penggunaan rotor sebagai alat penggerak pembantu, kapal hanya membutuhkan 12 ton bahan bakar untuk berlayar pada rute tersebut sehingga dapat dikatakan jauh lebih hemat bahan bakar jika dibandingkan dengan kapal yang menggunakan mesin konvensional yang membutuhkan 45 ton bahan bakar (Martin, 1926). Masih pada tahun 1926, angkatan laut Jerman juga membangun sebuah kapal dengan nama Barbara yang berukuran 3000 ton dan menggunakan rotor sebagai alat penggeraknya (Martin, 1926). Kapal Barbara beroperasi di laut Mediterania pada tahun 1926 sampai tahun 1929 (Collie, 1985). Gambar II. 15 menunjukkan kapal Barbara.



Gambar II. 15 Kapal Barbara  
(Collie, 1985)

Pada tahun 1983, Bergeson membuat sebuah desain dan *prototype Flettner Rotor Sail* yang kemudian dipasang pada kapal *Tracker* yang berukuran 18 ton dengan panjang 13 m. Rotor yang dibuat memiliki ukuran tinggi 7,3 m dan diameter 60 cm. Rotor ini diputar dengan menggunakan *hydraulic motor* dengan kecepatan putaran maksimum 600 rpm (Gillmore, 1984). Dari hasil pemasangan rotor ini, penghematan bahan bakar yang dapat dicapai adalah sekitar 50 % - 60 %. Hal ini menunjukkan bahwa *Flettner Rotor Sail* adalah sistem penggerak tenaga angin yang ekonomis dalam hal pengoperasiannya, reliabel, dan penghematan bahan bakar yang cukup tinggi ketika dimanfaatkan sebagai sistem penggerak bantu atau dikombinasikan dengan mesin diesel (Gillmore, 1984). Gambar II. 16 menunjukkan kapal *Tracker*.



Gambar II. 16 Kapal *Tracker*  
(Gillmore, 1984)

Pada tahun 2006, peneliti - peneliti dari UK NPO yang tergabung dalam kelompok *Greenwave* melakukan pengujian model *Flettner Rotor* pada *wind tunnel* di bawah pengawasan Lloyd's Register. Model rotor ini nantinya akan dipasang pada kapal *bulk carrier* berukuran sedang. Dari pengujian pada *wind tunnel* didapatkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan oleh pemasangan rotor ini lebih besar sekitar 8 sampai 10 kali lipat jika dibandingkan dengan gaya dorong yang dihasilkan oleh layar konvensional dengan *surface area* yang sama. Kemudian dibuat model kapal yang dipasang 4 buah rotor dengan skala 25 : 1 untuk menguji stabilitas dari kapal. Pengujian ini dilakukan di Warsash Maritime Academy, Southampton (Insight, 2010). Gambar II. 17 menunjukkan model kapal yang dibuat dan diuji.



Gambar II. 17 Model kapal *Greenwave*  
(Insight, 2010)

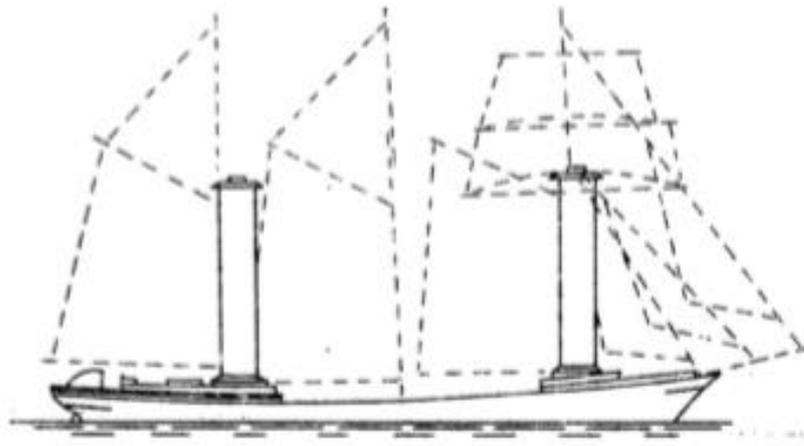
Pada tahun 2009, perusahaan pembuat *wind turbine* yang bernama Enercon meluncurkan sebuah kapal baru dengan penggerak rotor. Kapal ini bernama E-Ship 1 yang mempunyai dua sistem penggerak, yaitu mesin diesel konvensional dan *Flettner Rotor* dengan kontrol sistem otomatis. Gas buang yang dihasilkan oleh mesin diesel pada kapal ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap sehingga dapat menghasilkan daya listrik tambahan untuk memutar rotor. Dari hasil uji coba pelayaran dengan jarak 170000 mil laut pada tahun 2013, kapal ini dapat menghemat bahan bakar sekitar 25% (Enercon, 2013). Gambar II. 18 menunjukkan kapal E-Ship 1.



Gambar II. 18 Kapal E-Ship 1  
(Enercon, 2013)

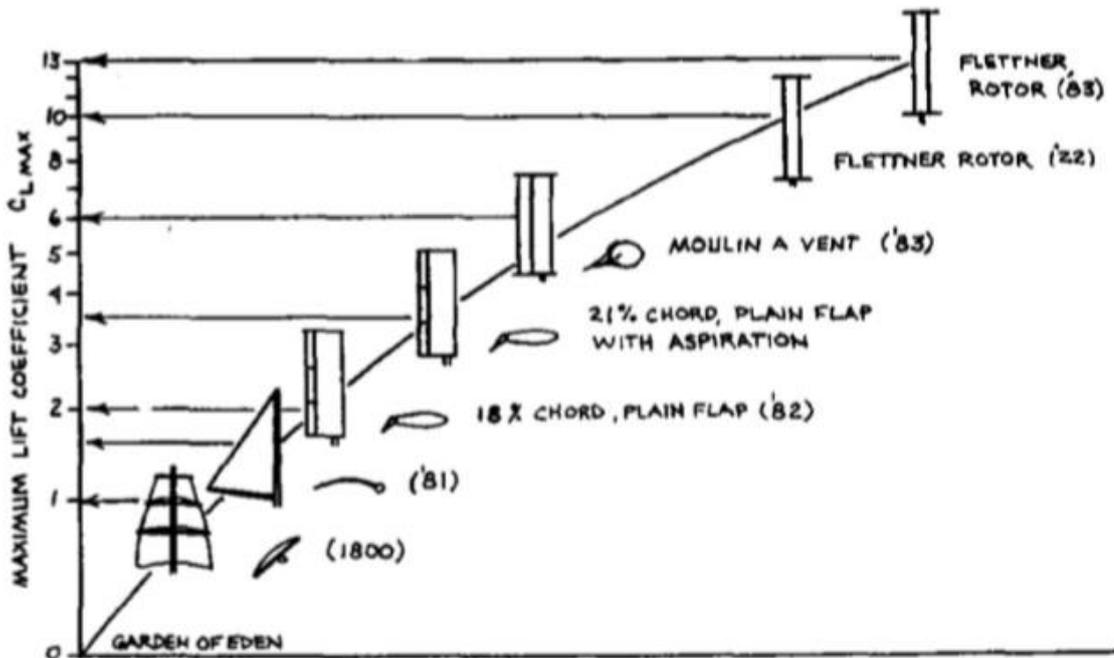
Dari uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa *Flettner Rotor Sail* memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan alat penggerak tenaga angin lainnya khususnya layar konvensional. Keunggulan – keunggulan tersebut antara lain adalah:

1. Memiliki *sail area* yang lebih kecil jika dibandingkan layar sehingga tidak mengganggu pekerjaan – pekerjaan yang ada di atas dek kapal (Prandtl, 1925)



Gambar II. 19 Perbandingan Dimensi Layar dan Rotor (Prandtl, 1925)

2. Menghasilkan gaya *lift* paling besar jika dibandingkan dengan alat penggerak tenaga angin lainnya (Bergeson, 1985).



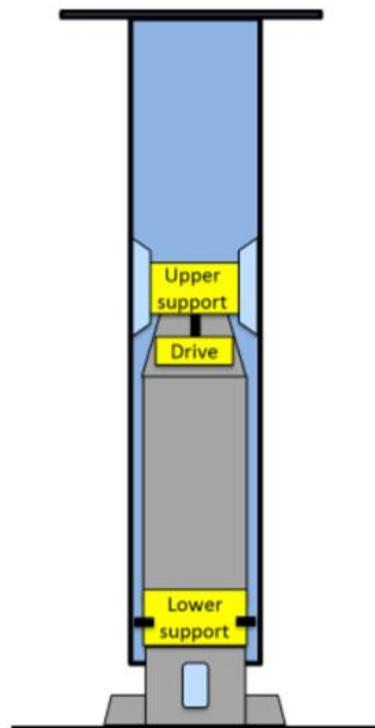
Gambar II. 20 Koefisien *Lift* Alat Penggerak Tenaga Angin (Bergeson, 1985)

3. Pengoperasiannya tidak memerlukan banyak orang

Selain beberapa keunggulan yang telah disebutkan di atas, *Flettner Rotor Sail* juga memiliki beberapa kekurangan yaitu memiliki pengaruh terhadap stabilitas kapal dikarenakan dimensinya yang tinggi. Kekurangan lain adalah diperlukan motor untuk memutar rotor agar menghasilkan gaya dorong untuk menggerakkan kapal.

#### II.2.4. Konfigurasi *Flettner Rotor Sail*

Jika dilihat dari luar, *Flettner Rotor Sail* memiliki bentuk silinder vertikal yang biasanya dipasang pelat tambahan (*thom disk*) pada kedua ujungnya. Konstruksi dari rotor itu sendiri adalah berupa silinder berongga yang diberi penguatan (*lower support* dan *upper support*) dan sebuah penggerak (*drive*) yang berada di dalamnya (Norsepower, 2018). Gambar II. 21 menunjukkan konfigurasi dari rotor.

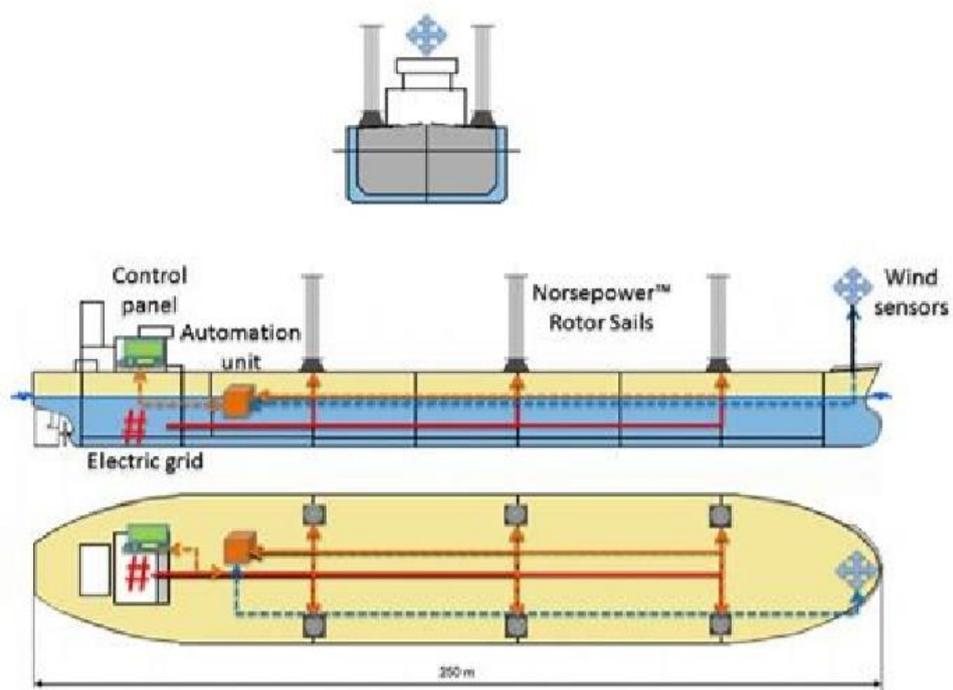


Gambar II. 21 Komponen *Flettner Rotor*  
(Norsepower, 2018)

Saat ini bahan pembuatan rotor sudah menggunakan bahan yang lebih ringan yaitu komposit. Penggunaan bahan ini untuk meminimalkan berat dari rotor sehingga pengaruhnya terhadap stabilitas kapal tidak begitu besar. Bahan komposit yang digunakan adalah GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) dan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) (Norsepower, 2018). CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) adalah serat polimer yang

terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat karbon. CFRP memiliki banyak aplikasi dalam konstruksi pesawat terbang, otomotif, dan kapal layar. Sedangkan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) adalah serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus dari kaca. GFRP banyak digunakan untuk perkuatan balok, kolom, dan struktur bangunan lainnya. Kedua material komposit ini memiliki bobot yang ringan, tahan korosi, dan memiliki kekuatan yang tinggi.

*Flettner Rotor Sail* yang modern sudah memiliki sebuah sistem yang dapat bekerja secara otomatis. Terdapat beberapa komponen utama dalam sebuah sistem penggerak *Flettner Rotor Sail*. Komponen – komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar II. 22 berikut ini.



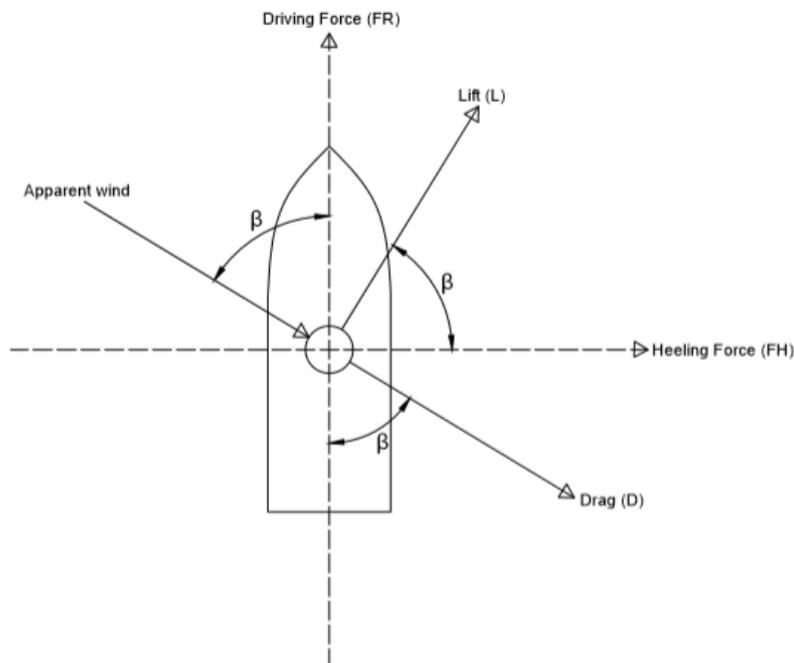
Gambar II. 22 Konfigurasi Sistem Pada *Flettner Rotor* (Norsepower, 2018)

1. *Flettner Rotor*, adalah komponen yang paling penting yang dapat menghasilkan gaya dorong untuk menggerakkan kapal
2. *Control Panel*, adalah komponen untuk mengontrol performa dan pengoperasian dari sistem *Flettner Rotor Sail*
3. *Automation Unit*, adalah komponen yang dapat mengoptimalkan performa dari *Flettner Rotor Sail* sehingga didapatkan gaya dorong yang optimal
4. *Wind Sensor*, adalah komponen yang berfungsi untuk membaca kecepatan dan arah angin. Komponen ini terhubung langsung dengan *automation unit* dan *control panel*

5. *Electric grid*, adalah komponen yang menyediakan daya listrik bertegangan rendah untuk menggerakkan motor yang memutar rotor

### II.2.5. Gaya – gaya yang Bekerja Pada *Flettner Rotor*

Dalam buku dengan judul “*Sailing Theory and Practice*” oleh Marchaj C. A. (1982) menjelaskan tentang perhitungan untuk mendapatkan gaya – gaya yang bekerja pada layar (*wind sail*). Perhitungan ini juga dapat digunakan dalam menghitung gaya – gaya yang bekerja pada *Flettner Rotor* karena memiliki kesamaan pada komponen – komponen gaya yang bekerja. Untuk mendapatkan gaya dorong yang maksimal maka usaha yang dilakukan memperbesar nilai  $F_R$  (*Driving Force*), yaitu gaya yang searah dengan arah berlayarnya kapal dan mengurangi besarnya  $F_H$  (*Heeling Force*), yaitu gaya yang tegak lurus dengan arah kapal berlayar. Besarnya nilai dari  $F_R$  dan  $F_H$  tergantung dari besarnya arah kapal berlayar terhadap arah angin (*apparent wind angle*,  $\beta$ ). Berikut ini adalah Gambar II. 23 yang menunjukkan gaya – gaya yang bekerja pada saat kapal berlayar.



Gambar II. 23 Gaya – Gaya yang Bekerja Saat Kapal Berlayar

Untuk mendapatkan besarnya  $F_R$  dan  $F_H$  menggunakan persamaan seperti berikut ini:

$$F_R = L \sin \beta - D \cos \beta \quad (2.5)$$

$$F_H = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (2.6)$$

Dengan,  $L$  : *lift*

$D$  : *drag*

### II.2.6. Parameter yang Mempengaruhi performa *Flettner Rotor*

Desain dari *Flettner Rotor Sail* sudah mengalami banyak perkembangan. Dari hasil penelitian – penelitian sebelumnya (baik secara numerik maupun eksperimen) menunjukkan bahwa koefisien *drag* dan *lift* (*aerodynamic performance*) dari *Flettner Rotor Sail* dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti berikut ini.

1. *Aspect Ratio* (AR) yaitu perbandingan atau rasio antara tinggi (H) dan diameter dari rotor (d).
2. *Spin Ratio* (SR) yaitu perbandingan atau rasio antara kecepatan putar rotor dan kecepatan angin. *Spin ratio* dapat dihitung dengan persamaan berikut ini. (De Marco A. dkk, 2016)

$$SR = \frac{\Omega d}{2U} \quad (2.7)$$

Dimana,

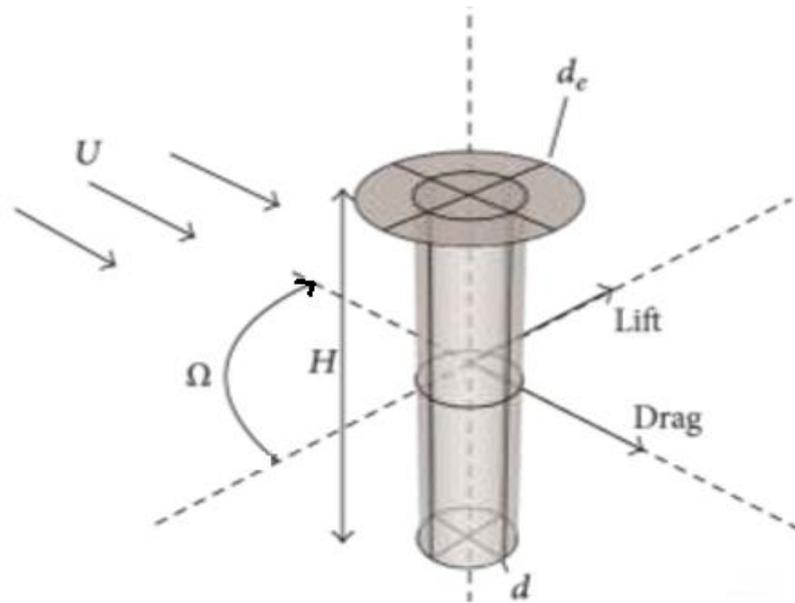
SR : *Spin Ratio*

$\Omega$  : Kecepatan putar rotor (rad/s)

U : Kecepatan angin (m/s)

d : Diameter rotor (m)

3. Desain dari rotor seperti ada tidaknya *end plate* pada kedua ujung rotor ataupun bentuk permukaan dari rotor



Gambar II. 24 Komponen Gaya Pada Flettner Rotor Sail  
(De Marco A. dkk , 2016)

Jurnal penelitian dengan judul “*Flettner Rotor Concept for Marine Applications : A Systematic Study*” oleh De Marco A, dkk (2016) merupakan penelitian lanjutan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh De Marco. Penelitian ini meneliti tentang pengaruh *key parameter* (parameter desain) seperti AR, SR, dan rasio antara diameter *end plate* dan diameter rotor ( $d_e/d$ ) dari *Flettner Rotor* terhadap performa dari *Flettner Rotor* serta hubungan antara tiap parameter tersebut. *Key parameters* ditentukan berdasarkan data kapal yang sudah ada dan mengaplikasikan *Flettner Rotor* sebagai sistem penggerak. Analisa secara numerik dilakukan dengan menggunakan *software* CD adapco STAR-CCM+ v.9.06 dengan permodelan 3 dimensi yang kemudian hasil dari analisa divalidasi menggunakan hasil dari eksperimen. Variasi dari tiap variabel *key parameter* ditentukan seperti pada tabel berikut ini.

Variables	Values			
SR	1.0	1.5	2.0	3.0
AR	2.0	4.0	6.0	8.0
$d_e/d$	1.0	2.0	3.0	/

Gambar II. 25 Variasi variabel  
(De Marco A. dkk , 2016)

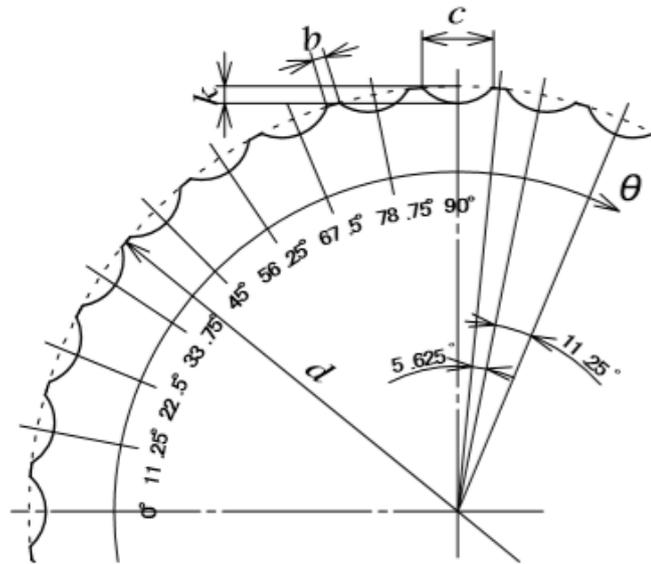
Dari penelitian didapatkan hubungan antara parameter geometrik (AR,  $d_e/d$ ) dan fungsional parameter (SR) dengan performa dari *Flettner Rotor* ( $C_l$ ,  $C_d$ , dan *aerodynamic*

*efficiency*). Berikut ini merupakan hubungan antara *key parameter* dengan performa dari *Flettner Rotor*.

1. SR merupakan parameter utama yang mempengaruhi  $C_l$  dari *Flettner Rotor*. Semakin besar nilai SR maka semakin besar juga nilai  $C_l$  karena sirkulasi yang ada disekitar rotor lebih besar. Akan tetapi juga akan terjadi kenaikan  $C_d$  yang kenaikannya lebih kecil jika dibandingkan dengan  $C_l$ .
2. Ketika  $d_e/d$  konstan dan nilai dari AR dinaikkan maka  $C_l$  juga akan naik, tetapi jika  $d_e/d$  diperbesar akan terjadi penurunan  $C_l$ .
3. Kenaikkan nilai AR dapat menurunkan  $C_d$  dari *Flettner Rotor*
4. Penelitian ini juga menunjukkan keuntungan pemasangan *end plate* pada ujung *Flettner Rotor* karena semakin besar ukuran *end plate* maka dapat mengurangi *drag* yang ada.
5. Peningkatan maksimum *aerodynamic efficiency* dari *Flettner Rotor* terjadi saat nilai SR paling tinggi ( $SR = 3$ ), nilai AR paling tinggi ( $AR = 8$ ), dan nilai  $d_e/d$  paling tinggi ( $d_e/d = 3$ ).

### **II.2.7. Karakteristik Aerodinamika Benda dengan *Dimpled Surface***

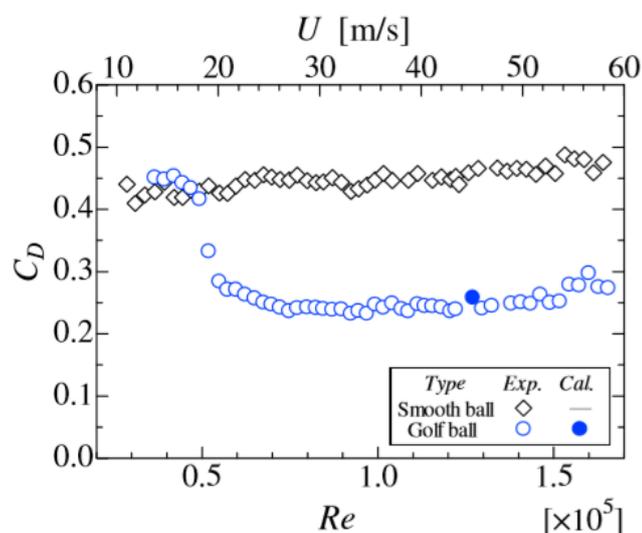
Penelitian dengan judul “*Aerodynamic Characteristic and Flow Pattern of a Golf Ball with Rotation*” yang dilakukan oleh Aoki K, dkk (2010) meneliti tentang karakteristik aerodinamika dari sebuah bola golf dengan permukaan yang halus (*smooth surface*) dan permukaan dengan cekungan – cekungan (*dimpled surface*). Penelitian ini juga membandingkan besarnya  $C_l$  dan  $C_d$  dari kedua jenis bola golf tersebut. Penelitian dilakukan dengan dua metode yaitu numerical secara 3 dimensi (CFD) dan eksperimental (pengujian pada *wind tunnel*). Bola golf yang digunakan terbuat dari vinyl chlorida dengan variasi diameter bola 42,6 mm dan 100 mm. Berikut ini merupakan model bola golf dengan *dimpled surface* yang digunakan.



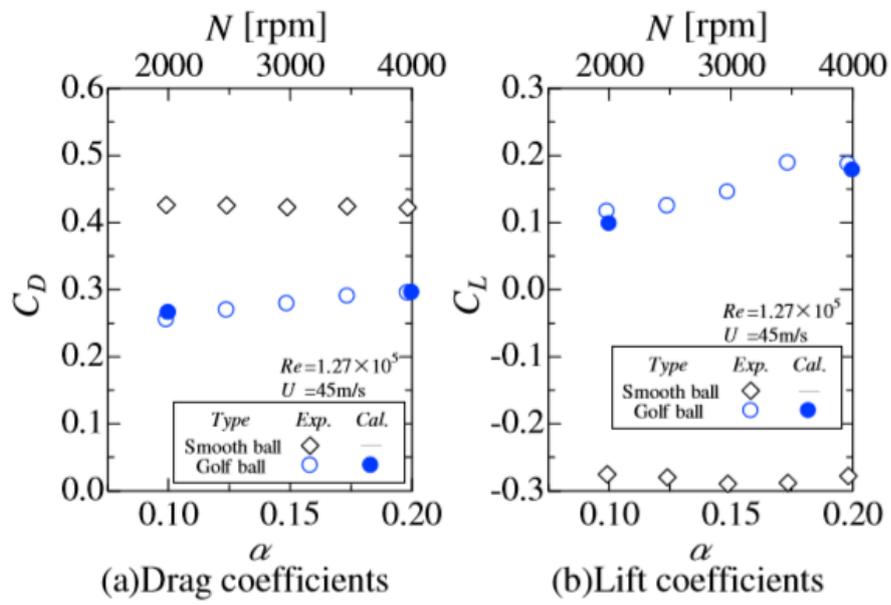
Gambar II. 26 Potongan Melintang Bola Golf  
(Aoki K, 2010)

Rasio kedalaman cekungan ( $k/d$ ) sebesar 0.0079 dan rasio lebar dari cekungan ( $c/d$ ) sebesar 0.082. Total jumlah cekungan yang dibuat adalah sebanyak 328 cekungan. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil sebagai berikut ini.

1. Ketika *spin rate* (putaran) dari bola golf meningkat,  $C_l$  dari bola golf dengan permukaan yang halus (*smooth surface*) menjadi negatif. Sedangkan  $C_l$  dan  $C_d$  dari bola golf dengan cekungan (*dimpled surface*) mengalami kenaikan.
2. Pada kasus tanpa adanya putaran,  $C_d$  dari bola golf dengan *dimpled surface* lebih kecil jika dibandingkan dengan *smooth surface*.



Gambar II. 27 Perbandingan  $C_d$  (tanpa putaran)  
(Aoki K, 2010)



Gambar II. 28 Perbandingan  $C_l$  dan  $C_d$  (dengan putaran)  
(Aoki K, 2010)

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB III METODOLOGI**

### **III.1. Studi Literatur**

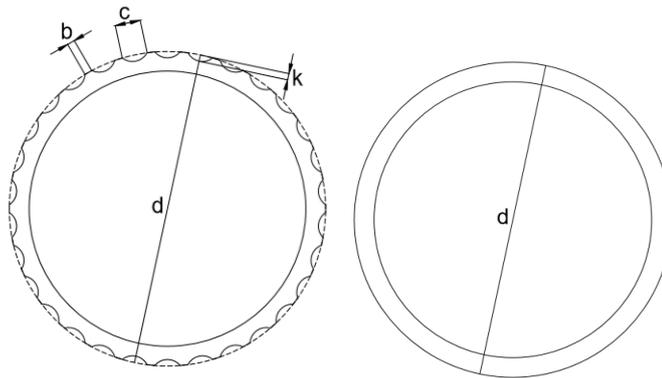
Mengumpulkan dan mempelajari berbagai referensi baik dari buku maupun penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan topik Tugas Akhir. Studi literatur yang dilakukan meliputi *Magnus Effect*, *Flettner Rotor Sail*, tinjauan desain *Flettner Rotor* dan *Computational Fluid Dynamic*.

### **III.2. Pengumpulan Data**

Data – data dikumpulkan dari referensi penelitian – penelitian yang dilakukan sebelumnya dan melakukan *browsing* dari internet. Data yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah kecepatan rata – rata angin yang ada di Indonesia, ukuran utama, data hambatan, rencana umum dan geometri layar kapal KLM Maruta Jaya 900 DWT. Pada penelitian ini kecepatan angin yang digunakan adalah sebesar 6 m/s (Anwar, 2010).

### **III.3. Pemodelan Rotor**

Pemodelan dilakukan dengan dua acara yaitu menggunakan AutoCAD dan menggunakan *design modeler* pada Ansys 18.2. Pemodelan pada AutoCAD digunakan untuk membuat rotor dengan *dimpled surface* karena hal ini tidak bisa dilakukan dengan menggunakan *design modeler* pada Ansys 18.2. Model yang digunakan berbentuk 2 dimensi dengan variasi sebanyak 3 variasi yaitu satu *smooth surface* dan dua model dengan ukuran *dimpled surface* yang berbeda yang diaplikasikan disepanjang rotor. Penentuan dimensi *dimpled surface* berdasarkan perbandingan antara  $c/d$  (perbandingan antara lebar *dimpled surface* dan diameter rotor) dan  $k/d$  (perbandingan antara kedalaman *dimpled surface* dan diameter rotor) (Aoki K, 2010). Detail variasi model ditunjukkan pada Tabel III. 1. Selain itu terdapat 5 variasi *spin ratio* (SR) yang dijelaskan pada Tabel III. 2. Gambar III. 1 menunjukkan potongan melintang dari rotor.



Gambar III. 1 Potongan Melintang Model Rotor

Keterangan :

d : diameter *Flettner Rotor*

c : lebar cekungan (*dimpled*)

b : jarak antar cekungan (*dimpled*)

k : kedalaman cekungan (*dimpled*)

Tabel III. 1 Detail Variasi Model Rotor

Model	Diameter rotor (d)	Ukuran <i>Dimpled Surface</i>	
		c/d	k/d
Model A	3 m	-	-
Model B	3 m	0,08	0,008
Model C	3 m	0,1	0,01

Tabel III. 2 Detail Variasi *Spin Ratio*

<i>Spin Ratio (SR)</i>	Kecepatan angin (m/s)	Kecepatan putar rotor (rad/s)
1	6	4
1,5	6	6
2	6	8
3	6	12
4	6	16

#### III.4. Simulasi Pada *software CFD*

Simulasi dilakukan pada *Software CFD* untuk mendapatkan nilai koefisien *lift* ( $C_l$ ) dan koefisien *drag* ( $C_d$ ) dari model rotor yang telah dibuat. Simulasi dilakukan dalam bentuk 2 dimensi. Simulasi dilakukan menggunakan komputer dengan spesifikasi teknis yang

dijelaskan pada Tabel III. 3 berikut ini. Lama waktu yang digunakan untuk simulasi satu rotor adalah  $\pm 10$  jam sedangkan untuk 2 rotor  $\pm 20$  jam.

Tabel III. 3 Spesifikasi Teknis Komputer

Operating System:	Windows 10 Pro 64-bit
System Manufacturer:	ASUSTeK COMPUTER INC.
System Model:	X455LJ
Processor:	Intel® Core™ i5-5200U CPU @2.20GHz (4 CPUs)
Memory:	4096 MB RAM
Display & Render:	NVIDIA GeForce 920M
Display Memory (VRAM):	2009 MB

Terdapat 3 tahapan dalam melakukan simulasi CFD yaitu tahap *Pre-Processor*, tahap *Solver Set-Up*, dan tahap *Post Processor*. Tahapan – tahapan tersebut dijelaskan secara rinci pada penjelasan berikut ini.

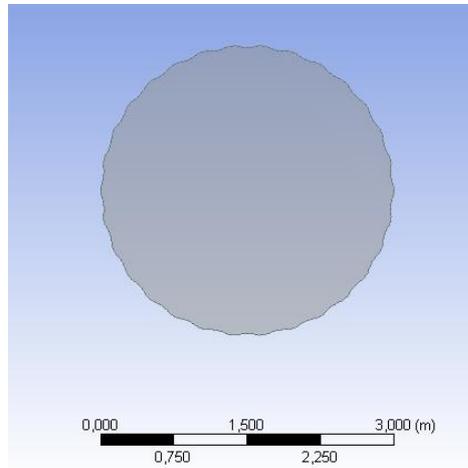
#### III.4.1. Tahap *Pre-Processor*

Pada tahap ini terdiri dari dua proses utama meliputi pembuatan model (*Modelling*) dan pembagian elemen (*meshing*). Berikut ini merupakan penjelasan dari proses – proses tersebut.

##### 1. Pembuatan model (*Modelling*)

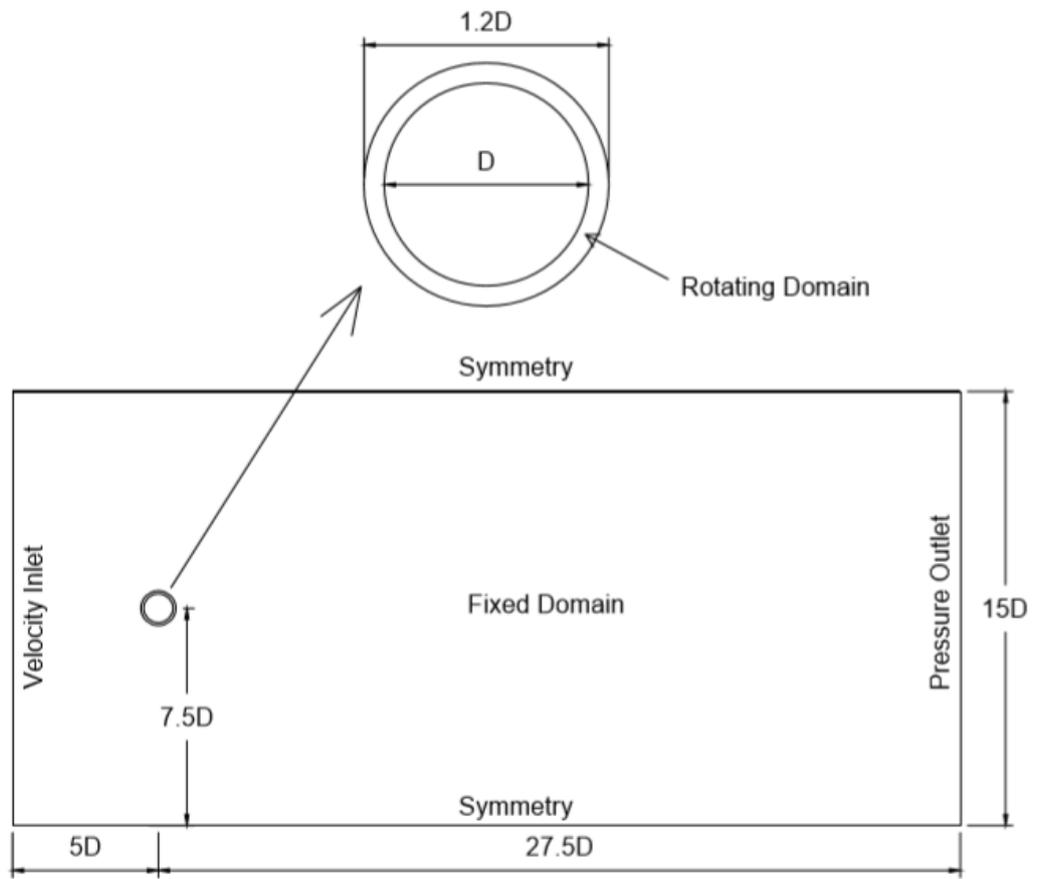
Pembuatan model dibagi menjadi dua yaitu pembuatan model benda yang akan diamati dimana dalam penelitian ini adalah rotor dan pembuatan domain simulasi. Pembuatan model rotor dapat dilakukan langsung pada *software modeling* yang sudah ada dalam ANSYS seperti ANSYS Design Modeler dan ANSYS SpaceClaim selain itu pembuatan model juga bisa dilakukan di *software modeling* lainnya seperti AutoCAD. Pada penelitian ini, pembuatan model dilakukan dengan dua cara yaitu melalui AutoCAD dan ANSYS Design Modeler. Penggunaan AutoCAD dipilih untuk mempermudah pembuatan model rotor dengan variasi *dimpled surface*. Model yang telah selesai dibuat menggunakan AutoCAD harus diekspor dari format .dwg menjadi format IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) agar dapat dibaca oleh ANSYS Design Modeler. Setelah proses ekspor selesai, maka harus dilakukan impor geometri pada ANSYS Design Modeler agar model dapat

ditampilkan. Model yang sudah diimpor pada ANSYS Design Modeler ditunjukkan pada Gambar III. 2 berikut.

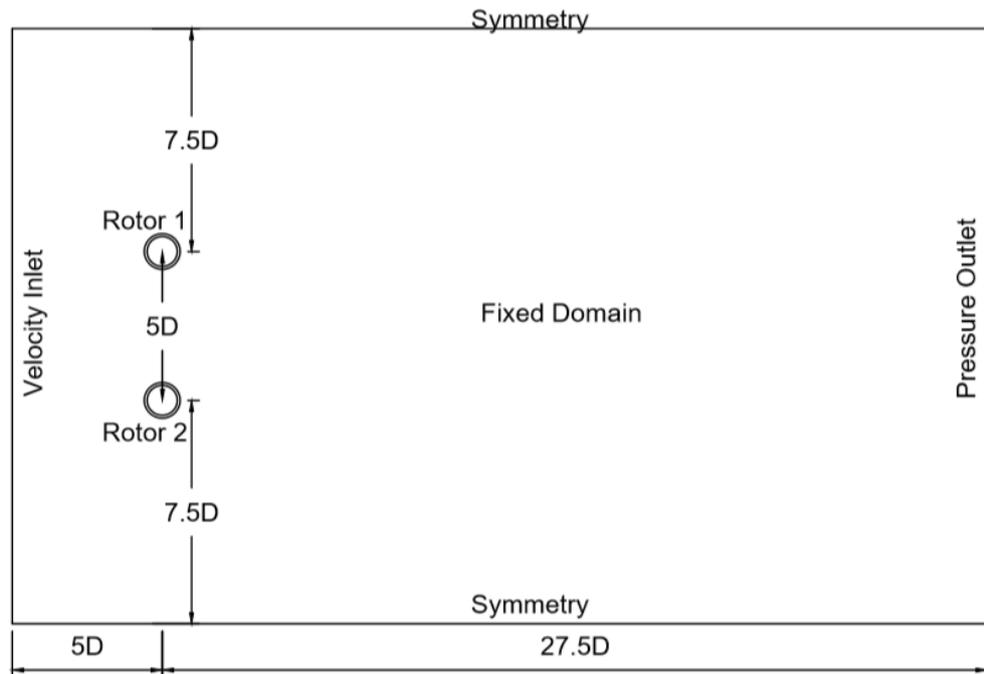


Gambar III. 2 Model Rotor yang Sudah di Impor

Proses selanjutnya yaitu pembuatan domain simulasi yang akan digunakan. Pembuatan domain simulasi dapat dilakukan langsung pada ANSYS Design Modeler. Penentuan domain simulasi berpengaruh terhadap akurasi hasil simulasi, lama waktu yang dibutuhkan untuk simulasi, dan kemampuan komputer yang digunakan sehingga harus dibuat domain dengan ukuran paling optimum dari segi akurasi dan lama waktu simulasi (*computational time*). Domain simulasi dibagi menjadi dua domain yaitu *rotate domain* dan *fixed domain* yang digunakan untuk metode *dynamic mesh* dengan menggunakan *interface*. *Rotate domain* adalah zona dimana *meshing* pada zona tersebut akan diputar sesuai dengan kecepatan putaran rotor. Hal ini diharapkan agar hasil simulasi memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan dapat memvisualisasikan aliran para sekitar rotor dengan benar. Terdapat dua ukuran domain yang digunakan pada simulasi ini, yaitu domain untuk satu rotor dan domain untuk dua rotor. Ukuran domain untuk dua rotor dibuat berdasarkan ukuran – ukuran domain untuk satu rotor. Gambar III. 3 menunjukkan ukuran domain untuk satu rotor dan Gambar III. 4 menunjukkan ukuran domain untuk dua rotor.



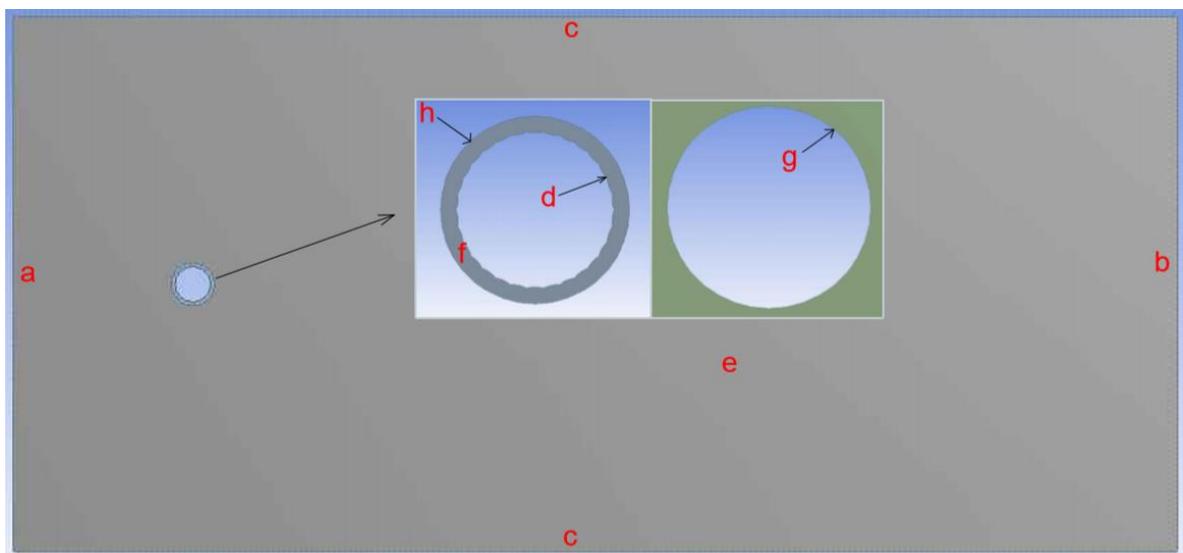
Gambar III. 3 Domain Satu Rotor



Gambar III. 4 Domain Dua Rotor

Setelah model dan domain selesai dibuat pada ANSYS Design Modeler, bagian – bagian dari domain dan model baik itu berupa *edge* maupun *surface* perlu diberi nama agar dapat didefinisikan ketika membuat kondisi batas. Proses penamaan menggunakan fitur *Named Selection* pada ANSYS Meshing. Hasil dari proses *Named Selection* untuk domain satu rotor ditunjukkan pada Gambar III. 5 dan domain dua rotor ditunjukkan pada Gambar III. 6. Berikut ini merupakan langkah – langkah dalam melakukan *Named Selection*:

- a. Klik kiri pada bagian yang akan didefinisikan
- b. Klik kanan kemudian pilih *Named Selection*
- c. Ubah nama pada *Named Selection* sesuai dengan kondisi batas yang akan ditentukan

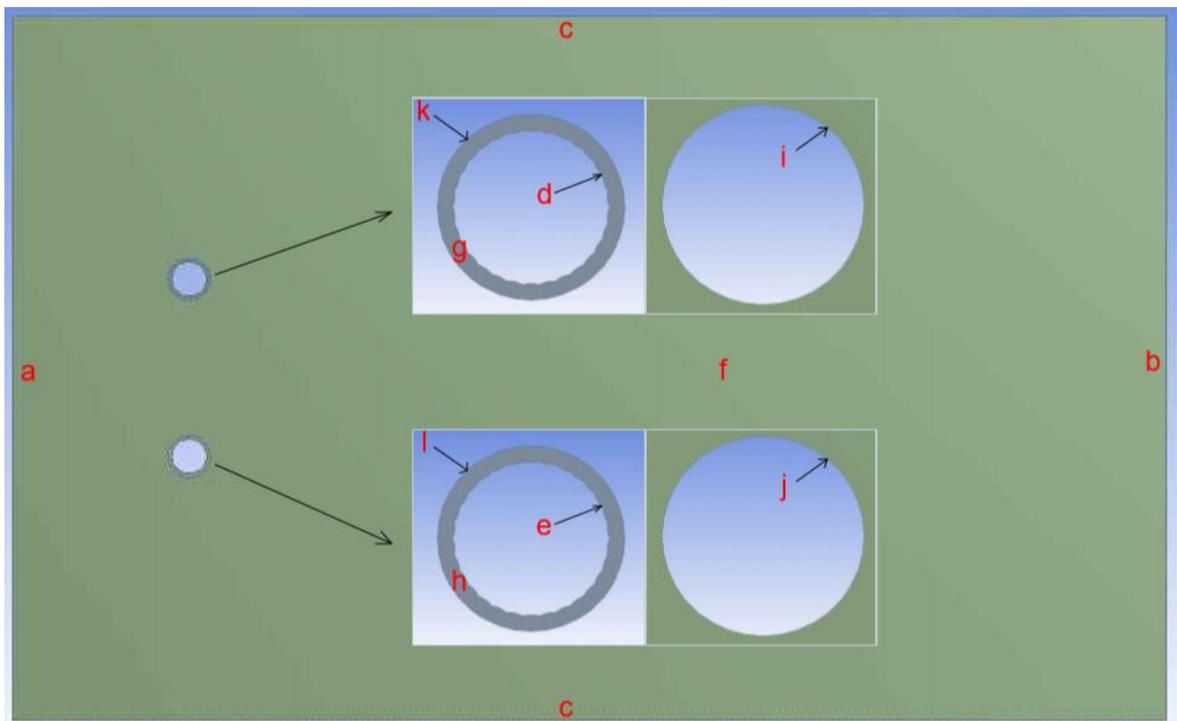


Gambar III. 5 *Named Selection* Model Satu Rotor

Bagian – bagian dari domain maupun model yang telah didefinisikan adalah sebagai berikut ini.

- a. *Inlet*, adalah bagian masuknya aliran fluida
- b. *Outlet*, adalah bagian keluarnya aliran fluida
- c. *Wall*, adalah batas atas dan bawah fluida yang seolah – olah berperan sebagai dinding
- d. *Rotor*, adalah benda atau objek yang akan diamati
- e. *Fixed*, adalah bagian dimana fluida dianggap diam / tidak terpengaruh oleh putaran dari rotor
- f. *Rotate*, adalah bagian dimana fluida dianggap bergerak / terpengaruh oleh putaran dari rotor
- g. *Interface1*, adalah sisi dari *fixed* (fluida diam) yang bersinggungan dengan sisi *rotate* (fluida bergerak)

- h. *Interface2*, adalah sisi dari *rotate* (fluida bergerak) yang bersinggungan dengan sisi *fixed* (fluida diam)



Gambar III. 6 *Named Selection Model Dua Rotor*

Bagian – bagian dari domain maupun model yang telah didefinisikan adalah sebagai berikut ini.

- Inlet*, adalah bagian masuknya aliran fluida
- Outlet*, adalah bagian keluarnya aliran fluida
- Wall*, adalah batas atas dan bawah fluida yang seolah – olah berperan sebagai dinding
- Rotor 1*, adalah benda atau objek yang akan diamati
- Rotor 2*, adalah benda atau objek yang akan diamati
- Fixed*, adalah bagian dimana fluida dianggap diam / tidak terpengaruh oleh putaran dari rotor
- Rotate 1*, adalah bagian dimana fluida dianggap bergerak / terpengaruh oleh putaran dari rotor 1
- Rotate 2*, adalah bagian dimana fluida dianggap bergerak / terpengaruh oleh putaran dari rotor 2
- Interface1*, adalah sisi dari *fixed* (fluida diam) yang bersinggungan dengan sisi *rotate 1* (fluida bergerak)

- j. *Interface3*, adalah sisi dari *fixed* (fluida diam) yang bersinggungan dengan sisi *rotate 2* (fluida bergerak)
- k. *Interface2*, adalah sisi dari *rotate 1* (fluida bergerak) yang bersinggungan dengan sisi *fixed* (fluida diam)
- l. *Interface4*, adalah sisi dari *rotate 2* (fluida bergerak) yang bersinggungan dengan sisi *fixed* (fluida diam)

## 2. Meshing

Metode *meshing* yang digunakan adalah *hybrid mesh* dimana terdapat dua jenis *meshing* yaitu *quadrilateral (structured mesh)* dan *triangular (unstructured mesh)*. *Structured mesh* digunakan pada area rotor sedangkan *unstructured mesh* digunakan pada area *rotating domain* dan *fixed domain*. Pertama ditentukan terlebih dahulu *sizing* dan *quality* dari *global mesh* yang digunakan. Detail dari *global mesh* ditunjukkan pada Tabel III. 4.

Tabel III. 4 Detail *Global Meshing*

Global Meshing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Max Face Size	0,8 m
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	0,001 m
Growth Rate	1,2
Span Angle Center	Fine
Smoothing	High

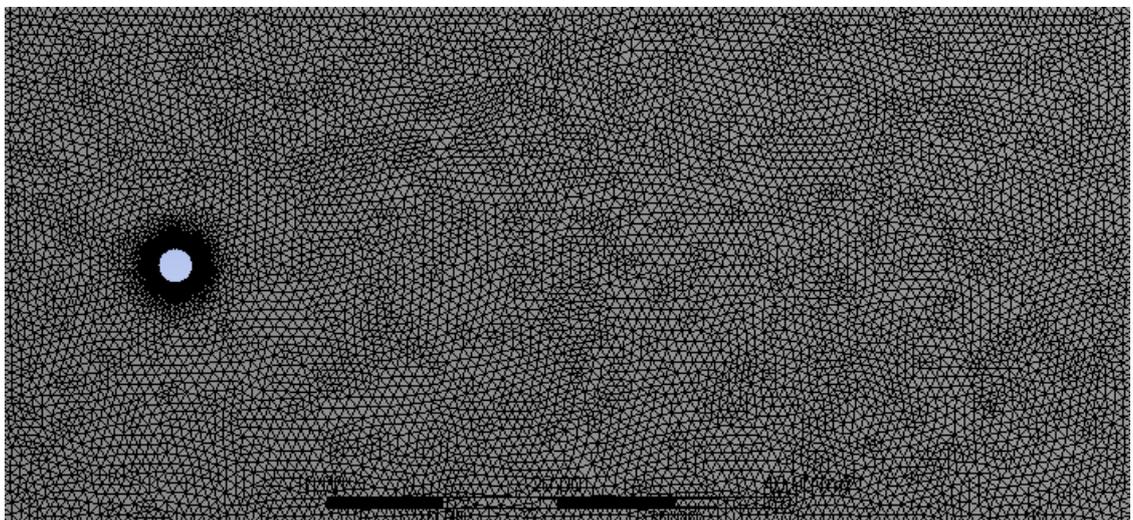
Pada daerah perbatasan antara *rotating domain* dan *fixed domain* digunakan *edge sizing* agar pada daerah tersebut memiliki ukuran *meshing* yang sama. Pada daerah sekitar rotor digunakan *edge sizing* kemudian pada daerah *rotating domain* digunakan *face sizing* sehingga mulai dari daerah rotor sampai daerah *fixed domain* kerapatan dari *meshing* berubah. Pada daerah rotor *wall* digunakan *structured mesh* agar dapat menangkap aliran yang terjadi pada daerah lapisan batas (*boundary layer*). Hal ini sangat penting karena berpengaruh terhadap akurasi hasil simulasi. Pada daerah ini digunakan *inflation layers* sebanyak 20 layer dengan *first cell height* agar ukuran cell pertama pada *boundary layer* tersebut dapat diatur. Untuk menentukan ukuran *cell* pertama terlebih dahulu harus diketahui nilai dari *nondimensional wall distance (y+)* yang sesuai dengan model turbulente yang

digunakan. Pada simulasi ini digunakan model turbulensi K- $\omega$  SST sehingga nilai dari  $y^+$  harus sama dengan 1 (ANSYS Inc, 2013). Detail dari *meshing* ditunjukkan pada Tabel III. 5 berikut ini.

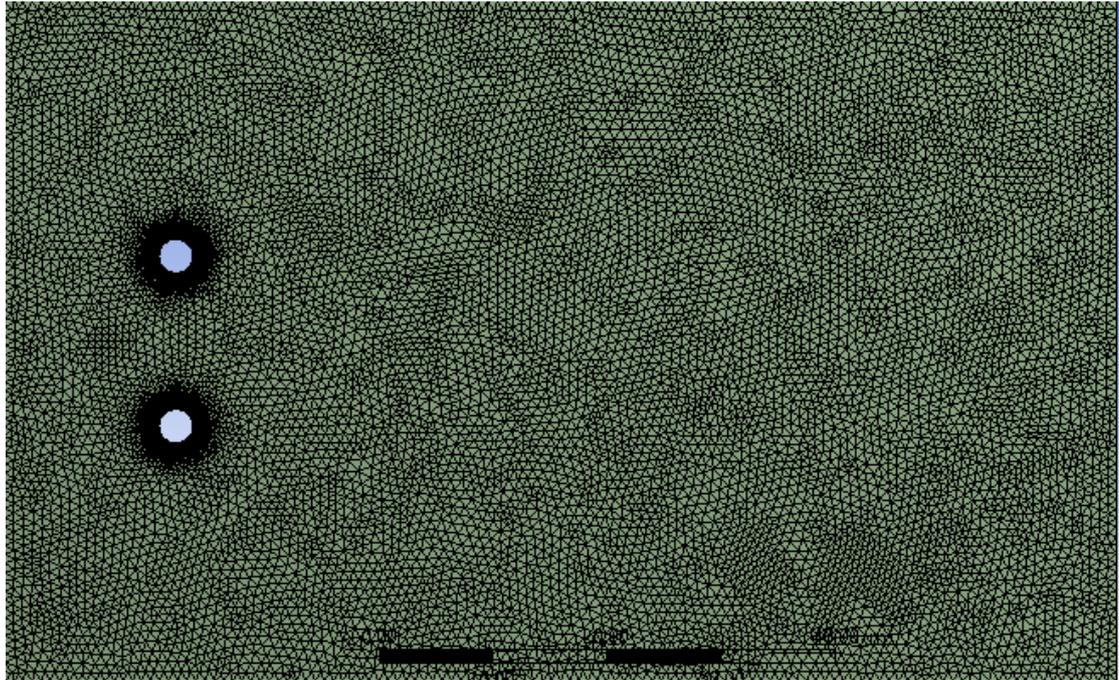
Tabel III. 5 Detail *Meshing* Tiap Bagian

Bagian	Jenis <i>Meshing</i>	Detail
Rotor	<i>edge sizing</i>	Element size = 0,002 m
	<i>Inflation</i>	First Layer Thickness
		First Layer Height = $5 \times 10^{-5}$ m
		Maximum Layers = 20
		Growth Rate = 1,2
interface1	<i>edge sizing</i>	Element size = 0,02 m
interface2	<i>edge sizing</i>	Element size = 0,02 m
rotate	<i>face sizing</i>	Element size = 0,02 m

Hasil *meshing* yang telah dibuat dengan ketentuan – ketentuan yang telah dijelaskan seperti pada Tabel III. 3 dan Tabel III. 4 ditunjukkan pada Gambar III. 7 untuk domain satu rotor dan Gambar III. 8 untuk domain dua rotor.

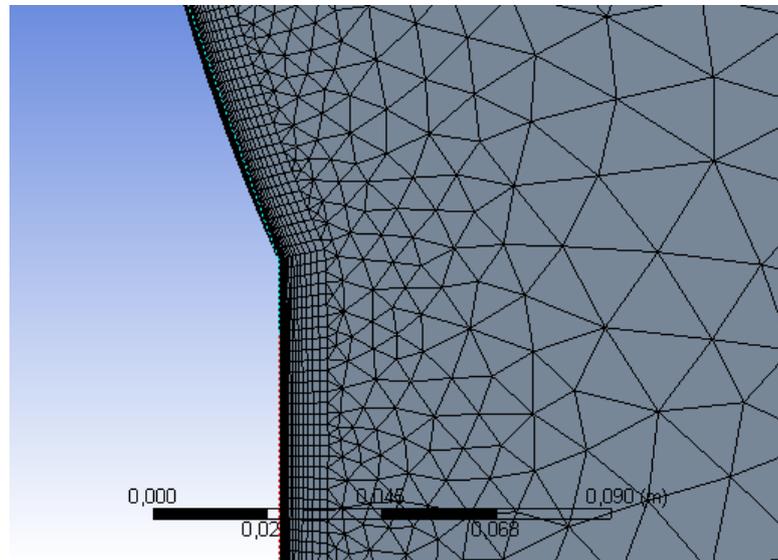


Gambar III. 7 Hasil *Meshing* Satu Rotor



Gambar III. 8 Hasil *Meshing* Dua Rotor

Pada daerah sekitar rotor diperlukan *meshing* dengan resolusi tinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar III. 9 berikut ini.



Gambar III. 9 Detail *Meshing* Pada Rotor

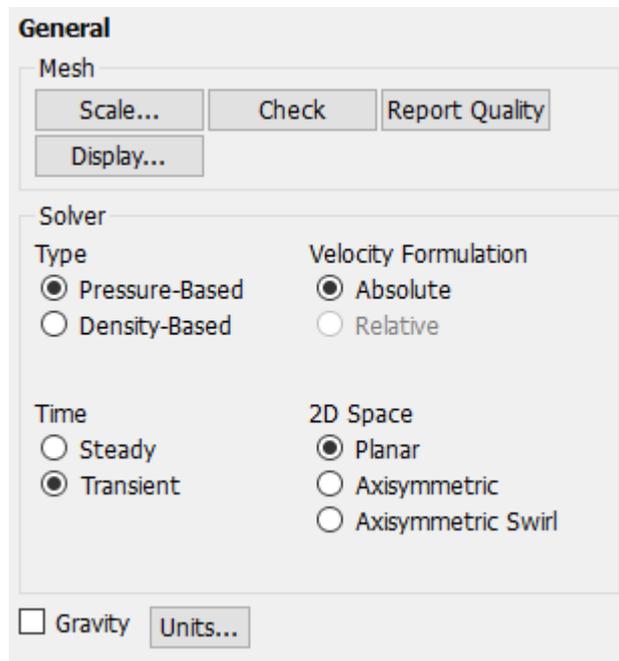
#### III.4.2. Tahap *Solver Set-Up*

Tahap *Solver Set-Up* adalah tahapan untuk mendefinisikan dan mengatur parameter – parameter yang digunakan dalam simulasi. Parameter – parameter yang ditentukan harus benar dan sesuai dengan kasus yang akan disimulasikan karena akan berpengaruh terhadap

tingkat akurasi dari hasil simulasi. Parameter yang ditentukan meliputi pengaturan kondisi batas, jenis fluida, model turbulensi yang digunakan, tipe *solver*, metode penyelesaian (*solution method*), dll. Berikut ini parameter – parameter yang diatur pada simulasi yang digunakan di penelitian ini.

a. *General*

Bagian ini digunakan untuk mengatur *Solver* yang digunakan dalam simulasi. *Solver* yang digunakan pada simulasi ini adalah tipe *pressure-based* karena hasil yang didapatkan pada simulasi berupa tekanan bukan massa jenis. *Transient* dipilih karena hasil simulasi yang diamati bergantung pada waktu (*time dependent*).

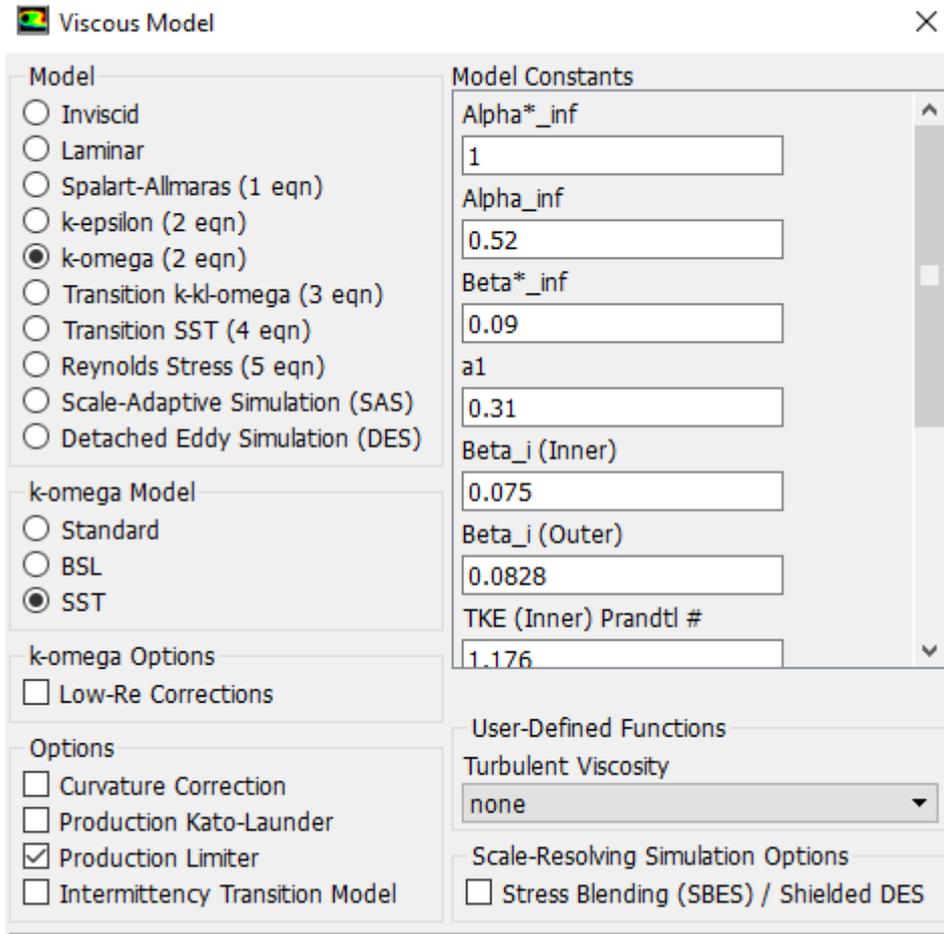


Gambar III. 10 Pengaturan pada *General*

b. *Models*



Bagian ini digunakan untuk menentukan model turbulensi yang digunakan dalam simulasi. Model turbulensi yang dipilih harus sesuai dengan kasus yang disimulasikan karena mempengaruhi tingkat akurasi hasil simulasi. Model turbulensi yang digunakan pada penelitian ini adalah K- $\omega$  SST karena dari perhitungan *Reynolds number* didapatkan nilai sekitar  $1,1 \times 10^6$  sehingga aliran turbulen. Selain itu model turbulensi ini dipilih karena memiliki tingkat akurasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan model turbulensi lainnya untuk menganalisis aliran yang melewati silinder yang berputar (A.M.Mgaidi, 2017).



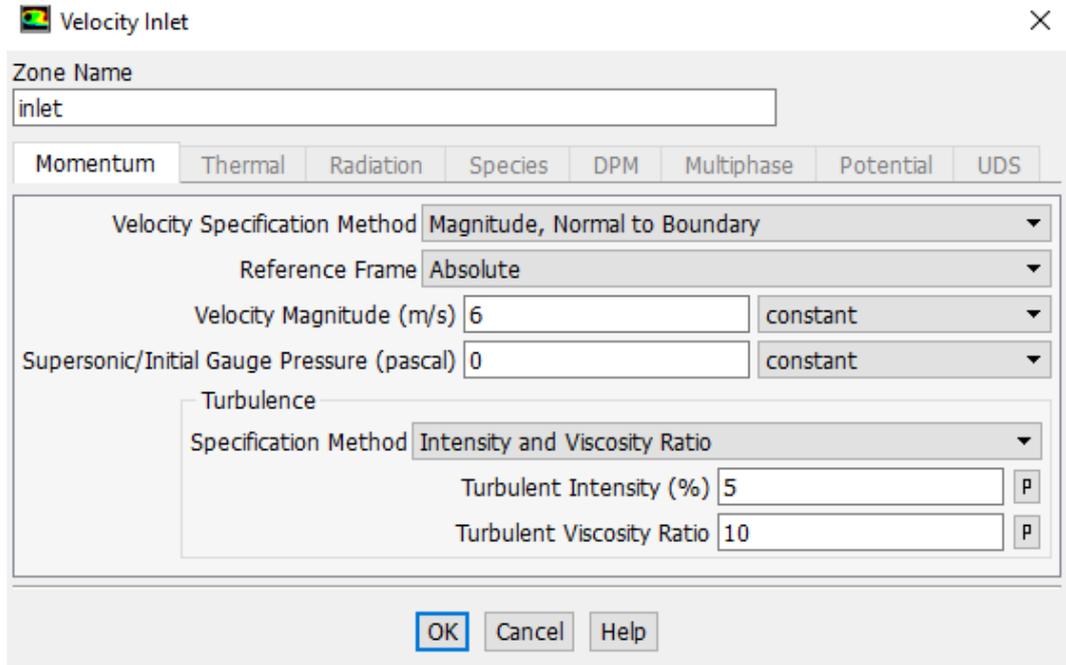
Gambar III. 11 Pengaturan *Viscous Model*

c. *Boundary Conditions*

Bagian ini digunakan untuk mengatur parameter – parameter yang digunakan pada kondisi batas. Parameter – parameter yang digunakan adalah sebagai berikut ini.

1. *Inlet*

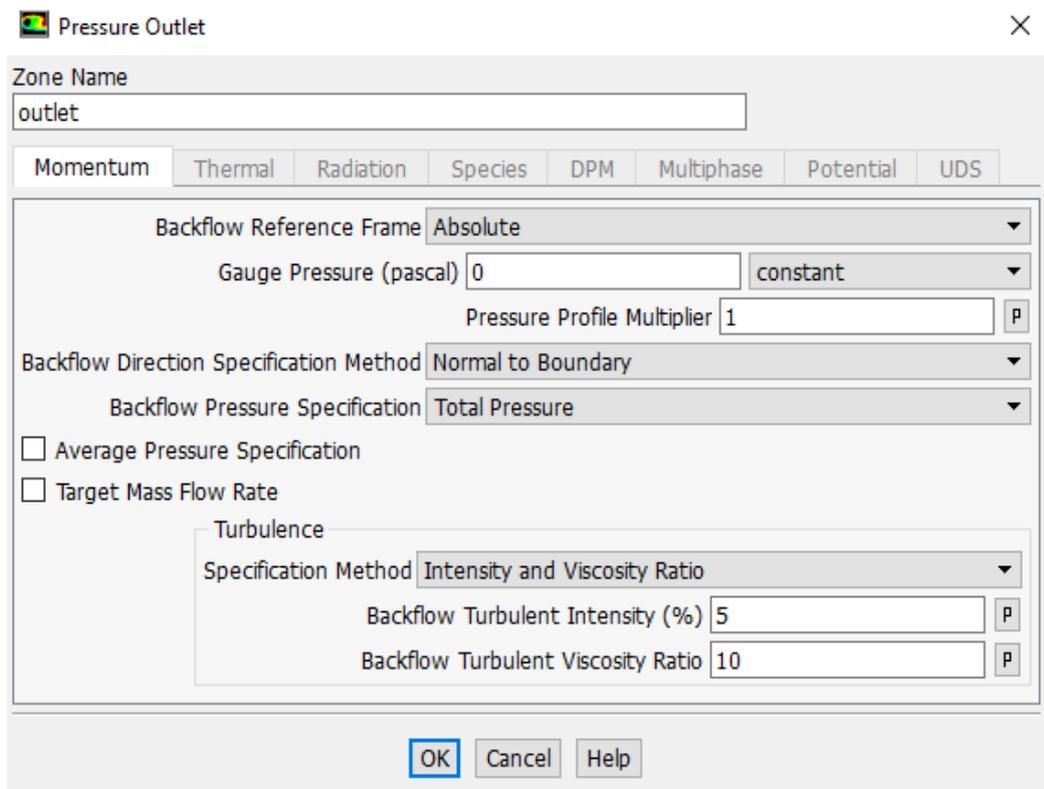
- Pilih *velocity-inlet* sebagai kondisi batas pada *inlet*
- Isi kecepatan angin yang digunakan pada kolom *velocity magnitude*
- Untuk pengaturan lain dibiarkan *default*



Gambar III. 12 Pengaturan *Velocity Inlet*

## 2. *Outlet*

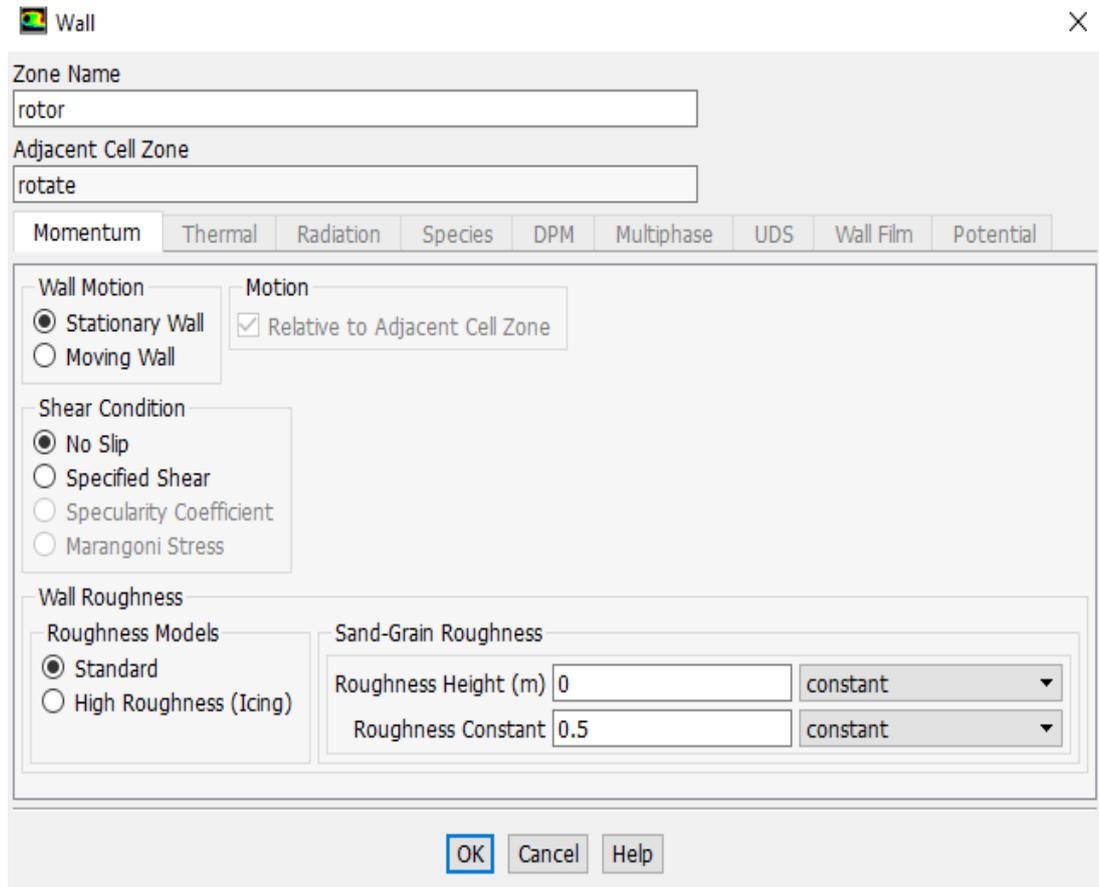
Pengaturan pada *outlet* dibiarkan *default* seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar III. 13 Pengaturan *Pressure Outlet*

### 3. Rotor

Pengaturan pada kondisi batas rotor dibiarkan *default* seperti yang ditunjukkan pada gambar

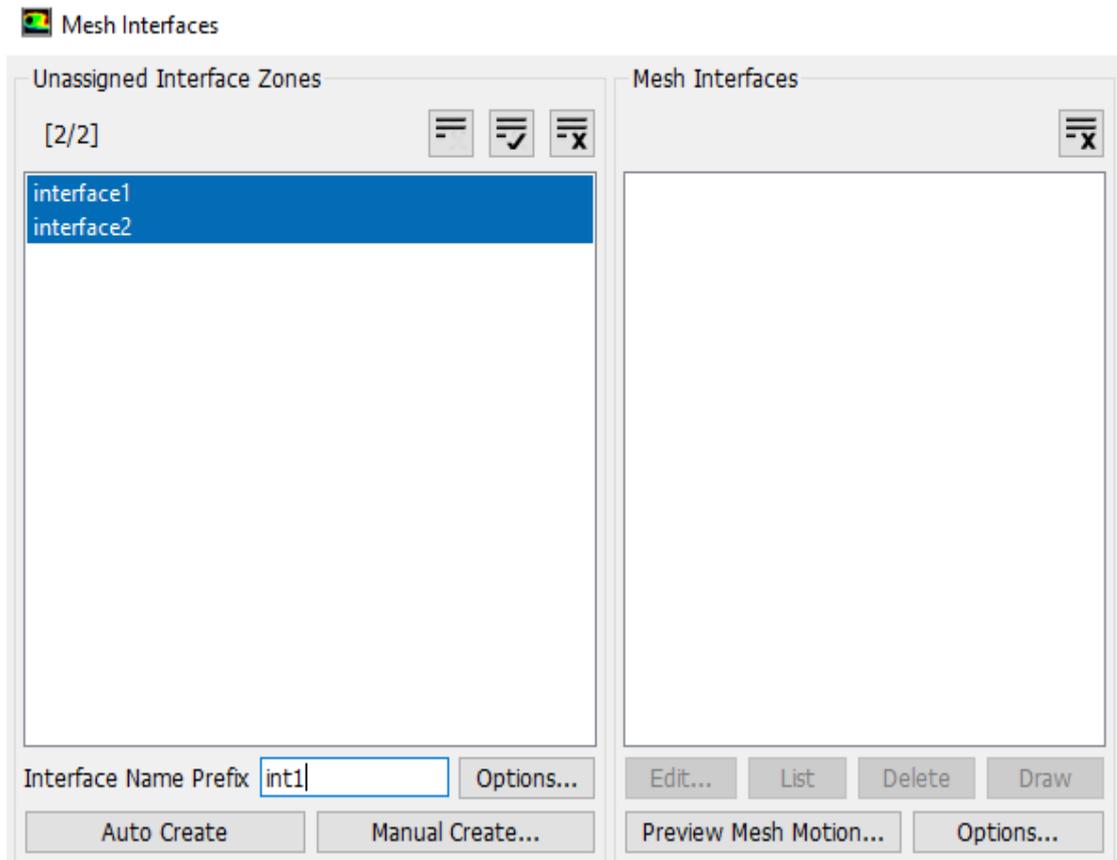


Gambar III. 14 Pengaturan Wall

#### d. Mesh Interfaces

Fungsi dari *Mesh Interfaces* adalah untuk menggabungkan 2 *interfaces* yang telah dibuat menjadi satu sehingga tidak ada celah antara kedua *interfaces* tersebut. Pengaturan *Mesh Interfaces* dilakukan dengan langkah – langkah berikut ini.

1. Klik icon  Mesh Interfaces
2. Kemudian akan muncul *Mesh Interfaces dialog box* seperti yang ditunjukkan pada gambar.



Gambar III. 15 Pengaturan *Mesh Interfaces*

3. Klik *interface1* dan *interface2*
  4. Klik *Auto Create* untuk menyelesaikan proses *Mesh Interfaces*
- e. *Dynamic Mesh*
- Fungsi dari *Dynamic Mesh* adalah untuk mendefinisikan gerakan dari benda yang diamati di dalam domain simulasi. Dalam penelitian ini rotor harus berputar sesuai dengan variasi *spin ratio* yang digunakan. Berikut ini langkah – langkah untuk mengatur *Dynamic Mesh* putaran rotor.
1. Membuat *script* untuk mendefinisikan gerakan rotor dengan *software* Microsoft Visual Basic. *Script* yang dibuat ditunjukkan pada gambar.

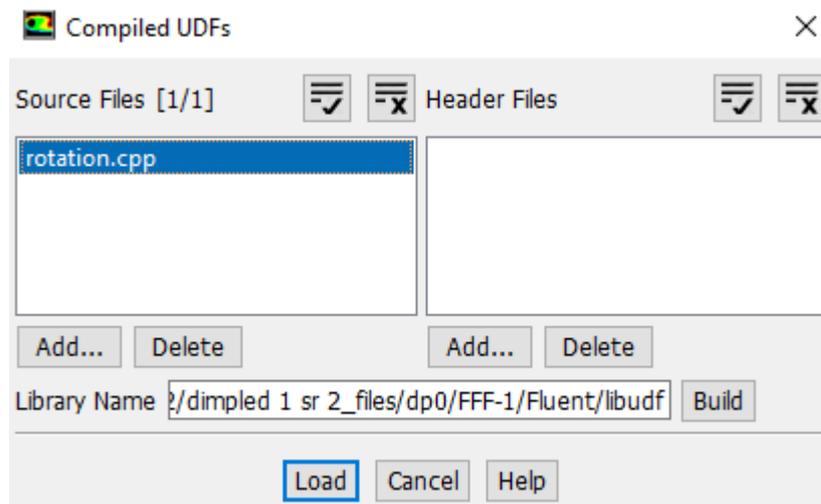
```

1  #include "udf.h"
2  #include "dynamesh_tools.h"
3  DEFINE_CG_MOTION(rotation,dt,vel,omega,time,dtime)
4  {
5      omega[2]=-8;
6  }

```

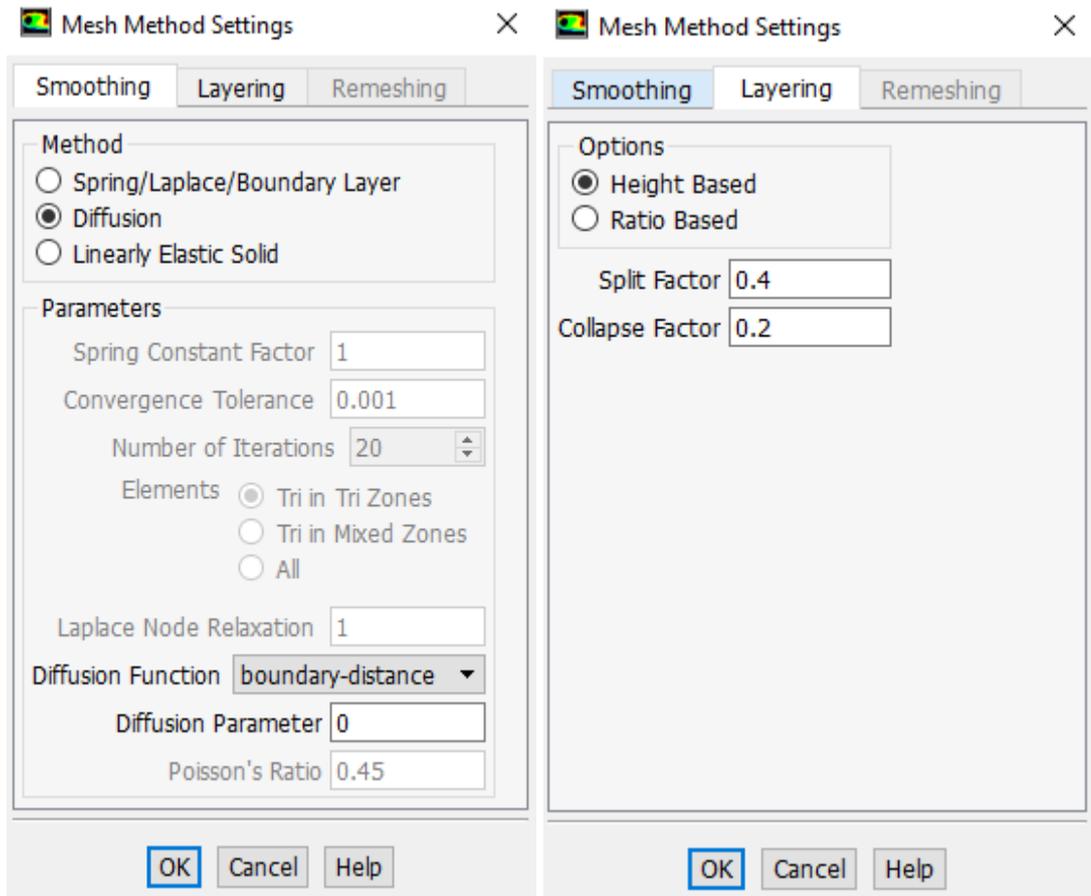
Gambar III. 16 Script pada UDF

2. Kemudian *script* yang sudah dibuat harus di *compile* pada *Software CFD* dengan cara klik menu **User Defined**, kemudian klik icon  $f(x)$  Functions, lalu pilih *compiled*.
3. Pada *Source File* klik *Add* lalu pilih *script file* yang telah dibuat. Kemudian klik *Build*. Setelah selesai klik *Load*. Proses ini ditunjukkan pada gambar



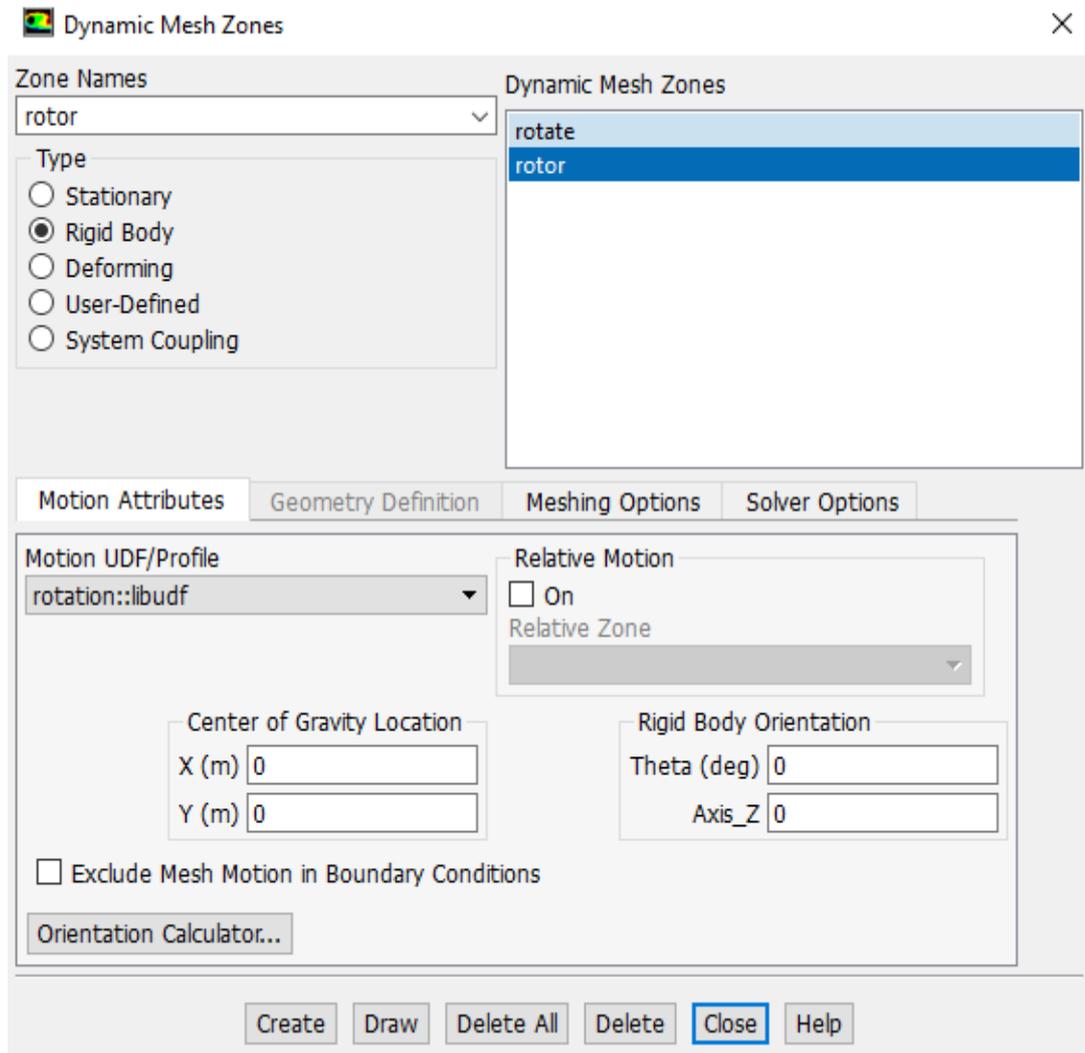
Gambar III. 17 Pengaturan *Compiled UDFs*

4. Pada *Dynamic Mesh Task Page* aktifkan *Dynamic Mesh* lalu pilih *Mesh Methods Smoothing* dan *Layering*. Pengaturan *Smoothing* dan *Layering* ditunjukkan pada gambar.



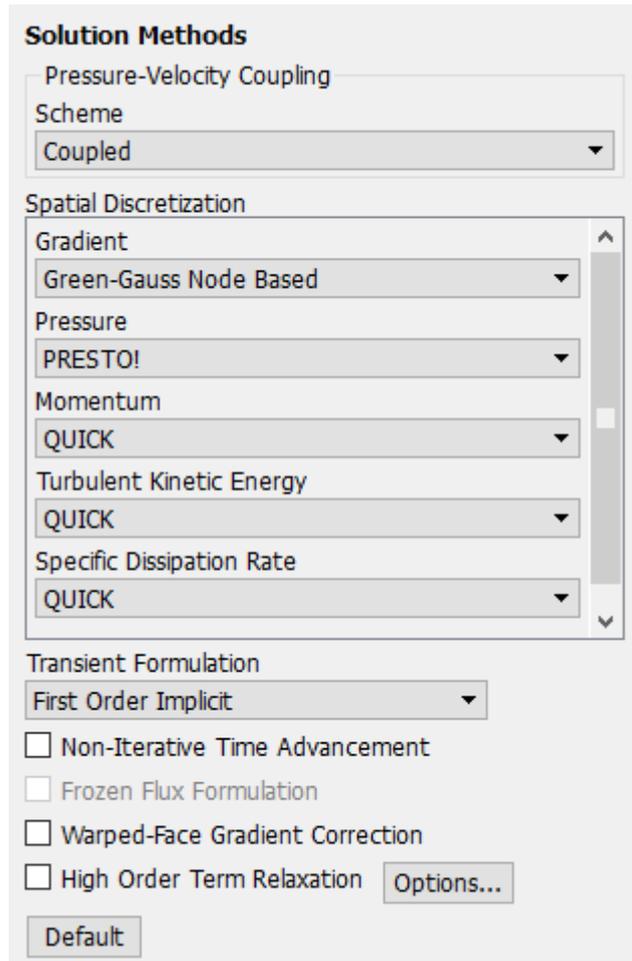
Gambar III. 18 Pengaturan *Mesh Method* pada *Dynamic Mesh*

5. Kemudian untuk mendefinisikan putaran rotor klik *Create/Edit* pada *Dynamic Mesh Task Page*. Lalu pada *Zone Names* pilih rotor dan pilih *Rigid Body* pada pilihan *Type*. Pastikan *Center of Gravity Location* sudah benar seperti titik berat rotor. Untuk menyelesaikan proses ini klik *Create*. Pengaturan ditunjukkan pada gambar.



Gambar III. 19 Pengaturan *Dynamic Mesh Zones*

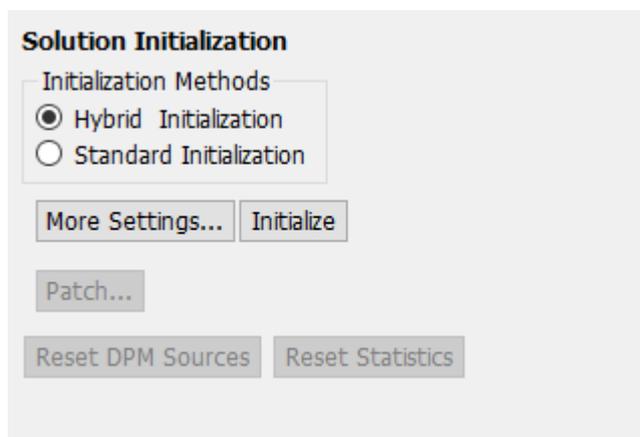
6. Langkah nomor 5 juga dilakukan untuk mendefinisikan pengaruh gerakan rotor pada domain *rotate*.
- f. *Solution Methods*
- Pada bagian ini ditentukan metode penyelesaian dari simulasi. Pengaturan pada bagian ini berpengaruh terhadap hasil dari simulasi. Pengaturan yang dipilih sebisa mungkin yang paling optimum dari segi hasil dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan simulasi. Gambar menunjukkan pengaturan *solution methods* yang digunakan.



Gambar III. 20 Pengaturan *Solution Methods*

g. *Solution Initialization*

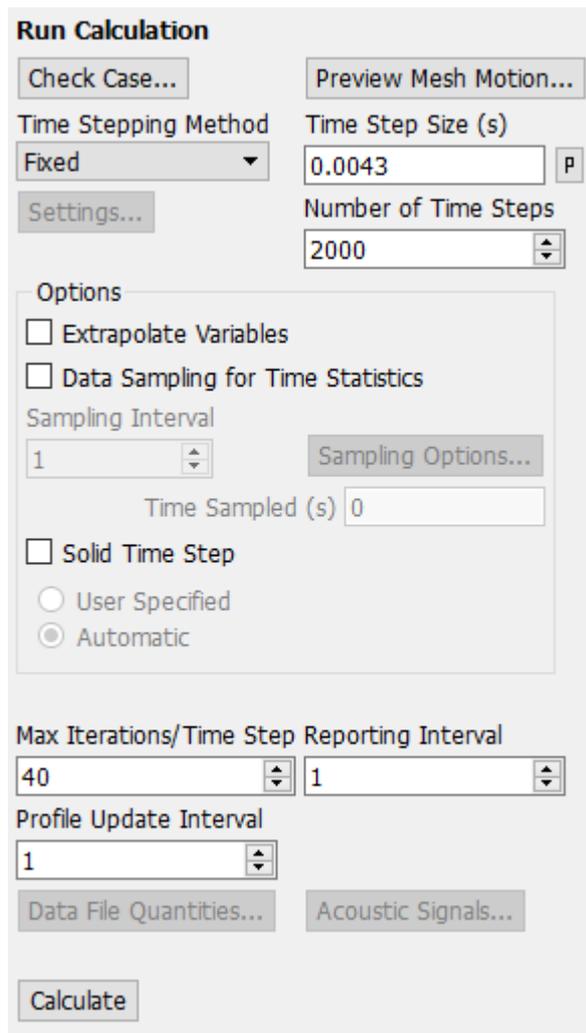
Pada simulasi ini metode inisialisasi pada *solution initialization* yang digunakan adalah *Hybrid Initialization*. Kemudian klik *Initialize* untuk memulai proses inisialisasi.



Gambar III. 21 Pengaturan *Solution Initialization*

h. *Run Calculation*

Pada bagian ini terdapat tiga pengaturan utama yaitu mengenai ukuran *time step*, jumlah *time step*, dan jumlah maksimum iterasi pada satu *time step*. *Max Iterations/Time Step* diatur sebanyak 40 untuk mencapai konvergensi. *Time step size* yang digunakan pada simulasi ini berbeda – beda tergantung pada variasi *Spin Ratio*. Sebagai acuan, ukuran *time step size* dalam derajat adalah  $3^\circ$ . Jumlah *time step* diatur sebanyak 2000 sampai grafik hasil yang didapatkan mencapai fase *steady*. Kemudian klik *Calculate* untuk memulai. Gambar menunjukkan pengaturan pada bagian *Run Calculation*.



Gambar III. 22 Pengaturan *Run Calculation*

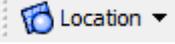
### III.4.3. Tahap *Post Processor*

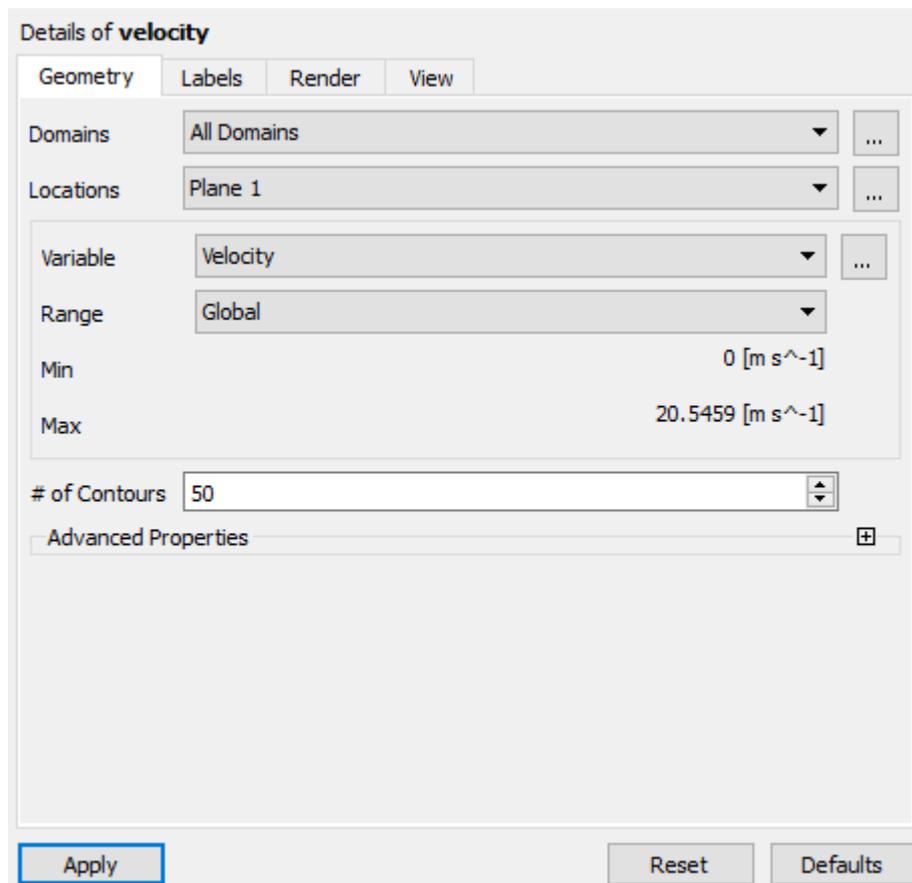
Tahap ini adalah tahap pengolahan dan visualisasi hasil dari simulasi CFD. Hasil simulasi dapat divisualisasikan dalam banyak tampilan seperti kontur tekanan, kontur kecepatan, aliran (*streamline*), vector plot, dan masih banyak lagi tergantung pada kebutuhan. Visualisasi ini berguna untuk melihat fenomena – fenomena yang terjadi pada aliran di sekitar

benda yang diamati. Pada penelitian ini terdapat 3 macam visualisasi yaitu kontur kecepatan, kontur tekanan, dan aliran (*streamline*) Visualisasi dilakukan dengan *software* ANSYS CFD-Post. Berikut ini langkah – langkah dalam menampilkan visualisasi hasil simulasi CFD.

a. Visualisasi kontur kecepatan aliran

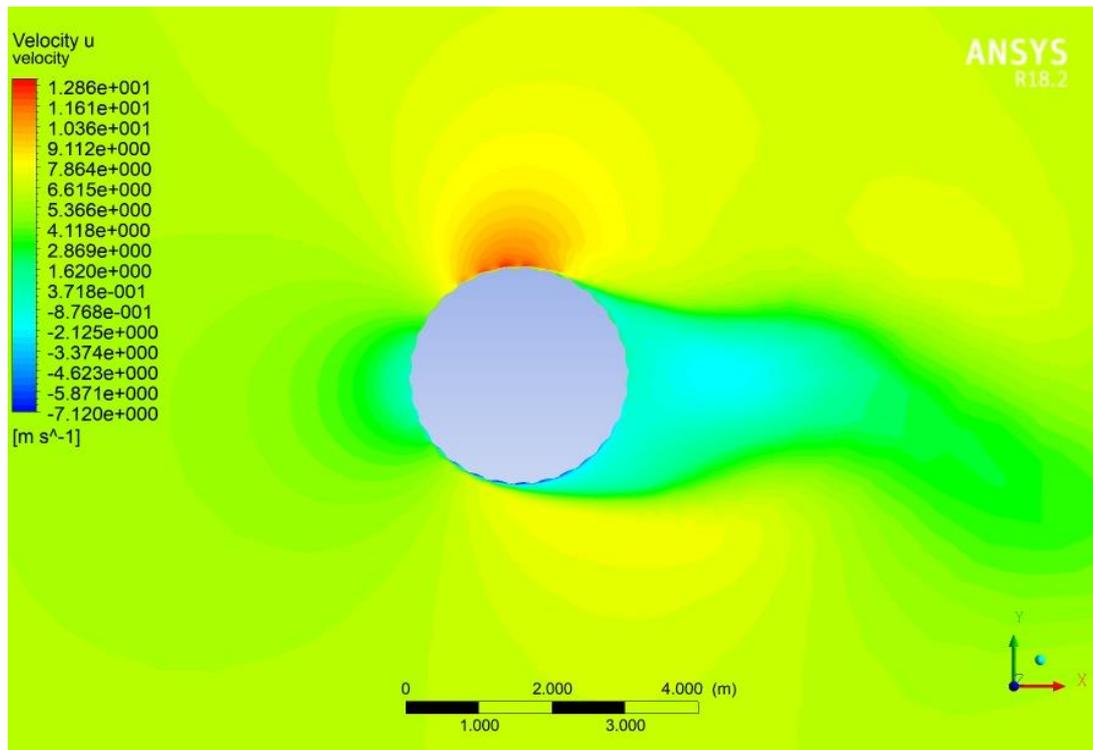
Kontur kecepatan aliran berfungsi untuk melihat distribusi dan perubahan kecepatan aliran pada domain simulasi khususnya sekitar rotor. Visualisasi kontur kecepatan aliran dapat dilakukan dengan langkah – langkah berikut ini.

1. Buat *plane* dengan cara klik icon  pada *toolbar*
2. Kemudian pilih icon *plane*
3. Pada *dialog box insert plane* kemudian beri nama *plane1*
4. Biarkan pengaturan detail *default* dan klik *Apply* untuk menampilkan hasilnya
5. Buat kontur dengan cara klik icon  pada *toolbar*
6. Pada *dialog box insert contour* kemudian beri nama *velocity contour*
7. Pada pengaturan detail pilih pengaturan sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar



Gambar III. 23 Pengaturan Kontur Kecepatan

8. Pada kolom *# of Contours* menunjukkan resolusi kontur yang dibuat. Semakin tinggi maka resolusi akan semakin bagus tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk *rendering*.
9. Klik *Apply* untuk menampilkan kontur yang dibuat. Kontur kecepatan ditunjukkan pada gambar berikut ini.

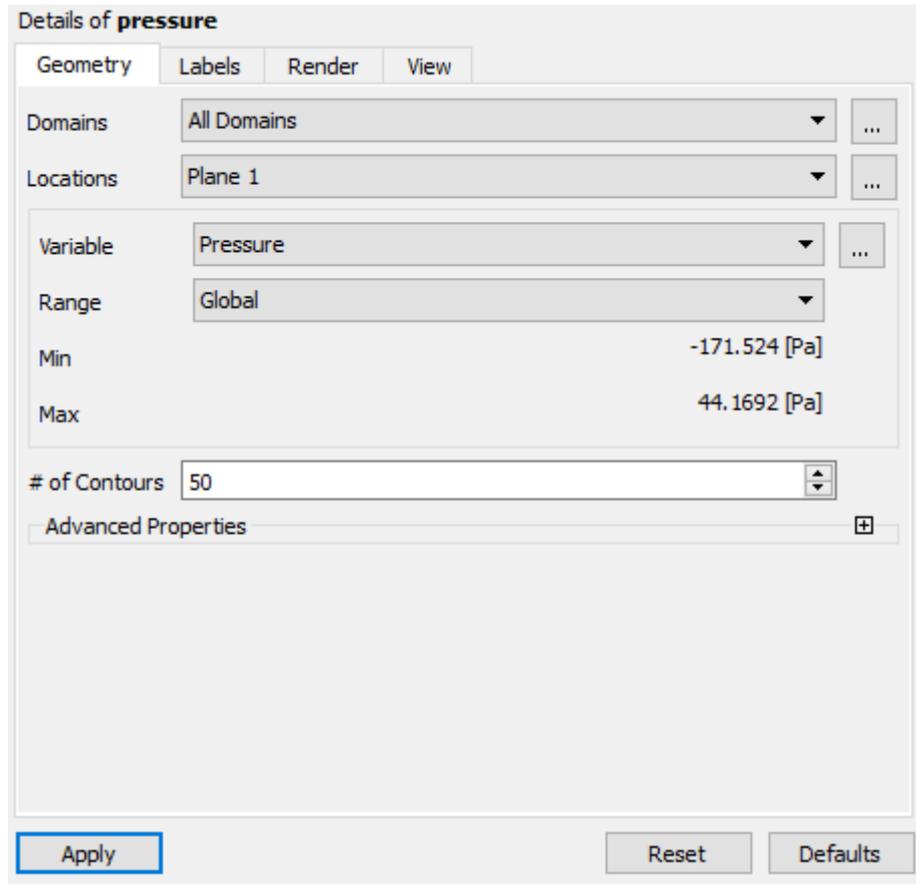


Gambar III. 24 Hasil Visualisasi Kontur Kecepatan

b. Visualisasi kontur tekanan aliran

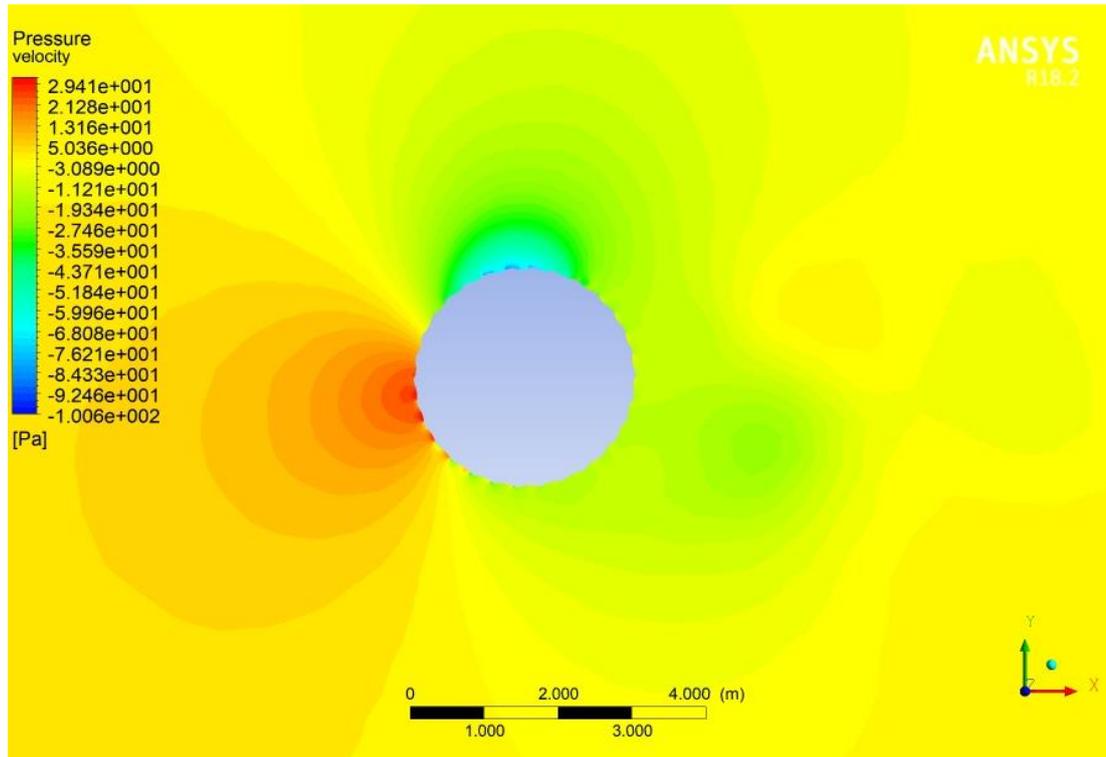
Kontur tekanan aliran berfungsi untuk melihat distribusi dan perubahan tekanan aliran pada domain simulasi khususnya sekitar rotor. Visualisasi kontur tekanan aliran dapat dilakukan dengan langkah – langkah berikut ini.

1. Buat kontur dengan cara klik *icon*  pada *toolbar*
2. Pada *dialog box insert contour* kemudian beri nama *pressure contour*
3. Pada pengaturan detail pilih pengaturan sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar



Gambar III. 25 Pengaturan Kontur Tekanan

4. Pada kolom *# of Contours* menunjukkan resolusi kontur yang dibuat. Semakin tinggi maka resolusi akan semakin bagus tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk *rendering*.
5. Klik *Apply* untuk menampilkan kontur yang dibuat. Kontur tekanan ditunjukkan pada gambar berikut ini.

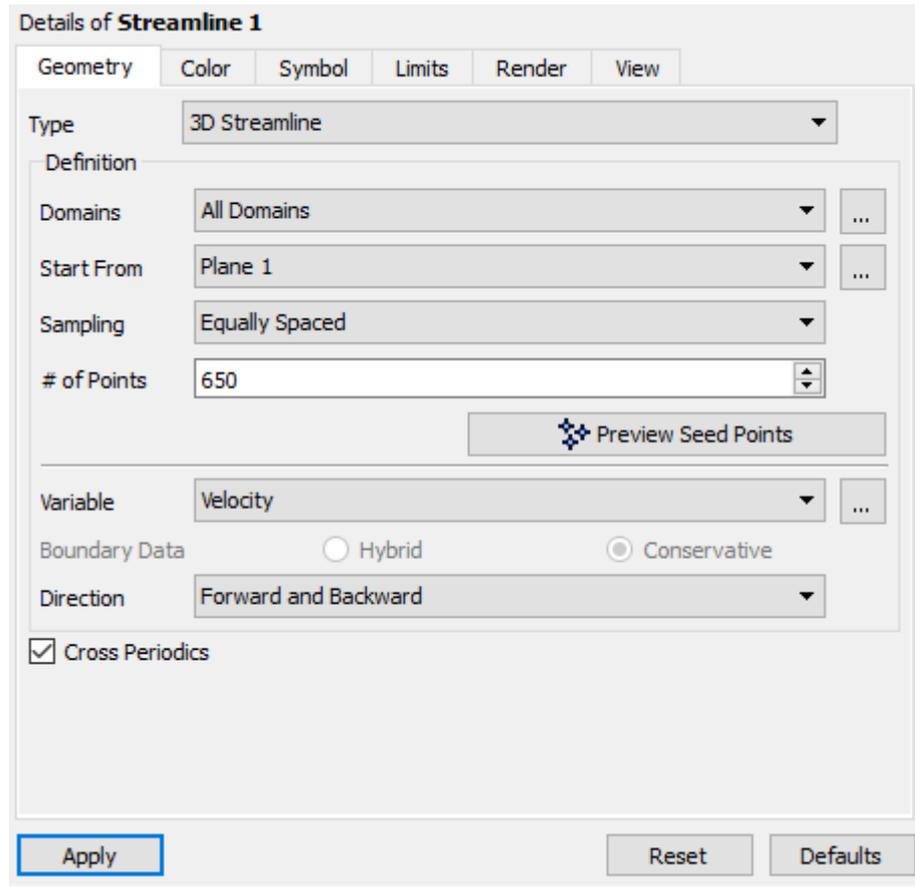


Gambar III. 26 Hasil Visualisasi Kontur Tekanan

c. Visualisasi bentuk aliran (*streamline*)

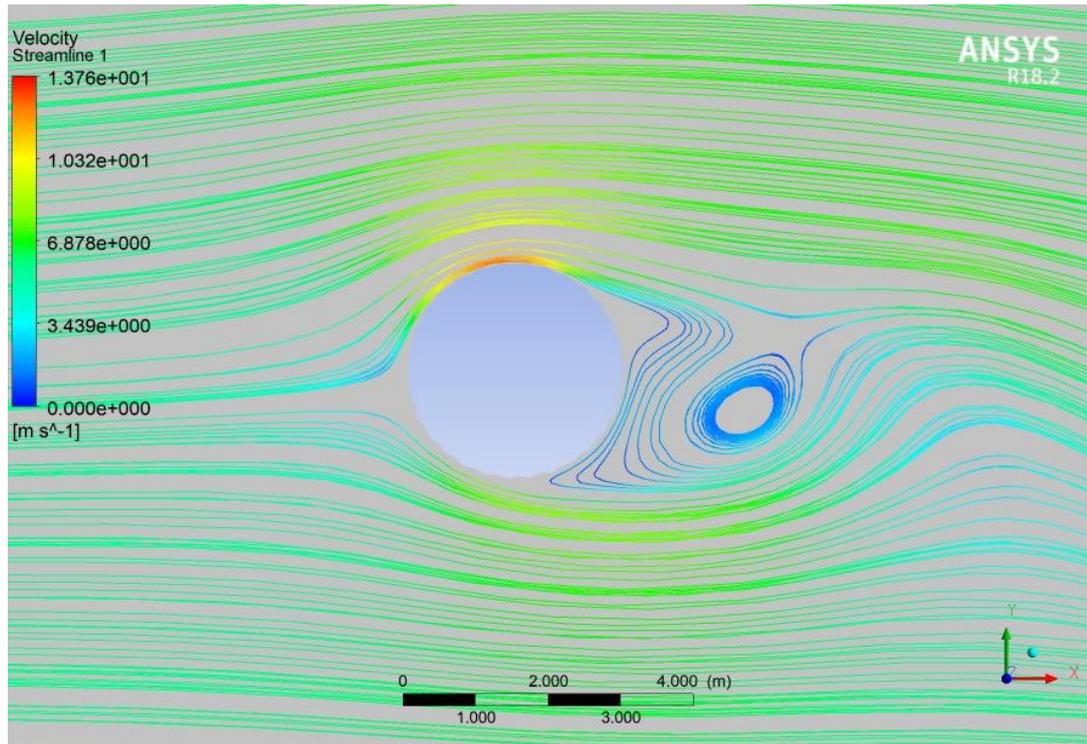
Visualisasi bentuk aliran (*streamline*) berfungsi untuk melihat bentuk aliran pada domain simulasi khususnya sekitar rotor. Visualisasi bentuk aliran (*streamline*) dapat dilakukan dengan langkah – langkah berikut ini.

1. Buat *streamline* dengan cara klik icon  pada *toolbar*
2. Pada *dialog box insert streamline* kemudian beri nama *streamline1*
3. Pada pengaturan detail pilih pengaturan sesuai dengan yang ditunjukkan pada gambar



Gambar III. 27 Pengaturan *Streamline*

4. Pada kolom *# of Points* menunjukkan resolusi dan banyaknya garis *streamline* yang dibuat. Semakin tinggi maka resolusi dan jumlah garis akan semakin banyak dan memberikan hasil yang semakin bagus tetapi membutuhkan waktu yang lebih lama untuk *rendering*.
5. Klik *Apply* untuk menampilkan kontur yang dibuat. Bentuk aliran (*streamline*) ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar III. 28 Hasil Visualisasi *Streamline*

### III.5. Validasi

Hasil simulasi yang telah didapatkan harus divalidasi agar dapat dipastikan bahwa hasil dan pengaturan – pengaturan yang dilakukan dalam simulasi sudah benar dan bisa dipertanggungjawabkan. Validasi dapat dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan hasil yang didapat dari metode lain. Dalam penelitian ini, validasi dilakukan dengan menggunakan eksperimen pada *wind tunnel* yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya yang telah dipublikasikan.

### III.6. Analisis Data dan Pembahasan

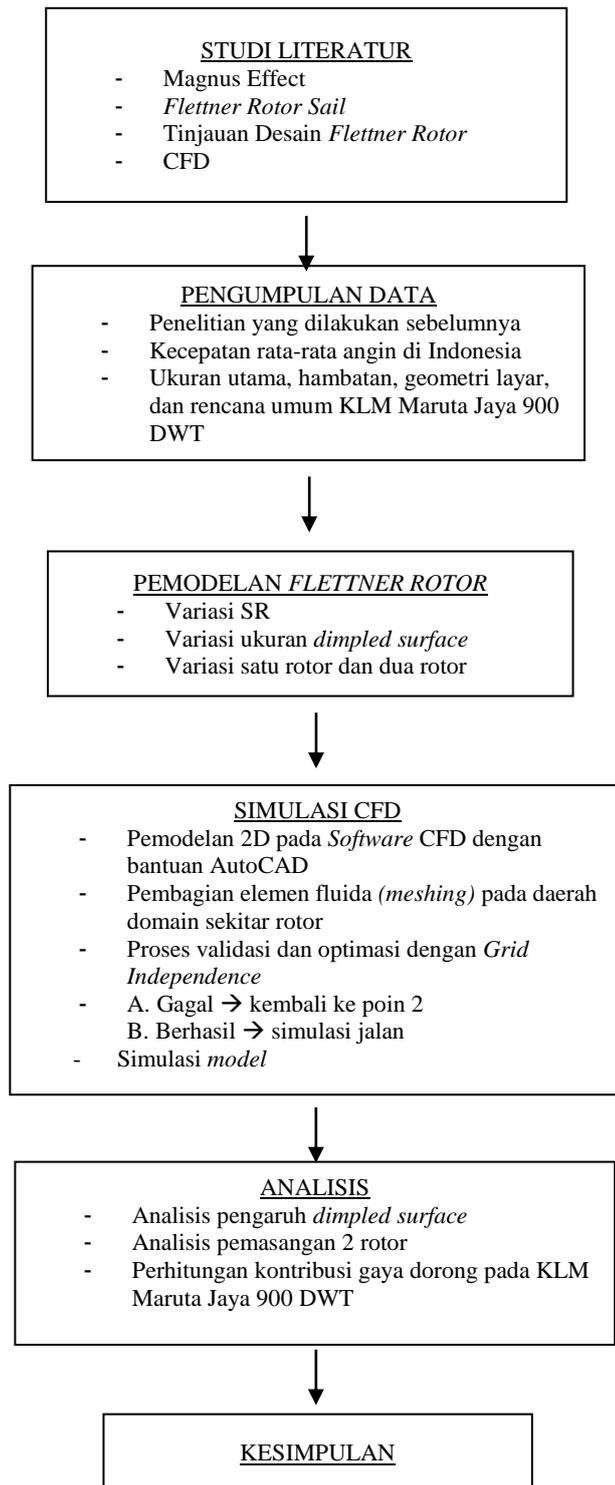
Tahap selanjutnya adalah analisis data dan pembahasan hasil yang telah didapatkan dari simulasi CFD. Pada tahap ini dilakukan analisis mengenai pengaruh penambahan *dimpled surface* pada rotor terhadap koefisien *lift* dan koefisien *drag*, besar kontribusi gaya dorong terhadap kapal, besar kecepatan kapal yang dihasilkan dari pemasangan rotor, dan pengaruh variable – variable lain terhadap performa rotor.

### **III.7. Kesimpulan**

Pada tahap ini dilakukan penarikan kesimpulan terhadap hasil – hasil yang telah didapatkan dari penelitian. Kesimpulan harus dapat menjawab semua permasalahan – permasalahan yang sudah dirumuskan sebelumnya.

### **III.8. Bagan Alir**

Diagram alir tahapan – tahapan pengerjaan Tugas Akhir ini ditunjukkan pada Gambar III. 29.



Gambar III. 29 Bagan Alir

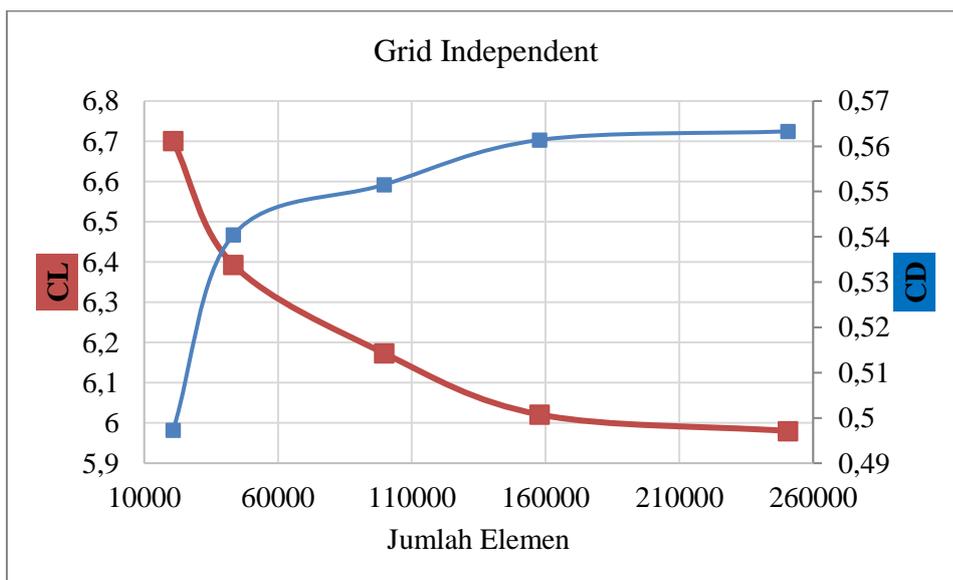
## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

### IV.1. *Grid Independence Study*

*Grid Independence Study* merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan jumlah dan ukuran *meshing* yang paling optimum sehingga didapatkan hasil simulasi dan waktu simulasi paling optimum. *Grid Independence* telah tercapai ketika hasil simulasi tidak mengalami perubahan yang signifikan ( $< 1\%$ ) saat jumlah elemen ditambah. Pada penelitian ini, *Grid Independence* dilakukan pada variasi model satu rotor dan dua rotor. Hasil simulasi yang diamati untuk parameter *Grid Independence* adalah  $C_L$  dan  $C_D$  dari rotor. *Grid Independence* untuk variasi satu rotor dilakukan pada model B. Hasil dari *Grid Independence* variasi model satu rotor disajikan pada Tabel IV. 1 dan Gambar IV. 1 berikut ini.

Tabel IV. 1 *Grid Independence* Model Satu Rotor

Jumlah Elemen	$C_L$	Selisih (%)	$C_D$	Selisih (%)
20804	6,701	-	0,497	-
43296	6,393	4,592	0,540	4,315
99747	6,173	3,445	0,552	1,111
157845	6,021	2,463	0,561	0,986
250659	5,980	0,678	0,563	0,19

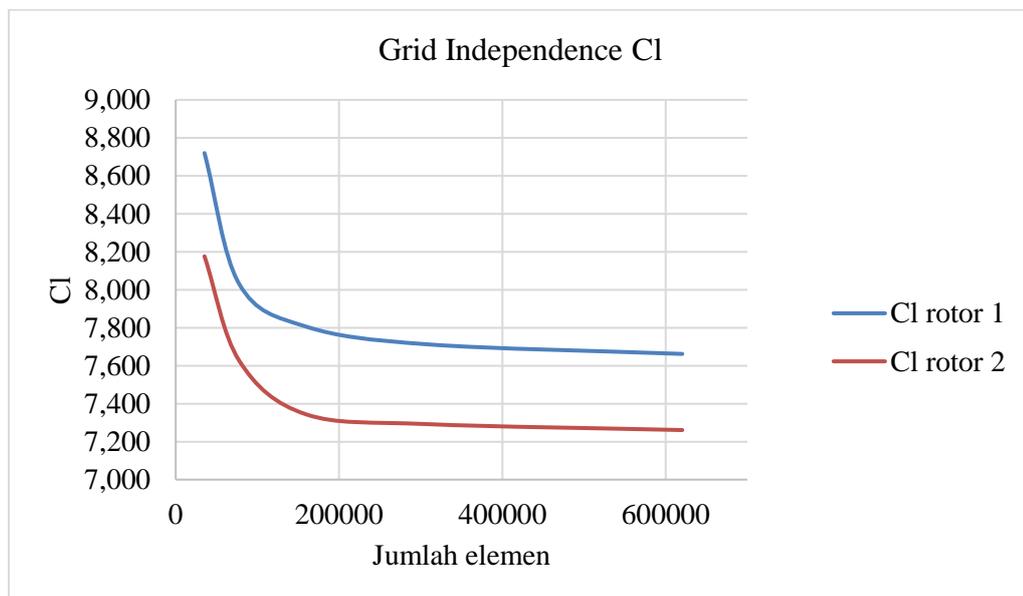


Gambar IV. 1 Grafik *Grid Independence* Model Satu Rotor

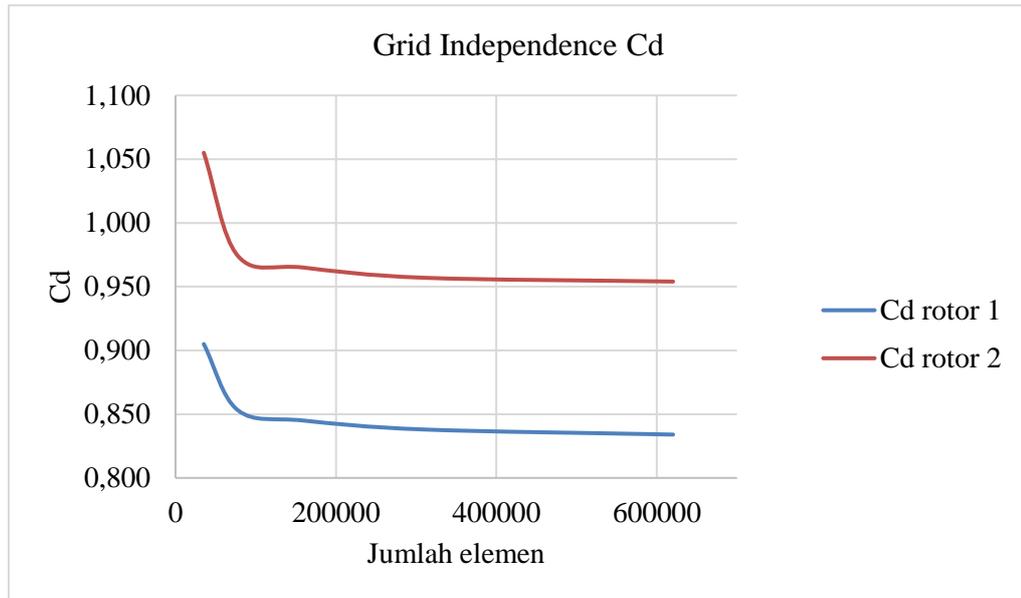
Dari Tabel IV. 1 dapat dilihat bahwa penambahan elemen dari 157845 hingga 250659, hasil  $C_L$  hanya memiliki perbedaan sebesar 0,678 % dan  $C_D$  sekitar 0,19 %. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa *Grid Independence* terjadi pada jumlah elemen 157845 sehingga jumlah elemen yang dipakai pada penelitian ini adalah 157845 dan ukuran *meshing* yang dipakai adalah ukuran pada jumlah elemen 157845. Kemudian untuk variasi model dua rotor *Grid Independence* dilakukan pada variasi sudut angin  $90^\circ$ . Hasil *Grid Independence* model dua rotor ditunjukkan pada Tabel IV. 2, Gambar IV. 2 dan Gambar IV. 3 berikut ini.

Tabel IV. 2 *Grid Independence* Model Dua Rotor

Jumlah elemen	$C_L$ rotor 1	Selisih (%)	$C_L$ rotor 2	Selisih (%)	$C_D$ rotor 1	Selisih (%)	$C_D$ rotor 2	Selisih (%)
35222	8,720	-	8,176	-	0,905	-	1,055	-
77930	8,029	7,924	7,625	6,739	0,853	5,746	0,974	7,678
159590	7,806	2,777	7,344	3,685	0,845	0,938	0,965	0,924
309604	7,712	1,204	7,292	0,708	0,838	0,828	0,957	0,829
620301	7,662	0,648	7,261	0,425	0,834	0,477	0,954	0,313



Gambar IV. 2 Grafik *Grid Independence*  $C_L$  Model Dua Rotor



Gambar IV. 3 Grafik *Grid Independence*  $C_D$  Model Dua Rotor

Dari Tabel IV. 2 menunjukkan bahwa penambahan elemen dari 309604 hingga 620301, hasil  $C_L$  rotor 1 memiliki perbedaan sebesar 0,648 %,  $C_L$  rotor 2 memiliki perbedaan sebesar 0,425 %,  $C_D$  rotor 1 memiliki perbedaan sebesar 0,477 % dan  $C_D$  rotor 2 memiliki perbedaan sebesar 0,313 %. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa *Grid Independence* terjadi pada jumlah elemen 309604.

## IV.2. Validasi

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil dan metode simulasi sudah benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Validasi dapat dilakukan dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan hasil yang diperoleh dari metode lain baik itu numerik maupun eksperimen. Atau dapat juga membandingkan hasil simulasi dengan penelitian – penelitian sejenis yang sudah dilakukan sebelumnya yang hasilnya sudah dipublikasikan dan dipertanggungjawabkan. Pada penelitian ini validasi dilakukan menggunakan penelitian sejenis yang telah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh A. M. Mgaidi, dkk dengan judul "*Numerical and Experimental Analyses of the Flow Around A Rotating Circular Cylinder at Subcritical Regime of Reynolds Number Using K-E and K- $\Omega$ -SST Turbulent Models*" menggunakan dua metode analisis yaitu pengujian pada *wind tunnel* (eksperimen) dan menggunakan CFD (numerik). Data yang digunakan untuk validasi pada penelitian kali ini adalah data yang diperoleh dari pengujian pada *wind tunnel*. Parameter *operating conditions* yang digunakan pada pengujian *wind tunnel* ditunjukkan pada Tabel IV. 3. Diameter

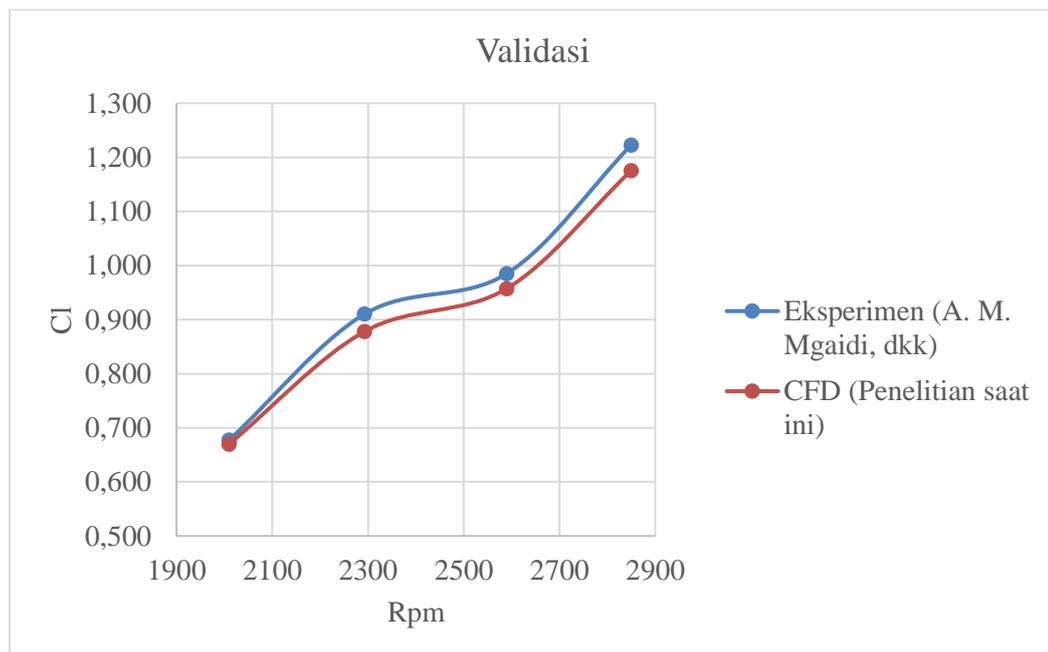
silinder (rotor) yang digunakan saat pengujian pada *wind tunnel* adalah 0,08 meter. Pada Tabel IV. 4 dan Gambar IV. 4 ditunjukkan hasil validasi yang telah dilakukan.

Tabel IV. 3 *Operating Condition Pada Wind Tunnel*

Atmospheric Pressure (P)	1,01 x 10 <sup>5</sup> N/m <sup>2</sup>
Temperature (T)	306,15 K <sup>o</sup>
Air Density	1,1539 kg/m <sup>3</sup>
Universal Gas Constant	289
Air Viscosity	1,872 x 10 <sup>5</sup>

Tabel IV. 4 Validasi

Kecepatan angin (m/s)	Rpm	CL Eksperimen (A. M. Mgaidi, dkk)	CL CFD (Penelitian saat ini)	Margin (%)
13	2010	0,677	0,670	1,068
13	2293	0,910	0,878	3,672
13	2590	0,985	0,957	2,886
13	2850	1,223	1,176	4,017



Gambar IV. 4 Grafik Validasi

Dari Tabel IV. 4 dapat dilihat bahwa margin antara hasil simulasi dan data yang digunakan untuk validasi berkisar antara 1 % sampai dengan 4% sehingga dapat dikatakan bahwa hasil simulasi CFD yang telah dilakukan memiliki hasil yang valid karena masih berada dalam batas toleransi margin (<5 %).

### IV.3. Hasil Simulasi CFD

Simulasi CFD yang dilakukan adalah simulasi 2 dimensi dengan bantuan *software Software CFD*. Simulasi 2 dimensi dilakukan karena bentuk dari rotor yang sama dari ujung ke ujung sehingga dapat diambil dari potongan melintangnya saja. Pada simulasi ini diasumsikan bahwa kecepatan angin adalah sama di sepanjang rotor. Hasil simulasi CFD yang didapatkan antara lain adalah nilai koefisien *lift* dan koefisien *drag*, distribusi kecepatan, distribusi tekanan, dan bentuk aliran. Nilai koefisien *lift* dan koefisien *drag* yang didapatkan dari hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel IV. 5.

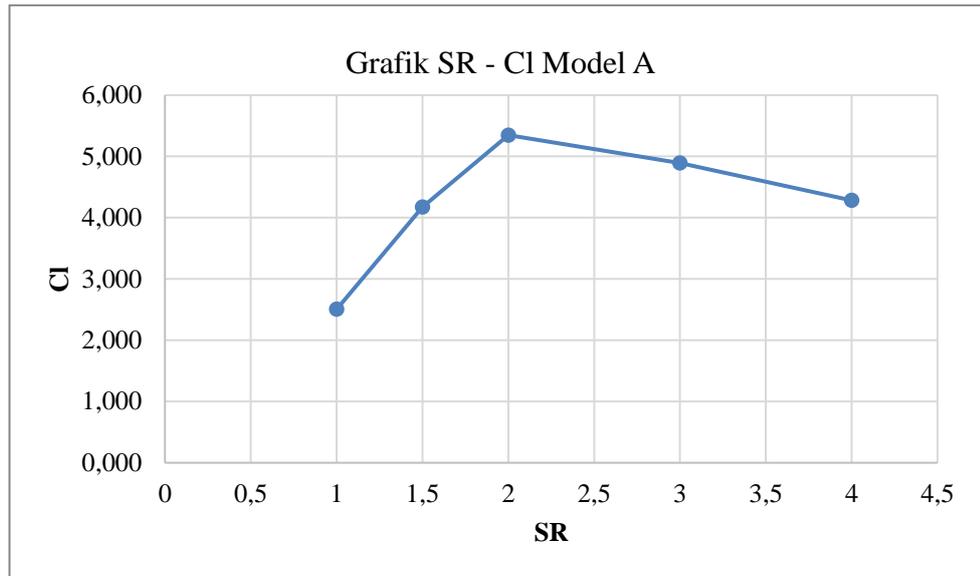
Tabel IV. 5 Hasil Cl dan Cd Model

Model	Spin Ratio (SR)	Cl	Cd
A	1	2,505	0,365
	1,5	4,175	0,366
	2	5,347	0,436
	3	4,891	0,548
	4	4,282	0,688
B	1	1,716	0,682
	1,5	3,534	0,503
	2	5,589	0,446
	3	6,022	0,561
	4	5,984	0,610
C	1	1,501	1,195
	1,5	3,332	0,688
	2	5,372	0,455
	3	6,723	0,554
	4	7,263	0,586

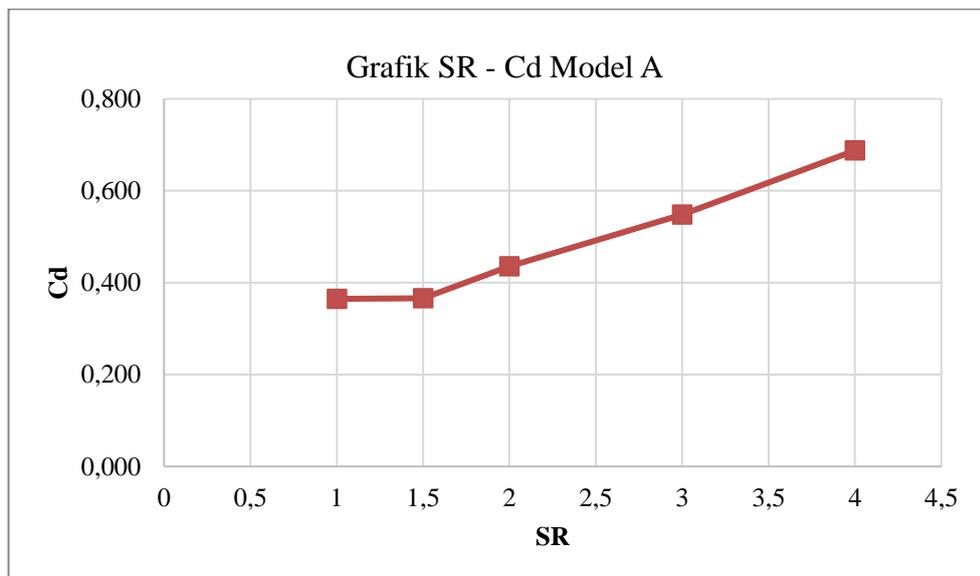
Data yang didapatkan kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk mengetahui hubungan antara *Spin Ratio* dengan koefisien *lift* dan *drag* serta untuk mengetahui kecenderungan nilai koefisien *lift* dan *drag* pada tiap model.

#### 1. Model A

Hubungan antara *Spin Ratio* (SR) dengan koefisien *lift* dan *drag* pada model A ditunjukkan pada Gambar IV. 5 dan Gambar IV. 6.



Gambar IV. 5 Perbandingan SR – Cl Model A

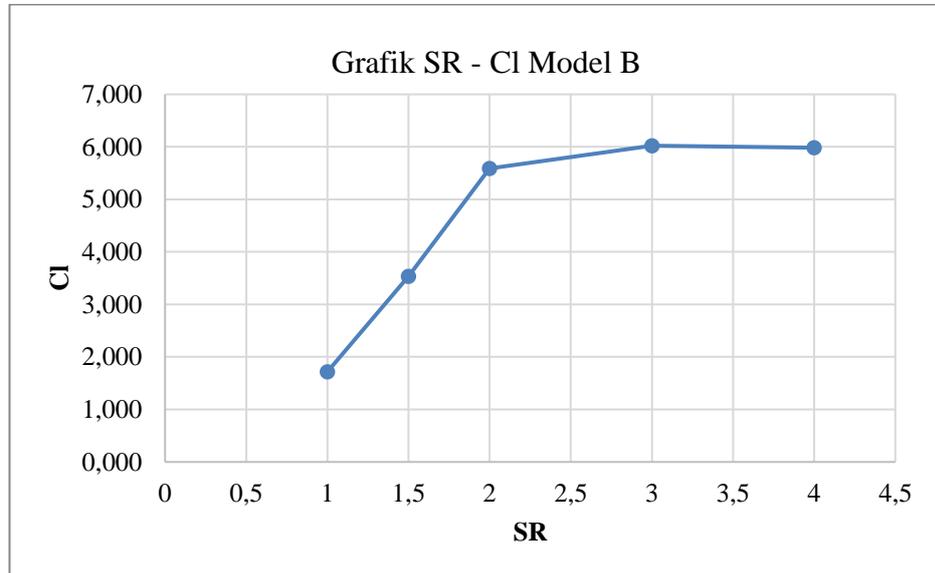


Gambar IV. 6 Perbandingan SR – Cd Model A

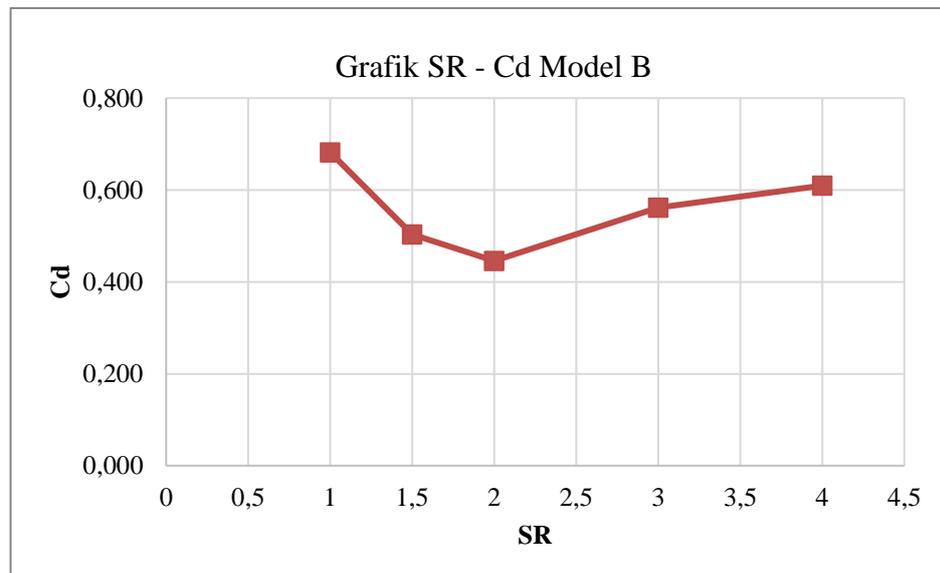
Dari Gambar IV. 5 dapat dilihat bahwa besarnya koefisien *lift* pada model A mengalami kenaikan dari SR 1 sampai SR 2 kemudian mengalami penurunan pada SR 3 dan SR 4. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara SR dan koefisien *lift* tidak berbanding lurus. Sedangkan koefisien *drag* pada model A cenderung sama pada SR 1 dan SR 1,5 kemudian mengalami kenaikan pada SR 2, 3, dan 4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV. 6. Hubungan antara SR dan koefisien *drag* pada model A cenderung berbanding lurus, semakin besar SR maka semakin besar nilai koefisien *drag*.

## 2. Model B

Hubungan antara *Spin Ratio* (SR) dengan koefisien *lift* dan *drag* pada model B ditunjukkan pada Gambar IV. 7 dan Gambar IV. 8.



Gambar IV. 7 Perbandingan SR – Cl Model B



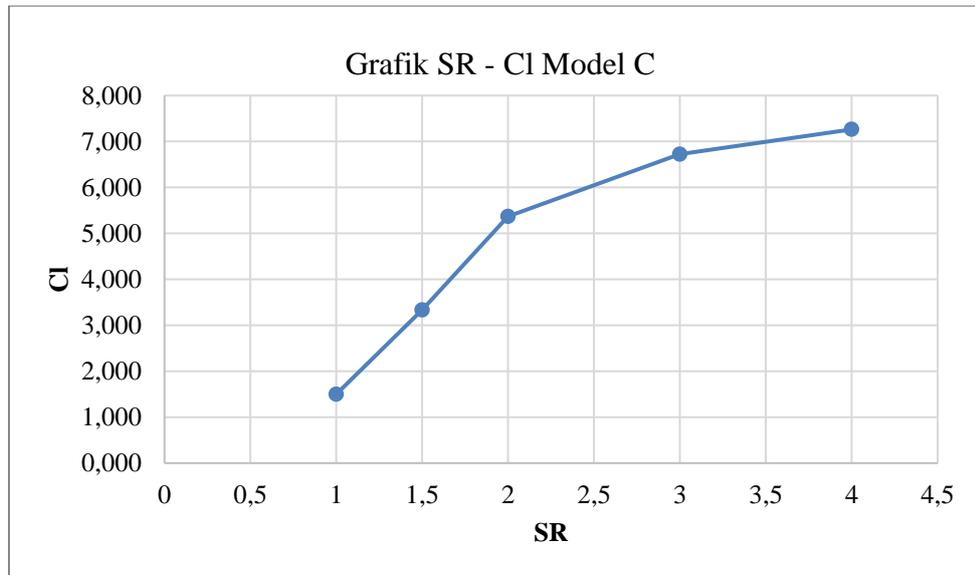
Gambar IV. 8 Perbandingan SR – Cd Model B

Dari Gambar IV. 7 dapat dilihat bahwa besarnya koefisien *lift* pada model B mengalami kenaikan dari SR 1 sampai SR 3 kemudian mengalami sedikit penurunan pada SR 4. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara SR dan koefisien *lift* pada model B tidak berbanding lurus. Pada Gambar IV. 8 menunjukkan koefisien *drag* pada model B mengalami penurunan dari SR 1 sampai SR 2 kemudian nilai koefisien *drag* naik pada

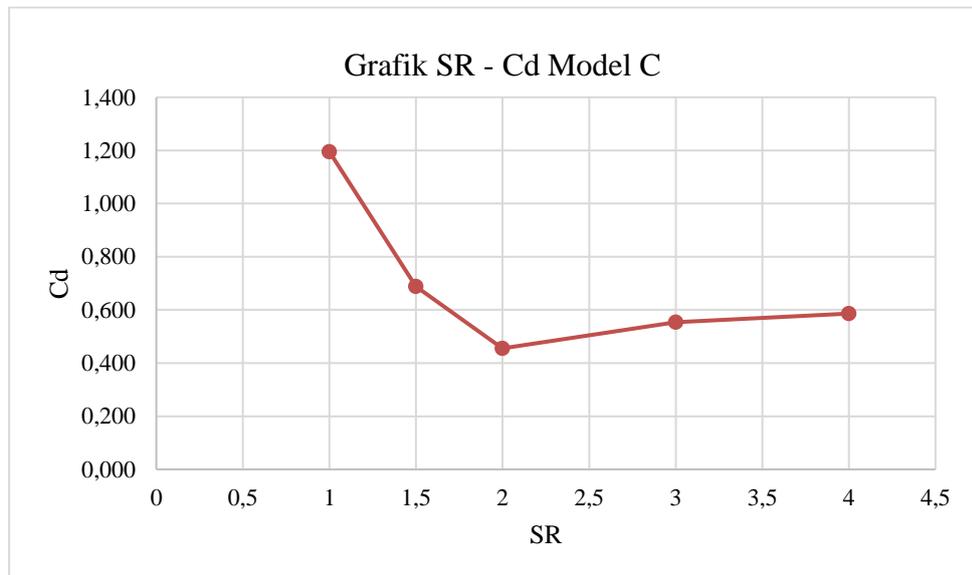
SR 3 dan SR 4 sehingga dapat dikatakan bahwa hubungan antara SR dan koefisien *drag* pada model B tidak berbanding lurus.

### 3. Model C

Hubungan antara *Spin Ratio* (SR) dengan koefisien *lift* dan *drag* pada model C ditunjukkan pada Gambar IV. 9 dan Gambar IV. 10.



Gambar IV. 9 Perbandingan SR – Cl Model C

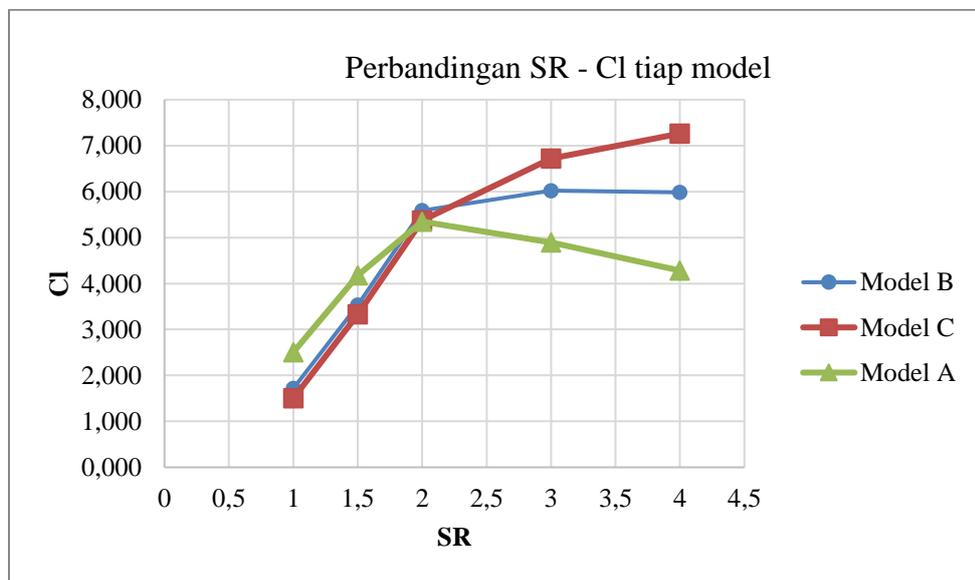


Gambar IV. 10 Perbandingan SR – Cd Model C

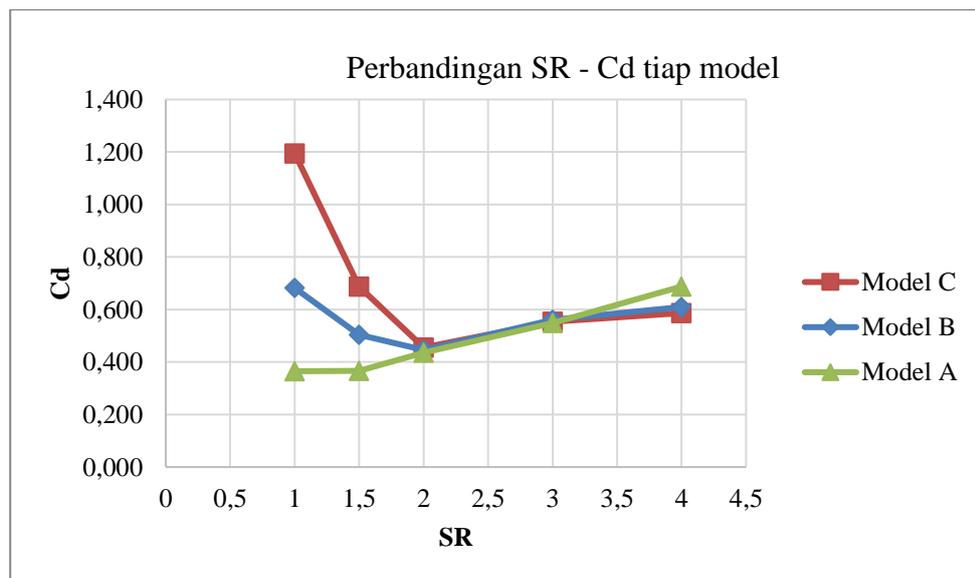
Dari Gambar IV. 9 dapat dilihat bahwa besarnya koefisien *lift* pada model C mengalami kenaikan seiring dengan naiknya SR, sehingga hal ini menunjukkan bahwa hubungan

antara SR dan koefisien *lift* pada model C berbanding lurus. Pada Gambar IV. 10 menunjukkan koefisien *drag* pada model C mengalami penurunan dari SR 1 sampai SR 2 kemudian mengalami kenaikan pada SR 3 dan SR 4. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara SR dan koefisien *drag* pada model C tidak berbanding lurus.

Model yang paling optimum adalah model yang memiliki nilai koefisien *lift* yang paling besar sehingga dapat menghasilkan gaya *lift* yang besar pula. Gambar IV. 11 dan Gambar IV. 12 menunjukkan perbandingan koefisien *lift* dan *drag* tiap model pada variasi *spin ratio*.



Gambar IV. 11 Perbandingan SR – Cl Tiap Model



Gambar IV. 12 Perbandingan SR – Cd Tiap Model

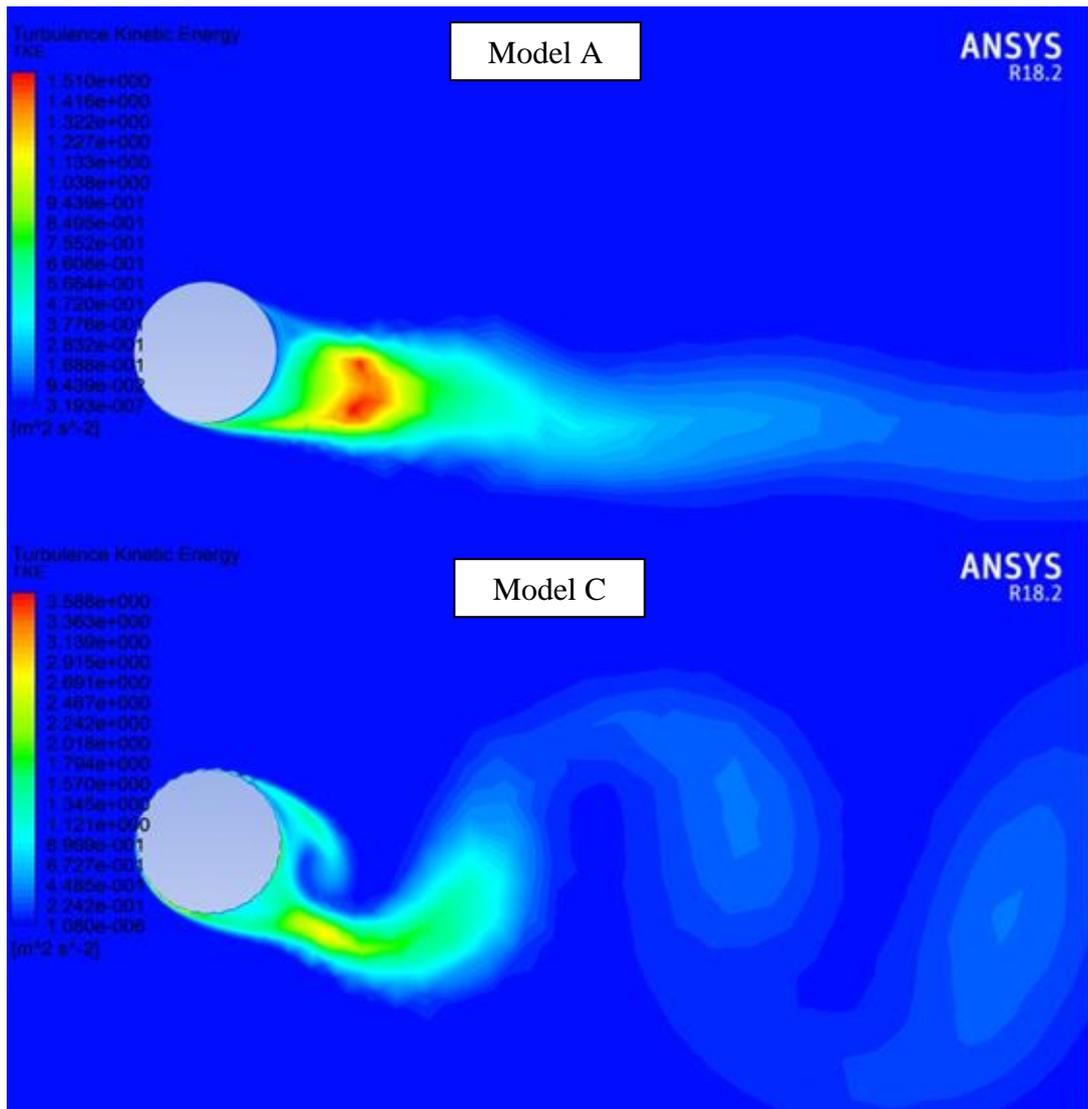
Dari Gambar IV. 11 dan Gambar IV. 12 dapat dilihat bahwa model yang paling optimum adalah model C pada *Spin Ratio* 4 karena memiliki nilai koefisien *lift* yang paling besar dan memiliki nilai koefisien *drag* yang paling kecil jika dibandingkan dengan model A dan model B.

#### **IV.4. Analisis Pengaruh *Dimpled Surface***

*Dimpled surface* yang diterapkan pada permukaan rotor memiliki pengaruh terhadap koefisien *lift* dan *drag*. Hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi yang telah disajikan pada Gambar IV. 11 dan Gambar IV. 12. Pembahasan mengenai pengaruh *dimpled surface* dijelaskan pada berikut ini.

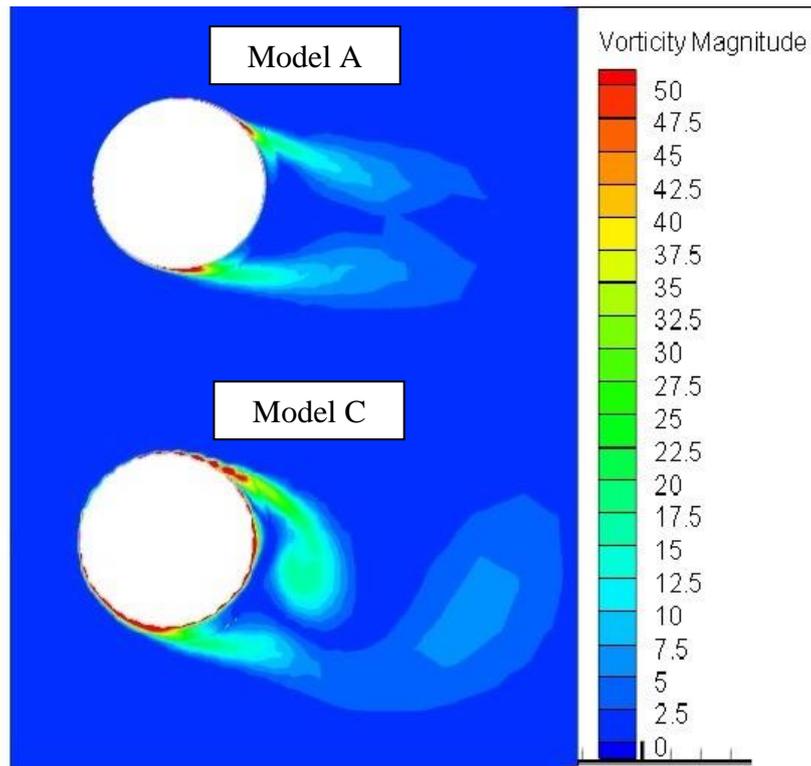
##### **1. Pengaruh terhadap koefisien *drag***

Pengaruh *dimpled surface* terhadap koefisien *drag* dapat dilihat pada Gambar IV. 12. Pada SR 1 sampai SR 3 terlihat bahwa koefisien *drag* dari rotor yang menggunakan *dimpled surface* (Model B dan Model C) memiliki nilai koefisien *drag* yang lebih besar jika dibandingkan dengan Model A (*smooth surface*). Nilai koefisien *drag* terbesar dimiliki oleh Model C dan nilai koefisien *drag* terkecil dimiliki oleh Model A, sedangkan nilai koefisien *drag* dari Model B berada ditengahnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada SR 1 sampai SR 3, semakin besar ukuran *dimpled surface* maka nilai koefisien *drag* juga akan semakin besar.



Gambar IV. 13 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* Model A dan Model C Pada SR 1

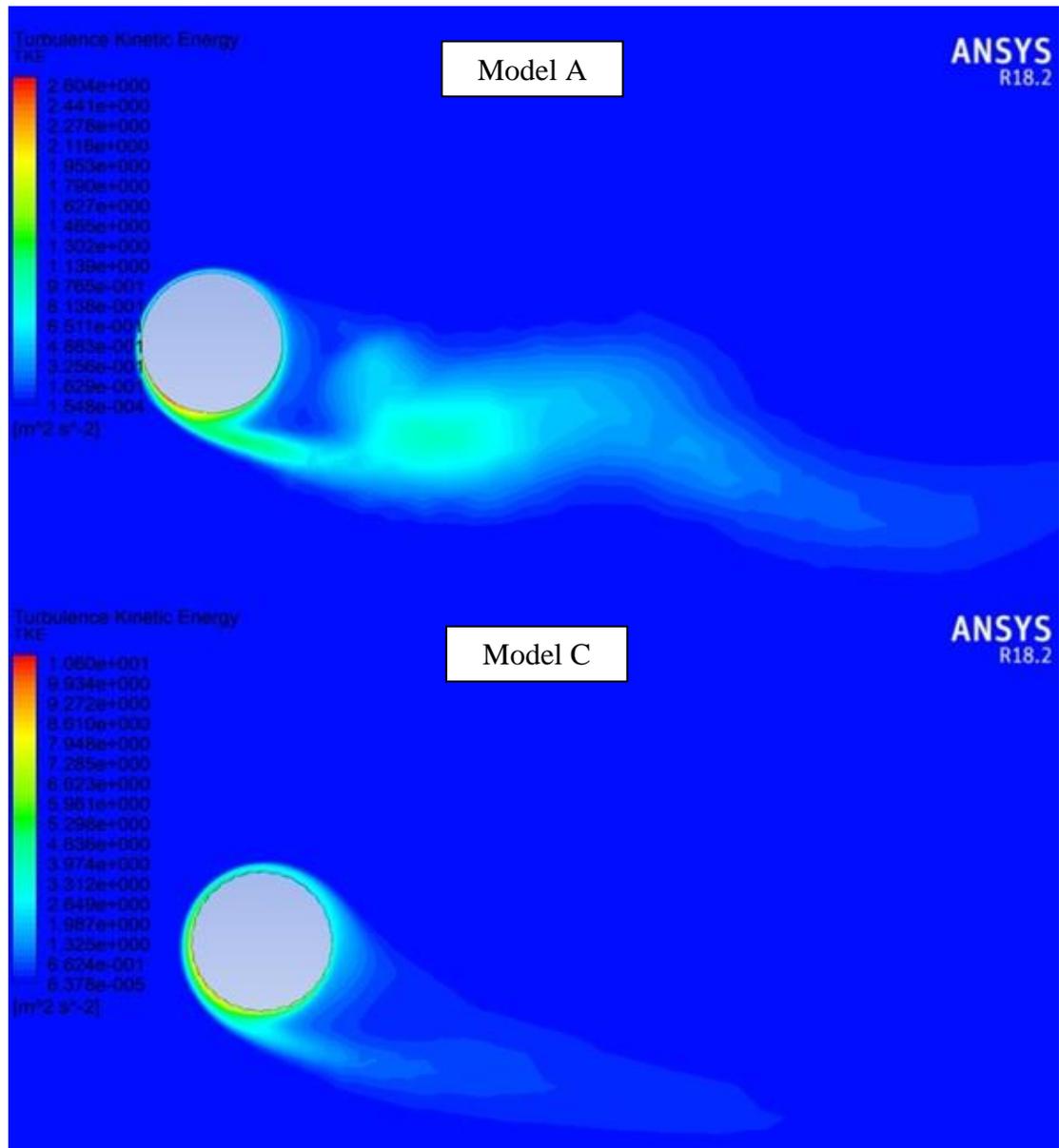
Dari Gambar IV. 13 dapat dilihat bahwa kontur area dan nilai *turbulent kinetic energy* dari Model C lebih besar jika dibandingkan dengan Model A. *Turbulent kinetic energy* adalah energi kinetic rata – rata per satuan massa yang berkaitan dengan pusaran (*eddies*) pada aliran turbulen. *Turbulent kinetic energy* tergantung pada *fluid shear* atau geseran/gesekan yang terjadi antar fluida yang bergerak (Matic, 2012). Semakin besar nilai dan area dari *turbulent kinetic energy* maka semakin besar *fluid shear* yang terjadi sehingga nilai dari koefisien *drag* juga semakin besar.



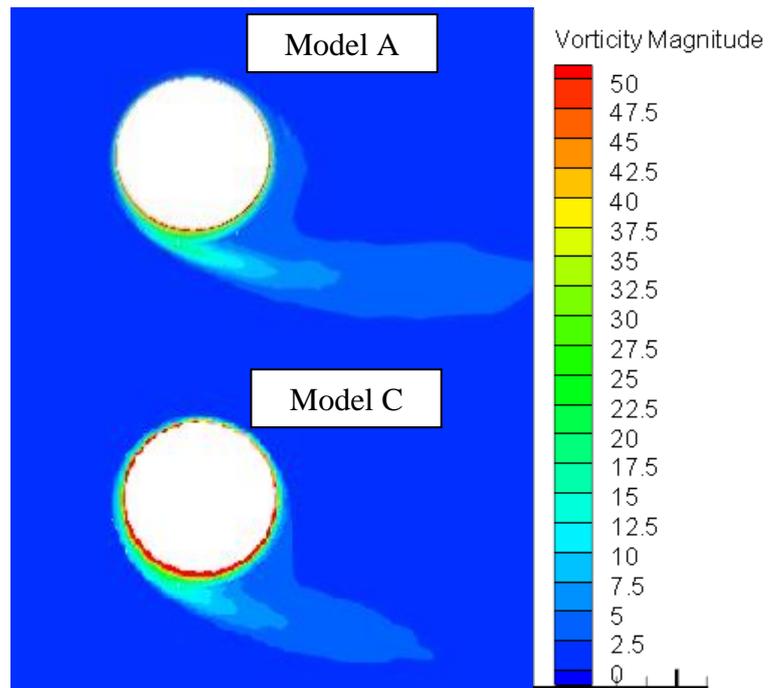
Gambar IV. 14 Kontur *Vorticity Magnitude* Model A dan Model C Pada SR 1

Selain itu dapat dilihat dari kontur *vorticity magnitude* yang ditunjukkan pada Gambar IV. 14, memperlihatkan bahwa kontur area *vorticity magnitude* dari Model C lebih besar jika dibandingkan dengan Model A. *Vorticity* berkaitan dengan *wake region* atau wilayah dengan aliran fluida yang berputar (*recirculating flow*) yang ada dibelakang rotor. Semakin besar *wake region* yang terjadi maka nilai koefisien *drag* juga semakin besar (Aoki, dkk, 2010).

Kemudian pada SR 4 dapat dilihat dari Gambar IV. 12 bahwa koefisien *drag* dari rotor Model B dan Model C lebih kecil dari pada Model A. Nilai koefisien *drag* terbesar dimiliki oleh Model A dan nilai koefisien *drag* terkecil dimiliki oleh Model C. Pada SR 4, semakin besar ukuran *dimpled surface* maka nilai koefisien *drag* semakin kecil. Pada Gambar IV. 15 dan Gambar IV. 16 menunjukkan area *turbulent kinetic energy* dan *vorticity magnitude* dari Model C lebih kecil dari pada Model A sehingga koefisien *drag* dari Model C lebih kecil daripada Model A.



Gambar IV. 15 Kontur *Turbulent Kinetic Energy* Model A dan Model C Pada SR 4

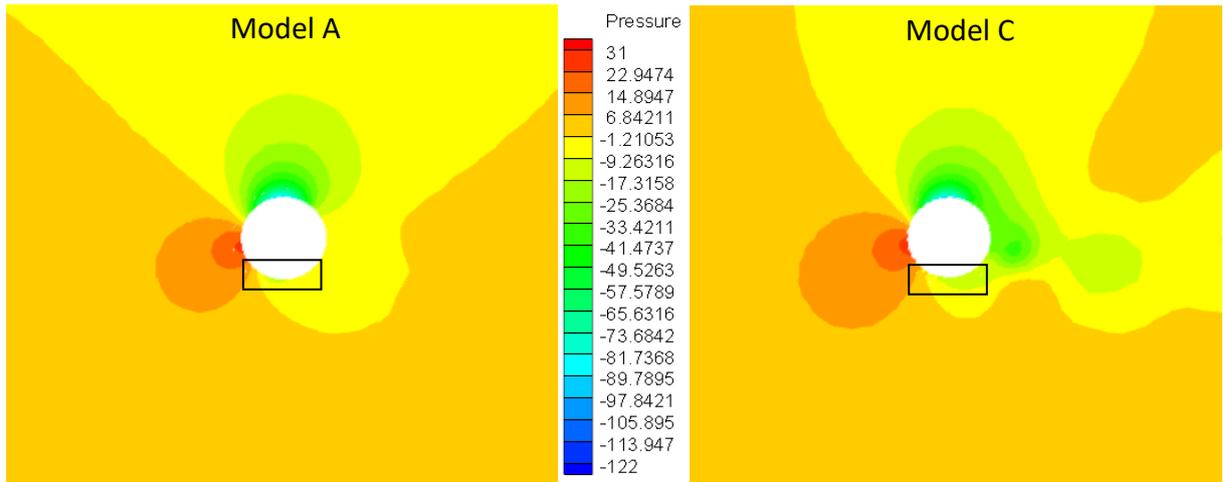


Gambar IV. 16 Kontur *Vorticity Magnitude* Model A dan Model C Pada SR 4

Penerapan *dimpled surface* pada permukaan rotor memberi keuntungan ketika pada kondisi SR 4. Hal ini ditunjukkan pada Model C yang memiliki koefisien *drag* paling kecil. Penurunan koefisien *drag* yang terjadi dari penerapan *dimpled surface* pada rotor adalah sebesar 14,765 %. Penurunan ini dapat dicapai pada model dengan ukuran *dimpled surface* yang paling besar yaitu Model C pada SR 4.

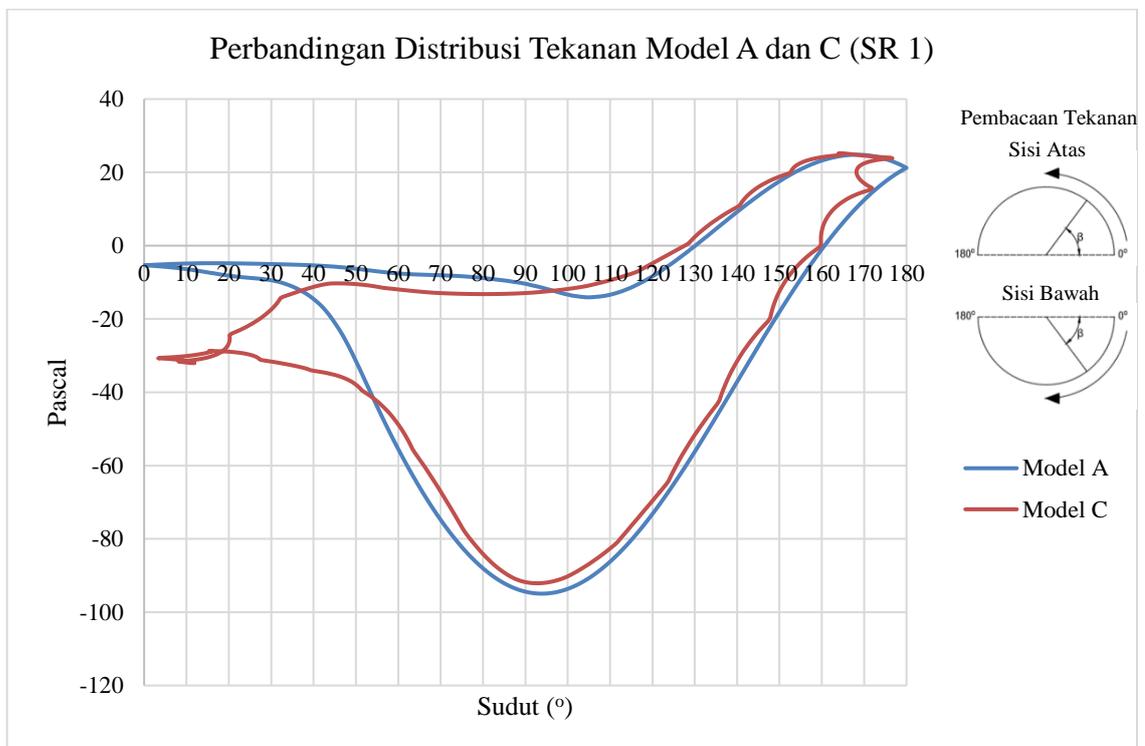
## 2. Pengaruh terhadap koefisien *lift*

Pengaruh *dimpled surface* terhadap koefisien *lift* dapat dilihat pada Gambar IV. 11. Pada SR 1 dan SR 1,5 terlihat bahwa rotor yang menggunakan *dimpled surface* (Model B dan Model C) memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih kecil jika dibandingkan dengan Model A (*smooth surface*). Nilai koefisien *lift* terbesar dimiliki oleh Model A dan nilai koefisien *lift* terkecil dimiliki oleh Model C, sedangkan nilai koefisien *lift* dari Model B berada ditengahnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada SR 1 dan SR 1,5, semakin besar ukuran *dimpled surface* maka nilai koefisien *lift* akan semakin kecil. Perbedaan nilai koefisien *lift* tersebut juga dapat dilihat dari kontur tekanan disekitar rotor pada tiap model. Gambar IV. 17 menunjukkan perbandingan kontur tekanan Model A dan Model C pada SR 1.



Gambar IV. 17 Kontur Tekanan Model A dan Model C Pada SR 1

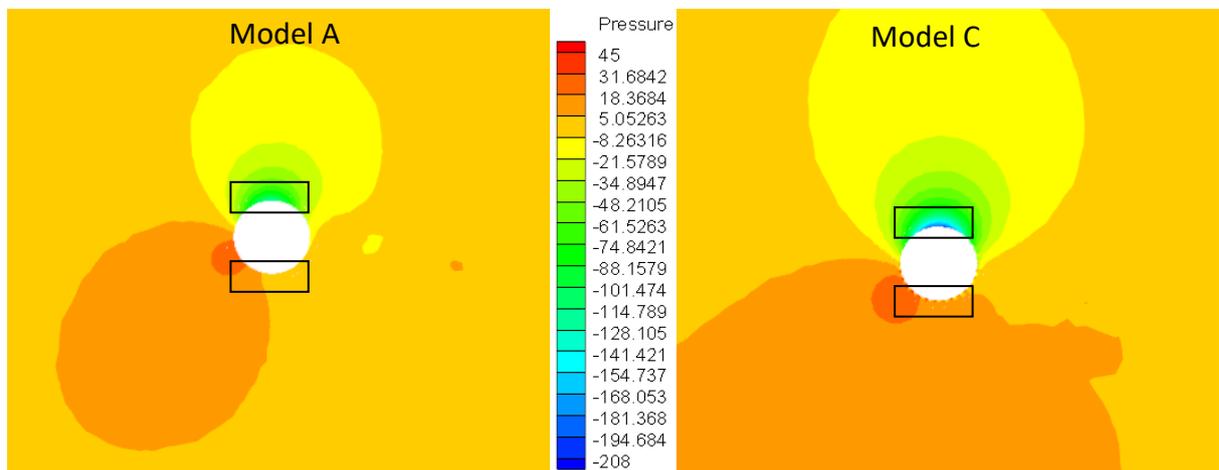
Dari Gambar IV. 17 dapat dilihat pada Model A, kontur tekanan pada bagian bawah model rotor ini memiliki warna kontur lebih kuning daripada Model C. Hal ini menandakan bahwa tekanan yang dimiliki oleh Model A lebih besar daripada Model C sehingga Model A memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan Model C. Perbedaan tekanan antara kedua rotor juga dapat dilihat dari perbandingan distribusi tekanan yang ditunjukkan pada Gambar IV. 18 berikut ini.



Gambar IV. 18 Distribusi Tekanan Model A dan Model C Pada SR 1

Dari Gambar IV. 18 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan tekanan pada sisi atas maupun sisi bawah rotor antara kedua model. Pada sisi bawah rotor, Model A cenderung memiliki tekanan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan Model C dan pada sisi atas rotor Model A memiliki tekanan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan Model C. Dari hal tersebut Model A memiliki perbedaan tekanan (resultan) antara sisi atas dan sisi bawah rotor yang lebih besar jika dibandingkan dengan Model C sehingga Model A memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih besar dari Model C. Semakin besar perbedaan (resultan) tekanan antara sisi atas dan sisi bawah rotor maka nilai koefisien *lift* dan gaya *lift* juga semakin besar (Everts, 2014).

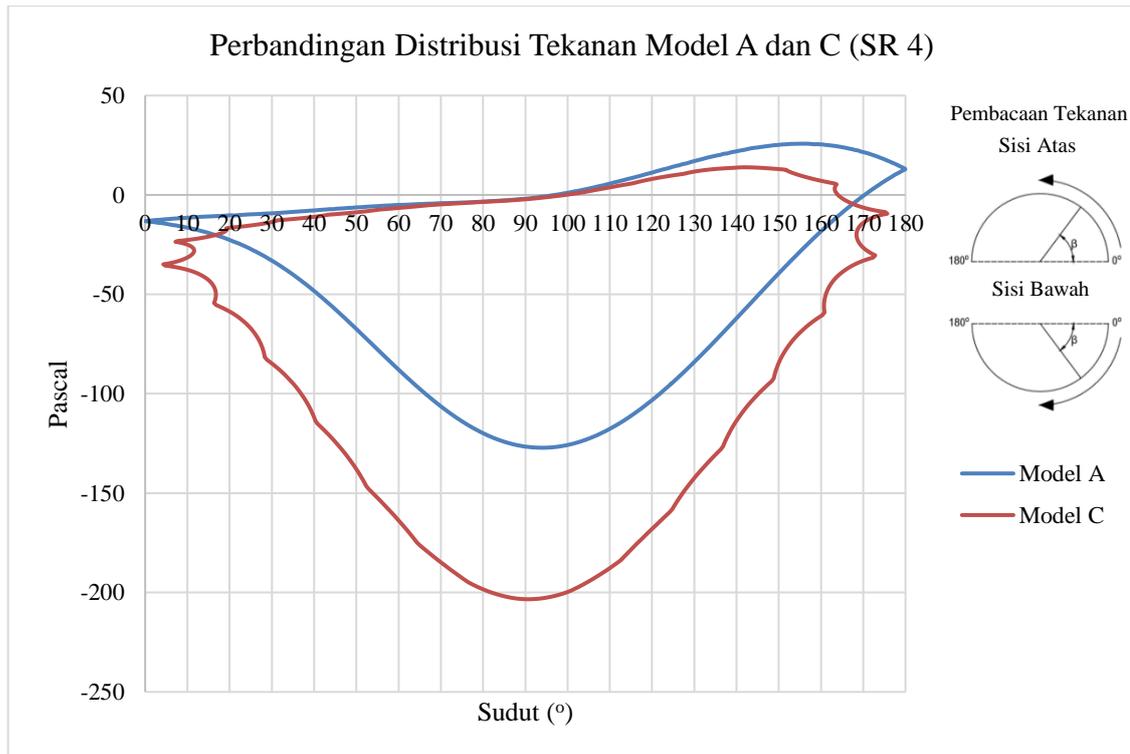
Pada SR 2 sampai SR 4, koefisien *lift* dari Model B dan Model C menjadi lebih besar dibandingkan dengan Model A. Pada SR 2, koefisien *lift* terbesar dimiliki oleh Model B. Kemudian pada SR 3 dan SR 4, Model C memiliki koefisien *lift* yang paling besar. Pada SR 3 dan SR 4, terlihat bahwa semakin besar ukuran *dimpled surface* maka nilai koefisien *lift* juga semakin besar. Peningkatan koefisien *lift* dari penerapan *dimpled surface* pada rotor adalah sebesar 69,6 %. Peningkatan ini dicapai pada Model C dengan SR 4. Perbedaan koefisien *lift* ini dapat dilihat dari adanya perbedaan kontur tekanan disekitar rotor antar model rotor tersebut. Gambar IV. 19 menunjukkan perbandingan kontur tekanan antara Model A dan Model C pada SR 4.



Gambar IV. 19 Kontur Tekanan Model A dan Model C Pada SR 4

Dari Gambar IV. 19 dapat dilihat bahwa kontur tekanan pada bagian atas rotor Model C memiliki warna kontur yang lebih biru jika dibandingkan dengan Model A. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan pada bagian atas rotor Model C lebih rendah daripada Model A. Kemudian pada bagian bawah rotor Model C memiliki warna kontur tekanan yang lebih

oranye jika dibandingkan dengan Model A sehingga tekanan pada bagian bawah rotor Model C lebih tinggi daripada Model A. Dari kedua hal tersebut perbedaan tekanan pada bagian sisi atas dan bawah rotor Model C lebih besar daripada Model A sehingga Model C memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan Model A. Adanya perbedaan tekanan antara Model A dan Model C juga dapat dilihat dari perbandingan distribusi tekanan pada Gambar IV. 20.



Gambar IV. 20 Distribusi Tekanan Model A dan Model C Pada SR 4

Dari Gambar IV. 20 dapat dilihat bahwa perbedaan tekanan pada sisi bawah rotor antara kedua model tidak begitu signifikan dan besarnya cenderung sama tetapi perbedaan tekanan pada sisi atas antara kedua model rotor terlihat sangat signifikan. Pada sisi atas rotor, Model C memiliki tekanan yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan Model A. Semakin besar perbedaan (resultan) tekanan antara sisi atas dan sisi bawah rotor maka nilai koefisien *lift* dan gaya *lift* juga semakin besar (Everts, 2014). Dapat dilihat bahwa perbedaan (resultan) tekanan antara sisi atas dan sisi bawah rotor dari Model C lebih besar jika dibandingkan dengan Model A sehingga Model C memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih besar daripada Model A.

#### IV.5. *Layout* Pemasangan Rotor Pada Kapal

Pada penelitian ini kapal yang digunakan untuk analisis kontribusi gaya dorong rotor adalah KLM Maruta Jaya 900 DWT. Untuk posisi pemasangan rotor pada kapal tentunya harus mempertimbangkan ukuran utama kapal dan ruang yang tersedia pada dek kapal. Tabel IV. 6 merupakan ukuran utama dari kapal KLM Maruta Jaya 900 DWT.

Tabel IV. 6 Ukuran Utama KLM Maruta Jaya 900 DWT

Data Ukuran Utama KLM Maruta Jaya 900 DWT		
Lwl	51,6	m
Lpp	50	m
Lebar (B)	12	m
Tinggi (H)	5	m
Sarat (T)	4,7	m
Kecepatan dinas	6	knot
Koefisien Blok (Cb)	0,558	
Displacement	1623,4948	ton

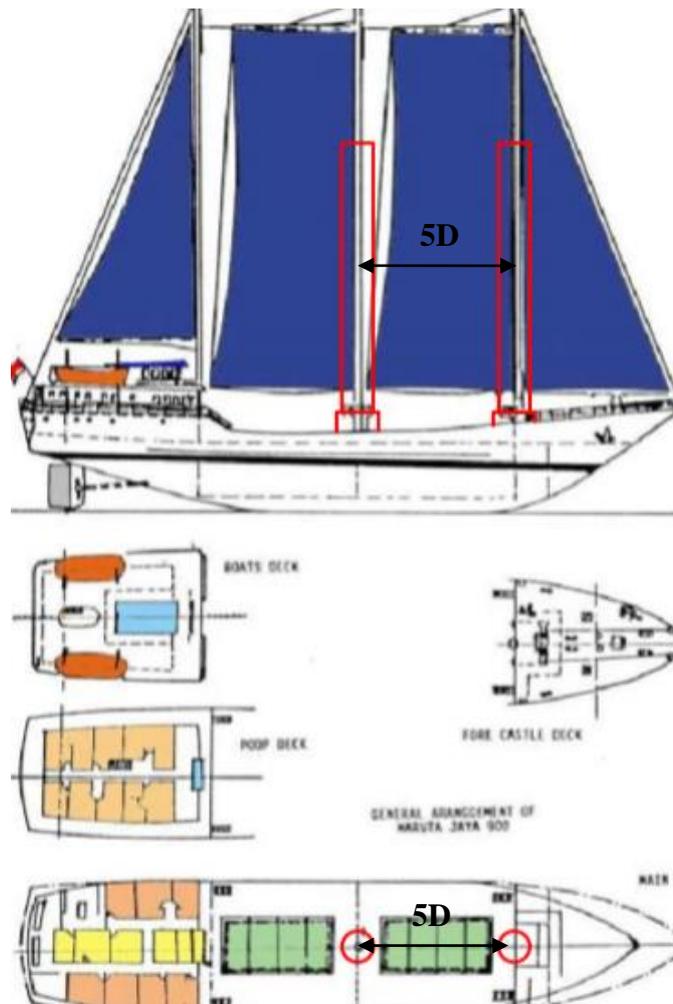
Penentuan tinggi rotor dihitung dengan mempertimbangkan titik berat layar KLM Maruta Jaya 900 DWT yang diukur terhadap dek kapal agar titik berat rotor tidak lebih tinggi daripada titik berat layar sehingga diharapkan stabilitas kapal masih baik dan tidak melebihi stabilitas kapal ketika menggunakan layar. Pada Tabel IV. 7 ditunjukkan perhitungan titik berat layar kapal yang diukur terhadap dek kapal.

Tabel IV. 7 Titik Berat Layar Terhadap Dek Kapal

Titik berat layar terhadap dek kapal		
Bagian	Luas (m <sup>2</sup> )	Titik Berat (m)
Jib Sail	145,6	16,167
Main Sail 1	393,6	21,28
Main Sail 2	393,6	21,28
Mizzen Sail	126,5	19,33
Tiang 1		18,75
Tiang 2		18,75
Tiang 3		17
<b>Total</b>	<b>1059,3</b>	<b>18,71108897</b>

Dari perhitungan titik berat didapatkan titik berat total layar diukur terhadap dek kapal adalah sebesar 18,711 m kemudian ditentukan tinggi rotor yang dipakai adalah 26 m dengan titik berat yang terletak di tengah – tengah tinggi rotor yaitu 13 m sehingga titik berat

dari rotor tidak melebihi titik berat layar. Terdapat dua variasi pemasangan rotor pada dek KLM Maruta Jaya 900 DWT yaitu satu rotor dan dua rotor. Posisi pemasangan rotor mempertimbangkan ruang yang tersedia pada dek kapal. Untuk variasi pemasangan dengan dua rotor jarak antar diameter rotor sebesar  $5D$  (5 kali diameter) sesuai dengan ruang yang tersedia pada dek kapal. Gambar IV. 21 menunjukkan posisi pemasangan rotor pada KLM Maruta Jaya 900 DWT.



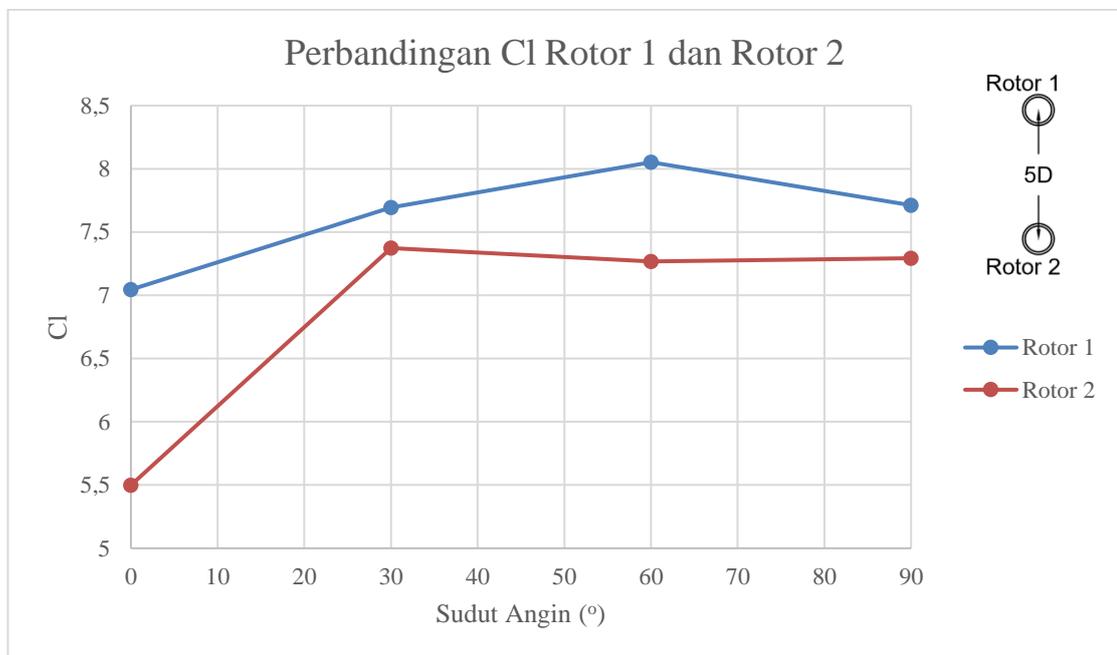
Gambar IV. 21 *Layout Pemasangan Rotor Pada Kapal*

Rotor yang dipasang pada kapal adalah model rotor yang memiliki performa paling optimum dan pada kondisi *spin ratio* (SR) yang paling optimum yaitu model C pada *spin ratio* (SR) 4. Pada pemasangan dua rotor perlu dilakukan simulasi CFD untuk mengetahui ada tidaknya interferensi antar rotor. Simulasi untuk dua rotor dilakukan pada 4 variasi sudut angin yaitu  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$ . Koefisien *lift* dan koefisien *drag* yang didapatkan dari hasil simulasi dua rotor ditampilkan pada Tabel IV. 8 berikut ini.

Tabel IV. 8 Hasil  $C_l$  dan  $C_d$  Simulasi Dua Rotor

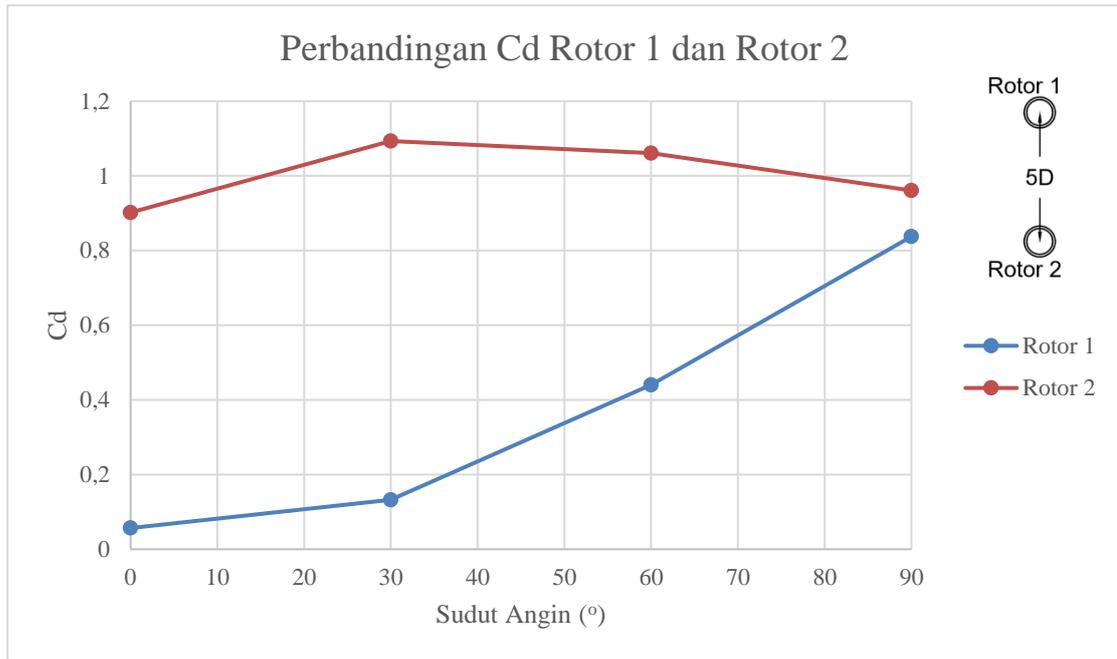
Sudut angin	$C_l$		$C_d$	
	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 1	Rotor 2
0°	7,04515	5,49936	0,05672	0,90207
30°	7,6959	7,37364	0,13214	1,09349
60°	8,05264	7,26709	0,44026	1,0609
90°	7,71239	7,29242	0,83758	0,96076

Agar lebih mudah untuk mengetahui besarnya interferensi terhadap koefisien *lift* dan *drag* pada tiap – tiap rotor maka dibuat grafik perbandingan  $C_l$  dan  $C_d$  pada tiap rotor seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV. 22 dan Gambar IV. 23.



Gambar IV. 22 Perbandingan  $C_l$  Rotor 1 dan Rotor 2

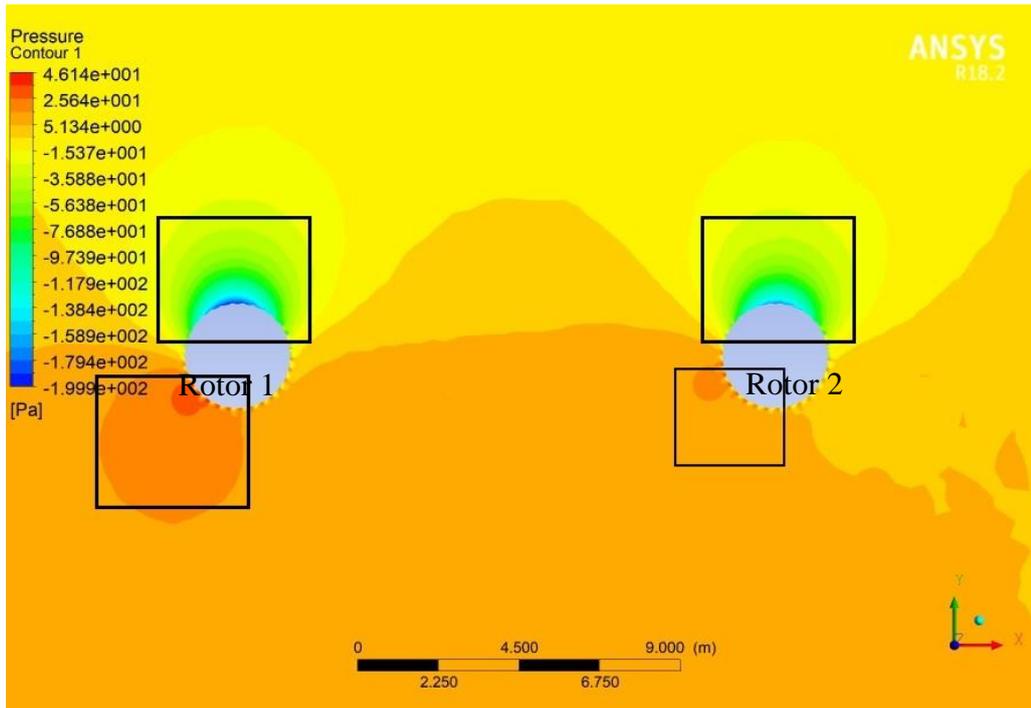
Dari grafik perbandingan  $C_l$  antara rotor 1 dan rotor 2 yang ditunjukkan pada Gambar IV. 20 di atas, dapat dilihat bahwa terjadi interferensi terhadap koefisien *lift* antara rotor 1 dan rotor 2. Interferensi terjadi pada semua sudut yang divariasikan. Interferensi terbesar terjadi pada sudut 0° ditandai dengan selisih koefisien *lift* antara rotor 1 dan rotor 2 paling besar jika dibandingkan dengan sudut lainnya. Kemudian interferensi yang terjadi cenderung berkurang dan besarnya cenderung sama pada sudut 30°, 60°, dan 90°. Pada sudut 30°, 60°, dan 90°. Interferensi yang terjadi membuat salah satu rotor (rotor 1) memiliki koefisien *lift* yang lebih besar jika dibandingkan dengan rotor lainnya (Anwar, 2019).



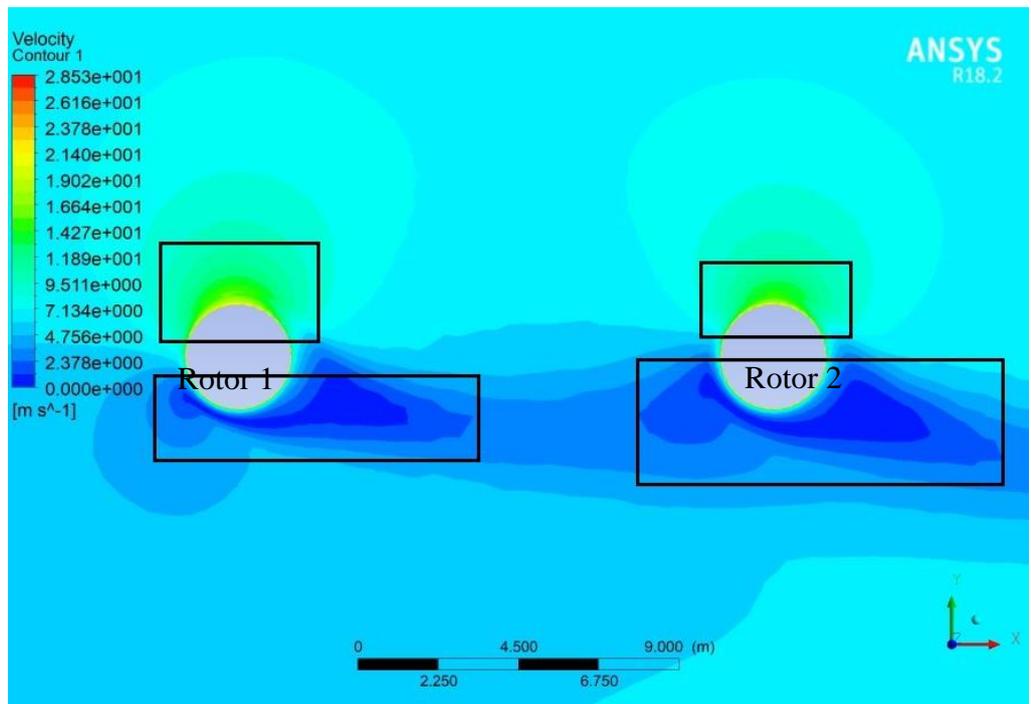
Gambar IV. 23 Perbandingan Cd Rotor 1 dan Rotor 2

Dari grafik perbandingan Cd antara rotor 1 dan rotor 2 yang ditunjukkan pada Gambar IV. 23 di atas, dapat dilihat bahwa terjadi interferensi terhadap koefisien *drag* antara rotor 1 dan rotor 2. Interferensi terjadi pada semua sudut yang divariasikan. Interferensi yang terjadi cenderung berkurang sampai dengan sudut  $90^\circ$ . Interferensi terkecil terjadi pada sudut  $90^\circ$  ditandai dengan selisih koefisien *drag* antara rotor 1 dan rotor 2 paling kecil jika dibandingkan dengan sudut lainnya.

Ada tidaknya interferensi juga dapat diketahui dari kontur tekanan disekitar rotor seperti contohnya pada Gambar IV. 24 yang menunjukkan kontur tekanan dengan variasi sudut angin  $0^\circ$ . Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan kontur tekanan pada rotor 1 dan rotor 2 seperti pada area yang telah diberi tanda. Selain itu dari kontur kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar IV. 25 dapat dilihat juga terdapat perbedaan kontur kecepatan disekitar rotor 1 dan rotor 2 seperti pada area yang sudah diberi tanda. Perbedaan yang ada pada kontur tekanan dan kontur kecepatan antara rotor 1 dan rotor 2 ini merupakan akibat dari adanya interferensi sehingga menghasilkan nilai koefisien *lift* dan *drag* yang berbeda.



Gambar IV. 24 Kontur Tekanan Rotor 1 dan 2 Pada Sudut Angin 0°



Gambar IV. 25 Kontur Kecepatan Rotor 1 dan 2 Pada Sudut Angin 0°

#### IV.6. Pengaruh Pemasangan Rotor Terhadap Hambatan Kapal

Pemasangan rotor pada kapal akan menambah berat LWT kapal sehingga sarat kapal akan berubah menjadi lebih tinggi dan hambatan kapal juga akan berubah. Besarnya perubahan sarat tergantung pada berat rotor yang dipasang pada kapal. Estimasi perhitungan berat total rotor ditentukan berdasarkan berat rotor yang ada dipasaran. Tabel IV. 9 menunjukkan estimasi berat total rotor yang digunakan.

Tabel IV. 9 Dimensi dan Berat Rotor

<b>Dimensi dan Berat</b>	<b>Norsepower Rotor</b> (Norsepower, 2018)	<b>Rotor Pada Penelitian</b> <b>Ini</b>
Tinggi rotor	30 m	26 m
Diameter rotor	5 m	3 m
Luasan rotor	150 m <sup>2</sup>	78 m <sup>2</sup>
Material	GFRP/CFRP sandwich	GFRP/CFRP sandwich
Berat total	49 ton	25,48 ton

Pada penelitian ini, rotor yang dipasang pada kapal dianggap memiliki material dan tebal yang sama dengan rotor yang ditunjukkan pada Tabel IV. 9 sehingga berat rotor dapat dihitung berdasarkan perbandingan luasan rotor. Setelah dihitung menggunakan perbandingan luasan didapatkan berat rotor sebesar 25,48 ton untuk satu rotor dan 50,96 ton untuk dua rotor. Kemudian berat total rotor ini dikurangi dengan berat total tiang dan layar KLM Maruta Jaya 900 DWT karena pemasangan rotor ini bertujuan untuk menggantikan layar pada kapal. Estimasi perhitungan berat layar dan tiang layar ditunjukkan pada Tabel IV. 9 berikut ini.

Tabel IV. 10 Berat Total Tiang Layar dan Layar

Item	Material	Dimensi				Berat (ton)
		Diameter dalam (m)	Diameter luar (m)	Tinggi (m)	Luas (m <sup>2</sup> )	
Tiang 1 ( <i>Fore Mast</i> )	Steel	0,74	0,75	39,65	-	14,562
Tiang 2 ( <i>Midship Mast</i> )	Steel	0,74	0,75	39,65	-	14,562
Tiang 3 ( <i>Mizzen Mast</i> )	Steel	0,74	0,75	38,25	-	14,048
Jib Sail	Dacron	-	-	32	145,6	0,033
Main Sail 1	Dacron	-	-	32	393,6	0,089
Main Sail 2	Dacron	-	-	32	393,6	0,089
Mizzen Sail	Dacron	-	-	22	126,5	0,029
<b>Total Berat</b>						<b>43,413</b>

Tiang layar yang digunakan pada KLM Maruta Jaya 900 DWT terbuat dari besi berongga (*steel*) dan kain layar yang digunakan berbahan dasar dacron. Bahan ini merupakan bahan yang paling sering digunakan untuk kain layar sekitar tahun 1980 sampai 1990 (Uksailmakers, 2019) dimana pada tahun tersebut KLM Maruta Jaya 900 DWT dibangun. Berat kain layar dacron adalah sebesar 8 ons per m<sup>2</sup> dan jika dikonversikan ke dalam kilogram adalah 0,227 kg per m<sup>2</sup> (Texloncorp, 2015). Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel IV. 10 didapatkan berat total layar dan tiang layar adalah sebesar 43,413 ton. Perhitungan selisih berat antara rotor dan layar ditunjukkan pada Tabel IV. 11 berikut ini.

Tabel IV. 11 Selisih Berat Rotor dan Layar (Termasuk Tiang)

Jumlah Rotor	Berat Total Rotor (ton)	Berat Layar dan Tiang (ton)	Selisih (ton)
1 rotor	25,48	43,413	-17,933
2 rotor	50,96	43,413	7,547

Dari Tabel IV. 11 dapat dilihat bahwa untuk penggunaan dua rotor berat total kapal bertambah sebesar 7,547 ton sehingga *displacement* kapal berubah menjadi 1631,0418 ton jika dibandingkan dengan penggunaan layar. Estimasi besarnya sarat kapal akibat pemasangan rotor dihitung dengan cara membandingkan *displacement* kapal pada saat dipasang rotor dengan pada saat dipasang layar kemudian dikalikan dengan sarat kapal saat dipasang layar. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa pertambahan sarat yang terjadi sebesar 0,022 m atau 2,2 cm sehingga dapat dikatakan pengaruhnya terhadap perubahan hambatan kapal kecil atau tidak signifikan.

Pemasangan rotor pada dek kapal juga berpengaruh terhadap hambatan angin yang ada di atas dek kapal. Hal ini disebabkan karena dimensi dari rotor yang cukup besar sehingga akan ada hambatan angin dari depan yang melawan gerakan kapal ketika kapal melaju. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui besarnya hambatan tersebut. Pada Tabel IV. 12 ditunjukkan hambatan kapal KLM Maruta Jaya 900 DWT dari hasil *towing test* HVSA Jerman Barat (lembar report test : tanggal 6 Mei 1983 : test No 83 – 144/145)

Tabel IV. 12 Data Hambatan KLM Maruta Jaya 900 DWT

Data Hambatan Kapal KLM Maruta Jaya 900 DWT		
V (knot)	Froude Number	RT (KN)
4	0,0927	5,2
6	0,1404	11,49
7,1	0,1645	15,93
8,1	0,1872	20,88
9,1	0,2112	27,93
10,1	0,2353	38,77

Perhitungan hambatan angin akibat pemasangan rotor dilakukan dengan mengalikan koefisien *drag* dari rotor ketika sudut angin  $0^\circ$  (*headwind*) dengan tekanan dinamis aliran bebas dan luasan penampang rotor (A). Hasil perhitungan hambatan angin untuk pemasangan satu rotor dan dua rotor ditunjukkan pada Tabel IV. 13 dan Tabel IV. 14 berikut ini.

Tabel IV. 13 Hambatan Angin Satu Rotor

V (knot)	V (m/s)	Hambatan angin (N)
4	2,056	111,475
6	3,084	250,818
7,1	3,649	351,215
8,1	4,163	457,116
9,1	4,677	576,952
10,1	5,191	710,721

Tabel IV. 14 Hambatan Angin Dua Rotor

V (knot)	V (m/s)	Hambatan angin (N)		
		Rotor 1	Rotor 2	Total
4	2,056	10,790	171,601	182,391
6	3,084	24,278	386,103	410,381
7,1	3,649	33,995	540,651	574,647
8,1	4,163	44,246	703,673	747,919
9,1	4,677	55,845	888,144	943,989
10,1	5,191	68,793	1094,065	1162,859

Kemudian hambatan angin akibat dari pemasangan rotor tersebut dijumlahkan dengan hambatan kapal dari hasil uji *towing tank* sehingga didapatkan hambatan total. Hambatan total kapal untuk pemasangan satu rotor dan dua rotor ditunjukkan pada Tabel IV. 15 berikut ini.

Tabel IV. 15 Hambatan Total Kapal

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	RT 2 rotor (N)
4	5311,475	5382,391
6	11740,818	11900,381
7,1	16281,215	16504,647
8,1	21337,116	21627,919
9,1	28506,952	28873,989
10,1	39480,721	39932,859

#### IV.7. Analisis Kontribusi Gaya Dorong pada Kapal

Gaya dorong yang dihasilkan dari rotor dapat dinyatakan dalam bentuk koefisien gaya yaitu koefisien *driving force*  $C_R$  dan koefisien *heeling force*  $C_H$ . Koefisien *driving force*  $C_R$  adalah koefisien gaya yang memiliki arah searah dengan arah kapal melaju sedangkan koefisien *heeling force*  $C_H$  adalah koefisien gaya yang memiliki arah tegak lurus terhadap arah kapal melaju. Perhitungan koefisien *driving force* dan *heeling force* ditunjukkan pada persamaan.

$$C_R = C_L \sin \beta - C_D \cos \beta \quad (4.1)$$

$$C_H = C_L \cos \beta + C_D \sin \beta \quad (4.2)$$

Model rotor yang digunakan adalah model rotor yang paling optimum yaitu model C pada *spin ratio* (SR) 4 sehingga nilai  $C_L$  dan  $C_D$  yang digunakan adalah  $C_L$  dan  $C_D$  model

tersebut. Selanjutnya diberikan 12 variasi sudut datangnya arah angin yaitu 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, 180°, 210°, 240°, 270°, 300°, dan 330°. Nilai  $C_R$  dan  $C_H$  ditunjukkan pada Tabel IV. 16 dan Tabel IV. 17.

Tabel IV. 16 Nilai  $C_R$  dan  $C_H$  1 Rotor

1 rotor		
Sudut angin	$C_R$	$C_H$
0°	-0,586	7,2626
30°	3,12379	6,58261
60°	5,99659	4,13881
90°	7,2626	0,58603
120°	6,58261	-3,1238
150°	4,13881	-5,9966
180°	0,58603	-7,2626
210°	4,13881	-5,9966
240°	6,58261	-3,1238
270°	7,2626	0,58603
300°	5,99659	4,13881
330°	3,12379	6,58261

Tabel IV. 17 Nilai  $C_R$  dan  $C_H$  2 Rotor

2 rotor				
Sudut angin	$C_R$		$C_H$	
	Rotor 1	Rotor 2	Rotor 1	Rotor 2
0°	-0,0567	-0,9021	7,04515	5,49936
30°	3,73352	2,73983	6,73091	6,93251
60°	6,75366	5,76304	4,4076	4,55231
90°	7,71239	7,29242	0,83758	0,96076
120°	6,82394	7,19392	-2,7148	-3,645
150°	4,63381	3,96239	-5,839	-6,5988
180°	0,90207	0,05672	-5,4994	-7,0452
210°	4,63381	3,96239	-5,839	-6,5988
240°	6,82394	7,19392	-2,7148	-3,645
270°	7,71239	7,29242	0,83758	0,96076
300°	6,75366	5,76304	4,4076	4,55231
330°	3,73352	2,73983	6,73091	6,93251

Dari nilai koefisien  $C_R$  dan  $C_H$  maka selanjutnya dapat dihitung besar *driving force* dan *heeling force* pada kondisi rotor yang sesungguhnya (*full scale*). Untuk mendapatkan besar *driving force* dan *heeling force* yang sesungguhnya, koefisien tersebut dikalikan dengan

tekanan dinamis aliran bebas dan luasan penampang rotor (A) atau dapat juga dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut ini.

$$F_R = L \sin \beta - D \cos \beta \quad (4.3)$$

$$F_H = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (4.4)$$

Besar nilai  $F_R$  dan  $F_H$  untuk satu rotor dan dua rotor ditunjukkan pada Tabel IV. 18 dan Tabel IV. 19.

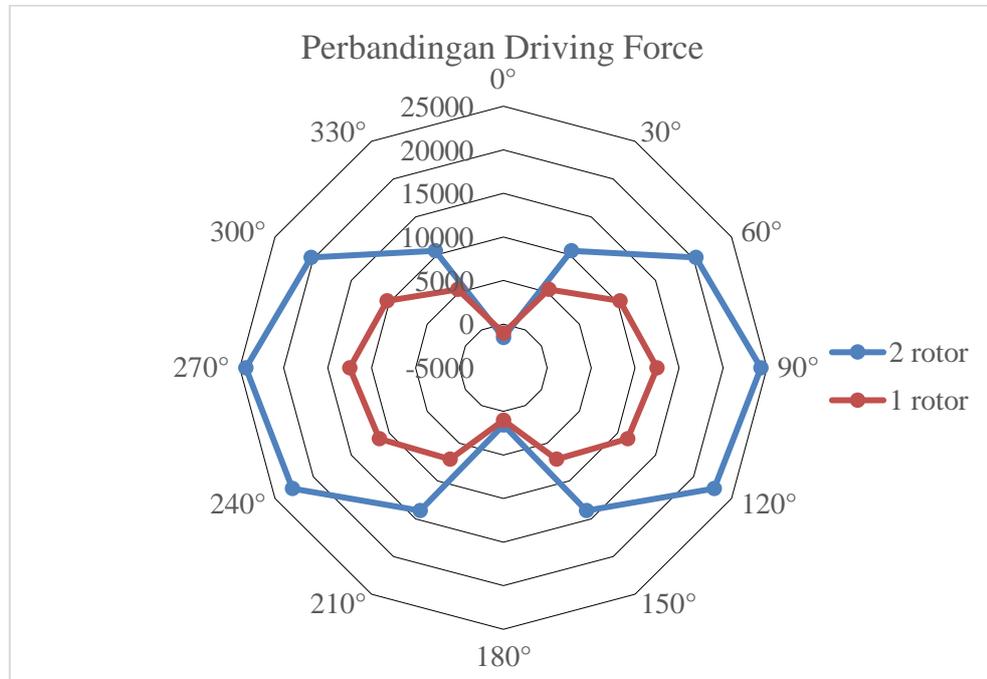
Tabel IV. 18 Nilai  $F_R$  dan  $F_H$  1 Rotor

1 rotor		
Sudut angin	$F_R$ (N)	$F_H$ (N)
0°	-949,41	11766
30°	5060,77	10664,3
60°	9714,92	6705,19
90°	11766	949,406
120°	10664,3	-5060,8
150°	6705,19	-9714,9
180°	949,406	-11766
210°	6705,19	-9714,9
240°	10664,3	-5060,8
270°	11766	949,406
300°	9714,92	6705,19
330°	5060,77	10664,3

Tabel IV. 19 Nilai  $F_R$  dan  $F_H$  2 Rotor

2 rotor						
Sudut angin	FR (N)			FH (N)		
	Rotor 1	Rotor 2	FR Total	Rotor 1	Rotor 2	FH Total
0°	-91,893	-1461,4	-1553,3	11413,7	8909,38	20323,1
30°	6048,58	4438,73	10487,3	10904,6	11231,2	22135,8
60°	10941,4	9336,56	20278	7140,64	7375,09	14515,7
90°	12494,7	11814,3	24308,9	1356,94	1556,5	2913,44
120°	11055,3	11654,7	22710	-4398,2	-5905,3	-10303
150°	7507,13	6419,36	13926,5	-9459,6	-10691	-20150
180°	1461,43	91,8925	1553,32	-8909,4	-11414	-20323
210°	7507,13	6419,36	13926,5	-9459,6	-10691	-20150
240°	11055,3	11654,7	22710	-4398,2	-5905,3	-10303
270°	12494,7	11814,3	24308,9	1356,94	1556,5	2913,44
300°	10941,4	9336,56	20278	7140,64	7375,09	14515,7
330°	6048,58	4438,73	10487,3	10904,6	11231,2	22135,8

Untuk mengetahui perbandingan *driving force* yang dihasilkan antara penggunaan satu rotor dan dua rotor maka dibuat diagram polar *driving force* tiap sudut datangnya arah angin seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV. 26.



Gambar IV. 26 Diagram Polar *Driving Force*

Untuk mengetahui besarnya kontribusi gaya dorong dan kecepatan yang dihasilkan dari pemasangan rotor maka dibutuhkan data hambatan kapal dari KLM Maruta Jaya 900 DWT. Data hambatan yang dipakai adalah hambatan total yang dihitung setelah pemasangan rotor. Verifikasi kontribusi gaya dorong diasumsikan jenis propulsi yang digunakan pada kapal hanya satu yaitu rotor. Jumlah rotor yang digunakan adalah satu rotor dan dua rotor. Kemudian dihitung besar kontribusi gaya dorong dan kecepatan kapal dengan variasi sudut datangnya arah angin.

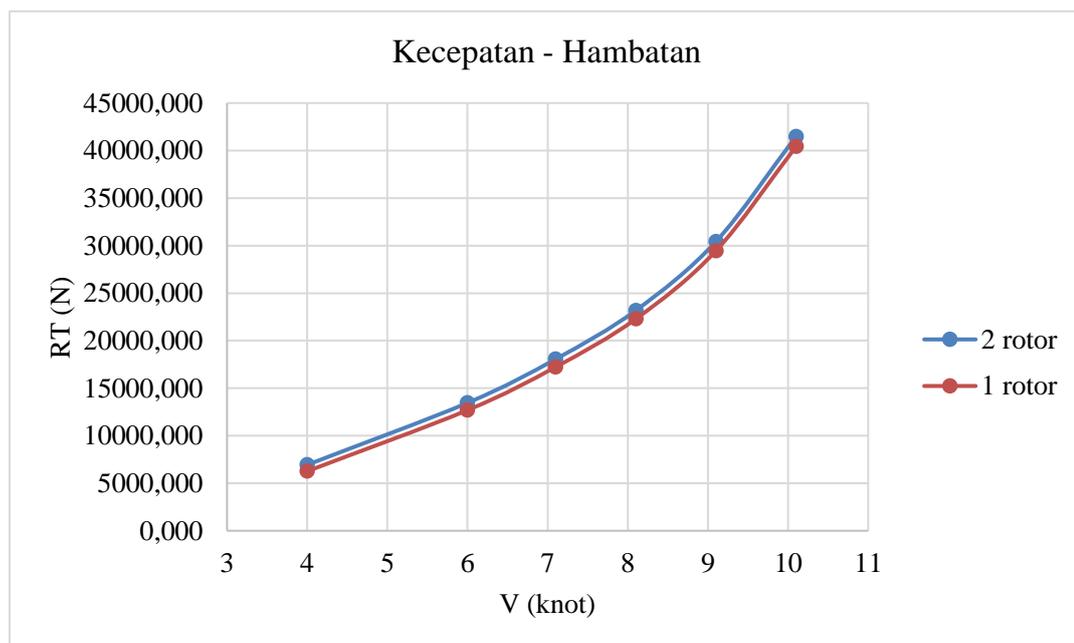
1. Pada sudut angin 0°

Pada sudut angin 0°, *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar -949,406 N dan untuk dua rotor sebesar -1553,32 N. Tanda negatif menunjukkan bahwa *driving force* berlawanan arah dengan arah kapal melaju sehingga kapal bergerak mundur. Maka kondisi ini menunjukkan performa paling minimum dari rotor. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 20.

Tabel IV. 20 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 0^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	-6260,881	5382,391	-6935,710
6	11740,818	-12690,224	11900,381	-13453,699
7,1	16281,215	-17230,621	16504,647	-18057,965
8,1	21337,116	-22286,523	21627,919	-23181,237
9,1	28506,952	-29456,358	28873,989	-30427,308
10,1	39480,721	-40430,128	39932,859	-41486,177

Pada Tabel IV. 20 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor maupun dua rotor hanya mampu menghasilkan kecepatan dibawah 4 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin  $0^\circ$ , dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 25.



Gambar IV. 27 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin  $0^\circ$

Dari Gambar IV. 27 dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah -2,643 knot (kapal bergerak mundur)
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah -2,831 knot (kapal bergerak mundur)

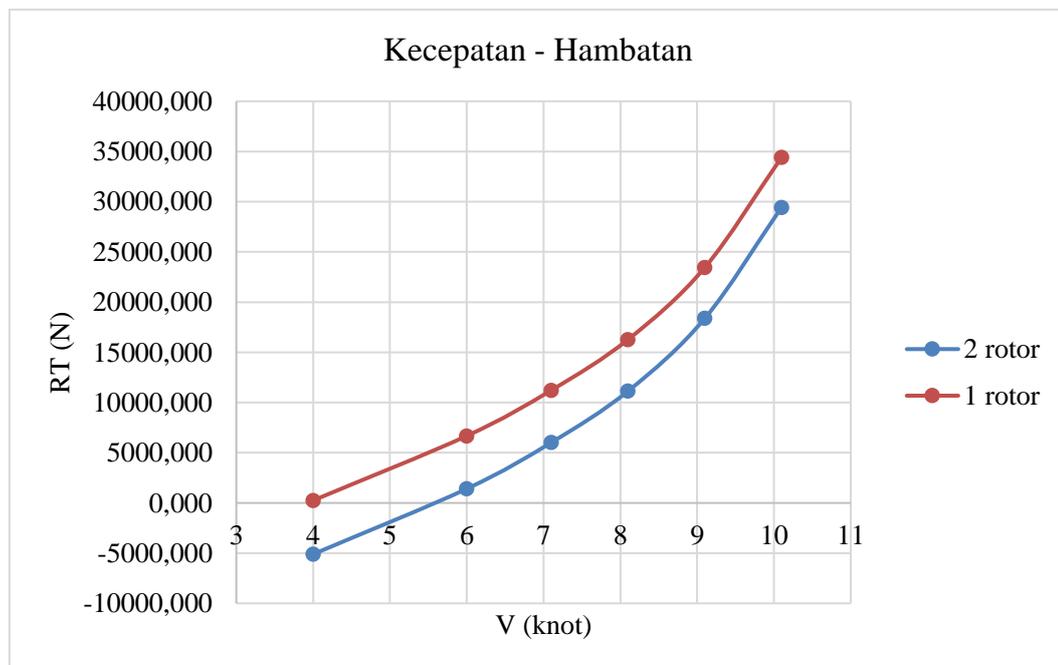
2. Pada sudut angin 30°

Pada sudut angin 30°, *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 5060,773 N dan untuk dua rotor sebesar 10487,3 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 21.

Tabel IV. 21 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 30^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	-250,702	5382,391	5104,912
6	11740,818	-6680,046	11900,381	-1413,077
7,1	16281,215	-11220,442	16504,647	-6017,344
8,1	21337,116	-16276,344	21627,919	-11140,615
9,1	28506,952	-23446,179	28873,989	-18386,686
10,1	39480,721	-34419,949	39932,859	-29445,556

Pada Tabel IV. 21 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor tidak mampu mencapai kecepatan 4 knot, sedangkan untuk dua rotor mampu mencapai kecepatan sekitar lebih dari 4 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin 30°, dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 28.



Gambar IV. 28 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 30°

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 3,922 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 5,566 knot

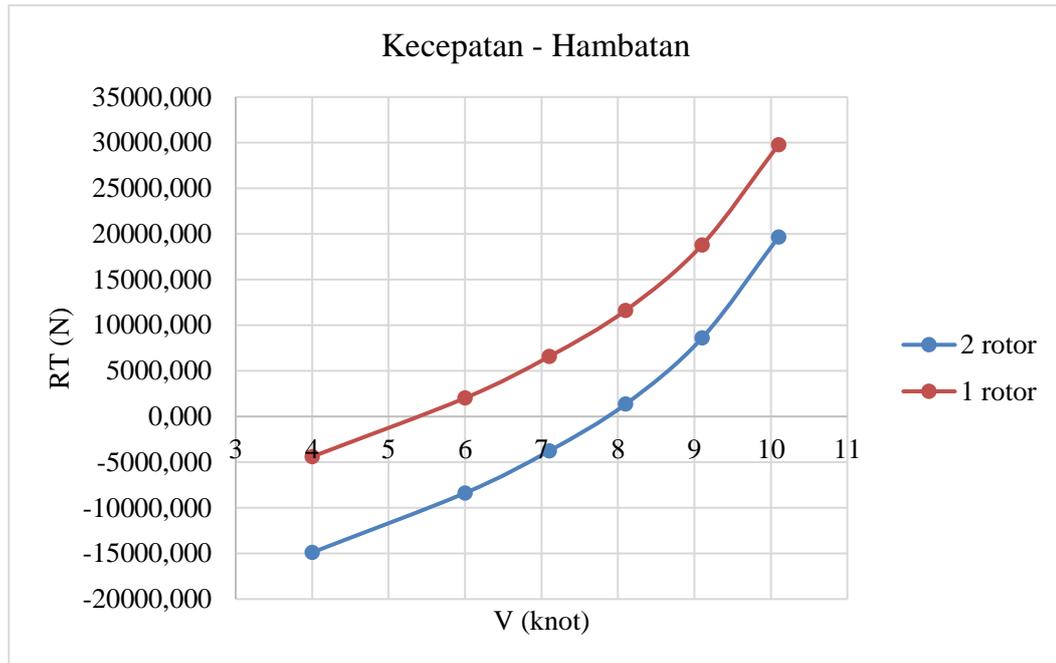
### 3. Pada sudut angin $60^\circ$

Pada sudut angin  $60^\circ$ , *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 9714,922 N dan untuk dua rotor sebesar 20278,01 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 22.

Tabel IV. 22 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 60^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	4403,447	5382,391	14895,614
6	11740,818	-2025,897	11900,381	8377,625
7,1	16281,215	-6566,293	16504,647	3773,359
8,1	21337,116	-11622,195	21627,919	-1349,913
9,1	28506,952	-18792,030	28873,989	-8595,983
10,1	39480,721	-29765,800	39932,859	-19654,853

Pada Tabel IV. 22 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 4 knot sedangkan untuk dua rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 7,1 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin  $60^\circ$ , dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 29.



Gambar IV. 29 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 60°

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 5,370 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 7,837 knot

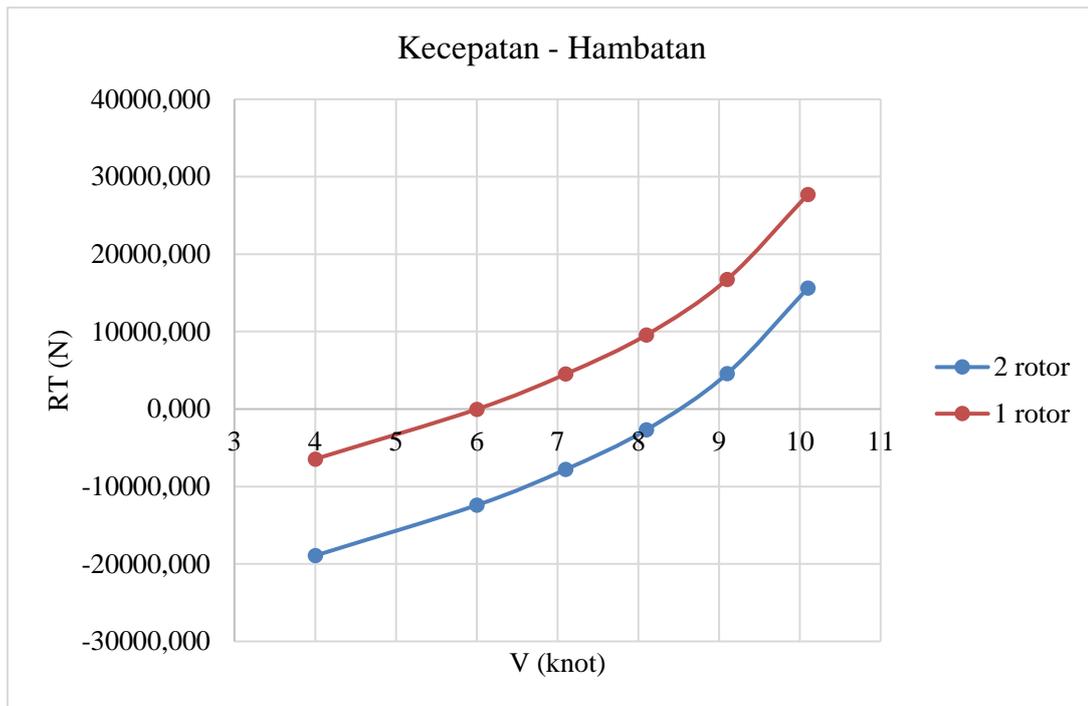
#### 4. Pada sudut angin 90°

Pada sudut angin 90°, *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 11765,97 N dan untuk dua rotor sebesar 24308,93 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 23.

Tabel IV. 23 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 90^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	6454,491	5382,391	18926,541
6	11740,818	25,147	11900,381	12408,552
7,1	16281,215	-4515,250	16504,647	7804,286
8,1	21337,116	-9571,151	21627,919	2681,014
9,1	28506,952	-16740,986	28873,989	-4565,057
10,1	39480,721	-27714,756	39932,859	-15623,926

Pada Tabel IV. 23 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 6 knot sedangkan untuk dua rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 8,1 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin  $90^\circ$ , dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 30.



Gambar IV. 30 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin  $90^\circ$

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 6,006 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 8,514 knot

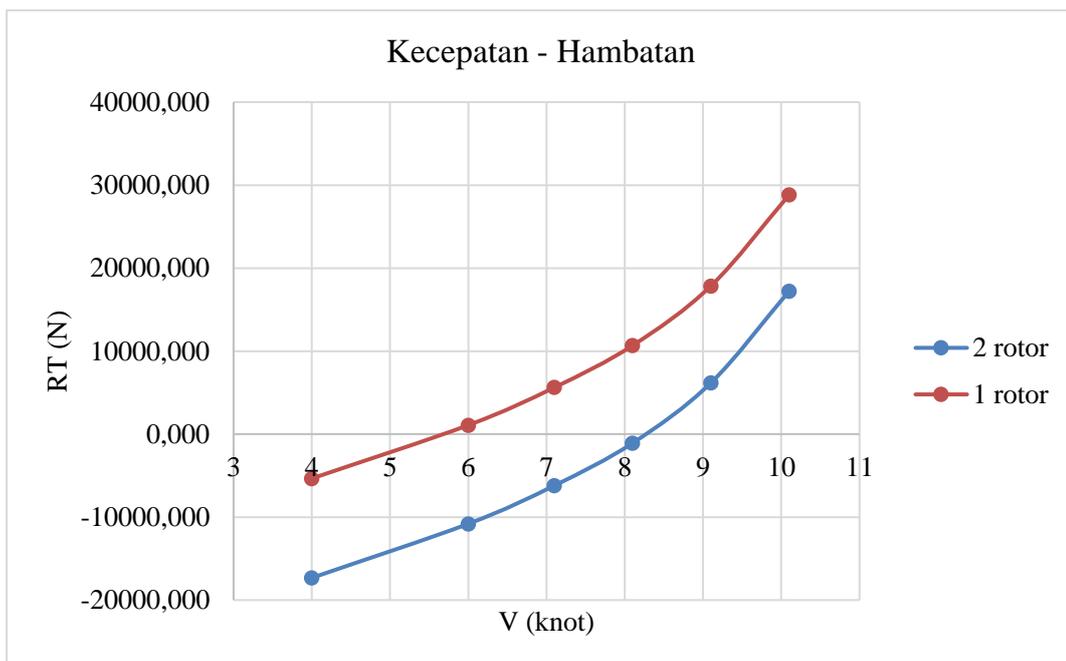
#### 5. Pada sudut angin $120^\circ$

Pada sudut angin  $120^\circ$ , *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 10664,33 N dan untuk dua rotor sebesar 22710 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 24.

Tabel IV. 24 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 120^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	5352,853	5382,391	17327,607
6	11740,818	-1076,490	11900,381	10809,618
7,1	16281,215	-5616,887	16504,647	6205,352
8,1	21337,116	-10672,788	21627,919	1082,080
9,1	28506,952	-17842,624	28873,989	-6163,991
10,1	39480,721	-28816,393	39932,859	-17222,860

Pada Tabel IV. 24 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 4 knot sedangkan untuk dua rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 8,1 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin  $120^\circ$ , dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 31.



Gambar IV. 31 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin  $120^\circ$

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 5,665 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 8,291 knot

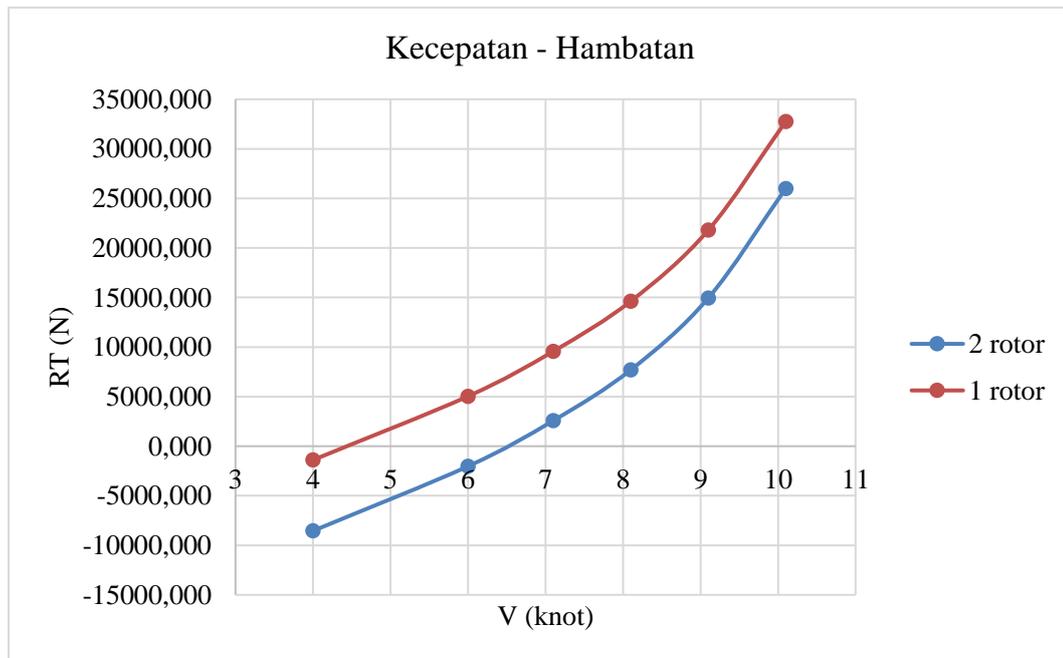
6. Pada sudut angin 150°

Pada sudut angin 150°, *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 6705,193 N dan untuk dua rotor sebesar 13926,49 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 25.

Tabel IV. 25 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 150^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	1393,718	5382,391	8544,101
6	11740,818	-5035,626	11900,381	2026,111
7,1	16281,215	-9576,023	16504,647	-2578,155
8,1	21337,116	-14631,924	21627,919	-7701,427
9,1	28506,952	-21801,759	28873,989	-14947,497
10,1	39480,721	-32775,529	39932,859	-26006,367

Pada Tabel IV. 25 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 4 knot sedangkan untuk dua rotor mampu mencapai kecepatan sekitar 6 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin 150°, dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 32.



Gambar IV. 32 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 150°

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 4,434 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 6,530 knot

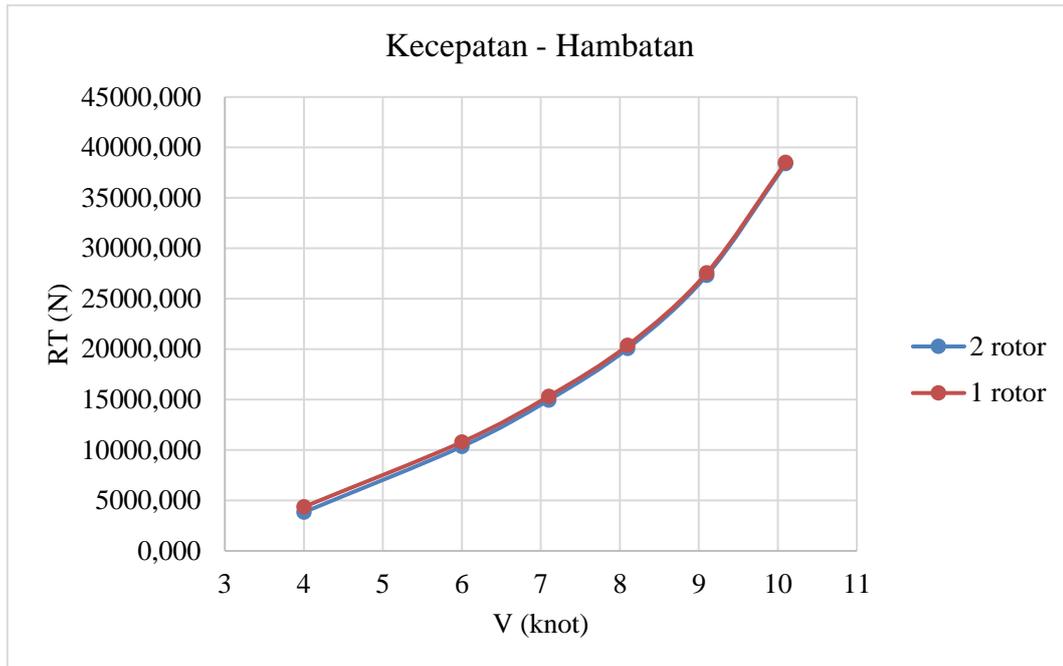
#### 7. Pada sudut angin 180°

Pada sudut angin 180°, *driving force* ( $F_R$ ) yang dihasilkan oleh satu rotor adalah sebesar 949,406 N dan untuk dua rotor sebesar 1553,318 N. Kontribusi rotor terhadap kecepatan dan gaya dorong kapal ditunjukkan pada Tabel IV. 26.

Tabel IV. 26 Kontribusi Gaya Dorong Terhadap Kecepatan Kapal ( $\beta = 180^\circ$ )

Kecepatan Kapal (knot)	RT 1 rotor (N)	FR - RT (N)	RT 2 rotor (N)	FR - RT (N)
		1 rotor		2 rotor
4	5311,475	-4362,069	5382,391	-3829,073
6	11740,818	-10791,412	11900,381	-10347,062
7,1	16281,215	-15331,809	16504,647	-14951,328
8,1	21337,116	-20387,710	21627,919	-20074,600
9,1	28506,952	-27557,545	28873,989	-27320,671
10,1	39480,721	-38531,315	39932,859	-38379,540

Pada Tabel IV. 26 menunjukkan bahwa gaya dorong yang dihasilkan satu rotor maupun dua rotor hanya mampu menghasilkan kecepatan dibawah 4 knot. Kecenderungan kontribusi gaya dorong yang dihasilkan dari pemasangan rotor pada kondisi sudut angin 180°, dapat digambarkan melalui grafik kecepatan – hambatan pada Gambar IV. 33.



Gambar IV. 33 Grafik Kecepatan - Hambatan Kapal Pada Sudut Angin 180°

Dari gambar dan melalui persamaan interpolasi maka didapatkan kecepatan konstan maksimal yang dapat dihasilkan dari rotor adalah sebagai berikut.

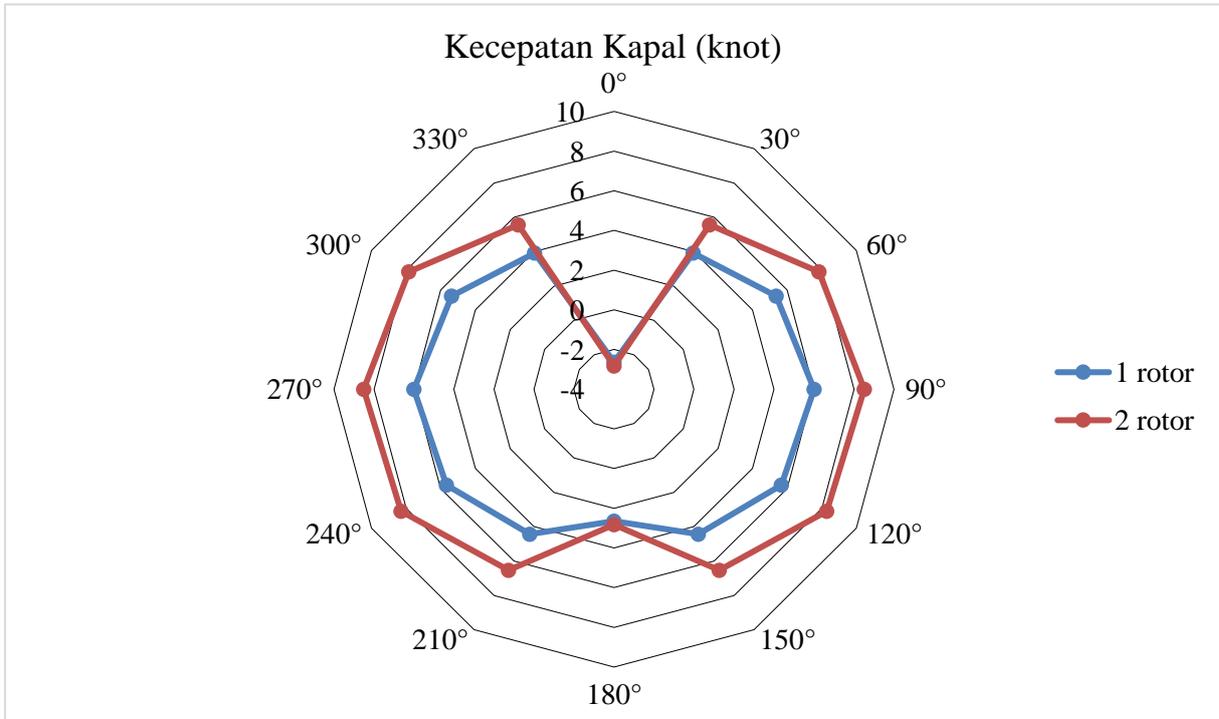
- Untuk satu rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 2,643 knot
- Untuk dua rotor, kecepatan maksimal kapal yang dapat dicapai adalah 2,831 knot

Pada Tabel IV. 27 ditunjukkan kecepatan maksimal yang dapat dicapai oleh penggunaan rotor pada tiap – tiap sudut arah datangnya angin.

Tabel IV. 27 Rekapitulasi Kecepatan Kapal

Sudut angin	Kecepatan (knot)	
	1 rotor	2 rotor
0°	-2,643	-2,831
30°	3,922	5,566
60°	5,370	7,837
90°	6,006	8,514
120°	5,665	8,291
150°	4,434	6,530
180°	2,643	2,831
210°	4,434	6,530
240°	5,665	8,291
270°	6,006	8,514
300°	5,370	7,837
330°	3,922	5,566

Untuk mengetahui perbandingan kecepatan maksimal yang dapat dicapai dari penggunaan satu rotor dan dua rotor, disajikan diagram polar kecepatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar IV. 34.



Gambar IV. 34 Diagram Polar Kecepatan Kapal

Pada Gambar IV. 34 dapat dilihat bahwa besar kecepatan maksimal yang dapat dicapai dari penggunaan rotor sebagai alat penggerak utama kapal adalah sebesar 8,514 knot. Kecepatan ini dapat dicapai dari penggunaan dua rotor pada kondisi sudut angin 90° dan 270° dengan kondisi *Spin Ratio* 4. Hal ini menunjukkan bahwa performa optimum dari rotor terjadi ketika angin yang bertiup tegak lurus atau membentuk sudut 90° dengan arah kapal melaju. Sebaliknya, kecepatan minimum terjadi ketika angin yang bertiup sejajar dan berlawanan dengan arah kapal melaju. Kondisi ini terjadi ketika sudut angin yang bertiup adalah 0° (*headwind*). Pada sudut 0° kecepatan yang dihasilkan negatif sehingga kapal bergerak mundur. Hal ini menunjukkan bahwa rotor tidak dapat bekerja / tidak dapat menghasilkan gaya dorong yang searah dengan arah kapal melaju sehingga arah angin dengan sudut 0° harus dihindari dengan cara mengatur arah kapal (memiringkan arah kapal) agar membentuk sudut lebih dari 0° dan kurang dari 90° terhadap tujuan ketika terjadi angin dengan sudut 0° (*headwind*). Untuk memutar rotor diperlukan satu motor listrik untuk satu rotor sehingga dibutuhkan dua motor listrik untuk dua rotor.

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **V.1. Kesimpulan**

Setelah dilakukan analisis mengenai pengaruh *dimpled surface* pada *Flettner Rotor* dan perhitungan gaya dorong yang dihasilkan oleh *Flettner Rotor* pada KLM Maruta Jaya 900 DWT diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Penerapan *dimpled surface* berpengaruh terhadap koefisien *lift* dan *drag* rotor. Pengoperasian pada SR 1 dan SR 1,5 akan menurunkan koefisien *lift* dan pada SR 1 sampai SR 3 akan meningkatkan koefisien *drag*. Kemudian pengoperasian pada SR 2 sampai SR 4 dapat meningkatkan koefisien *lift*. Keuntungan dari penerapan *dimpled surface* terjadi pada SR 4 karena dapat meningkatkan koefisien *lift* sebesar 69,6 % dan dapat menurunkan koefisien *drag* sebesar 14,76%. Hal ini terjadi pada Model C pada *Spin Ratio* (SR) 4.
2. *Spin Ratio* (SR) memiliki pengaruh terhadap besarnya nilai dari koefisien *lift* dan *drag* rotor dimana besarnya kedua koefisien ini tidak berbanding lurus dengan besarnya *Spin Ratio* (SR).
3. Pada SR 1 dan SR 1,5 rotor yang menggunakan *dimpled surface* (Model B dan C) memiliki nilai koefisien *lift* yang lebih kecil daripada rotor *smooth surface* (Model A). Kemudian pada SR 2 sampai SR 4 nilai koefisien *lift* dari Model B dan C menjadi lebih besar daripada Model A. Pada SR 1 sampai SR 3 rotor yang menggunakan *dimpled surface* (Model B dan C) memiliki nilai koefisien *drag* yang lebih besar daripada rotor *smooth surface* (Model A). Kemudian pada SR 4 nilai koefisien *drag* dari Model B dan C menjadi lebih kecil daripada Model A.
4. Besar kontribusi gaya dorong maksimal yang dihasilkan oleh pemasangan rotor pada KLM Maruta Jaya 900 DWT adalah sebesar 24308,9 N dan kecepatan maksimal yang dapat dicapai adalah sebesar 8,514 knot. Gaya dorong dan kecepatan ini dapat dicapai dari penggunaan dua rotor pada kondisi sudut angin 90° dan 270° dengan *Spin Ratio* 4.

#### **V.2. Saran**

1. Simulasi dilakukan secara 3 dimensi agar memperoleh hasil yang lebih akurat

2. Perlu dilakukan perhitungan stabilitas kapal secara mendetail setelah dipasang rotor agar dapat dipastikan apakah stabilitas kapal masih memenuhi atau tidak

## DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS Inc. (2014, Februari 28). Lecture 7: Turbulence Modelling.
- Anwar, S., Khalil, M. I., dan Saha, S. (2019). Finite Element Analysis on Turbulent Flow Over Two Sideby-Side Rotating Cylinders, *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Computer Modeling and Simulation*, (pp. 107-111). Melbourne, Australia.
- Aoki, K., Muto, K., dan Okanaga, H. (2010). Aerodynamic Characteristic and Flow Pattern of a Golf Ball with Rotation, *Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference of the International Sports Engineering Association*, (pp. 2431-2436). Vienna, Austria.
- Bergeson, L. (1981). *Wind Propulsion for ships of the American merchant marine*. Washington: U.S. Dept. of Commerce.
- Bertram, V. (2002). *Practical Ship Hydrodynamics*. Oxford: Butterworth Heineman.
- BPPT. (2009). *KLM Maruta Jaya Bukti Nyata Hemat BBM*. Retrieved from, <http://www.bppt.go.id>
- Cengel, Y. A. dan Cimbala, J. M. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- Collie, E. (1985). *Alcyone: Le Navire Merveilleux Oceanus* 2(3), 56-62., Woods Hole Oceanographic Institution, Mass.
- De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., dan De Luca, F. (2016). Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study. *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2016, pp 1-12, Italy.
- Enercon. (2013). *Enercon, Energie Fur De Welt: Press Release*. Retrieved from, [http://www.enercon.de/p/downloads/PM\\_EShip1\\_](http://www.enercon.de/p/downloads/PM_EShip1_)
- Everts, M., Ebrahim, R., Kruger, J. P., Miles, E., Sharifpur, M., dan Meyer, J.P. (2014). Turbulent Flow Across a Rotating Cylinder with Surface Roughness, *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, (pp. 1606-1614). Orlando, Florida.
- Fujiwara, Hirata, K., Ueno, M., dan Nimura, T. (2003). National Maritime Research Institute, *On Aerodynamic Characteristics of a Hybrid Sail with Square Soft Sail*, Tokyo

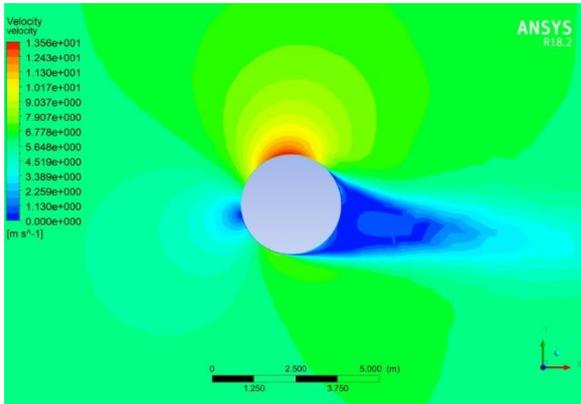
- Greenwave (2006). *Greenwave: Shipping's environmental charity*. Retrieved, from <http://www.greenwave.org.uk>
- NASA. (2018). *Lift of Rotating Cylinder*. Retrieved from, <http://www.grc.nasa.gov>
- Norsepower. (2018). *Norsepower Rotor Sails*. Retrieved from, <http://www.norsepower.com>
- Marchaj C. A. (1982). *Sailing Theory and Practice*. New York: United States.
- Martin, R. E. (1926) *We can trick the wind into saving millions*. *Popular Science Monthly*, 38,105.
- Mgaidi, A. M., Mohd Rafie, A. S., Ahmad, K. A., Zahari, R., Abdul Hamid, M. F., dan Marzuki, O.F. (2018). Numerical and Experimental Analyses of the Flow Around A Rotating Circular Cylinder at Subcritical Regime of Reynolds Number Using K-E and K- $\Omega$ -SST Turbulent Models. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, pp 954-960, Pakistan.
- Prandtl, L. (1925). *The Magnus effect and wind-powered ships*, *Naturwissenschaften*, 13, 1787-1806.
- Savli, M. (2012). Seminar. *Turbulent Kinetic Energy – TKE*. Slovenia: University of Ljubljana
- Seifert, J. (2012). A review of the Magnus Effect in Aeronautics. *Journal of Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 55, pp 17-45, Belanda.
- Seybold, G. S. (1925). A Sailing Ship Without Sails: New Wonder of the Seas. *Popular Science Monthly*, 106 (2), 35-37.
- Suominen, T. (2015). B.Eng. Thesis. *Rotor Pilot Project on M/S Estraden of Bore Fleet*. Finlandia: Satakunta University of Applied Sciences.
- Texloncorp. (2015). Catalogue. *Texlon's Dacron*. California
- Tradt, M. (1925). *Der Umbau des Motorseglers "Buckau" zum tttner-Rotorschiff und seine Erprobungen*, *Werft Reederei Hafen*, Heft 6 (25), 160-167.
- UK Sailmakers. (2018). *UK Sailmakers' Encyclopedia of Sails – Sail Cloth*. Retrieved from, <http://www.uksailmakers.com>
- Versteeg dan Malalasekera. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. England: Longman Scientific and Technical.
- Yoshimura, Y. (2002). *A Prospect of Sail-Assisted Fishing Boats*, The Japanese Society Fisheries Science.

## LAMPIRAN

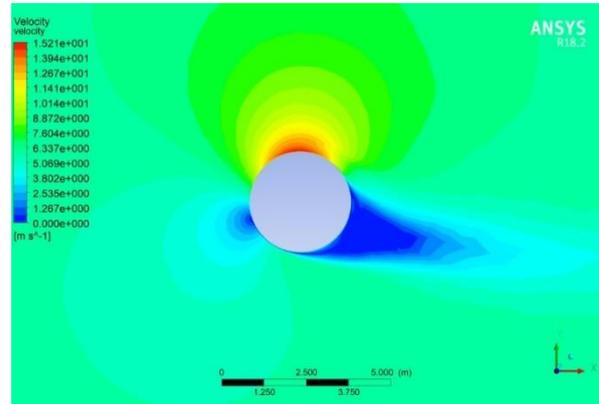
- Lampiran A Kontur Kecepatan
- Lampiran B Kontur Tekanan
- Lampiran C *Streamline*
- Lampiran D Grafik Koefisien *Lift*
- Lampiran E Grafik Koefisien *Drag*

**LAMPIRAN A**  
**KONTUR KECEPATAN**

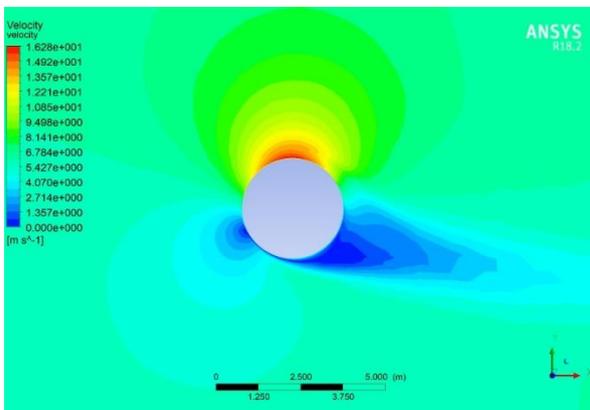
# MODEL A



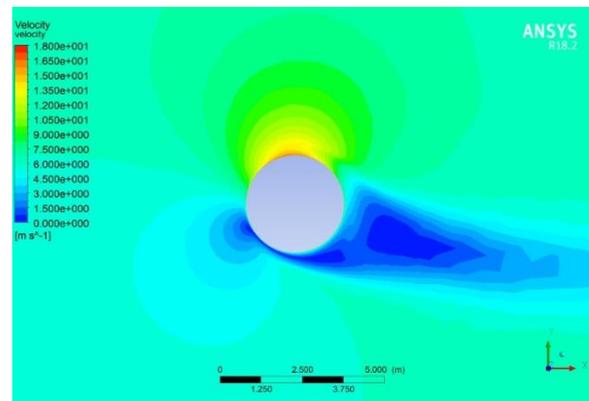
SR 1



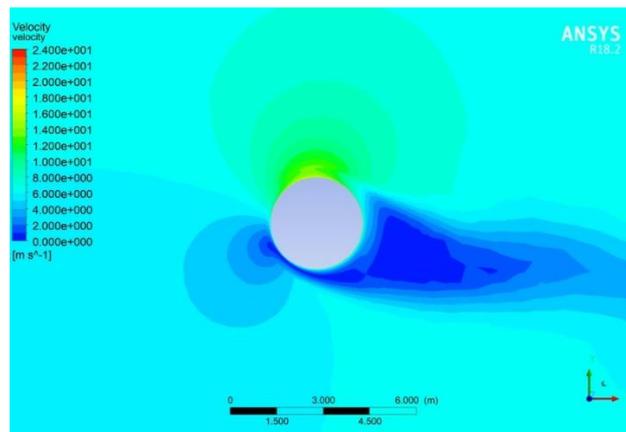
SR 1,5



SR 2

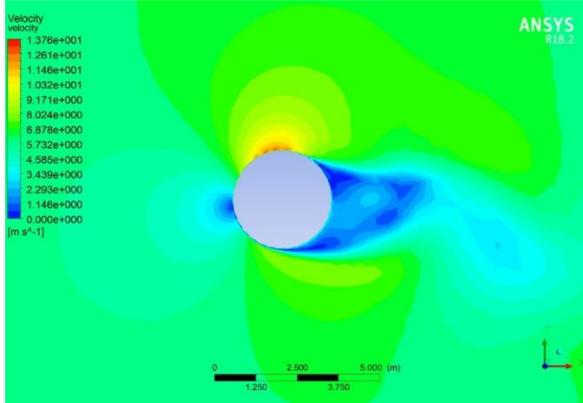


SR 3

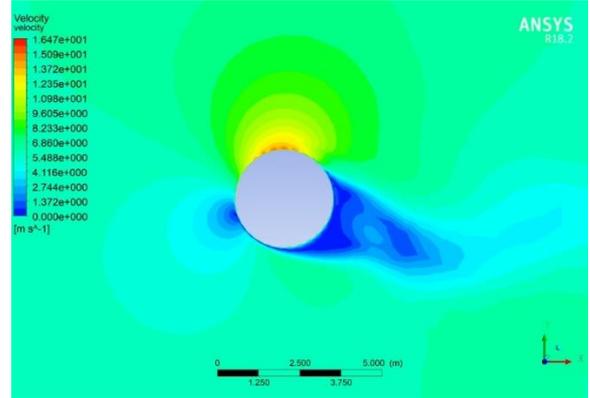


SR 4

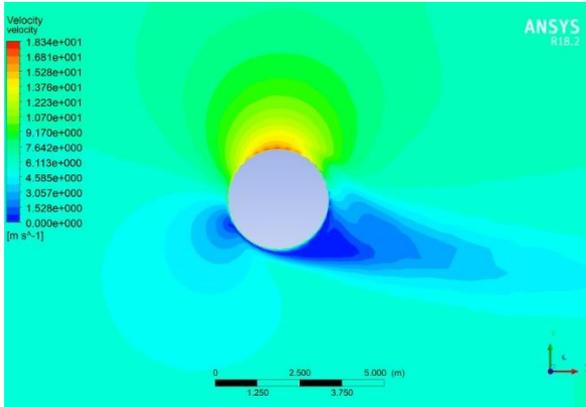
# MODEL B



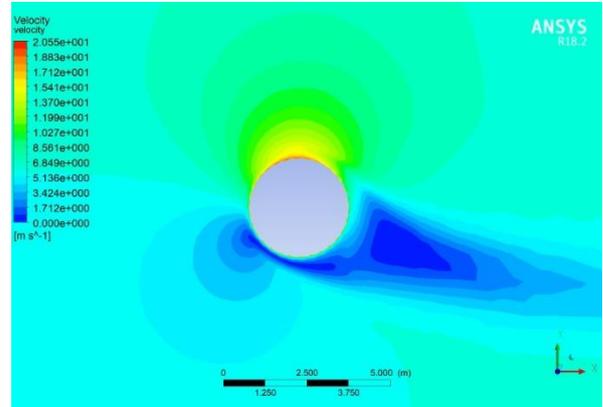
SR 1



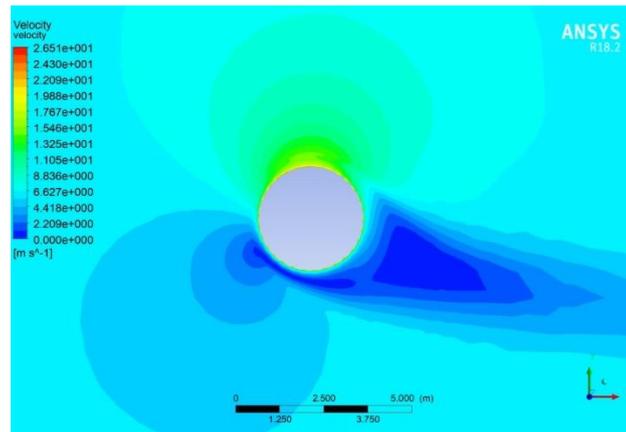
SR 1,5



SR 2

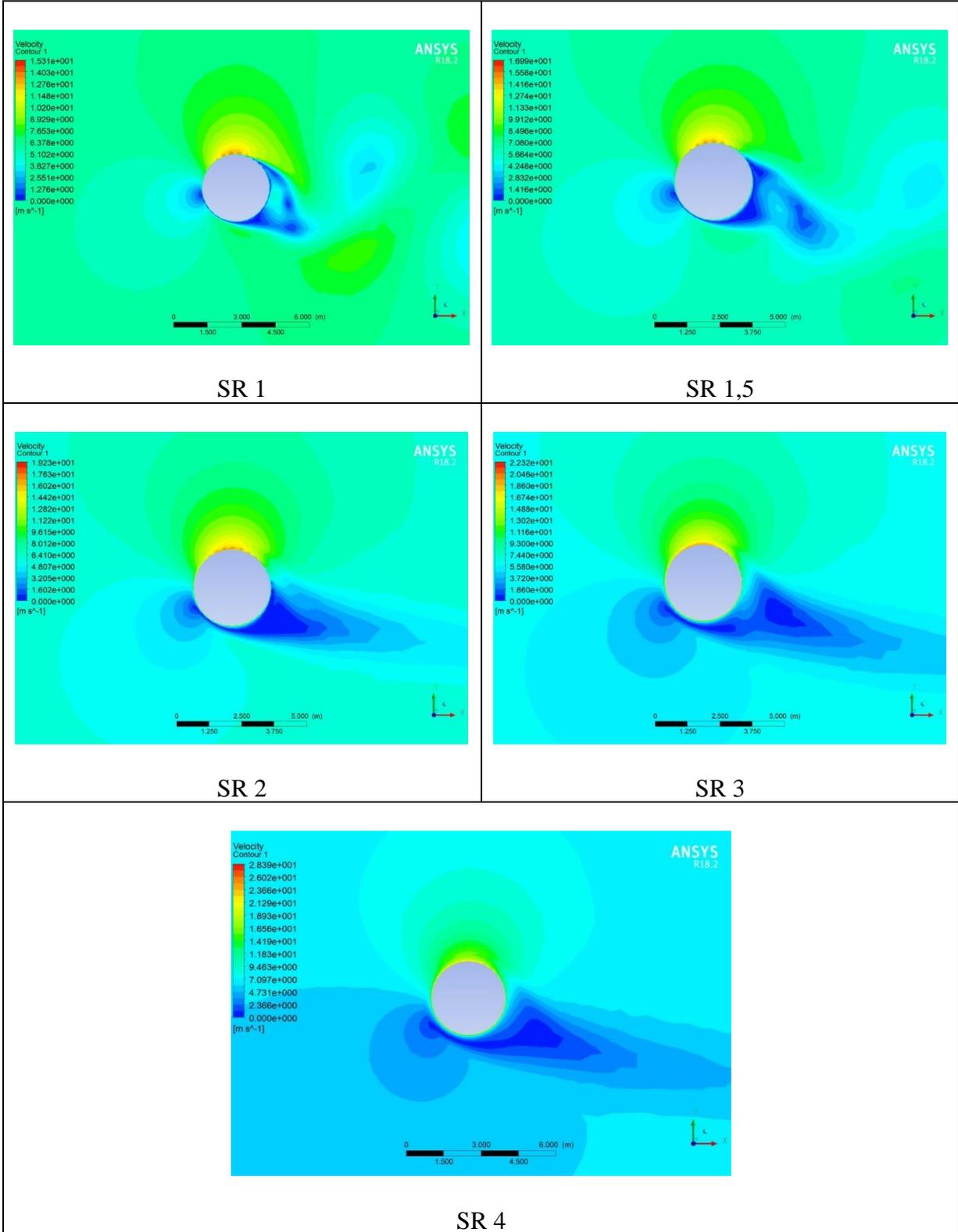


SR 3

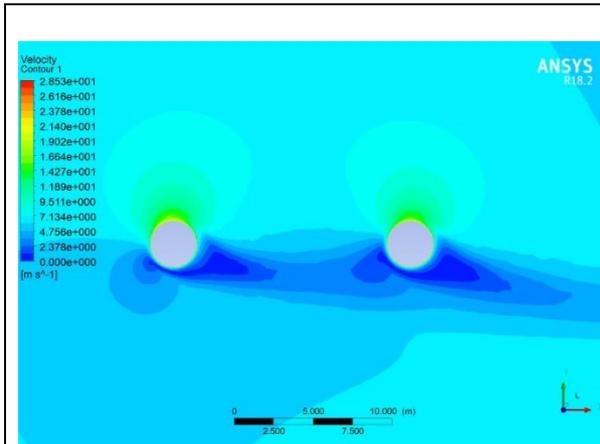


SR 4

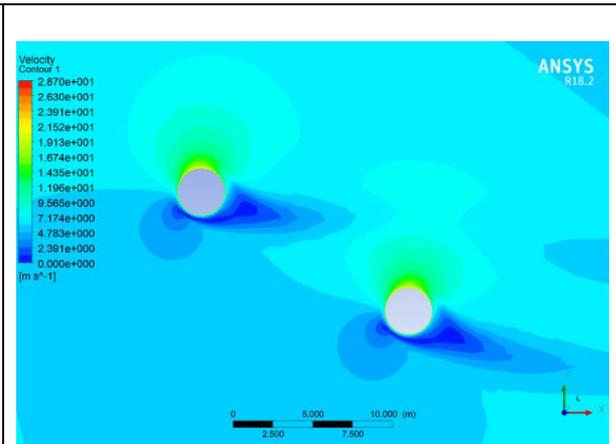
# MODEL C



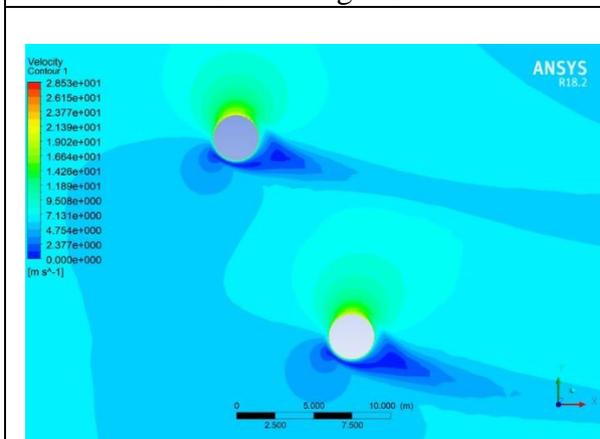
## SIMULASI 2 ROTOR



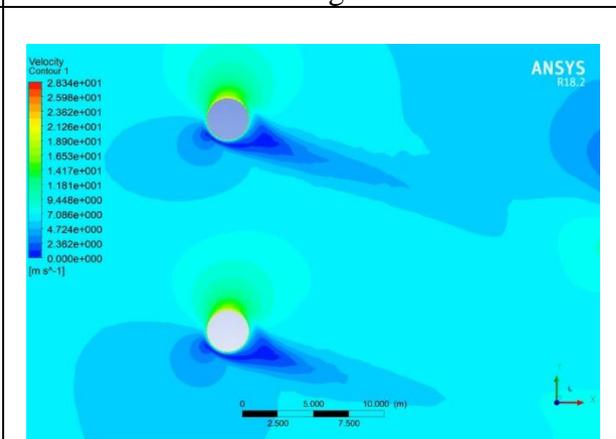
Sudut Angin 0°



Sudut Angin 30°



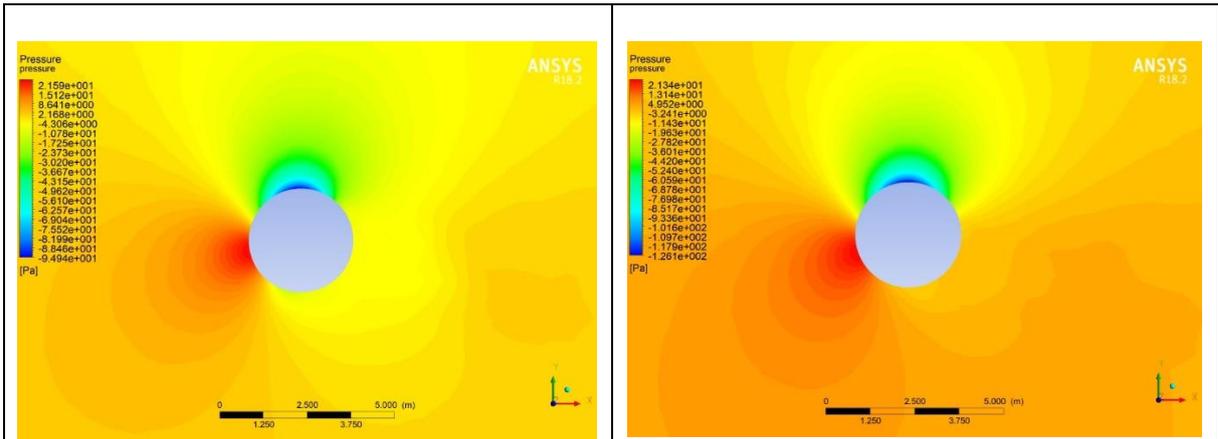
Sudut Angin 60°



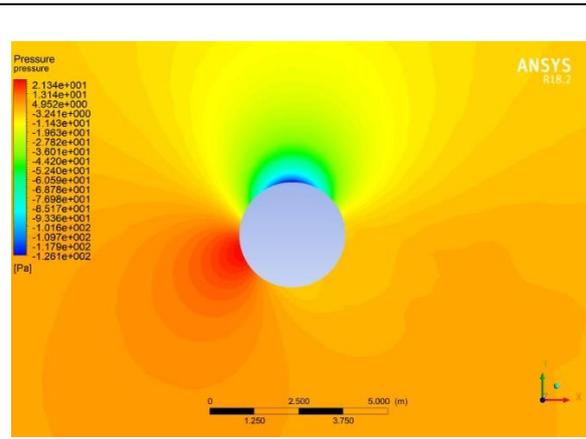
Sudut Angin 90°

**LAMPIRAN B**  
**KONTUR TEKANAN**

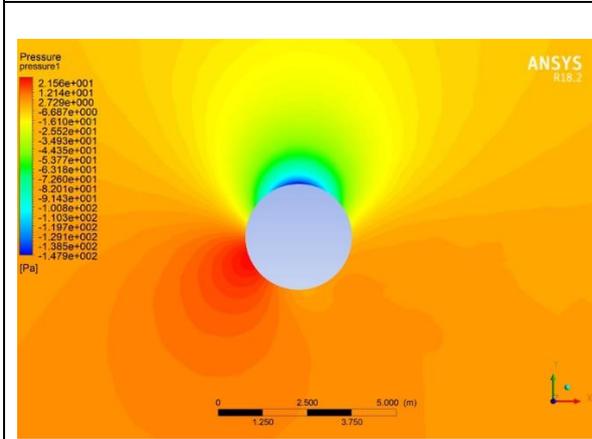
# MODEL A



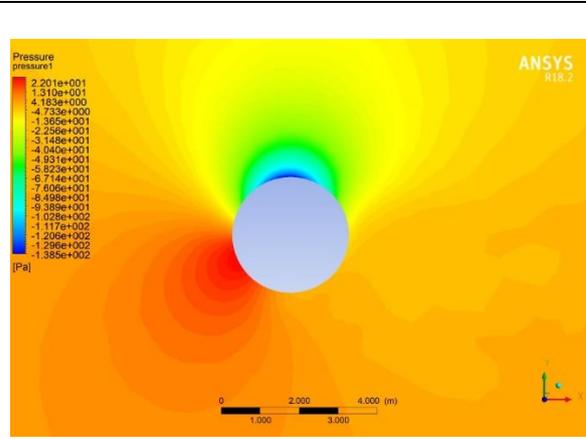
SR 1



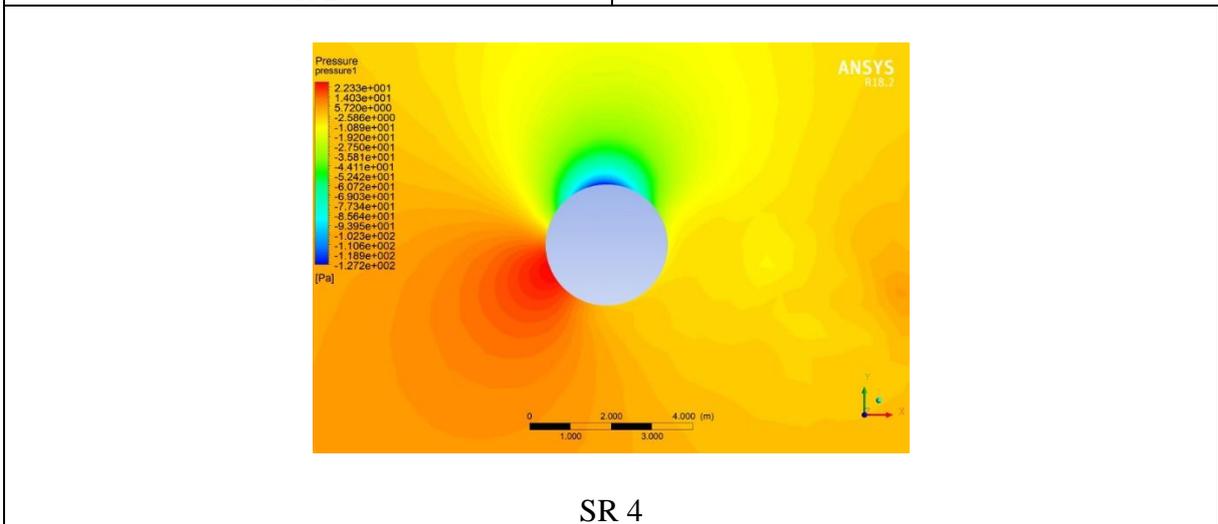
SR 1,5



SR 2

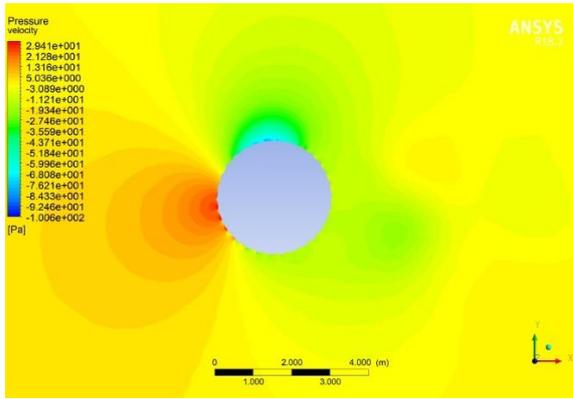


SR 3

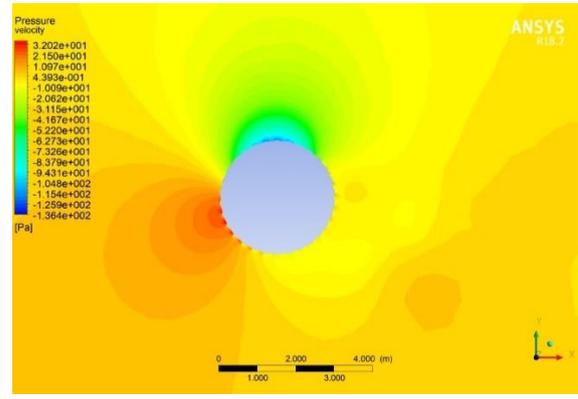


SR 4

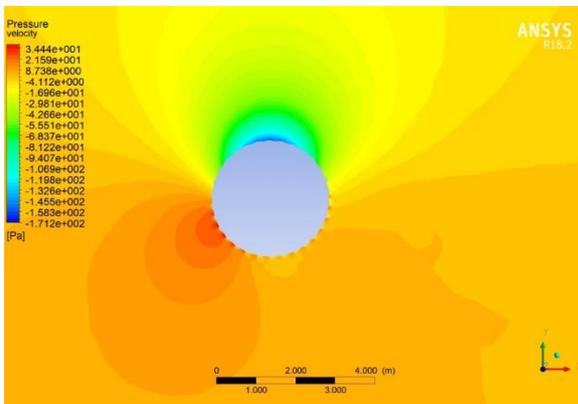
# MODEL B



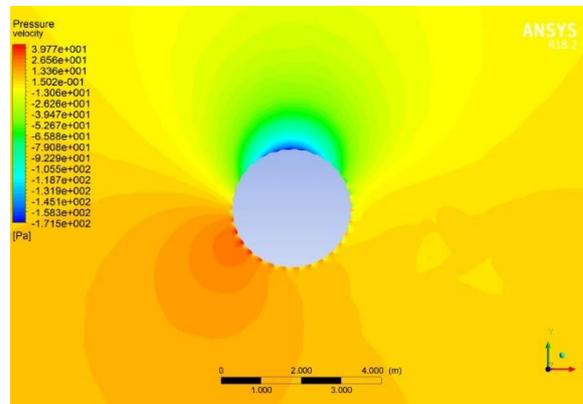
SR 1



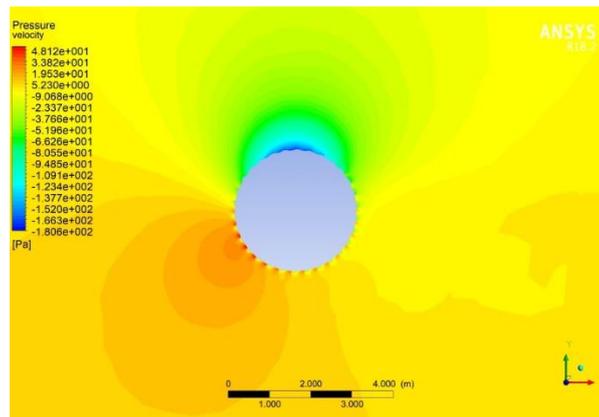
SR 1,5



SR 2

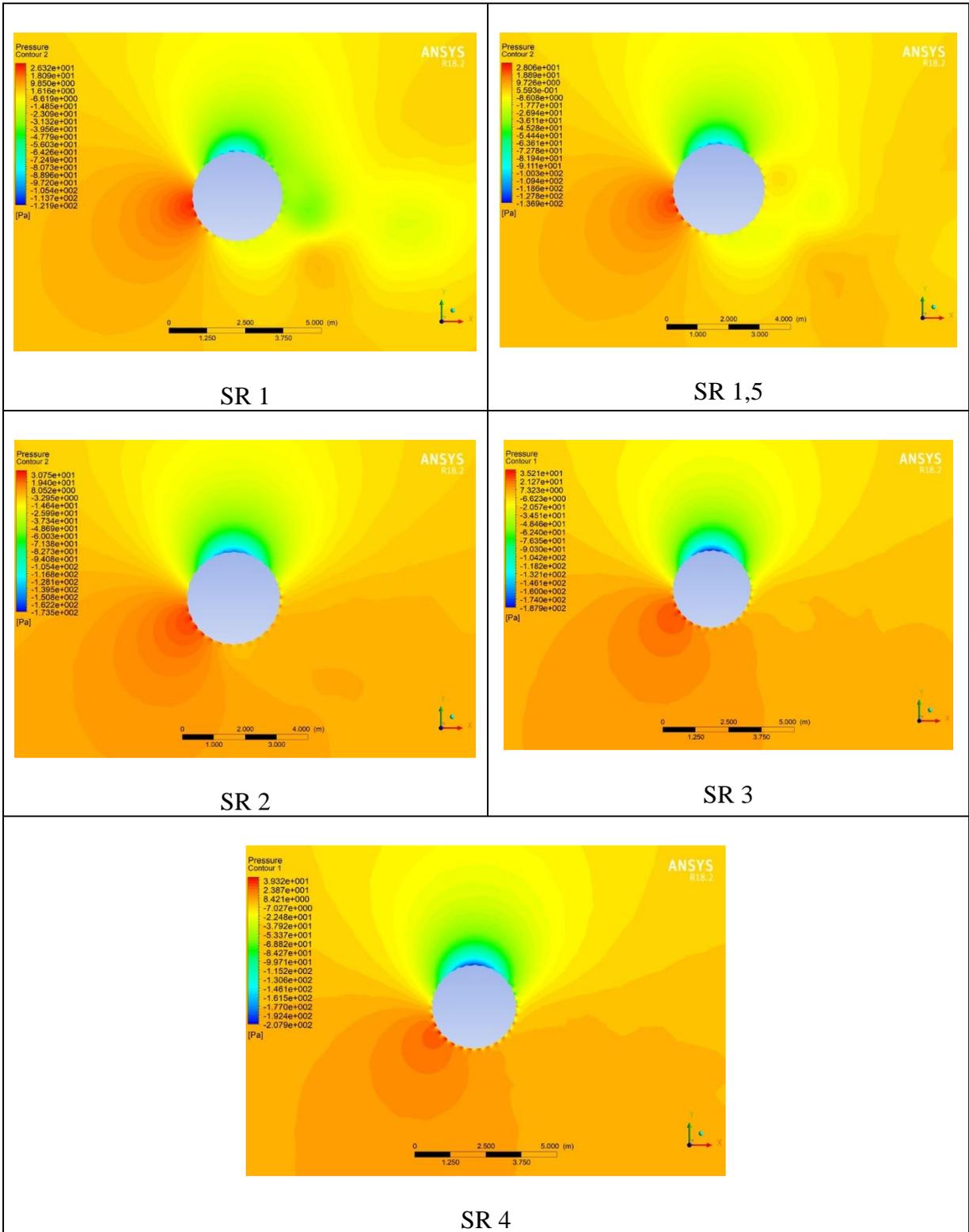


SR 3

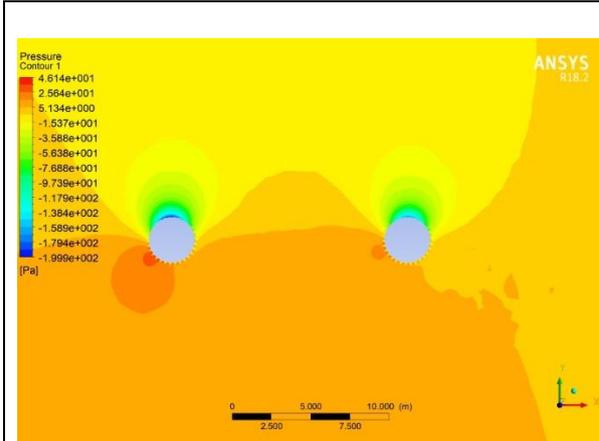


SR 4

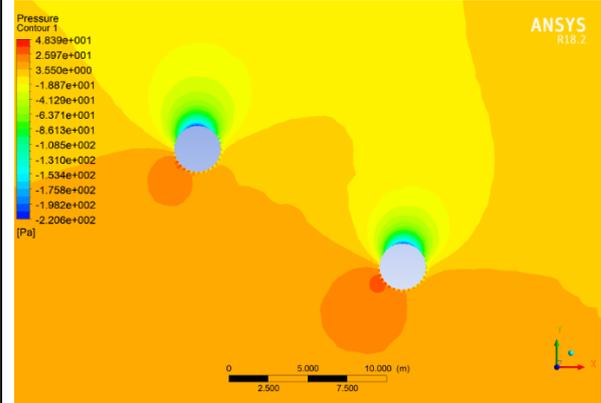
# MODEL C



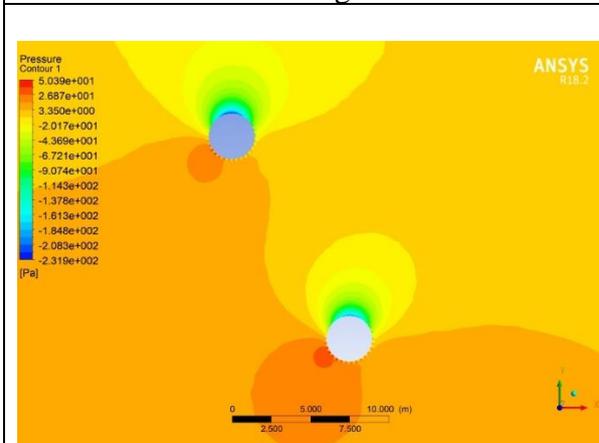
## SIMULASI 2 ROTOR



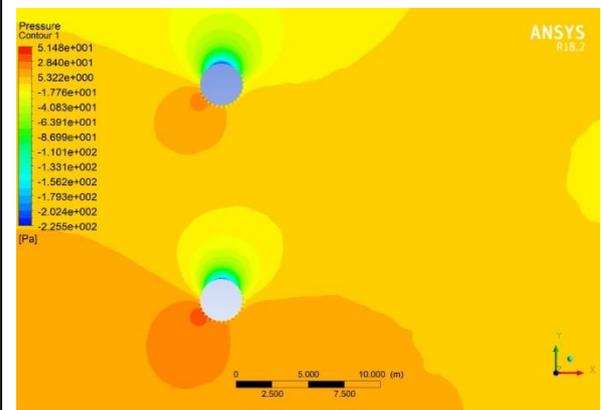
Sudut Angin 0°



Sudut Angin 30°



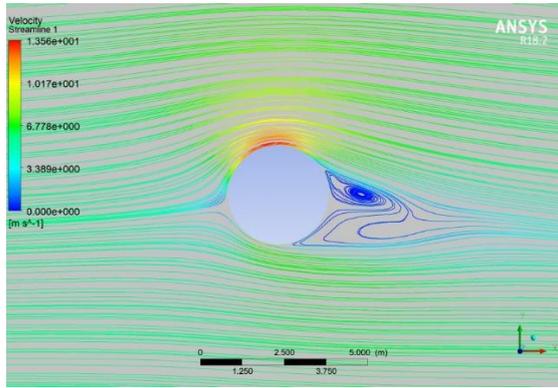
Sudut Angin 60°



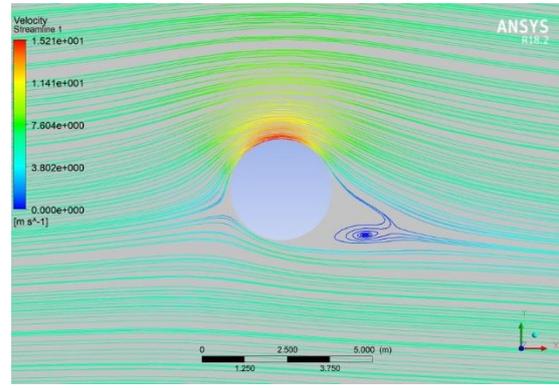
Sudut Angin 90°

**LAMPIRAN C**  
***STREAMLINE***

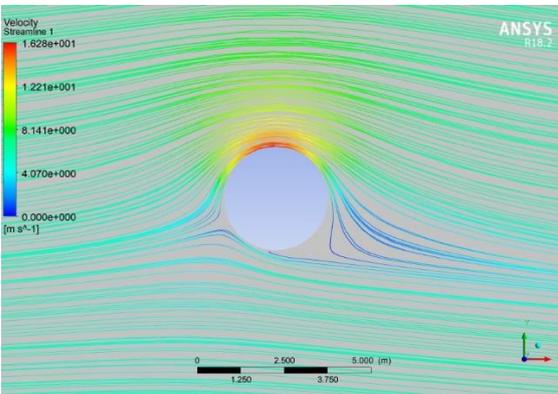
# MODEL A



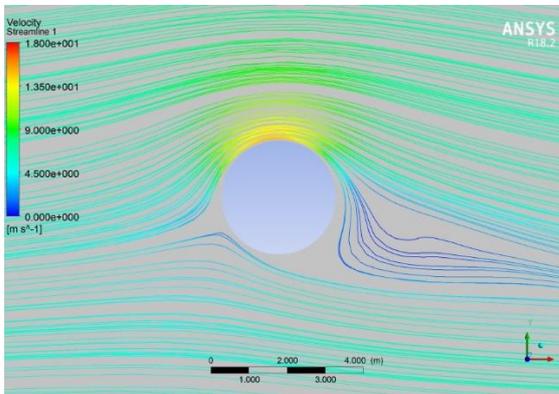
SR 1



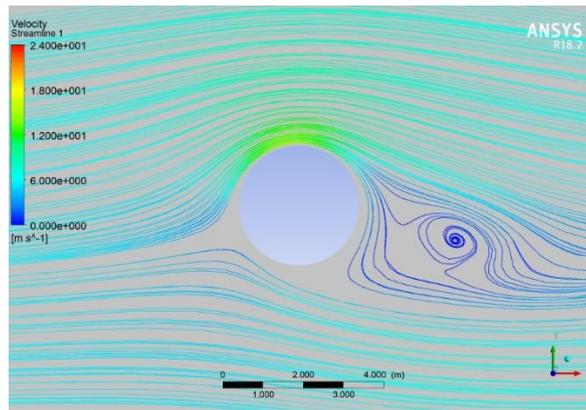
SR 1,5



SR 2

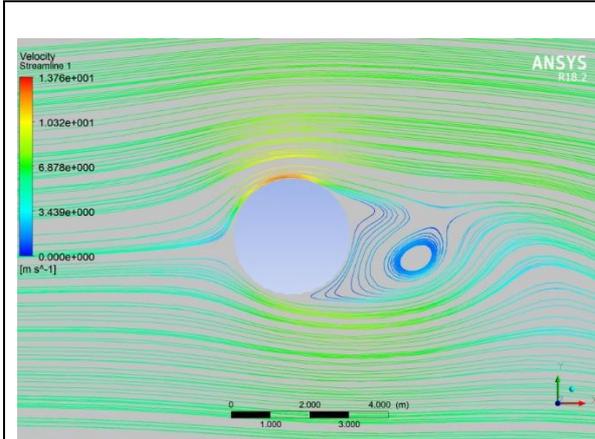


SR 3

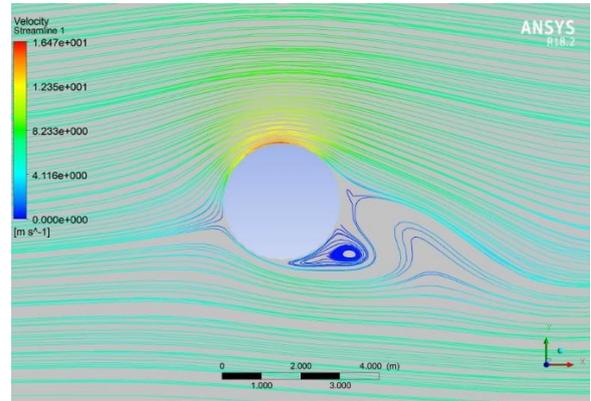


SR 4

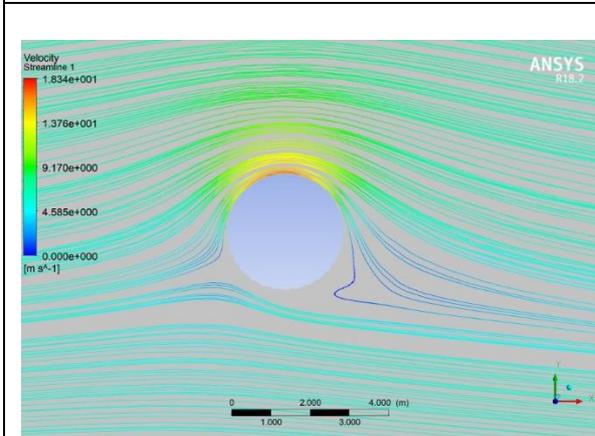
# MODEL B



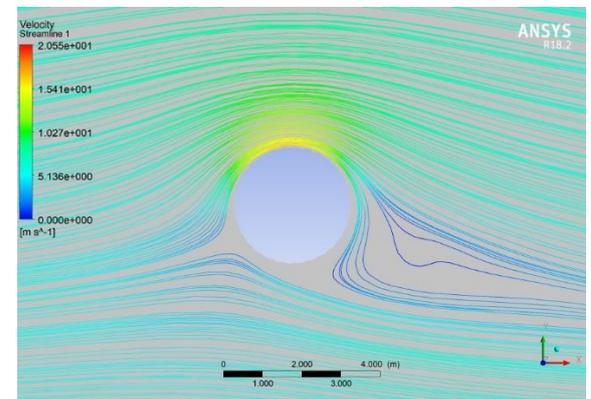
SR 1



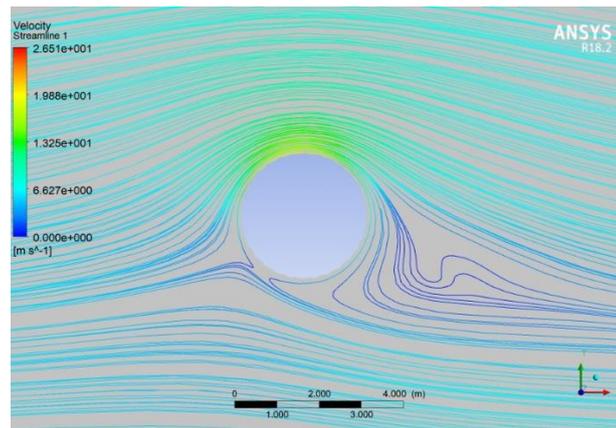
SR 1,5



SR 2

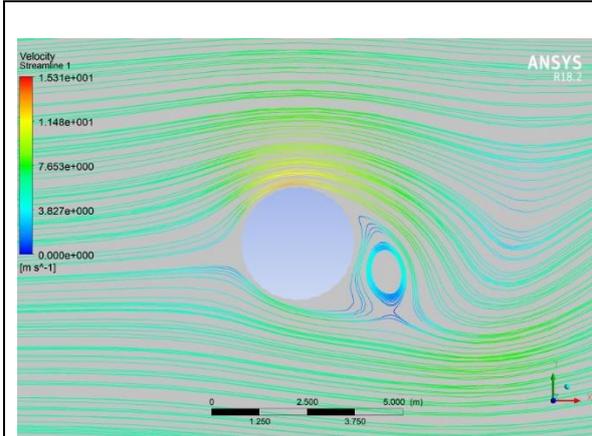


SR 3

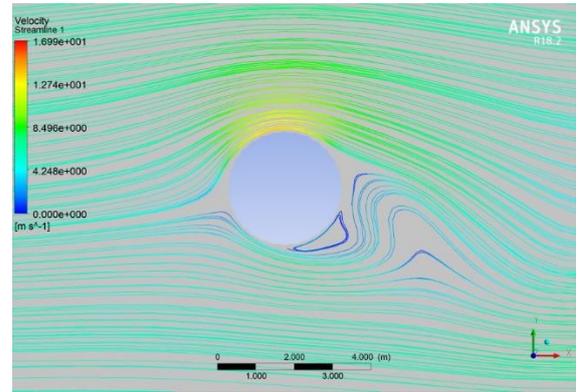


SR 4

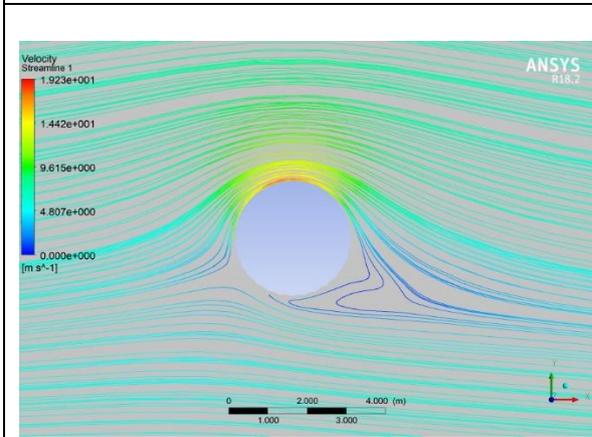
# MODEL C



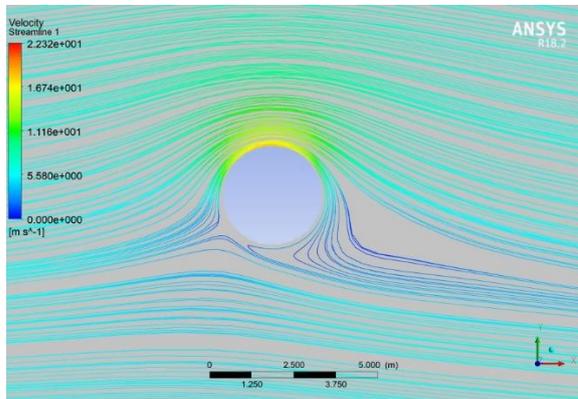
SR 1



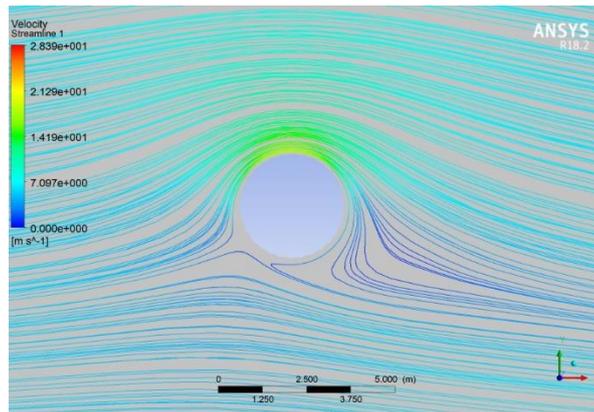
SR 1,5



SR 2

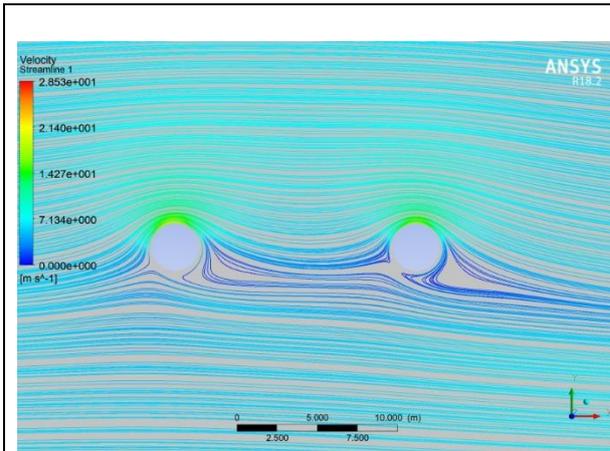


SR 3

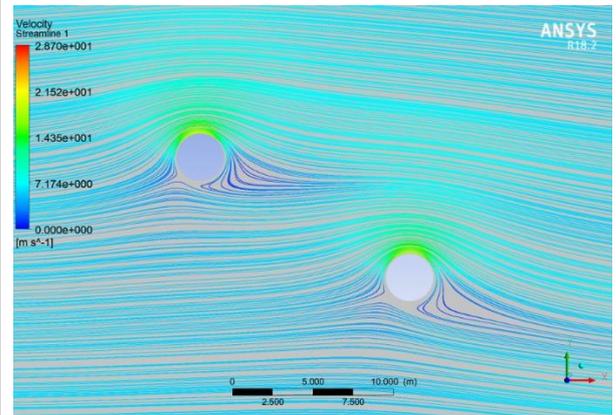


SR 4

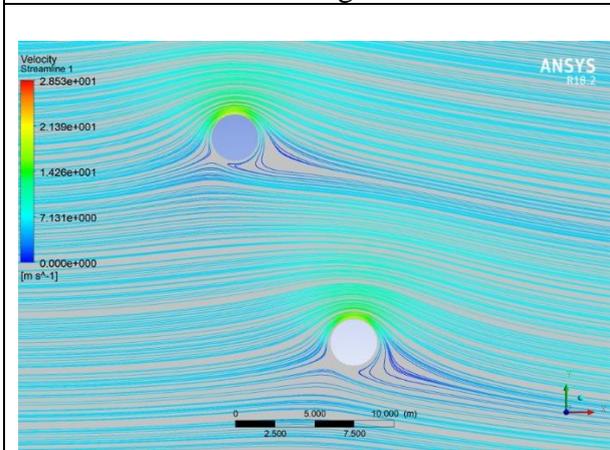
## SIMULASI 2 ROTOR



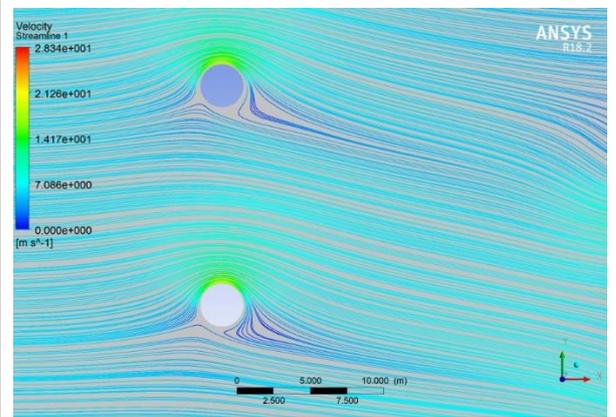
Sudut Angin  $0^\circ$



Sudut Angin  $30^\circ$



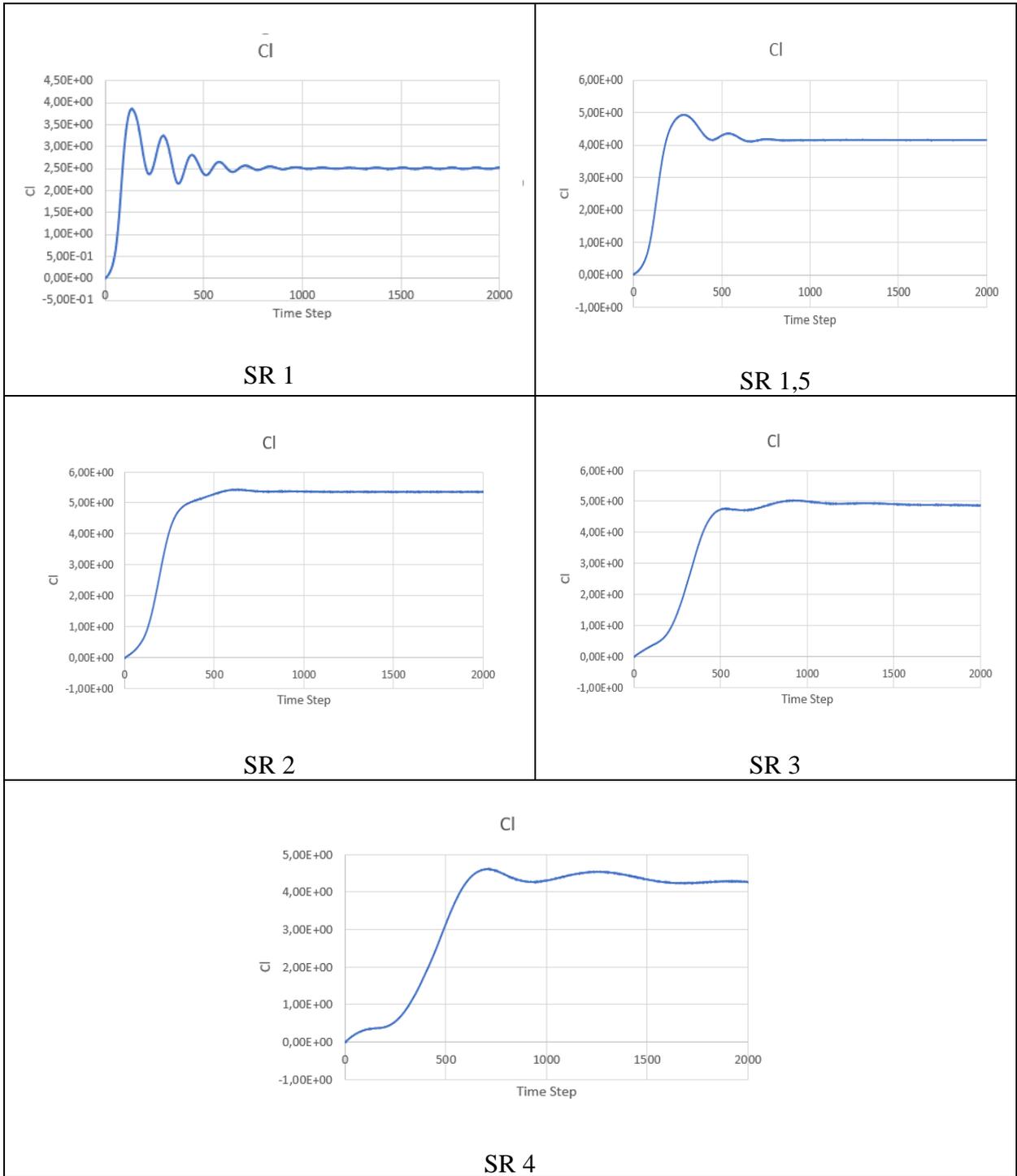
Sudut Angin  $60^\circ$



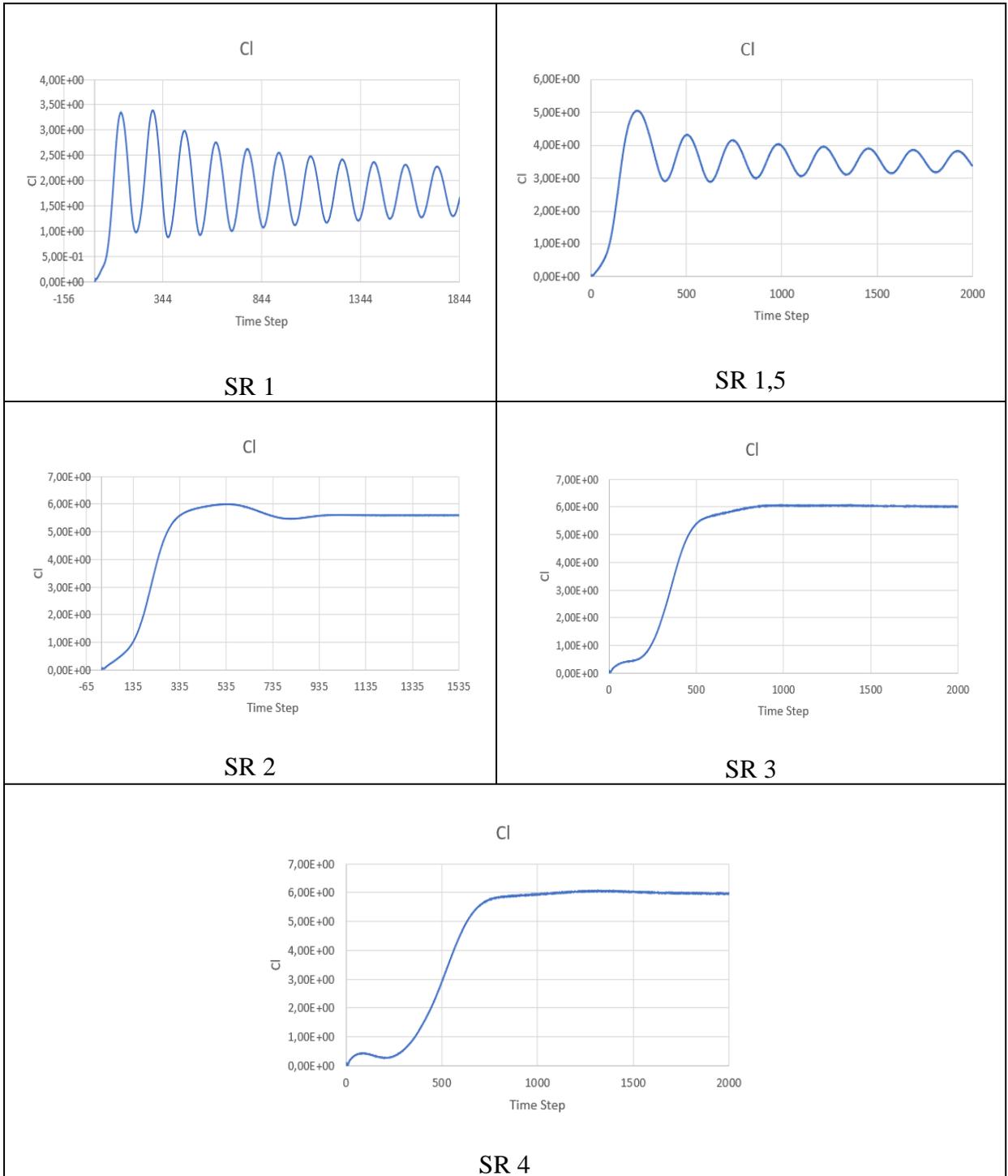
Sudut Angin  $90^\circ$

**LAMPIRAN D**  
**GRAFIK KOEFISIEN *LIFT***

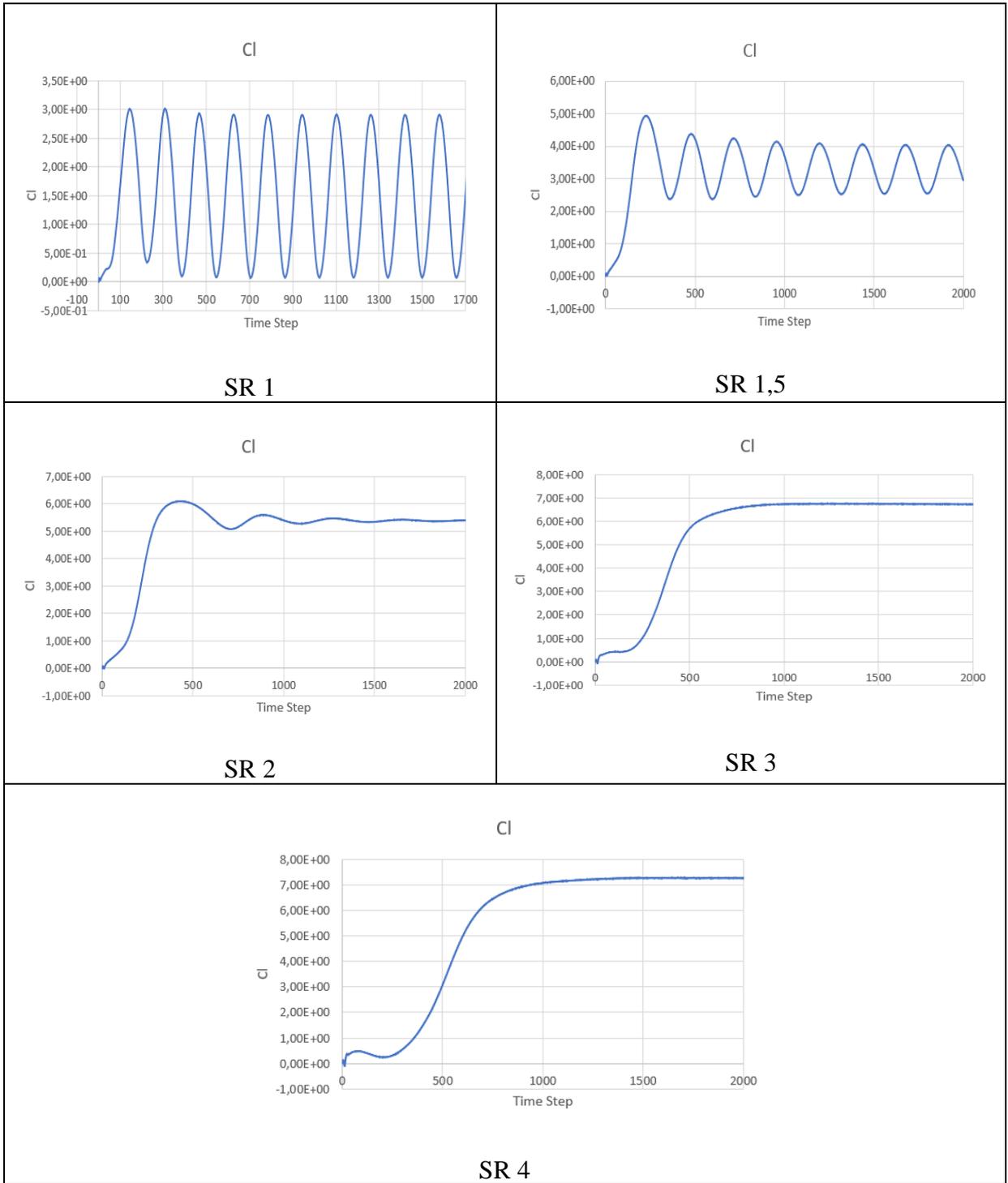
# MODEL A



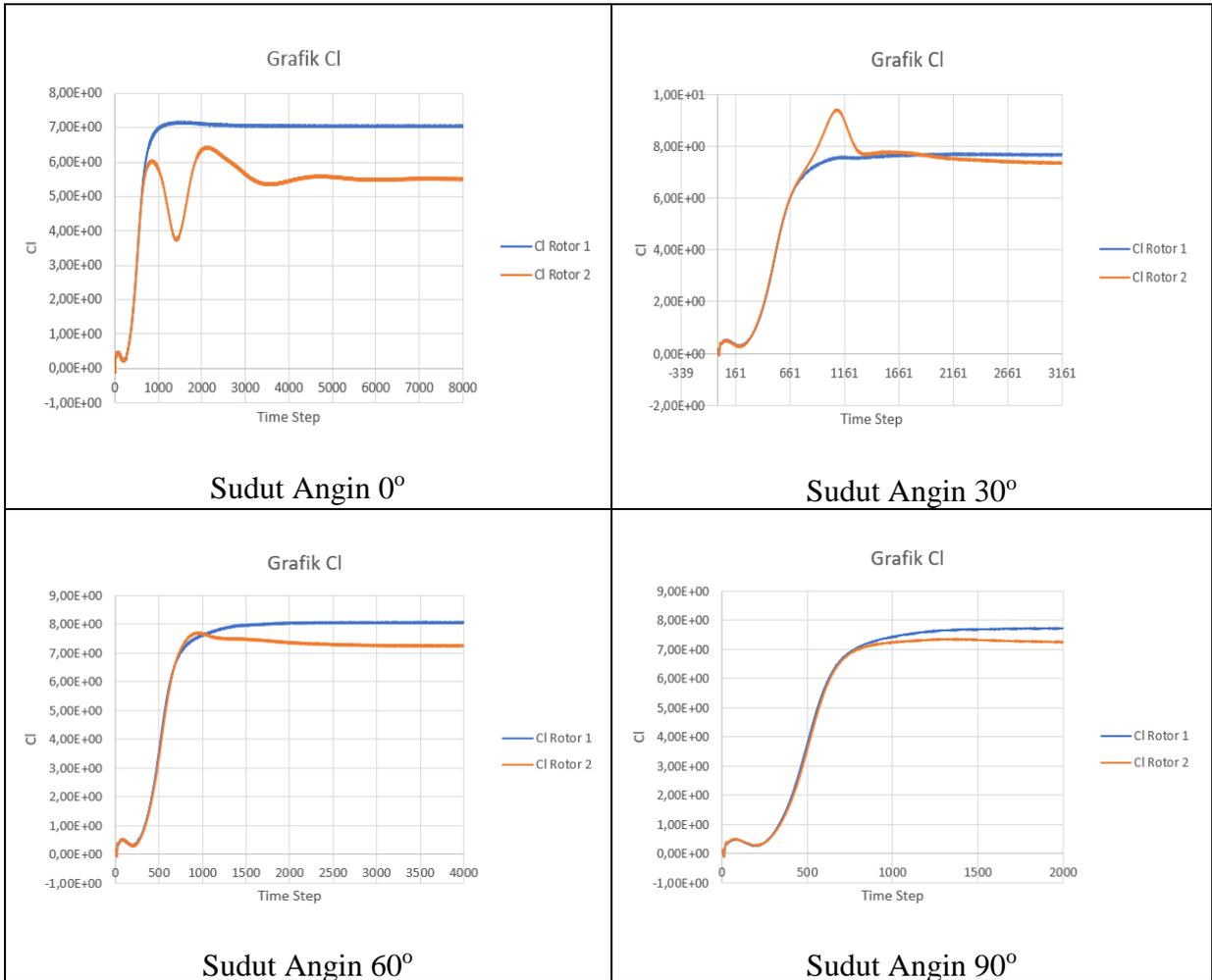
## MODEL B



# MODEL C

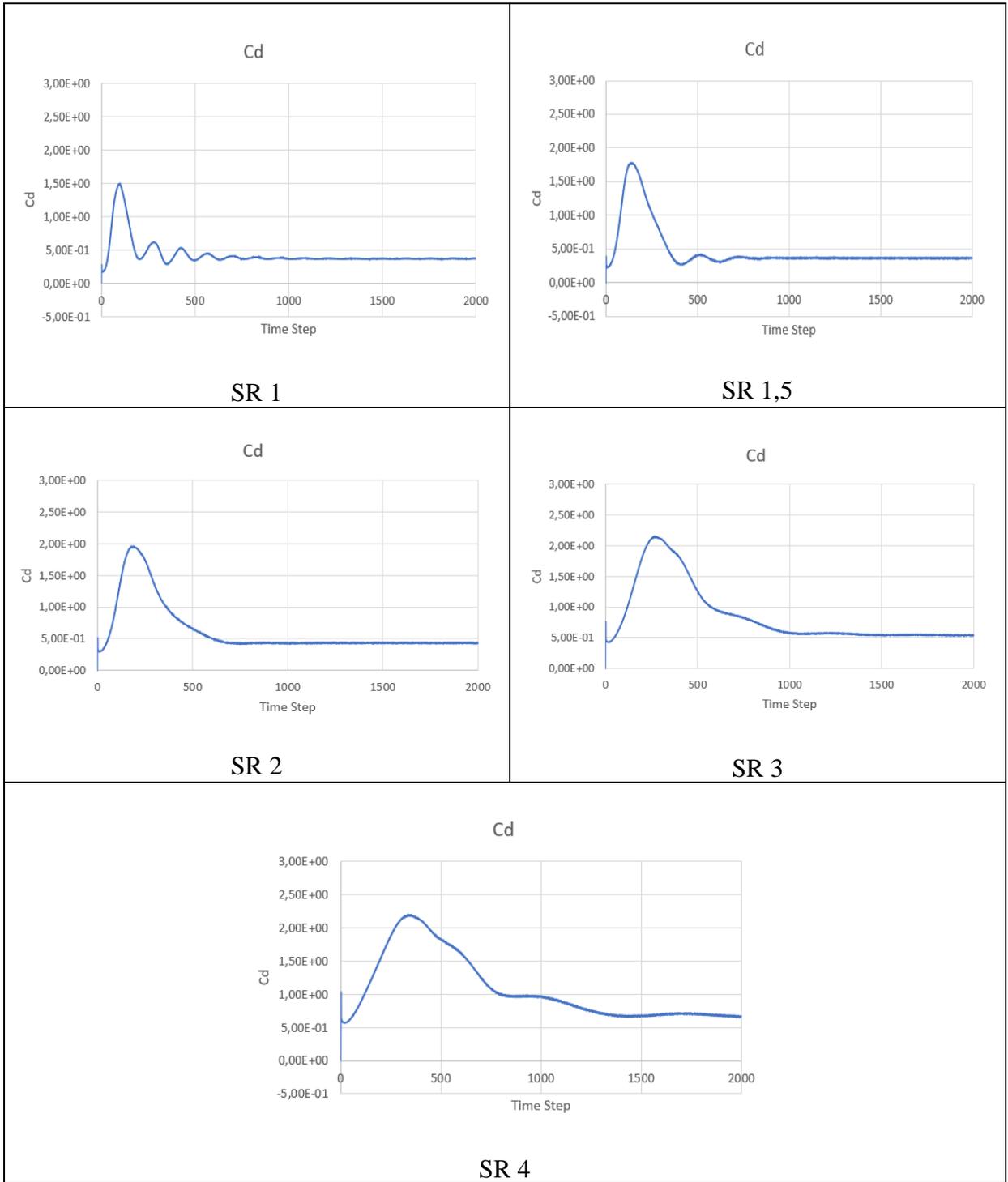


## SIMULASI 2 ROTOR

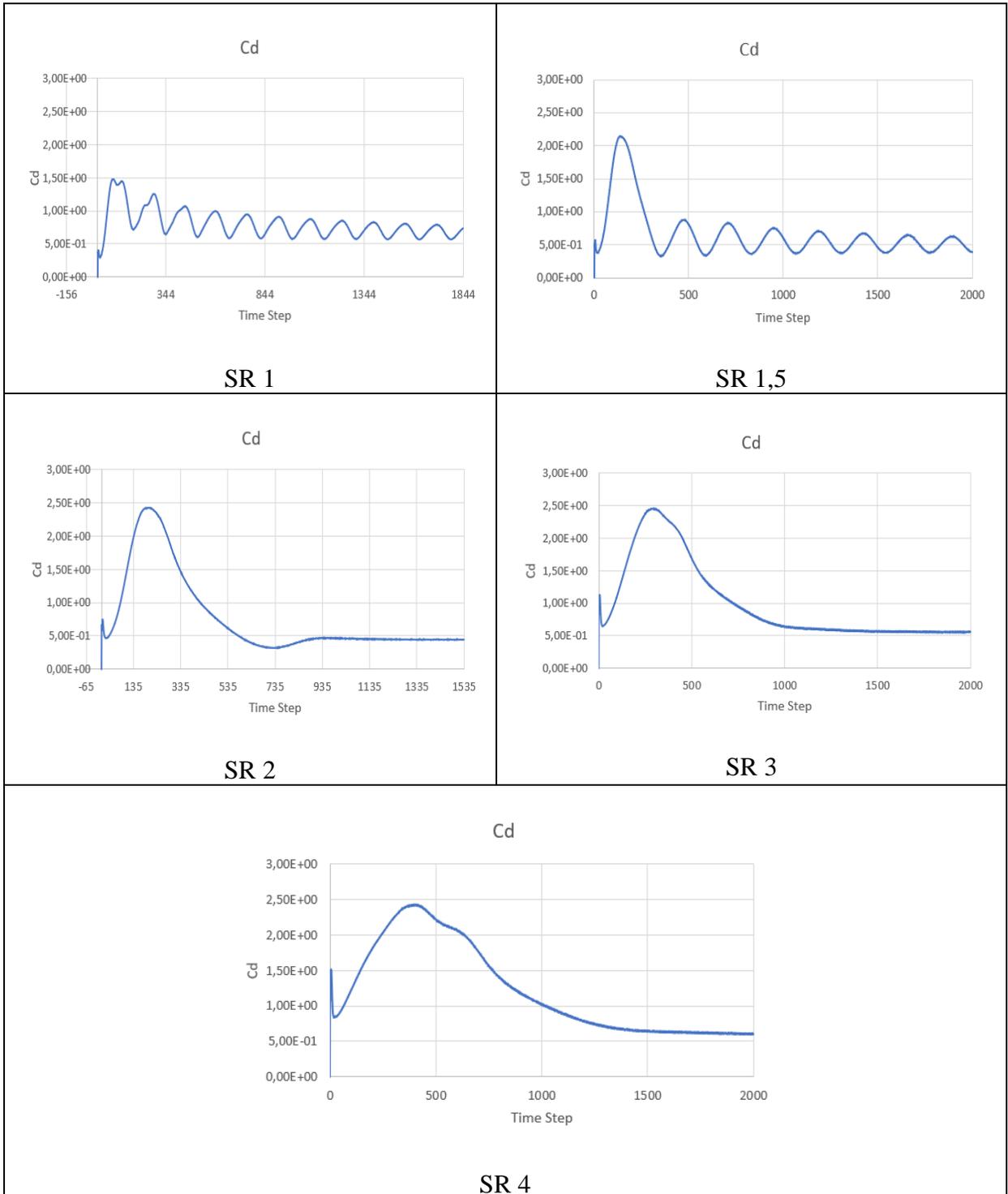


**LAMPIRAN E**  
**GRAFIK KOEFISIEN *DRAG***


# MODEL A




## MODEL B



# MODEL C



## SIMULASI 2 ROTOR



## BIODATA PENULIS



Aditya Bagaskara, itulah nama lengkap penulis. Penulis dilahirkan di Klaten, Jawa Tengah pada 09 Maret 1998. Penulis merupakan anak pertama dalam keluarga. Penulis menempuh pendidikan formal tingkat dasar pada TK Aisyah, kemudian melanjutkan ke SDN 2 Gondangsari, SMPN 1 Sukoharjo dan SMAN 1 Sukoharjo. Setelah lulus SMA, Penulis diterima di Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2015 melalui jalur SNMPTN.

Di Departemen Teknik Perkapalan penulis mengambil Bidang Studi Hidrodinamika Kapal. Selama masa studi di ITS, selain kuliah penulis juga pernah menjadi Sekertaris Bendahara Departemen Media Informasi Kreatif HIMATEKPAL periode 2016/2017, penulis juga pernah menjadi Kepala Divisi Bidang Informasi Biro Media Informasi HIMATEKPAL periode 2017/2018. Selain itu penulis juga pernah aktif dalam organisasi diluar kampus dan menjadi Ketua Forda IKEMAS Surabaya (Ikatan Keluarga Mahasiswa Sukoharjo di Surabaya) periode 2017/2018.

Email : [adityabagaskara24@gmail.com](mailto:adityabagaskara24@gmail.com)

Line : @aditb98