

TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER *WIRE*
TERHADAP PERFORMA *CIRCULAR CYLINDER* DENGAN
 $D = 80 \text{ MM}$ DAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* UNTUK
ENERGY HARVESTING PADA *DUCTING SYSTEM***

ATHALLAH PUTRA HARENSA

NRP 02111840000006

Dosen Pembimbing

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

NIP 198105292003122001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER *WIRE* TERHADAP
PERFORMA *CIRCULAR CYLINDER* DENGAN $D = 80 \text{ MM}$
DAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* UNTUK *ENERGY*
HARVESTING PADA *DUCTING SYSTEM***

ATHALLAH PUTRA HARENSA

NRP 02111840000006

Dosen Pembimbing

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

NIP 198105292003122001

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF WIRE DIAMETER
ON CIRCULAR CYLINDER PERFORMANCE WITH $D = 80$
MM AND REYNOLDS NUMBER VARIATIONS FOR ENERGY
HARVESTING IN DUCTING SYSTEM**

ATHALLAH PUTRA HARENSA

NRP 02111840000006

Advisor

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

NIP 198105292003122001

Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER *WIRE* TERHADAP PERFORMA *CIRCULAR CYLINDER* DENGAN $D = 80$ MM DAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* UNTUK *ENERGY HARVESTING* PADA *DUCTING SYSTEM*

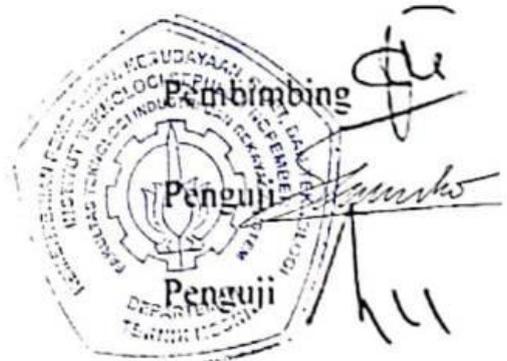
TUGAS AKHIR

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

Oleh: ATHALLAH PUTRA HARENSA
NRP. 0211184000006

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

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



SURABAYA

Juli, 2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF WIRE DIAMETER ON CIRCULAR CYLINDER PERFORMANCE WITH $D = 80$ MM AND REYNOLDS NUMBER VARIATIONS FOR ENERGY HARVESTING IN DUCTING SYSTEM

FINAL PROJECT

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

By: ATHALLAH PUTRA HARENSA
NRP. 0211184000006

Approved by Final Project Examiner Team:

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



SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Athallah Putra Harenda / 0211184000006
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /
198105292003122001

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER *WIRE* TERHADAP PERFORMA *CIRCULAR CYLINDER* DENGAN $D = 80$ MM DAN VARIASI *REYNOLDS NUMBER* UNTUK *ENERGY HARVESTING* PADA *DUCTING SYSTEM*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bila mana dikemudian hari ditemukan ketidak sesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 20 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,



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

NIP. 198105292003122001



(Athallah Putra Harenda)

NRP. 0211184000006

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Athallah Putra Harenda / 0211184000006
Department : Teknik Mesin
Advisor / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /
198105292003122001

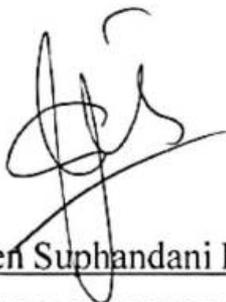
Hereby declare that the Final Project with the title of "*NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF WIRE DIAMETER ON CIRCULAR CYLINDER PERFORMANCE WITH $D = 80$ MM AND REYNOLDS NUMBER VARIATIONS FOR ENERGY HARVESTING IN DUCTING SYSTEM*" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

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

Surabaya, 20 July 2022

Acknowledged

Advisor



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

NIP. 198105292003122001

Student



(Athallah Putra Harenda)

NRP. 0211184000006

STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER WIRE TERHADAP PERFORMA CIRCULAR CYLINDER DENGAN $D = 80$ MM DAN VARIASI REYNOLDS NUMBER UNTUK ENERGY HARVESTING PADA DUCTING SYSTEM

Nama Mahasiswa / NRP : Athallah Putra Harensa / 0211184000006
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

Abstrak

Dalam Fenomena *Flow Induced Vibration* (FIV) silinder sirkular, getaran yang terjadi disebabkan oleh adanya interaksi antara silinder dengan aliran fluida. Saat sebuah silinder dilewati oleh aliran fluida maka silinder akan mengalami gaya aerodinamis yaitu gaya angkat (*lift force*) dan gaya hambat (*drag force*). Getaran yang terjadi pada silinder memunculkan energi kinetik yang kemudian akan dirubah menjadi energi listrik dengan menggunakan alat *transducer piezoelectric*. Sebagai bentuk untuk meningkatkan energi listrik yang diperoleh maka diperlukan getaran dengan amplitudo serta frekuensi yang besar yaitu dengan cara meningkatkan gaya *lift* dan menurunkan gaya *drag*. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire* di daerah *leeward* silinder sirkular.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode simulasi numerik dengan menggunakan *software ANSYS FLUENT 2021 R2*. Objek yang diteliti berupa silinder sirkular dengan diameter 80 mm dan dianalisa secara 2 dimensi dengan *viscous* model *Standrd K-epsilon* untuk bilangan Reynolds 6000 dan *K- ω SST* untuk bilangan Reynolds 20000 dan 40000, serta di simulasi dalam kondisi *Transient*. Adapun variasi yang digunakan pada studi numerik ini berupa variasi diameter *wire* (2 mm, 2.5 mm, 3 mm) dengan variasi Bilangan Reynolds sebesar 6000, 20000, 40000. *Meshing* yang digunakan merupakan *structured Mesh* dengan jumlah *nodes* yang digunakan sebanyak 155900. Kondisi batas yang diterapkan dalam penelitian ini antara lain *velocity inlet*, *wall* pada silinder, *symmetry* dan *pressure outlet*.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan *wire* di daerah *leeward circular cylinder* pada Bilangan Reynolds 2×10^4 dapat memberikan kenaikan performa di seluruh variasi diameter *wire*. *Ratio* kenaikan koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata koefisien *drag* tertinggi terjadi pada variasi diameter *wire* 2.5 mm pada Bilangan Reynolds 2×10^4 sebesar 14.5%.

Kata kunci: *Flow-Induced Vibration, Circular cylinder, Wire*

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF WIRE DIAMETER ON CIRCULAR CYLINDER PERFORMANCE WITH $D = 80$ MM AND REYNOLDS NUMBER VARIATIONS FOR ENERGY HARVESTING IN DUCTING SYSTEM

Student Name / NRP : Athallah Putra Harenda / 02111840000006
Department : Mechanical Engineering FTIRS - ITS
Advisor : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D.

Abstract

In the Circular Cylinder Flow-Induced Vibration (FIV) Phenomenon, the vibrations that occur are caused by the interaction between the cylinder and the fluid flow. When a cylinder is passed by a fluid flow, the cylinder will experience aerodynamic forces, namely, lift force and drag force. The vibrations that occur in the cylinder generate kinetic energy which will then be converted into electrical energy using a piezoelectric transducer. To increase the electrical energy obtained, a vibration with a large amplitude and frequency is needed, namely by increasing the lift force and decreasing the drag force. In this study, modification of the circular cylinder geometry was carried out with the addition of wire in the leeward area of the circular cylinder.

The method used in this research is a numerical simulation method using the ANSYS FLUENT 2021 R2 software. The object under study is a circular cylinder with a diameter of 80 mm and analyzed in 2 dimensions with the viscous model Standard K-epsilon for Reynolds number 6000 and K- ω SST for Reynolds number 20000 and 40000, Transient. The variations used in this numerical study are in the form of variations in wire diameter (2 mm, 2.5 mm, 3 mm) with variations in the Reynolds number of 6000, 20000, and 40000. The meshing used is structured mesh with 155900 nodes used. Conditions The limits applied in this study include velocity inlet, wall on the cylinder, symmetry and pressure outlet.

The results obtained from this study indicate that the addition of wire in the leeward circular cylinder area at 2×10^4 Reynolds number can provide an increase in performance in all variations of wire diameter. The ratio of the increase in the RMS lift coefficient with the average drag coefficient occurs at a 2.5 mm wire diameter variation at 2×10^4 Reynolds Numbers of 14.5%.

Keywords: *Flow-Induced Vibration, Circular cylinder, Wire*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“STUDI NUMERIK PENGARUH DIAMETER WIRE TERHADAP PERFORMA CIRCULAR CYLINDER DENGAN $D = 80$ MM DAN VARIASI REYNOLDS NUMBER UNTUK ENERGY HARVESTING PADA DUCTING SYSTEM”**. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

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

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

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

Surabaya, 20 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
APPROVAL SHEET	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vi
Abstrak	vii
Abstract	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR SIMBOL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.1.1 Penelitian tentang pengaruh penambahan <i>wire</i> di permukaan <i>circular cylinder</i>	4
2.1.2 Penelitian tentang pengaruh penambahan <i>dimple</i> di permukaan <i>circular cylinder</i>	5
2.1.3 Penelitian pengaruh penambahan <i>porous coatings</i> di permukaan <i>circular cylinder</i>	10
2.1.4 Rangkuman penelitian terdahulu	11
2.2 Aliran Eksternal.....	13
2.2.1 Aliran fluida yang melewati silinder.....	13
2.3 <i>Lift</i> dan <i>Drag</i>	16
2.4 Koefisien <i>Drag</i> (C_D).....	17
2.5 Koefisien <i>Lift</i> (C_L).....	17
2.6 Koefisien <i>Pressure</i> (C_P)	17
2.7 <i>Vortex Shedding</i>	18

2.7.1	Gaya akibat <i>vortex shedding</i>	18
2.7.2	Frekuensi <i>vortex shedding</i>	19
2.8	<i>Reynolds Number</i>	19
2.9	<i>Strouhal Number</i>	20
2.10	<i>Energy Harvesting</i>	21
2.11	Persamaan Matematis Perhitungan Daya	21
2.12	<i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	23
BAB III METODOLOGI		24
3.1	Variasi Simulasi	24
3.2	Tahap <i>Pre-Processing</i>	25
3.2.1	Pembuatan model benda uji	25
3.2.2	Domain simulasi	25
3.2.3	<i>Meshing</i>	26
3.2.4	<i>Boundary condition</i>	27
3.3	Tahap <i>Processing</i>	28
3.4	Tahap <i>Post-Processing</i>	29
3.5	<i>Sensitivity Analysis</i>	30
3.5.1	<i>Grid independency test</i>	30
3.5.2	<i>Time step sensitivity analysis</i>	31
3.6	Diagram Alir Penelitian	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		34
4.1	Validasi.....	34
4.2	Hasil Simulasi	35
4.2.1	Analisa koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift</i>	35
4.2.1.1	Koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift rms</i> pada <i>smooth circular cylinder</i> dan <i>wired circular cylinder</i> dengan variasi diameter <i>wire</i> pada bilangan Reynolds 6×10^3 ..	35
4.2.1.2	Koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift</i> pada <i>smooth circular cylinder</i> dan <i>wired circular cylinder</i> dengan variasi diameter <i>wire</i> pada bilangan Reynolds 2×10^4	37
4.2.1.3	Koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift</i> pada <i>smooth circular cylinder</i> dan <i>wired circular cylinder</i> dengan variasi diameter <i>wire</i> pada bilangan Reynolds 4×10^4	39
4.2.1.4	Perbandingan nilai koefisien <i>lift rms</i> dan koefisien <i>drag</i> rata-rata pada <i>smooth circular cylinder</i> dan <i>wired circular cylinder</i> dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4	41
4.2.2	Analisa koefisien <i>pressure</i> (C_p)	43
4.2.3	Analisa kontur kecepatan, kontur tekanan dan streamlines	45
4.2.4	Analisa nilai <i>strouhal</i>	47

4.2.5 Hasil diskusi.....	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN.....	60
BIODATA PENULIS.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 (A) Silinder tanpa Variasi Permukaan (B) Variasi Permukaan Silinder 1 (C) Variasi Permukaan silinder 2 (Biga, 2017)	4
Gambar 2. 2 Diagram Koefisien Drag setiap Variasi Permukaan dengan Kecepatan Aliran Fluida Berbeda (Biga, 2017)	5
Gambar 2. 3 Variasi dan Kode Kasus Dimple pada Permukaan Silinder Sirkular (Bo Zhou et al, 2016).....	6
Gambar 2. 4 Koefisien Drag dan Koefisien Lift pada (A) Smooth Silinder Sirkular (B) Silinder Sirkular Kode DF (C) Silinder Sirkular Kode DDF (Bo Zhou et al, 2016)	6
Gambar 2. 5 Grafik (A) Mean Drag Coefficient (B) RMS Lift Coefficient untuk Seluruh Variasi Permukaan Silinder Sirkular pada Re 20000-80000 (Bo Zhou et al, 2016)	7
Gambar 2. 6 Variasi Pola Dimple pada Permukaan Silinder Sirkular (Fei Yan et al., 2021) .	7
Gambar 2. 7 Schematic Diagram dari Distribusi Dimple pada Silinder Sirkular (Fei Yan et al., 2021).....	8
Gambar 2. 8 Domain Simulasi dan Boundary Condition yang Digunakan Dalam Penelitian (Fei Yan et al., 2021).....	8
Gambar 2. 9 Hasil Simulasi Rata-Rata Koefisien Drag pada Setiap Cases (Fei Yan et al., 2021)	8
Gambar 2. 10 Distribusi Rata- Rata Nilai C_p Pada Reynolds (A) 1×10^5 (B) 2×10^5 (Fei Yan et al., 2021).....	9
Gambar 2. 11 Power Spectral Density dari Koefisien Lift Silinder Sirkular dengan Jumlah Dimple yang Berbeda (Fei Yan et al., 2021).....	9
Gambar 2. 12 Gambar Schematic Dimensi dan Sudut Porous Coatings pada Silinder Sirkular (Guinnes dan Persoons, 2021).....	10
Gambar 2. 13 Perbandingan Hasil Nilai CD dan C_L' setiap Variasi Sudut Coatings (Guinnes dan Persoons, 2021)	11
Gambar 2. 14 Detail Aliran Viscous Disekitar Airfoil (Pritchard, 2014).....	13
Gambar 2. 15 Gambar Kualitatif Aliran Fluida yang Melewati Suatu Silinder (Pritchard, 2010)	13
Gambar 2. 16 Foto Pola Aliran Melewati Silinder Tunggal (Kreith, 2001).....	14
Gambar 2. 17. Velocity Profile Aliran yang Melintasi Silinder Sirkular (Bergman, et al., 2011)	15
Gambar 2. 18 Sketsa Pola Aliran pada Aliran Melintang (cross flow) Melewati Sebuah Silinder Berpenampang Lingkaran pada Berbagai Bilangan Reynolds (Owen, et al., 1953).....	15
Gambar 2. 19 Tekanan dan Tegangan Geser pada Suatu Elemen Kecil di Permukaan Sebuah Benda (Munson et al., 2009)	16
Gambar 2. 20 Skema Terjadi Pelepasan Vortex Shedding $Re > 40$ (Srinivasan, 2021).....	18
Gambar 2. 21 Gaya Drag dan Gaya Lift pada Silinder.....	19
Gambar 2. 22 Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dengan Bilangan Strouhal (Lienhard, 1966; Achenbach dan Heinecke, 1981).....	20
Gambar 2. 23 (a) Model 1 DOF Sistem Massa dengan Pegas dan Peredam (b) Free BodyDiagram yang Bekerja pada Massa	21
Gambar 3. 1 (A) Geometri Smooth Circular Cylinder (B) Geometri Circular Cylinder dengan Variasi Wire Diameter 2 mm	25

Gambar 3. 2 Dimensi Domain Simulasi	26
Gambar 3. 3 (A) <i>Mesh Circular Cylinder</i> (B) Detail <i>Mesh</i> disekitar <i>Smooth Circular Cylinder</i> dengan Jumlah Elemen 155,168 (C) Detail <i>Mesh</i> disekitar <i>Wired Circular Cylinder</i> dengan Jumlah Elemen 164,846	27
Gambar 3. 4 Boundary Condition Simulasi.....	27
Gambar 3. 5 Grafik Jumlah Nodes Mesh Terhadap Nilai Rata-Rata Koefisien Drag.....	30
Gambar 3. 6 Grafik Nilai Rata-Rata Koefisien Pressure (C_p) Terhadap Sudut Azimuth (Teta) Pada Silinder Sirkular.....	31
Gambar 4. 1 Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien Drag Smooth Circular Cylinder dengan Beberapa Penelitian Simulasi Numerik dan Eksperimen.....	34
Gambar 4. 2 Grafik Koefisien Drag (C_D) dan Koefisien Lift (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 6 \times 10^3$: (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> , (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$, (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	36
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien Drag dan Koefisien Lift RMS setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3	37
Gambar 4. 4 Grafik Koefisien <i>Drag</i> (C_D) dan Koefisien <i>Lift</i> (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 2 \times 10^4$: (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> , (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$, (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	38
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien Drag dan Koefisien Lift RMS setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 2×10^4	39
Gambar 4. 6 Grafik Koefisien <i>Drag</i> (C_D) dan Koefisien <i>Lift</i> (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 4 \times 10^4$ (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> , (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$, (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	40
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien Drag dan Koefisien Lift RMS setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 4×10^4	41
Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Nilai Koefisien Lift RMS setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4	41
Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien <i>Drag</i> setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4	42
Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Koefisien <i>Lift RMS</i> dengan Nilai Rata-Rata Koefisien <i>Drag</i> setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4	42
Gambar 4. 11 Grafik Koefisien Pressure Smooth Circular Cylinder, Wired Circular Cylinder dengan Variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada Bilangan Reynolds 2×10^4	44
Gambar 4. 12 Kontur Kecepatan Sesaat pada <i>Peak</i> Koefisien <i>Lift</i> dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$ (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	45
Gambar 4. 13 Fenomena Windward Recirculation pada Wired Circular Cylinder dengan Variasi $d/D = 0.0375$ pada Bilangan Reynolds 2×10^4	46
Gambar 4. 14 Kontur Tekanan pada <i>Peak</i> Koefisien <i>Lift</i> dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$ (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	47
Gambar 4. 15 Grafik Magnitude C_L terhadap Strouhal Number pada variasi Wired circular cylinder d/D 0.03125 dengan Bilangan Reynolds 2×10^4	48
Gambar 4. 16 Kontur Kecepatan Sesaat pada <i>Peak</i> Koefisien <i>Lift</i> dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 (a) <i>Smooth Circular Cylinder</i> (b) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.025$ (c) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.03125$, dan (d) <i>Wired Circular Cylinder</i> $d/D = 0.0375$	50

Gambar 4. 17 Kontur Kecepatan Sesaat pada Peak Koefisien Lift dengan Bilangan Reynolds 4×10^4 (a) Smooth Circular Cylinder (b) Wired Circular Cylinder $d/D = 0.025$ (c) Wired Circular Cylinder $d/D = 0.03125$, dan (d) Wired Circular Cylinder $d/D = 0.0375$ 53

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tabel Rangkuman Penelitian Terdahulu.....	11
Tabel 3. 1 Variasi Penelitian	24
Tabel 3. 2 Penentuan Parameter Simulasi Tahap Processing	28
Tabel 3. 3 Hasil Pengujian Grid Independency	30
Tabel 3. 4 Time Step Sensitivity Analysis.....	31
Tabel 4. 1 Strouhal Number Smooth Circular Cylinder dan Wired Circular Cylinder pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 dan 4×10^4	48

DAFTAR SIMBOL

Simbol

- D : Diameter Silinder sirkular
d : Diameter *wire*
 θ_A : Posisi angular *wire* utama terhadap titik stagnasi
 θ_w : Jarak Sudut setiap *wire* daerah *leeward* sirkular silinder
n : Jumlah *wire*
 C_D : *Drag Coefficient*
 C_L : *Lift Coefficient*
 C_p : *Coefficient pressure*
 $\overline{C_D}$: *Mean Drag Coefficient*
 C_L' : *Root Mean Square Lift Coefficient*
Re : *Reynolds Number*
 V_∞ : *Freestream Velocity*
U : Kecepatan aliran
 S_t : *Strouhal Number*
 f_v : Frekuensi *vortex shedding*
 p_c : Tekanan statis dititik tertentu pada kontur (N/m²)
 p_∞ : Tekanan statis *freestream* (N/m²)
TI : *Turbulent Intensity*
l : *Length Scale*

Simbol Yunani

- μ : Viskositas Absolut
 ρ : Massa jenis

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang menempati posisi keempat dengan jumlah penduduk terbanyak. Berdasarkan data administrasi kependudukan (Admindex) jumlah penduduk Indonesia pada tahun 2021 mencapai angka 272.23 juta jiwa, dan diperkirakan akan meningkat menjadi 305 juta jiwa pada tahun 2035. Hal ini tentunya akan berdampak pada meningkatnya kebutuhan energi listrik di Indonesia. Disisi lain produksi kebutuhan energi listrik di Indonesia sebagian besar masih didominasi bahan bakar fosil seperti batu bara dan gas alam. Berdasarkan data dari kementerian ESDM, pada tahun 2021 pasokan kebutuhan tenaga listrik di Indonesia didominasi dari produksi pembangkit listrik berbahan bakar batu bara sebesar 47 % dan pembangkit listrik berbahan bakar gas sebesar 28 % dari total kapasitas produksi pembangkit listrik sebesar 74 GW. Penggunaan energi fosil yang massive ini tentunya akan habis dalam kurun waktu tertentu, oleh karena itu untuk meminimalisir penggunaan batu bara dan gas alam sebagai bahan yang digunakan dalam produksi listrik, perlu dikembangkan energi baru terbarukan (EBT). Sementara pada tahun 2021 porsi Energi Baru Terbarukan (EBT) dalam memenuhi pasokan bauran energi listrik nasional hanya sebesar 11.152 MW, sehingga Indonesia dituntut untuk segera mempercepat riset dan pengembangan sektor EBT guna mengejar ketercapaian target yang telah ditetapkan yaitu sebesar sebesar 23 % dari produksi listrik nasional pada tahun 2025 (DITJEN EBTKE, 2020).

Sebagai upaya untuk mendukung ketetapan tersebut, banyak para peneliti yang mulai melakukan upaya dalam menemukan sumber-sumber energi baru yang lebih murah, yang tersedia dalam jumlah yang besar. Salah satu energi alternatif yang dapat dikembangkan yaitu dengan memanfaatkan getaran silinder akibat aliran fluida yang melewati silinder. Fenomena ini disebut dengan *Flow Induced Vibration* (FIV). Getaran yang terjadi pada silinder disebabkan oleh adanya interaksi antara silinder dengan aliran fluida. Ketika sebuah silinder dilewati oleh aliran fluida maka silinder akan mengalami gaya aerodinamis yaitu gaya angkat (*lift force*) yang arah proyeksinya tegak lurus dengan arah aliran dan gaya hambat (*drag force*) yang arahnya searah dengan arah datang aliran. Getaran yang terjadi pada silinder memunculkan energi kinetik yang kemudian akan dirubah menjadi energi listrik dengan menggunakan alat *transducer piezoelectric*.

Dalam mengembangkan FIV, salah satu faktor yang cukup penting adalah geometri dari permukaan silinder sirkular, hal ini dikarenakan geometri dapat mempengaruhi karakteristik dari gaya-gaya aerodinamik (gaya *lift* dan gaya *drag*) sebagai bentuk akibat dari perubahan karakteristik aliran yang melewati silinder. Adapun beberapa peneliti yang telah melakukan modifikasi pada geometri silinder yaitu berupa penambahan *dimple* dan *wire*, diantaranya (Zhou, 2016) melakukan penelitian eksperimen dengan tujuan mengetahui hubungan *drag reduction* dengan variasi kekasaran berupa pemberian *dimple* pada permukaan silinder sirkular. Hasil dari eksperimen menunjukkan penempatan dan jumlah *dimple* secara efektif dapat mengurangi koefisien *drag*, terutama penempatan *dimple* berjumlah 16 pada daerah *leeward* silinder sirkular dapat meningkatkan sedikit nilai r.m.s koefisien *lift* pada Bilangan Reynolds 40000-60000. Selanjutnya (Fei Yan *et al.*, 2021) melakukan penelitian eksperimen dan simulasi numerik dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh pola *dimple surface* silinder sirkular terhadap pengurangan *drag* yang terjadi pada silinder sirkular. Hasil dari eksperimen menunjukkan pemberian *dimple* pada permukaan silinder sirkular dapat mengurangi koefisien *drag* yang terjadi pada Bilangan Reynolds 1×10^5 , sedangkan pada Bilangan Reynolds 2×10^5 pemberian *dimple* pada permukaan silinder sirkular dapat meningkatkan koefisien *drag*. Selanjutnya (Guinnes dan Persoons, 2021) melakukan penelitian numerik dengan tujuan

Pengaruh *leeward porous coatings* terhadap gaya *drag* di silinder sirkular. Hasil dari penelitian numerik menunjukkan *coating* dengan sudut $\beta = 40^\circ$ dan 70° dapat menurunkan koefisien *drag*. Sedangkan *coating* dengan sudut $\beta = 160^\circ$ mampu meningkatkan nilai C_L' (*Root Mean Square Lift Coefficient*) dengan diikuti kenaikan nilai koefisien *drag*.

Berdasarkan penelitian yang telah disebutkan, pada pengembangan kasus FIV apabila tujuan utamanya yaitu menurunkan gaya *drag* maka dibutuhkan desain silinder sirkular dengan permukaan kasar pada selimut silinder sirkular. Namun apabila ingin mendapatkan nilai gaya *lift* yang meningkat dan pada saat bersamaan nilai gaya *drag* menurun maka dibutuhkan pemahaman yang lebih mendetail terkait pengaruh kekasaran permukaan akibat penambahan *wire* dari selimut silinder sirkular pada daerah *leeward* terutama karakteristik aliran dalam model 2D. Hal ini dikarenakan pada umumnya ketika gaya *drag* menurun maka gaya *lift* juga menurun. Sehingga diharapkan dari pengujian ini dapat menunjang pengembangan energi *harvesting* pada *ducting system*.

1.2 Rumusan Masalah

Flow induced vibration adalah sebuah fenomena yang terjadi pada objek yang bergetar yang timbul akibat aliran fluida yang melewati objek tersebut. Getaran ini terjadi akibat adanya interaksi gaya aerodinamis (gaya *drag* dan gaya *lift*) terhadap permukaan benda. Di dunia energi baru terbarukan, FIV memiliki potensi menjadi energi terbarukan, hal ini dikarenakan getaran mekanis yang timbul pada sebuah objek memunculkan energi kinetik yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan alat *transducer piezoelectric*. Energi listrik yang dihasilkan FIV dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi. Besarnya amplitudo dipengaruhi oleh gaya *drag* dan gaya *lift* sedangkan frekuensi dipengaruhi oleh kecepatan aliran. Dalam pengembangan FIV sendiri efisiensi dalam menghasilkan listrik tergolong masih rendah. Hal ini dikarenakan masih belum ditemukan kondisi optimum. Salah satu parameter agar kondisi optimum tercapai yaitu ketika getaran yang terjadi pada suatu objek timbul dikarenakan amplitudo yang besar. Amplitudo yang besar disebabkan oleh gaya *lift* maksimal dan gaya *drag* yang minimum. Hal ini tentunya menarik untuk diteliti, dikarenakan kedua besaran gaya tersebut dapat direayasa dengan memodifikasi bentuk dari geometri yang dilewati aliran.

Hipotesa awal dalam penelitian ini adalah geometri silinder dimodifikasi dengan penambahan *wire* (*wire* ditempel di silinder) di daerah *leeward* sirkular silinder akan berdampak pada perubahan pola aliran yang terjadi saat melewati silinder. Hal ini dikarenakan penempatan *wire* di daerah *leeward* sirkular silinder secara langsung dapat membuat bentuk *wake* menjadi semakin tidak simetris dan selisih *vortex shedding* akan terganggu. Perubahan periode dari *vortex shedding* menyebabkan distribusi tekanan pada silinder akan berubah. Perubahan distribusi tekanan yang terjadi pada sirkular silinder akan mempengaruhi komponen gaya arah *cross flow* yaitu gaya *lift*, dimana dapat meningkatkan nilai amplitudo gaya *lift*. Peningkatan nilai amplitudo gaya *lift* akan menyebabkan getaran yang dihasilkan semakin tinggi. Selain itu, perubahan distribusi tekanan yang terjadi pada sirkular silinder akan mempengaruhi nilai dari komponen gaya yang searah dengan arah datangnya aliran yaitu gaya *drag*. Pada dasarnya ketika nilai gaya *lift* meningkat maka gaya *drag* meningkat. Namun pada kenyataannya peningkatan nilai tersebut belum dapat dihitung secara matematis. Hal ini akan menjadi sebuah masalah karena akan mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan.

Berdasarkan penjelasan diatas, maka penelitian ini berfokus untuk meneliti bagaimana pengaruh perubahan diameter *wire* yang dipasang secara membujur pada daerah *leeward circular cylinder* berdiameter 80 mm, khususnya terhadap koefisien *lift* dan koefisien *drag*.

1.3 Batasan Masalah

1. Aliran fluida *unsteady* dan *incompressible flow*.
2. Simulasi dilakukan secara 2D dengan menggunakan *Software Ansys Fluent 2021 R2*.
3. Analisa dilakukan pada *cylinder* berbentuk *circular*.
4. *Circular cylinder* memiliki diameter 80 mm.
5. Silinder sirkular dianalisa dalam keadaan statis.
6. Variasi Bilangan Reynolds number (Re_D) adalah 6000, 20000, 40000.
7. Diameter *wire* divariasikan sebesar 2 mm, 2.5 mm, dan 3 mm.
8. Analisis *External Flow*.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Mengetahui pengaruh perubahan diameter *wire* yang dipasang secara membujur pada daerah *leeward* silinder sirkular dengan diameter 80 mm terhadap koefisien *lift RMS* (C'_L), rata-rata koefisien *drag* (\bar{C}_D), dan *ratio* koefisien *lift RMS* (C'_L) dengan nilai rata-rata koefisien *drag* (\bar{C}_D) silinder sirkular.
2. Mengetahui pengaruh perubahan diameter *wire* yang dipasang secara membujur pada daerah *leeward* silinder sirkular dengan diameter 80 mm terhadap *Strouhal Number*.
3. Mengetahui karakteristik aliran fluida yang telah melalui silinder sirkular permukaan kasar akibat dari penambahan *wire* dengan variasi *Reynolds number* pada daerah *leeward* silinder sirkular.

1.5 Manfaat

1. Mengetahui pengaruh perubahan diameter *wire* yang dipasang secara membujur pada silinder terhadap aliran yang melewati silinder
2. Dapat digunakan sebagai data penunjang pengembangan energi terbarukan yang memanfaatkan fenomena *Flow Induced Vibration*
3. Sebagai referensi penelitian selanjutnya terkait pengaruh perubahan geometri silinder terhadap gaya *drag* dan gaya *lift* yang bekerja.

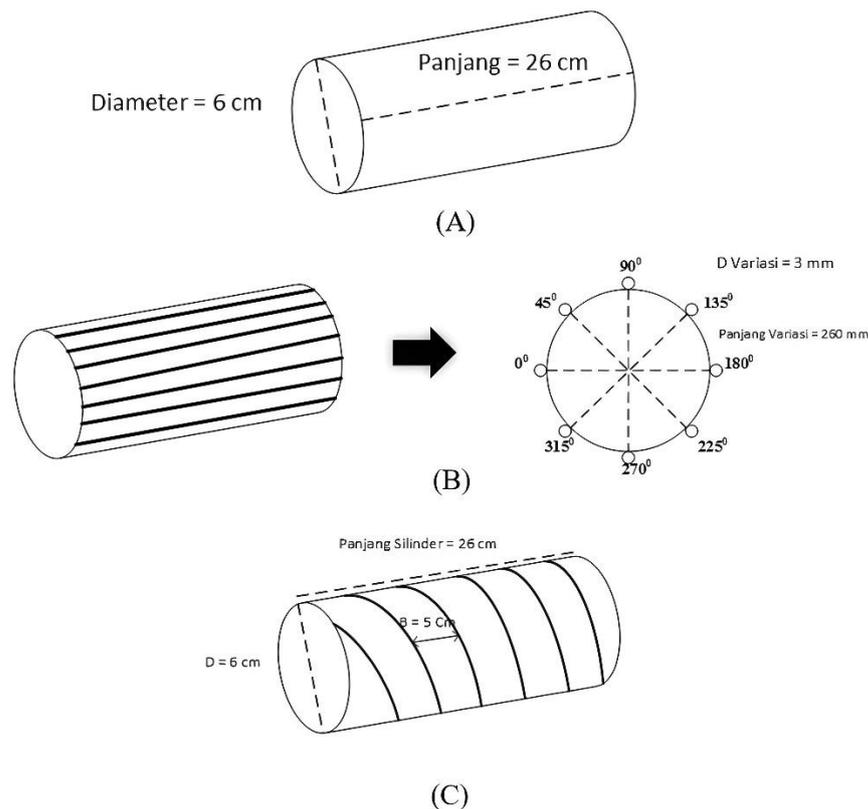
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Penelitian tentang pengaruh penambahan *wire* di permukaan *circular cylinder*

- Biga (2017)

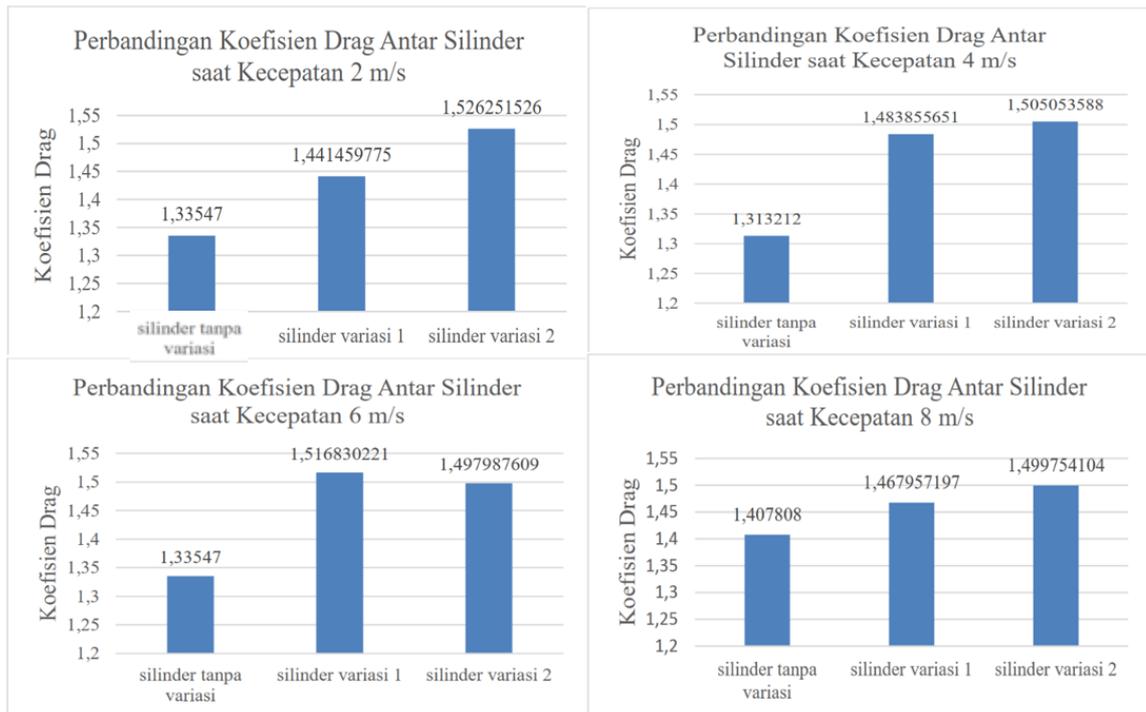
Tahun 2015 Biga melakukan studi eksperimental untuk menganalisa aliran fluida yang melewati silinder sirkular dengan variasi permukaan silinder. Salah satu hal yang dibahas adalah koefisien *drag* (C_D) untuk masing-masing kecepatan setiap variasi permukaan silinder sirkular. Dalam penelitian ini menggunakan 3 jenis objek silinder sirkular yaitu silinder tanpa variasi permukaan, silinder dengan variasi permukaan 1 (Permukaan silinder dipasang *wire* secara membujur) dan silinder dengan variasi permukaan 2 (*Wire* dipasang secara *helical*). Gambar 2.1 menunjukkan dimensi serta variasi permukaan dari objek yang diteliti. Objek diuji dengan memasukkan kedalam *sub sonic wind* tunel dengan kecepatan fluida yang melewati silinder sirkular antara lain 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s dengan Bilangan Reynolds sebesar 7547, 15094, 22641, 30188.



Gambar 2. 1 (A) Silinder tanpa Variasi Permukaan (B) Variasi Permukaan Silinder 1 (C) Variasi Permukaan silinder 2 (Biga, 2017)

Gambar 2.2 terlihat untuk nilai C_D tertinggi pada kecepatan 2 m/s, 4 m/s dan 8 m/s dimiliki oleh silinder sirkular dengan variasi permukaan 2 dengan nilai C_D berturut-turut sebesar 1.526, 1.505, 1.499. Pada kecepatan 6 m/s nilai C_D tertinggi dimiliki oleh silinder sirkular dengan variasi permukaan 1 sebesar 1.517. Dalam Gambar 2.2 dapat disimpulkan perbedaan nilai C_D yang paling besar antara silinder

sirkular tanpa variasi permukaan dengan silinder sirkular variasi permukaan 1 terjadi pada kecepatan 6 m/s dengan nilai perbedaan C_D sebesar 0.18136 atau sebesar 13.58%. Perbedaan nilai C_D yang paling besar antara silinder sirkular tanpa variasi permukaan dengan silinder sirkular variasi permukaan 2 terjadi pada kecepatan 4 m/s dengan nilai perbedaan C_D sebesar 0.19184 atau sebesar 14.6%. Perbedaan nilai C_D yang paling besar antara silinder silinder sirkular variasi permukaan 1 dengan silinder sirkular variasi permukaan 2 terjadi pada kecepatan 2 m/s dengan nilai perbedaan C_D sebesar 0.0847 atau sebesar 5.88%.



Gambar 2. 2 Diagram Koefisien *Drag* setiap Variasi Permukaan dengan Kecepatan Aliran Fluida Berbeda (Biga, 2017)

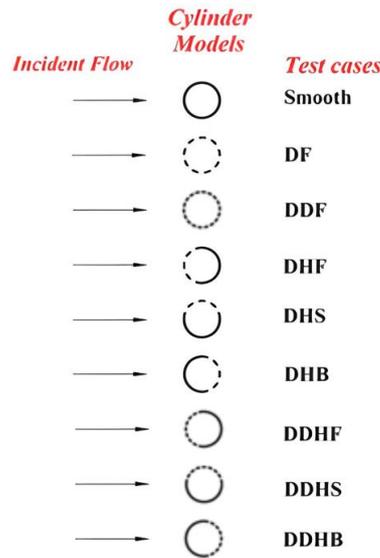
2.1.2 Penelitian tentang pengaruh penambahan *dimple* di permukaan *circular cylinder*

- **Zhou et al (2016)**

Penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Bo Zhou *et al.*, tentang aliran fluida yang melewati permukaan silinder kasar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan *drag reduction* dengan variasi kekasaran berupa pemberian *dimple* pada permukaan silinder sirkular. Dalam penelitian ini terdapat 9 variasi permukaan silinder sirkular yang akan menjadi objek pengujian. Gambar 2.3 menunjukkan variasi *dimple* yang terdapat pada silinder sirkular yang digunakan pada penelitian ini. Silinder sirkular memiliki diameter 100 mm dengan bahan terbuat dari pipa PVC. Diameter *dimple* yang terdapat di permukaan silinder sirkular sebesar 10 mm dan kedalaman *dimple* sebesar 2.5 mm.

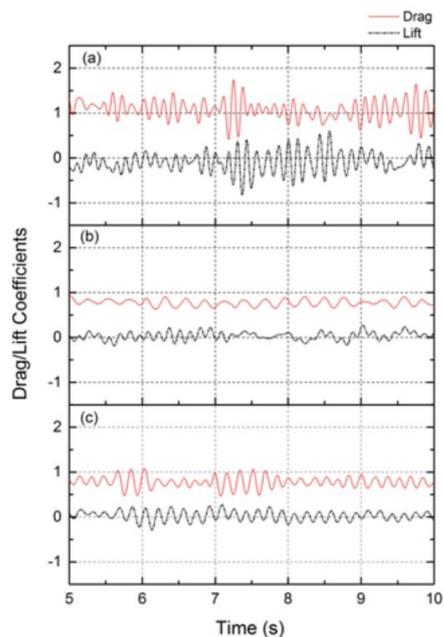
Silinder sirkular diuji dengan memasukkan kedalam *towing tank* berdimensi 4000 mm x 1500 mm dengan kecepatan fluida yang melewati silinder sirkular antara lain 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s dengan Bilangan Reynolds sebesar 20000, 40000, 60000, 80000. Pada Gambar 2.4 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *drag* dan nilai koefisien *lift* pada *smooth* silinder sirkular (*Smooth*),

silinder sirkular dengan dimple kode DF dan silinder sirkular dengan dimple kode DDF dalam Bilangan Reynolds sebesar 8×10^4 .



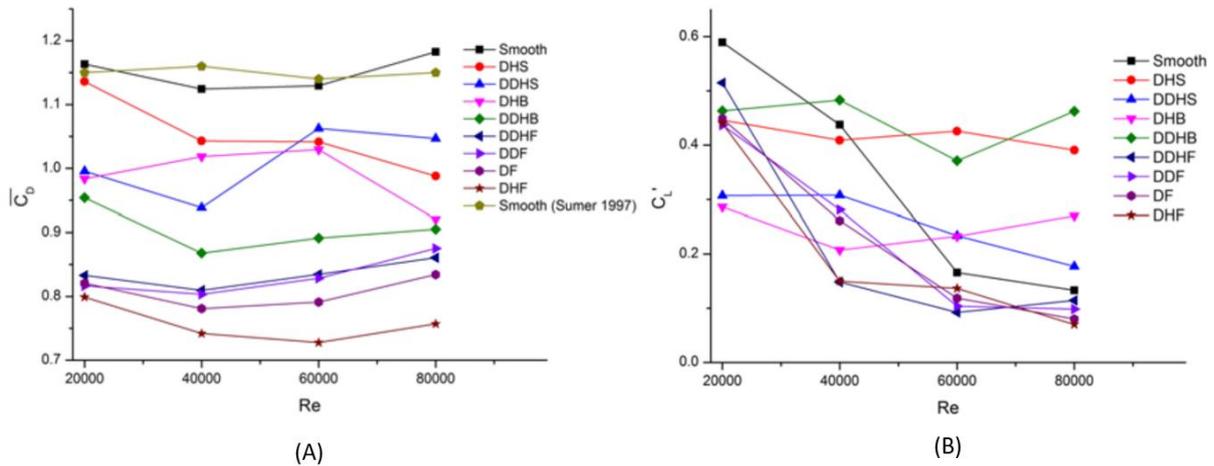
Gambar 2. 3 Variasi dan Kode Kasus *Dimple* pada Permukaan Silinder Sirkular (Bo Zhou *et al*, 2016)

Terlihat pada Gambar 2.4 (A) rata-rata untuk nilai koefisien *drag* pada kasus *smooth* silinder sirkular sebesar 1.1 sedangkan pada kasus silinder sirkular dengan variasi dimple kode DF dan DDF memiliki nilai rata-rata koefisien *drag* yang hampir sama yaitu sebesar 0.8. Kasus *smooth* silinder sirkular memiliki fluktuasi yang lebih besar dari pada kasus variasi dimple kode DF dan DDF yang menandakan *case smooth* silinder sirkular menghasilkan amplitudo dan percepatan getaran yang lebih tinggi.



Gambar 2. 4 Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift* pada (A)*Smooth* Silinder Sirkular (B) Silinder Sirkular Kode DF (C) Silinder Sirkular Kode DDF (Bo Zhou *et al*, 2016)

Gambar 2.5 (A) menunjukkan nilai $\overline{C_D}$ yang berbeda-beda pada setiap variasi permukaan dan Bilangan Reynolds. Nilai $\overline{C_D}$ paling rendah terjadi pada *dimple* silinder sirkular dengan kode DHF pada Bilangan Reynolds 60000. Kenaikan nilai $\overline{C_D}$ yang paling signifikan terjadi pada silinder sirkular dengan kode DDHS pada rentang *Reynolds* 20000-40000. Penurunan nilai $\overline{C_D}$ yang paling signifikan terjadi pada silinder sirkular dengan kode DHB pada rentang *Reynolds* 60000-80000. Pada Gambar 2.5 (B) terlihat terjadi kenaikan nilai C_L' (*Root Mean Square Lift Coefficient*) pada *dimple* silinder sirkular dengan kode DHB pada rentang *Reynolds* 40000-60000 dan *dimple* silinder sirkular dengan kode DDHB pada *Reynolds* 60000-80000.



Gambar 2.5 Grafik (A) *Mean Drag Coefficient* (B) *RMS Lift Coefficient* untuk Seluruh Variasi Permukaan Silinder Sirkular pada *Re* 20000-80000 (Bo Zhou et al, 2016)

- **Fei Yan et al (2021)**

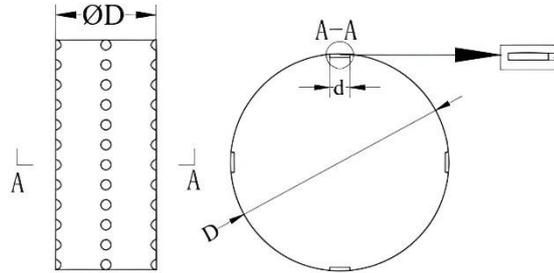
Tahun 2021, Fei Yan et al. melakukan penelitian tentang pengaruh pola *dimple surface* silinder sirkular terhadap pengurangan *drag* yang terjadi pada silinder sirkular jika dibandingkan dengan *smooth* silinder sirkular. Penelitian ini dilakukan secara numerik dan eksperimen. Pembahasan kali ini akan berfokus terhadap simulasi numerik, hal ini dikarenakan pada penelitian dengan menggunakan metode numerik berfokus kepada koefisien *pressure*, *skin friction* dan *vortex shedding* yang terjadi.

Number of Columns	$Re_1 = 1 \times 10^5$	$Re_2 = 2 \times 10^5$
0 column	Case 1-1	Case 2-1
4 columns	Case 1-2	Case 2-2
8 columns	Case 1-3	Case 2-3
12 columns	Case 1-4	Case 2-4

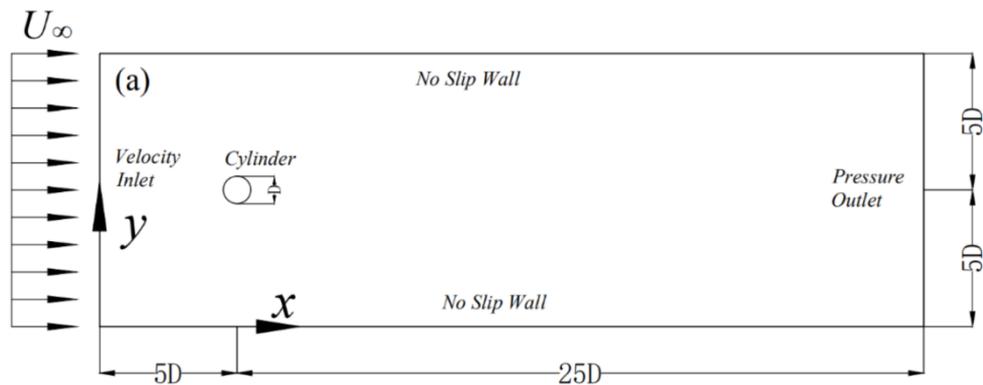
Gambar 2.6 Variasi Pola *Dimple* pada Permukaan Silinder Sirkular (Fei Yan et al., 2021)

Simulasi numerik dilakukan dengan pendekatan 2 dimensi yang berfokus pada 4 variasi pola *dimple surface* silinder sirkular dengan Bilangan Reynolds 1×10^5

dan 2×10^5 . Variasi pola *dimple surface* silinder sirkular dan Bilangan Reynolds dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan peletakan distribusi *dimple* pada permukaan silinder dapat dilihat Gambar 2.7. Domain simulasi berukuran $30D \times 10D$ dengan rincian dimensi dan *boundary condition* yang dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2.7 Schematic Diagram dari Distribusi *Dimple* pada Silinder Sirkular



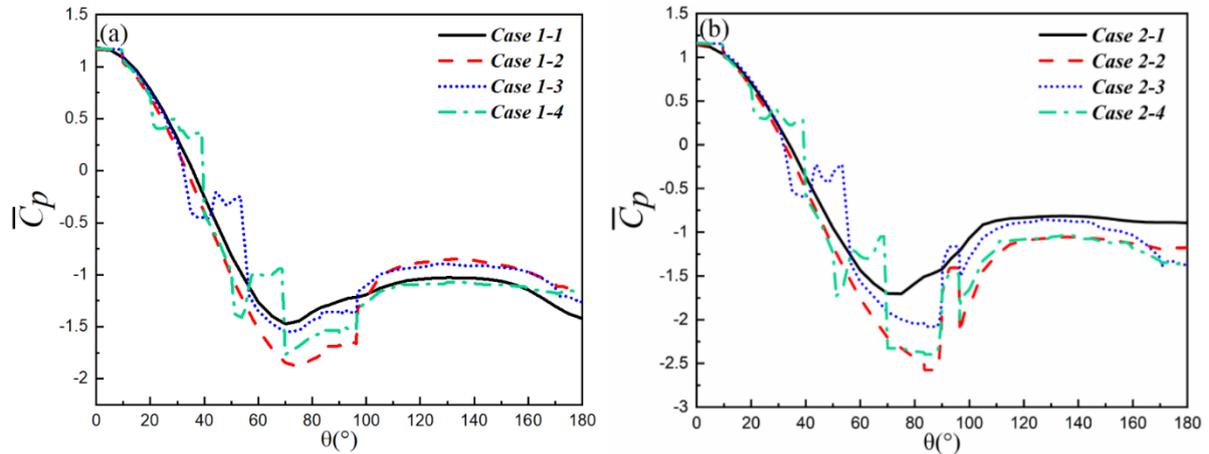
Gambar 2.8 Domain Simulasi dan *Boundary Condition* yang Digunakan Dalam Penelitian (Fei Yan et al., 2021)

Mesh yang digunakan untuk *smooth* silinder sirkular memiliki *nodes* berjumlah 107000 dan *nodes* untuk *dimple* silinder sirkular berjumlah 110000 dengan ukuran *first layer* 0.001 dan Y^+ dibuat mendekati 1. Metode numerik ini menggunakan Fluida air pada temperatur 20°C sedangkan model turbulensi yang digunakan adalah *Transition SST* dengan *solution method SIMPLEC* dan *spatial discretization second order upwind*.

Serial Number	Remark	\bar{C}_d	η
1	Case 1-1	1.242	
2	Case 1-2	1.006	+19.00%
3	Case 1-3	1.088	+12.40%
4	Case 1-4	1.091	+12.16%
5	Case 2-1	0.898	
6	Case 2-2	0.931	-3.67%
7	Case 2-3	1.060	-18.04%
8	Case 2-4	1.080	-20.27%

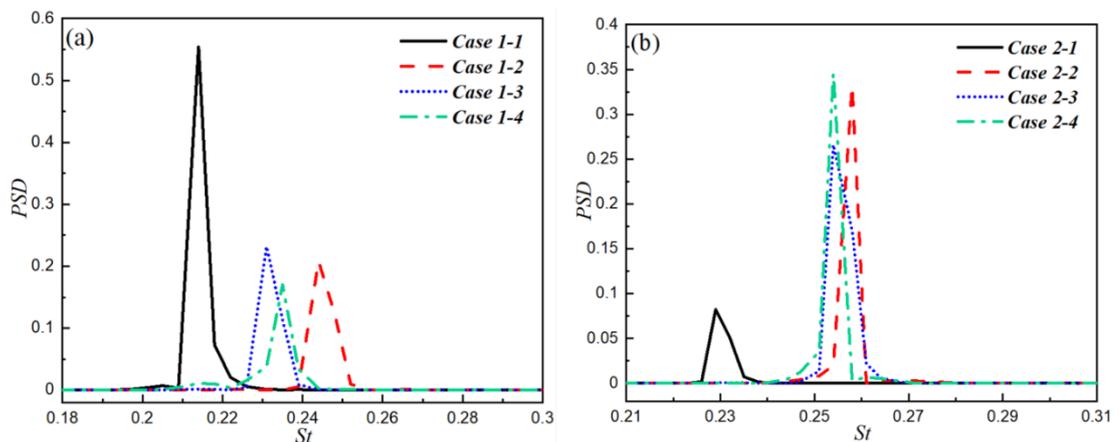
Gambar 2.9 Hasil Simulasi Rata-Rata Koefisien *Drag* pada Setiap *Cases* (Fei Yan et al., 2021)

Berdasarkan hasil studi numerik yang dilakukan oleh Fei Yan et al. didapatkan nilai rata-rata koefisien *drag* yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Gambar 2.9 menunjukkan bahwa pemberian *dimple* pada permukaan silinder sirkular dapat mengurangi koefisien *drag* yang terjadi pada silinder sirkular secara efektif. Hal ini dibuktikan pada *case 1-1* (*Smooth* silinder sirkular pada $Re\ 1 \times 10^5$) dan *case 2-1* (*Smooth* silinder sirkular pada $Re\ 2 \times 10^5$) memiliki nilai $\overline{C_D}$ yang lebih tinggi dari nilai $\overline{C_D}$ pada permukaan silinder yang diberikan *dimple*.



Gambar 2. 10 Distribusi Rata- Rata Nilai C_p Pada Reynolds (A) 1×10^5 (B) 2×10^5 (Fei Yan et al., 2021)

Gambar 2.10 menunjukkan nilai rata rata dari koefisien *pressure* $\overline{C_p}$ terhadap sudut dari peletakan *dimple* yang didapatkan dari penelitian ini. Terlihat nilai $\overline{C_p}$ permukaan silinder sirkular yang diberikan *dimple* pada Bilangan Reynolds 1×10^5 memiliki nilai yang lebih rendah dari nilai $\overline{C_p}$ permukaan *smooth* silinder sirkular, sedangkan pada Bilangan Reynolds 2×10^5 terlihat nilai $\overline{C_p}$ permukaan silinder sirkular yang diberikan *dimple* memiliki nilai yang lebih tinggi dari nilai $\overline{C_p}$ permukaan *smooth* silinder sirkular. Berdasarkan penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa jumlah *dimple* dan kecepatan dari aliran memberikan pada efek pada *drag* yang terjadi.



Gambar 2. 11 Power Spectral Density dari Koefisien Lift Silinder Sirkular dengan Jumlah *Dimple* yang Berbeda (Fei Yan et al., 2021)

Gambar 2.11 menunjukkan hubungan antara *PSD* (*Power Spectral Density*) dengan bilangan Strouhal (dalam persamaan Strouhal mengandung variabel frekuensi *vortex shedding*). *PSD* adalah distribusi dari *signal power* dalam *frequency domain* atau nilai yang mendiskripsikan distribusi daya dari proses domain frekuensi. Dimensi yang digunakan oleh *PSD* adalah daya per Hz. Parameter yang mempengaruhi *PSD* antara lain amplitudo dan frekuensi sinyal, dimana bentuk matematik dari setiap parameter *PSD* dituliskan dalam persamaan 2.1.(Brook dan Wynne, 1991)

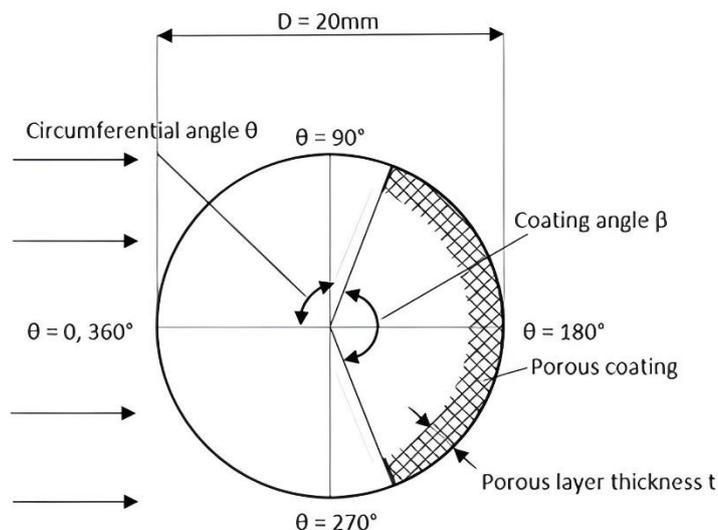
$$PSD = \left(\frac{(Amplitudo)^2}{Frekuensi} \right) \quad (2.1)$$

Terlihat pada Gambar 2.11 (a) pada Bilangan Reynolds 1×10^5 nilai puncak pada *case 1-2*, *case 1-3*, *case 1-4* lebih rendah dari nilai puncak *case 1-1*. Hal ini menandakan bahwa *dimple* pada permukaan silinder sirkular dapat mengurangi kekuatan dari *vortex shedding* sedangkan pada Gambar 2.11 (b), pada Bilangan Reynolds 2×10^5 terlihat nilai puncak pada *case 2-2*, *case 2-3*, *case 2-4* lebih tinggi dari nilai puncak *case 2-1*, hal ini menandakan bahwa pada Bilangan Reynolds 2×10^5 *dimple* pada permukaan silinder sirkular dapat meningkatkan kekuatan dari *vortex shedding*.

2.1.3 Penelitian pengaruh penambahan *porous coatings* di permukaan *circular cylinder*

- **Guinness dan Persoons (2021)**

Tahun 2021, Guinness dan Persoons melakukan penelitian tentang pengaruh *leeward porous coatings* terhadap gaya *drag* di silinder sirkular. Penelitian ini dilakukan secara numerikal 2 dimensi dengan menggunakan *software ANSYS fluent*. Kondisi simulasi dilakukan pada silinder sirkular berdiameter 20 mm dengan variasi sudut yang terdapat *porous coatings* (β) adalah sebesar (0° , 40° , 70° , 100° , 130° , 160° , 360°). Bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 4.2×10^4 . Berikut Gambar 2.12 menunjukkan geometri silinder sirkular serta sudut *porous coatings*.



Gambar 2. 12 Gambar *Schematic* Dimensi dan Sudut *Porous Coatings* pada Silinder Sirkular (Guinness dan Persoons, 2021)

Jenis *Mesh* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *structured Mesh* dengan Y^+ dibuat mendekati 1. Jumlah *cell Mesh* yang digunakan sebesar 155000, dimana *Mesh* didaerah dekat dinding silinder sirkular dibuat lebih rapat untuk bisa menangkap *vortex shedding*. Penelitian numerik ini menggunakan Fluida *water* pada temperatur 20°C. Model turbulensi yang digunakan adalah *K- ω SST* dengan *solution method SIMPLE* dan *spatial discretization second order implicit*. *Turbulent Intensity* sebesar 1% dan *Time step size* yang digunakan sebesar 0.0001 sekon.

β	C_d	$\Delta\%$	C'_l	$\Delta\%$	St	$\Delta\%$	θ_{sep}	$\Delta\%$
0°	1.065	-	0.846	-	0.25	-	90.69°	-
40°	0.945	-11.3	0.523	-38.2	0.25	0.0	87.26°	-3.8
70°	0.900	-15.5	0.389	-54.1	0.25	0.0	86.34°	-4.8
100°	0.912	-14.3	0.396	-53.1	0.26	4.0	86.89°	-4.2
130°	1.008	-5.4	0.589	-30.4	0.26	4.0	89.07°	-1.8
160°	1.528	43.4	1.187	40.3	0.27	8.0	93.60°	3.2
360°	1.511	41.8	0.322	-61.9	0.24	-4.0	139.83°	54.2

Gambar 2. 13 Perbandingan Hasil Nilai C_D dan C_L' setiap Variasi Sudut *Coatings* (Guinnes dan Persoons, 2021)

Gambar 2.13 menunjukkan perbandingan hasil nilai koefisien *drag* (C_D) dan *Root Mean Square Lift Coefficient* (C_L') pada setiap variasi. Terlihat nilai koefisien *drag* pada *smooth* silinder sirkular ($\beta = 0^\circ$) sebesar 1.065 dan C_L' sebesar 0.846, sedangkan pada $\beta = 360^\circ$ (*Full Coatings* silinder sirkular) mendapatkan kenaikan nilai koefisien *drag* 42% dari *smooth* silinder sirkular sebesar 1.511 dan C_L' yang lebih rendah sebesar 0.322. Pada silinder sirkular dengan lapisan *coating* $\beta = 160^\circ$ terlihat terjadi peningkatan nilai C_L' yang cukup besar dengan nilai 1.187 namun nilai C_D juga mengalami kenaikan sebesar 1.528. Gambar 2.13 menunjukkan ketika $\beta > 100^\circ$ terjadi peningkatan *shedding frequency*, selain itu terlihat ketika *separation angle* (θ_{sep}) meningkat maka nilai koefisien *drag* juga meningkat. Berdasarkan hasil yang didapat dalam penelitian ini kita mendapatkan informasi bahwa kekasaran permukaan didaerah *leeward* akibat *coatings* pada $\beta = 160^\circ$ terjadi peningkatan C_L' yang cukup besar walupun diiringin dengan peningkatan C_D .

2.1.4 Rangkuman penelitian terdahulu

Berikut Tabel 2.1 merupakan ringkasan dari penelitian terdahulu yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

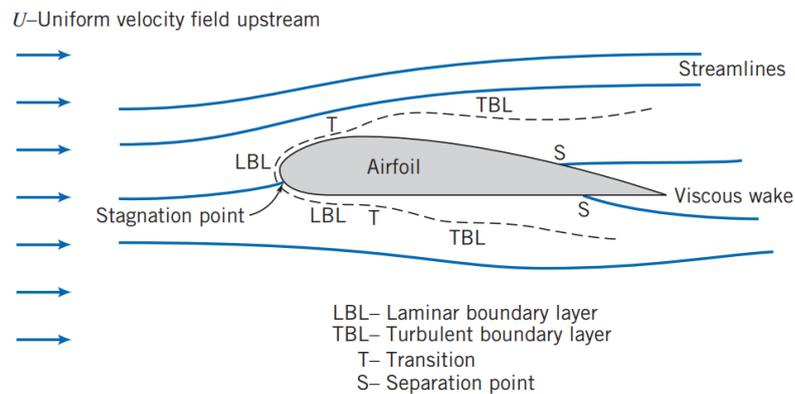
Tabel 2. 1 Tabel Rangkuman Penelitian Terdahulu

Peneliti	Pemaparan	
Biga (2017)	Jenis	Wire
	Tujuan	Menganalisa koefisien <i>drag</i> aliran fluida yang melewati silinder sirkular
	Metode	Eskperimen
	Bilangan Reynolds	7547, 15094, 22641, 30188
	Variasi	Bentuk permukaan silinder sirkular (<i>smooth</i> silinder sirkular, <i>circular cylinder</i> dengan <i>wire</i> membujur dan silinder sirkular dengan <i>wire</i> dipasang secara <i>helical</i>)

	Hasil	Penambahan <i>wire</i> pada permukaan silinder sirkular dapat meningkatkan koefisien <i>drag</i> dan bentuk <i>Helical wire</i> dapat meningkatkan nilai Cd lebih signifikan hampir diseluruh kecepatan yang diterapkan dalam pengujian
Zhou (2016)	Jenis	<i>Dimple</i>
	Tujuan	Mengetahui hubungan <i>drag reduction</i> dengan variasi kekasaran berupa pemberian <i>dimple</i> pada permukaan silinder sirkular
	Metode	Eskperimen
	Bilangan Reynolds	20000, 40000, 60000, 80000
	Variasi	Jumlah dan penempatan lokasi <i>dimple</i> pada permukaan silinder sirkular
	Hasil	Penempatan <i>dimple</i> berjumlah 16 pada daerah <i>leeward</i> silinder sirkular dapat meningkatkan nilai koefisien <i>lift</i> pada Bilangan Reynolds 40000-60000
Fei Yan et al (2021)	Jenis	<i>Dimple</i>
	Tujuan	Mengetahui pengaruh pola <i>dimple surface</i> silinder sirkular terhadap pengurangan <i>drag</i> yang terjadi pada silinder sirkular
	Metode	<i>Simulasi numerik 2D Transient</i>
	Bilangan Reynolds	1×10^5 dan 2×10^5
	Kondisi	<i>Incompressible, Reynolds Average Navier Stokes (RANS)</i> , disimulasi dengan menggunakan <i>viscous model Transition SST</i>
	Input	<i>Boundary Condition: Velocity Inlet, Symmetry, Pressure outlet</i> untuk <i>domain Wall</i> untuk silinder.
	Validasi	Schewe (1983) dan Zdravkovich (1980) pada $Re 1 \times 10^5$
	Hasil	Pemberian <i>dimple</i> pada permukaan silinder sirkular dapat mengurangi koefisien <i>drag</i> yang terjadi pada Bilangan Reynolds 1×10^5 . Pada Bilangan Reynolds 2×10^5 terjadi peningkatan nilai koefisien <i>drag</i> .
Guinnes dan Persoons (2021)	Jenis	<i>Porous Coatings</i>
	Tujuan	Pengaruh <i>leeward porous coatings</i> terhadap gaya <i>drag</i> di silinder sirkular
	Metode	<i>Simulasi numerik 2D Transient</i>
	Bilangan Reynolds	4.2×10^4
	Software	<i>Ansys Fluent</i>
	Kondisi	<i>Incompressible, Unsteady Reynolds Averaage Navier Stokes (URANS)</i> , disimulasi dengan menggunakan <i>viscous model K-ω SST</i>
	Input	TI = 1%, <i>Time Step Size</i> = 0.0001
	Validasi	Klausmann (2017)
	Hasil	Sudut <i>coating</i> paling optimum sebesar 70° dalam menurunkan koefisien <i>drag</i>

2.2 Aliran Eksternal

Aliran eksternal adalah kondisi aliran fluida yang gerakannya melingkupi permukaan dari sebuah benda padat. Aliran *eksternal flow* bisa dikatakan juga sebagai aliran yang ada disekitar benda yang terbenam fluida. Contoh dari aliran eksternal adalah aliran fluida yang melintasi bola, silinder dan aliran fluida yang melewati *streamlined body*. Gambar 2.14 menunjukkan fenomena yang terjadi selama aliran fluida bergerak melingkupi suatu benda padat.

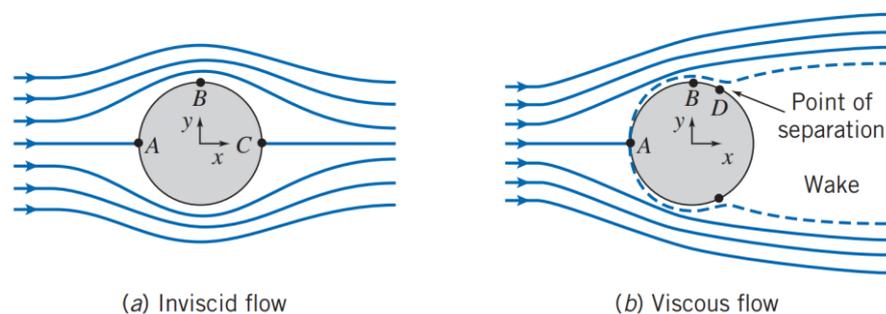


Gambar 2. 14 Detail Aliran *Viscous* Disekitar Airfoil (Pritchard, 2014)

Terlihat pada Gambar 2.14 *freestream flow* mengalami sparasi pada titik stagnasi lalu aliran mengalir pada sisi *upper* dan *lower* di sekitar permukaan benda. Selama aliran bergerak dipermukaan benda, aliran mengalami gesekan dengan permukaan benda sehingga menyebabkan terbentuknya *boundary layer* yang memiliki *thickness* dengan nilai tertentu. Aliran yang mengalir pada sisi *upstream* akan mengalami *transition* dari aliran *laminar* ke aliran *turbulent* pada jarak tertentu dari titik stagnasi. Perubahan dari aliran *laminar* ke aliran *turbulent* bisa disebabkan oleh beberapa faktor antara lain *Pressure Gradient*, kondisi *freestream flow* dan kekasaran dari permukaan benda yang dilalui oleh fluida.

2.2.1 Aliran fluida yang melewati silinder

Aliran fluida yang melewati silinder dengan arah aliran tegak lurus terhadap sumbu silinder dapat dilihat pada Gambar 2.15



Gambar 2. 15 Gambar Kualitatif Aliran Fluida yang Melewati Suatu Silinder (Pritchard, 2010)

Terlihat pada Gambar 2.15 terdapat perbedaan *streamline* didaerah *downstream* antara aliran *viscous* dan aliran *inviscid* saat melewati silinder. Terjadi perbedaan ini dikarenakan pada aliran *inviscid*, koefisien viskositas aliran diasumsikan 0 ($\mu=0$), sedangkan pada aliran *viscous*, aliran memiliki viskositas yang ditandai dengan munculnya efek gesek yang signifikan.

Gambar 2.15 (a) menunjukkan aliran yang mengalir dianggap aliran *inviscid* sehingga terlihat *streamlines simetris* dan tidak terjadi *wake* sehingga tidak terjadi gaya hambat pada silinder. Gambar 2.15 (b) menunjukkan aliran yang mengalir dianggap aliran *viscous*, dimana proses yang terjadi pada aliran dimulai dari titik stagnasi (titik A) yang memiliki tekanan stagnasi yang sangat besar dan kecepatan aliran dititik tersebut sama dengan 0 ($U_{\infty}=0$), selanjutnya terjadi *boundary layer*. Berdasarkan persamaan Navier-Stokes yang berlaku pada *boundary layer* pada kondisi *steady, incompressible*, dan viskositas konstan berlaku:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

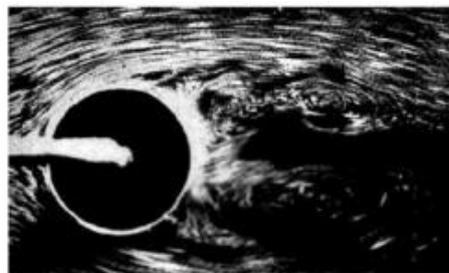
Nilai $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ dapat diabaikan dikarenakan nilai dari *pressure gradient* pada arah x sangat kecil dibandingkan dengan arah y sehingga persamaan *boundary layer* menjadi

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.3)$$

Karena pada wall ($y=0$), komponen kecepatan $u = 0$ dan $v = 0$, maka:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \Big|_{y=0} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.4)$$

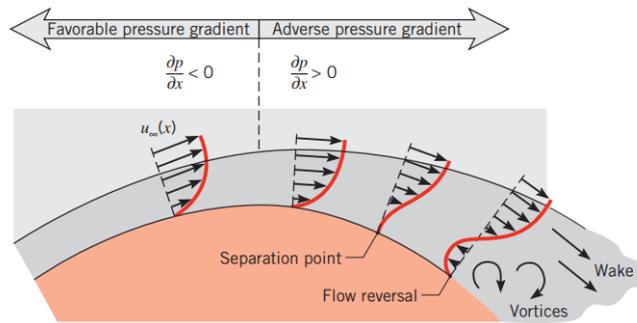
Berdasarkan persamaan diatas, aliran akan mengalami percepatan ($\partial u / \partial y > 0$) setelah melewati titik stagnasi. Hal ini dikarenakan adanya *favorable pressure gradient* ($\partial p / \partial x < 0$) hingga mencapai kecepatan *maximum* pada daerah $\partial p / \partial x = 0$, dimana pada Gambar 2.15 (a) pertambahan kecepatan aliran terjadi di titik A ke titik B, pertambahan kecepatan yang terjadi berdampak pada terjadinya penurunan tekanan. Pada titik B ke titik C terjadi penurunan kecepatan yang berarti terjadi kenaikan tekanan (Tekanan di titik C lebih besar dari tekanan dititik B). Penurunan kecepatan terjadi karena adanya *adverse pressure gradient* ($\partial p / \partial x > 0$) hingga mencapai kondisi kecepatan aliran pada daerah *wall* menjadi terhenti ($\partial u / \partial y = 0|_{y=0}$), dan akhirnya terjadi *backflow* ($\partial u / \partial y < 0$) selanjutnya dapat dilihat Pada Gambar 2.15 (a) di titik C terjadi sparasi aliran. Fenomena ini untuk lebih jelasnya dapat dilihat di Gambar 2.17, selain itu *Adverse pressure gradient* menyebabkan gangguan yang memunculkan pusaran-pusaran turbulen. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.16 yang merupakan foto pada aliran arus yang mengalir tegak lurus pada sebuah silinder.



Gambar 2. 16 Foto Pola Aliran Melewati Silinder Tunggal (Kreith, 2001)

Terlihat pada Gambar 2.16, dari kedua sisi silinder muncul pusaran-pusaran yang meluas ke hilir sehingga terbentuk *wake*. Semakin besar *wake* maka gaya hambat aliran terhadap silinder

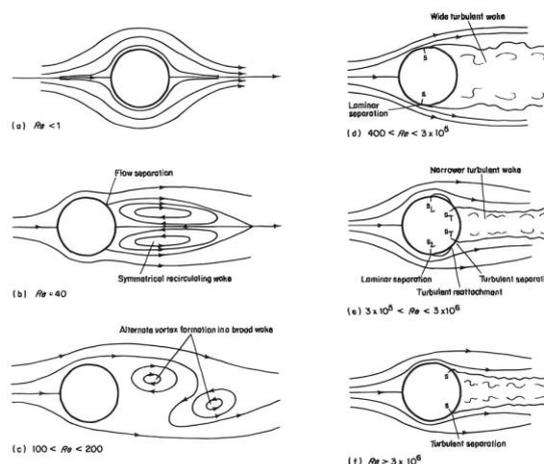
semakin besar hal ini disebabkan karena adanya perbedaan yang cukup besar antara gaya didepan dengan gaya yang terjadi dibelakang silinder.



Gambar 2. 17. Velocity Profile Aliran yang Melintasi Silinder Sirkular (Bergman, *et al.*, 2011)

Aliran fluida yang melewati suatu benda tentunya menghasilkan karakteristik aliran yang berbeda beda. Karakteristik aliran yang berbeda-beda disebabkan oleh beberapa faktor antara lain; orientasi benda yang dilalui, bentuk benda, kondisi permukaan benda, Bilangan Reynolds dan bilangan Mach.

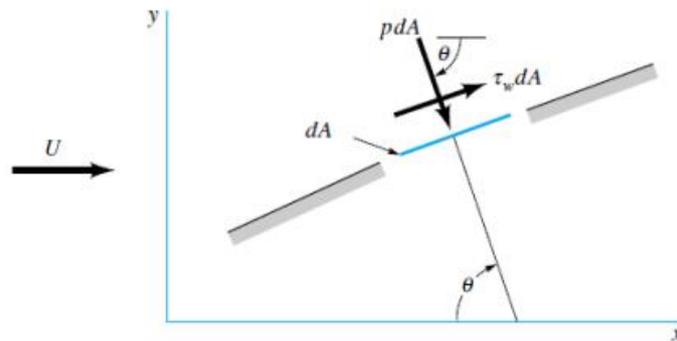
Gambar 2.18 menunjukkan pola aliran pada aliran yang melewati silinder dengan variasi Bilangan Reynolds tertentu. Pada Bilangan Reynolds < 1 , aliran yang melewati silinder belum mengalami pemisahan (*regime of unseparated flow*) yang mana mengindikasikan belum terjadi *vortex* dibelakang silinder. Pada Bilangan Reynolds < 40 , di belakang silinder terbentuk *foopl vortices*. Pada $100 < Re < 200$ mulai terbentuk *laminar vortex streets* akibat pelepasan *vortex* yang disebabkan ketidakstabilan area *wake* atau mulai terbentuknya 2 daerah pembentuk *vortex* pada bagian sisi kanan dan sisi kiri silinder. Pada bilangan $400 < Re < 3 \times 10^5$ terlihat akan muncul pola aliran *turbulen* dan *vortex shedding* menjadi kurang beraturan, dimana pada rentang Bilangan Reynolds ini titik separasi berada sekitar 70° sampai 80° dari titik stagnasi. Pada Bilangan Reynolds $3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ *wake* yang dihasilkan semakin tidak teratur dan lebih sempit yang diakibatkan laminar boundary layer telah mengalami transisi menjadi turbulen dan pada Bilangan Reynolds $Re > 3 \times 10^6$ *vortex shedding* kembali menjadi reguler dengan titik separasi berada pada posisi sedikit di depan setengah silinder.



Gambar 2. 18 Sketsa Pola Aliran pada Aliran Melintang (*cross flow*) Melewati Sebuah Silinder Berpenampang Lingkaran pada Berbagai Bilangan Reynolds (Owen, *et al.*, 1953)

2.3 Lift dan Drag

Ketika fluida mengalir melalui sebuah benda dengan kondisi benda terendam dalam medan aliran fluida, maka akan terjadi interaksi antara fluida dengan benda tersebut. Interaksi antara benda dengan fluida adalah gaya pertemuan antara permukaan keduanya di daerah sekitar dinding benda yang dilingkupi fluida khususnya di daerah *boundary layer*. Gaya-gaya tersebut dihasilkan karena adanya tegangan normal akibat tekanan, P , dan tegangan geser pada dinding, τ_w , akibat pengaruh viskositas dari aliran. Nilai tekanan dan tegangan geser yang terjadi memiliki besar dan arah yang bervariasi disepanjang permukaan. Resultan gaya yang arahnya tegak lurus dengan arah kecepatan *freestream* disebut *lift*, L , sedangkan resultan gaya yang searah dengan kecepatan *freestream* disebut *drag*, D . *Drag* yang terjadi dapat disebabkan oleh tegangan geser maupun tekanan. Dalam kasus benda *bluff body*, *drag* sebagian besar disebabkan oleh perbedaan tekanan di bagian depan dan di bagian belakang benda (*adverse pressure gradient*).



Gambar 2. 19 Tekanan dan Tegangan Geser pada Suatu Elemen Kecil di Permukaan Sebuah Benda (Munson *et al.*, 2009)

Gambar 2.19 menunjukkan resultan gaya dari tegangan geser τ_w dan distribusi tekanan (P) dapat diperoleh dengan menggabungkan efek dari kedua kuantitas pada permukaan dinding. Dimana dA merupakan elemen luasan body yang dikenai gaya *drag*. Berdasarkan Gambar 2.19, apabila diuraikan terhadap sumbu x dan sumbu y maka komponen x dan y adalah sebagai berikut:

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (2.5)$$

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (2.6)$$

kedua persamaan 2.5 dan 2.6 diintegrasikan, menjadi

$$F_D = \int dF_x = \int p\cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (2.7)$$

$$F_L = \int dF_y = -\int p\sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (2.8)$$

Persamaan 2.7 dan persamaan 2.8 secara nyata sulit untuk diterapkan dalam menentukan gaya *drag* dan gaya *lift*, hal ini dikarenakan dalam menyelesaikan persamaan diatas perlu mengetahui tegangan geser (τ_w) dan tekanan normal (P) disepanjang permukaan dinding yang mana hal ini dalam kenyataannya sulit untuk ditentukan. Sebagai alternatif dalam menentukan gaya *drag* dan gaya *lift* yaitu dengan menggunakan koefisien *lift* dan koefisien *drag* (White, 2011).

2.4 Koefisien Drag (C_D)

Koefisien *drag* adalah bilangan tidak berdimensi yang besarnya berbeda beda tergantung dari kecepatan aliran *freestream*, bentuk *body* benda yang dilewati aliran. Koefisien *drag* dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.9)$$

dimana : C_D = Koefisien *drag*

F_D = Gaya *drag* (Newton)

ρ = Massa jenis aliran fluida (Kg/m^3)

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

A = *Frontal* area benda (m^2)

2.5 Koefisien Lift (C_L)

Koefisien *lift* atau koefisien gaya angkat merupakan bilangan tidak berdimensi untuk gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu benda. Koefisien *lift* dirumuskan dalam persamaan berikut:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.10)$$

dimana : C_L = Koefisien *lift*

F_L = Gaya *lift* (Newton)

ρ = Massa jenis aliran fluida (Kg/m^3)

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

A = Luas permukaan yang menghasilkan *lift* (m^2)

2.6 Koefisien Pressure (C_P)

Koefisien *pressure* atau koefisien tekanan merupakan bilangan tidak berdimensi untuk tekanan yang terjadi pada permukaan suatu benda. Berikut merupakan persamaan untuk Koefisien *pressure*:

$$C_P = \frac{p_c - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (2.11)$$

dimana : C_p = Koefisien *pressure*

p_c = Tekanan statis dititik tertentu pada kontur (N/m^2)

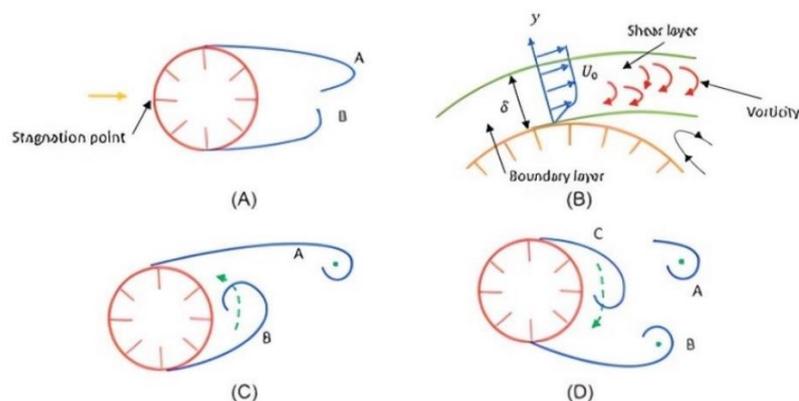
p_∞ = Tekanan statis *freestream* (N/m^2)

ρ = Massa jenis aliran fluida (Kg/m^3)

U = Kecepatan aliran fluida (m/s)

2.7 Vortex Shedding

Vortex adalah suatu fenomena ketika aliran fluida melewati suatu benda dimana partikel fluida berotasi terhadap titik pusatnya pada aliran di daerah belakang benda yang dilewati. Peristiwa terjadinya pelepasan *vortex* disebut dengan *vortex shedding*, yang mempunyai kecepatan transversal dan tangensial bervariasi terhadap radiusnya (Indiyono, 1994). Pada Gambar 2.20 (A) terlihat Penyebab terjadinya pelepasan *vortex* yaitu karena adanya 2 titik yang tidak stabil pada $Re > 40$, akibatnya pasangan *vortices* yang terbentuk menjadi tidak stabil sehingga salah satu *vortex* akan tumbuh lebih besar dari yang lainnya. Terlihat pada Gambar 2.20 (B) dan Gambar 2.20 (C) *Vorticity* dalam *vortex* A berputar searah jarum jam, sedangkan *vorticity* dalam *vortex* B berputar berlawanan arah jarum jam. Selanjutnya, gerakan aliran *vorticity* yang berlawanan arah jarum jam akan memotong aliran *vorticity* yang mensuplay *vortex* A, sehingga *vortex* A terlepas lalu menjadi *vortex* bebas dan terseret aliran ke arah belakang/menjauhi silinder seperti yang ditunjukkan Gambar 2.20 (D) (Beu, 2013).

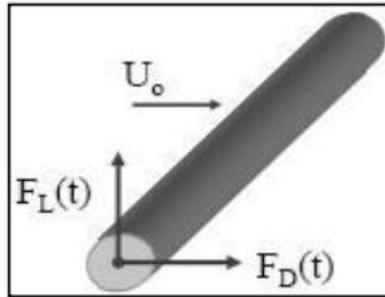


Gambar 2. 20 Skema Terjadi Pelepasan *Vortex Shedding* $Re > 40$ (Srinivasan, 2021)

Setelah *vortex* A terlepas maka akan muncul *vortex* C dan *vortex* C akan melakukan hal yang sama terhadap *vortex* B seperti yang *Vortex* B lakukan terhadap *vortex* A. Proses seperti akan tetap berlanjut setiap terjadi pelepasan *vortex* baru pada tiap sisi silinder. Berdasarkan Gambar 2.18, terlihat bahwa semakin tinggi nilai *Reynolds* maka *vortex* yang terjadi semakin sedikit dan tidak teratur

2.7.1 Gaya akibat *vortex shedding*

Getaran pada silinder terjadi karena dua penyebab yaitu akibat gaya fluida dan akibat dari munculnya *vortex shedding*. Munculnya *vortex shedding* ini berdampak pada silinder yang dilalui fluida dimana silinder terkena distribusi tekanan lokal, akibatnya silinder bergetar atau beresonansi dengan frekuensi tertentu. Sebagai hasil dari perubahan periode dari *vortex shedding*, distribusi tekanan (Tekanan yang disebabkan dari fluida) yang terjadi pada silinder akan berubah secara periodik, selanjutnya komponen gaya pada silinder akan bervariasi secara periodik. Komponen gaya tersebut terbagi menjadi arah *cross flow* dan *in line*. Komponen gaya arah *cross flow* biasa dinamakan gaya *lift*, sedangkan arah *in line* disebut gaya *drag*. (Cengel dan Cimbala, 2010).



Gambar 2. 21 Gaya *Drag* dan Gaya *Lift* pada Silinder

Menurut percobaan yang dilakukan Drescher (1956) dalam Sumer dan Fredsoe (2006), nilai koefisien *lift* (C_L) dan koefisien *drag* (C_D) berubah pada nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) tertentu dan pada nilai *mean lift* ($\overline{C_L}$) sama dengan nol ketika *vortex shedding* terjadi.

2.7.2 Frekuensi *vortex shedding*

Nilai dari Frekuensi *vortex shedding* sangat bergantung pada kecepatan aliran dan diameter silinder. Ketika nilai frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi pribadi struktur, maka yang terjadi adalah gaya angkat *periodic* membesar secara *asymptote* dan akan terjadi resonansi. Menurut percobaan yang dilakukan Drescher (1956) dalam Sumer dan Fredsoe (2006), besarnya frekuensi osilasi gaya *drag* adalah dua kali frekuensi *vortex shedding* dan besarnya frekuensi osilasi gaya *lift* sebesar frekuensi *vortex shedding*. Nilai frekuensi *vortex shedding* bisa didapat dari nilai *Strouhal number* yang merupakan fungsi dari Bilangan Reynolds. Dimana untuk persamaan *Strouhal number* dapat dilihat pada persamaan 2.13.

2.8 Reynolds Number

Bilangan Reynolds adalah bilangan tidak berdimensi yang mengidentifikasi apakah suatu aliran fluida merupakan aliran laminar atau turbulen. Bilangan Reynolds ditemukan oleh Osborne Reynolds pada tahun 1883. Menurut Reynolds ada tiga faktor yang mempengaruhi keadaan aliran yaitu kekentalan fluida μ (mu), massa jenis fluida ρ (rho) dan luas penampang dari suatu benda. Berikut merupakan persamaan Bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{v}{(\mu/\rho l)} = \frac{\rho l v}{\mu} = \frac{v l}{\nu} \quad (2.12)$$

V merupakan kecepatan aliran fluida (m/s), L merupakan panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran (m). Dalam kasus aliran fluida yang melewati silinder secara melintang, nilai L adalah nilai diameter dari silinder, sedangkan untuk variabel ρ merupakan massa jenis aliran fluida (kg/m^3). Variabel μ merupakan viskositas dinamis fluida (Ns/m^2) dan Variabel ν merupakan viskositas kinematik aliran fluida (m^2/s) yang bisa didapat dengan melakukan pembagian dari viskositas dinamis fluida (μ) dengan massa jenis aliran fluida (ρ). Nilai bilangan Reynolds rendah mengindikasikan bahwa aliran tersebut laminar, ketika terjadi peningkatan bilangan Reynolds baik karena penambahan kecepatan aliran fluida atau berkurangnya kekentalan suatu fluida hingga nilai Reynolds mencapai titik kritis, maka aliran akan mengalami perubahan yang awalnya aliran laminar akan menjadi aliran turbulen.

2.9 Strouhal Number

Strouhal Number atau Bilangan Strouhal adalah bilangan tidak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia akibat percepatan lokal aliran dengan gaya inersia akibat percepatan konvektif (percepatan dari suatu titik ke titik lainya dalam suatu aliran fluida). Berikut merupakan persamaan *Strouhal number* untuk mendapatkan nilai frekuensi *vortex shedding*:

$$S_t = \frac{f_v \times D}{U} \quad (2.13)$$

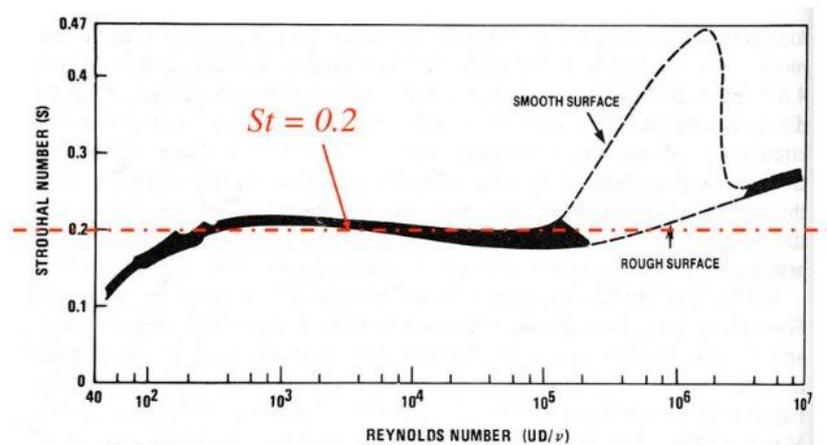
dimana : $S_t = \text{Strouhal number}$

$f_v =$ Frekuensi osilasi yang timbul akibat *vortex shedding* (Hz)

$D =$ Diameter silinder (m)

$U =$ Kecepatan aliran fluida (m/s)

Pada Gambar 2.22 dijelaskan hubungan antara *Strouhal number* dengan *Reynolds number*, dimana terlihat untuk Bilangan Reynolds sekitar $1.5 \times 10^2 - 1 \times 10^5$ baik untuk *smooth surface* maupun untuk *rough surface* terlihat nilai *Strouhal Number* yang *relative* cukup konstan dengan nilai Strouhal sekitar 0.2 (tidak ada perbedaan yang signifikan). Pada Bilangan Reynolds $> 10^5$ terlihat nilai *Strouhal Number* memiliki perbedaan yang cukup besar baik untuk *smooth surface* maupun untuk *rough surface*.



Gambar 2. 22 Grafik Hubungan Bilangan Reynolds dengan Bilangan Strouhal (Lienhard, 1966; Achenbach dan Heinecke, 1981)

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Norberg (2003) didapatkan rumus empiris dalam penentuan *Strouhal number* berdasarkan nilai *Reynolds* dalam kasus silinder sirkular. Dimana rumus empiris *Strouhal number* untuk setiap bilangan Reynolds berbeda-beda. Berikut merupakan rumus empiris *Strouhal Number* yang digunakan dalam penelitian ini untuk Re_D (6000, 20000, 40000) yang dapat dilihat pada persamaan 2.14 sebagai berikut:

$$St = 0.1853 + 0.0261 \times \exp(-0.9 \times x^{2.3}) \quad (2.14)$$

Dengan nilai x dapat dilihat pada persamaan 2.15 sebagai berikut

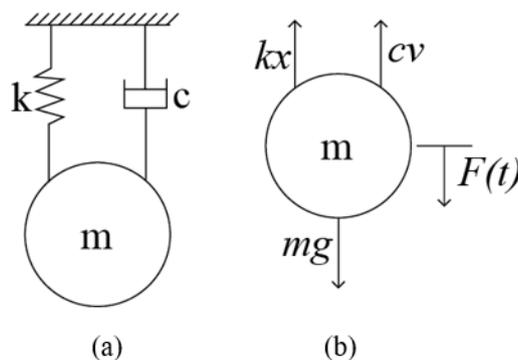
$$x = \text{Log} (Re / 1.6 \times 10^3) \quad (2.15)$$

2.10 Energy Harvesting

Energy Harvesting atau memanen energi adalah proses menyerap energi yang berasal dari sumber energi eksternal. Sumber energi eksternal meliputi getaran, energi kinetik, energi surya, energi panas, energi angin, dan energi potensial. Energi yang didapat kemudian dikonversikan menjadi energi listrik untuk dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Ada beberapa hal yang mendorong semakin dikembangkannya teknologi dari *energy harvesting* antara lain dalam proses *energy harvesting* tidak memiliki efek polusi yang tidak diinginkan terhadap lingkungan, selain itu sumber energi eksternal tersedia dalam jumlah yang melimpah dan dapat digunakan tanpa batas.

2.11 Persamaan Matematis Perhitungan Daya

Dalam menghitung daya yang dihasilkan pada sistem konverter dari *circular cylinder* yang dianalisa dalam keadaan bergetar maka perlu dilakukan pemodelan terhadap *circular cylinder* dalam suatu sistem massa pegas. Gambar 2.23 menunjukkan pemodelan sistem konverter pada *circular cylinder* menggunakan sistem getaran 1-DOF (*Degree of Freedom*).



Gambar 2. 23 (a) Model 1 DOF Sistem Massa dengan Pegas dan Peredam (b) *Free Body Diagram* yang Bekerja pada Massa

Terlihat pada gambar 2.23 massa bergerak secara translasi akibat gaya dari luar sehingga berlaku Hukum Newton kedua. Berdasarkan arah gaya yang bekerja pada massa yang ditunjukkan pada gambar 2.23, maka persamaan resultan gaya dapat dituliskan pada persamaan berikut:

$$\sum F = ma \quad (2.16)$$

$$mg - kx - cv + F(t) = ma \quad (2.17)$$

$$ma + kx + cv = F(t) + mg \quad (2.18)$$

dimana: m = Massa *circular cylinder* (Kg)

g = Percepatan gravitasi (m/s^2)

k = Kekakuan pegas (N/m)

x = Jarak simpangan (m)

c = koefisien peredam (Ns/m)

v = Kecepatan massa (m/s)

a = Percepatan massa (m/s²)

$F(t)$ = Gaya yang diberikan pada *circular cylinder* oleh vortisitas aliran (N)

Variabel $F(t)$ merupakan gaya periodik yang diberikan pada *circular cylinder* oleh vortisitas aliran, untuk mengetahui amplitudo dari $F(t)$ maka diperlukan untuk menghitung gaya *lift* pada *circular cylinder* (F_L). Gaya *lift* pada *circular cylinder* dirumuskan pada persamaan sebagai berikut: (Hall-stinson, 2011)

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_{Fluid} U^3 D L C_L \quad (2.19)$$

dimana: F_L = Gaya *lift circular cylinder* (N)

ρ_{Fluid} = Massa jenis fluida (kg/m³)

U^3 = Kecepatan aliran fluida (m/s)

D = Diameter *circular cylinder* (m)

L = Panjang *circular cylinder* (m)

C_L = koefisien *lift*

Persamaan amplitudo *circular cylinder* terhadap waktu dapat didefinisikan pada persamaan sebagai berikut: (Hall-stinson, 2011)

$$A(t) = \frac{F_L \times \sin(\omega_n t + \pi/2)}{k \sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2}} \quad (2.20)$$

dimana: $A(t)$ = Amplitudo *circular cylinder* (m)

ω_n = frekuensi natural *circular cylinder* (Hz)

f_s = frekuensi *vortex shedding* (Hz)

f_n = frekuensi natural (Hz)

ζ = Konstanta redaman fluida

Kecepatan *circular cylinder* didapatkan dengan menurunkan persamaan 2.20 terhadap waktu dengan persamaan sebagai berikut: (Hall-stinson, 2011)

$$v(t) = \frac{d}{dt} A(t) \quad (2.21)$$

dimana: $v(t)$ = Kecepatan *circular cylinder* (m/s)

Persamaan daya $P(t)$ ditentukan dari hasil perhitungan kecepatan dan gaya *lift* pada *circular cylinder* akibat *vortex shedding* yang ditunjukkan pada persamaan berikut: (Hall-stinson, 2011)

$$P(t) = v(t) \times F_L \times \sin(\omega_n t) \quad (2.22)$$

dimana: $P(t)$ = Daya dari sistem (W)

2.12 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah suatu metode perhitungan dimana permasalahan aliran fluida dapat dianalisa dan diselesaikan menggunakan metode komputasi dan algoritma numerik dengan bantuan komputer. Proses CFD secara umum terdiri dari 3 bagian utama yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post-processing*. Pada tahap *pre-processing* hal yang dilakukan adalah pendefinisian *Boundary Condition* atau kondisi batas geometri dari permasalahan yang sedang dianalisa. Selain itu pada tahap ini dilakukan *Meshing* pada geometri, dimana *Meshing* merupakan sebuah proses membagi suatu ruang yang berisi fluida menjadi beberapa bagian. Bagian-bagian yang terbagi dan pendefinisian *Boundary Condition* merupakan sebuah kontrol perhitungan yang akan diolah dalam software perhitungan. Memasuki tahap yang kedua yaitu tahap *processing* yaitu tahap permasalahan yang akan dianalisa memasuki proses perhitungan berdasarkan data-data input dengan menggunakan persamaan dasar kontinuitas dan persamaan *Navier Stokes* untuk mendapatkan parameter-parameter kecepatan, tekanan. Apabila ingin mendapatkan parameter-parameter seperti suhu, energi tentunya harus mendapatkan persamaan lainnya. Proses perhitungan atau komputasi berlangsung secara iteratif yang mana perhitungan akan terus berlangsung sampai hasil mencapai nilai residual yang kecil atau konvergen. Memasuki tahap yang terakhir yaitu tahap *post-processing*, dimana dalam tahap ini hasil perhitungan yang telah didapatkan akan divisualisasikan/ diinterpretasikan dalam bentuk grafik, gambar atau animasi dengan variasi pola warna untuk memudahkan dalam menganalisa hasil yang telah didapat dari proses komputasi.

BAB III METODOLOGI

Tahapan penelitian ini dimulai dengan penentuan variasi simulasi, lalu dilanjutkan ke tahap *Pre-processing*, *Processing* dan terakhir ke tahap *Post Processing*. Sebagai bentuk untuk memastikan bahwa hasil simulasi yang didapat benar maka perlu dilakukan *sensitivity analysis* dan validasi. Penelitian numerik ini dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD). *Software* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *software* Ansys Fluent 2021 R2 yang berfungsi untuk mensimulasikan model yang telah dibuat guna mendapatkan data yang diinginkan, *software* ICEM CFD 2021 R2 untuk melakukan *Meshing* pada geometri dan domain yang telah dibuat dan *Microsoft Excel* serta *CFD POST 2021 R2* dapat digunakan untuk mengolah data kuantitatif dan kualitatif yang telah didapat dari hasil simulasi. *Software* yang digunakan dalam pembuatan geometri silinder dan domain adalah *Autodesk Inventor Professional 2019*. Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik adalah sebagai berikut.

3.1 Variasi Simulasi

Model yang digunakan dalam penelitian ini yaitu geometri silinder sirkular dengan analisa yang dilakukan secara dua dimensi. Variasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu konfigurasi ukuran diameter *wire* yang ditempatkan pada daerah *leeward* dari silinder sirkular dan bilangan Reynolds yang diterapkan dalam simulasi. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi untuk mendapatkan data kuantitatif yaitu berupa *drag coefficient* dan *lift coefficient*, dimana hasil dari simulasi setiap variasi diameter *wire* akan dibandingkan. Analisa dan perbandingan akan juga dilakukan terhadap hasil simulasi setiap variasi yang didapat terhadap hasil simulasi kondisi silinder sirkular tanpa *wire* pada beberapa bilangan Reynolds yang berbeda. Pada Tabel 3.1 ditunjukkan variasi parameter penelitian ini sebagai berikut:

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

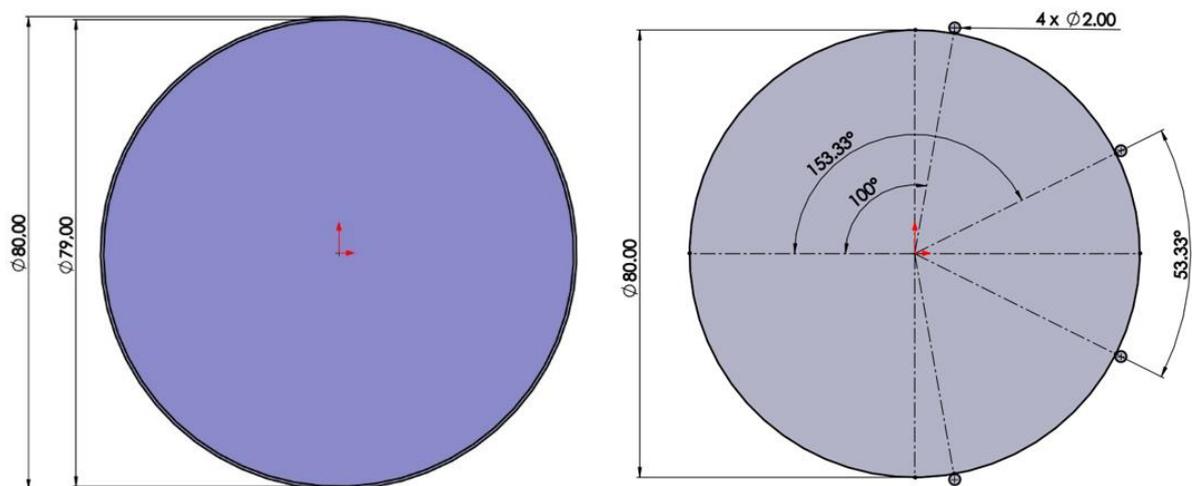
Parameter	Keterangan
Silinder	
Type Silinder	Silinder Sirkular
Diameter (D)	80 mm
Wire	
Type Wire	Silinder Sirkular
Diameter (d)	2 mm
	2.5 mm
	3 mm
Ratio diameter <i>wire</i> dengan diameter silinder sirkular (d/D)	0.025
	0.03125
	0.0375
Jarak Sudut setiap <i>wire</i> daerah <i>leeward</i> sirkular silinder (θ_w)	53.33°
Posisi angular <i>wire</i> utama terhadap titik stagnasi (θ_A)	100°
Jumlah <i>Wire</i> setiap silinder sirkular (n)	4 buah
Bilangan Reynolds	
Bilangan Reynolds (Re_D)	6000
	20000
	40000

3.2 Tahap *Pre-Processing*

Pada tahap *pre-processing*, terdapat beberapa tahapan meliputi tahapan pembuatan geometri model benda uji dan pembuatan domain simulasi, tahapan pembuatan *Meshing*, dan tahapan penentuan *boundary condition* untuk simulasi pada *software* CFD.

3.2.1 Pembuatan model benda uji

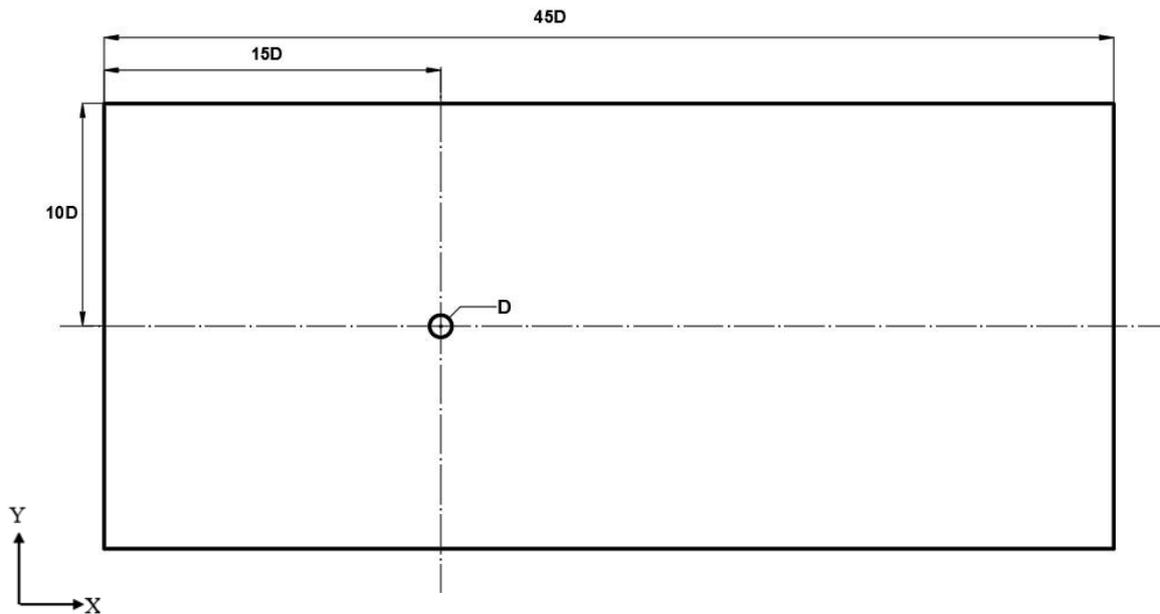
Terdapat dua model benda uji yang akan digunakan dalam penelitian ini. Dua Model benda uji yang digunakan antara lain: silinder sirkular tanpa *wire* (*smooth circular cylinder*) dan silinder sirkular dengan *wire*. Dalam penelitian ini, silinder sirkular yang terdapat *wire*, memiliki 4 buah *wire* yang terpasang dengan diameter *wire* bervariasi dan jarak sudut setiap *wire* (θ_w) sebesar 53.3° dengan posisi angular *wire* utama terhadap titik stagnasi (θ_A) sebesar 100° sebagaimana sesuai dengan informasi yang ditulis pada Tabel 3.1. Proses pembuatan model benda uji dilakukan dengan menggunakan *software Autodesk Inventor Professional 2019*. Berikut pada Gambar 3.1 menyajikan model dua dimensi dari *smooth* silinder sirkular dan silinder sirkular yang terdapat *wire* dengan diameter *wire* 2 mm.



Gambar 3. 1 (A) Geometri *Smooth Circular Cylinder* (B) Geometri *Circular Cylinder* dengan Variasi *Wire* Diameter 2 mm

3.2.2 Domain simulasi

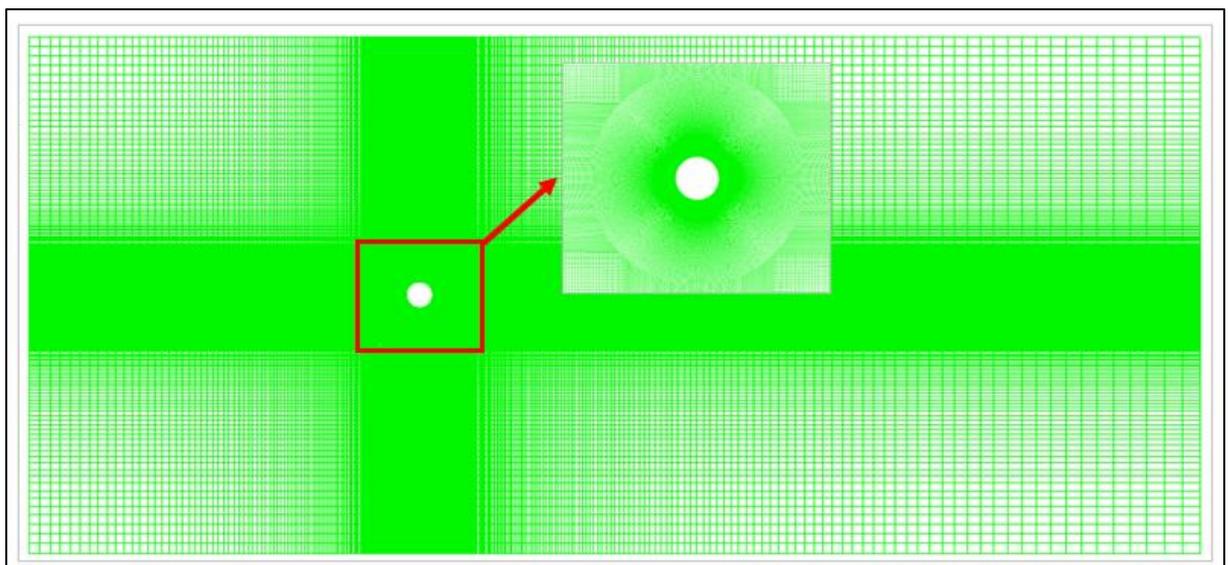
Setelah model benda uji dibuat, langkah selanjutnya yaitu membuat domain simulasi. Penelitian ini menganalisa aliran yang termasuk dalam *external flow* oleh karena itu perlu dibuat domain berupa ruang atau batasan dengan ukuran yang lebih besar dari model benda uji yang disimulasi dalam penelitian ini. Domain yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk persegi panjang dengan dimensi arah panjang inlet sebesar 15D atau sebesar 1200 mm, dimensi arah lebar sebesar 10D atau sebesar 800 mm dan dimensi arah panjang outlet sebesar 30D atau sebesar 2400 mm, dimana jarak diukur dari titik pusat silinder sirkular. Berikut Gambar 3.2 merupakan gambar domain simulasi pada penelitian ini.



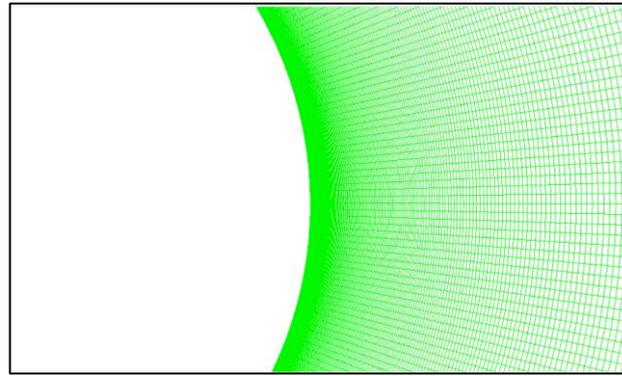
Gambar 3. 2 Dimensi Domain Simulasi

3.2.3 Meshing

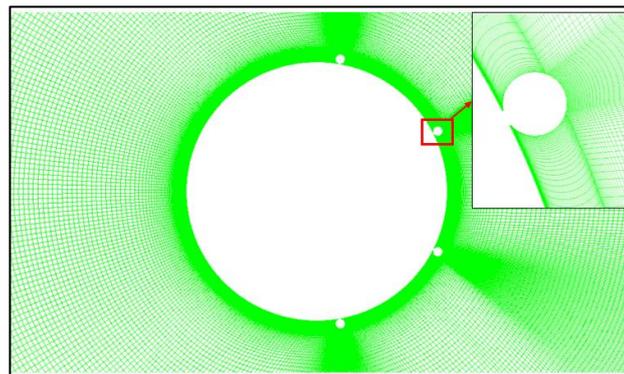
Meshing adalah suatu metode yang digunakan untuk mendiskritisasi atau membagi daerah model benda uji dan domain menjadi elemen yang lebih kecil. Dalam penelitian ini, proses *Meshing* dilakukan dengan menggunakan *software ICEM CFD 2021 R2*. *Mesh* yang digunakan merupakan *structured Mesh*. *Structured Mesh* dipilih dalam penelitian ini dikarenakan dapat menghemat waktu yang digunakan untuk mensimulasikan objek yang diuji dalam *software fluent*. Salah satu cara lain yang dapat digunakan untuk mempersingkat waktu simulasi atau *running* dan meningkatkan tingkat keakuratan simulasi (bisa menangkap *boundary layer* yang terjadi didaerah silinder sirkular) yaitu dengan membuat rapat elemen ke arah permukaan silinder sirkular dan membuat renggang elemen yang berada jauh dari silinder sirkular. *Mesh* yang telah dibuat memiliki *skewness* sebesar 0.4851 dan *orthogonality quality* 0.7241 sebesar Berikut pada Gambar 3.3 merupakan bentuk *Meshing* yang digunakan dalam penelitian ini.



(A)



(B)

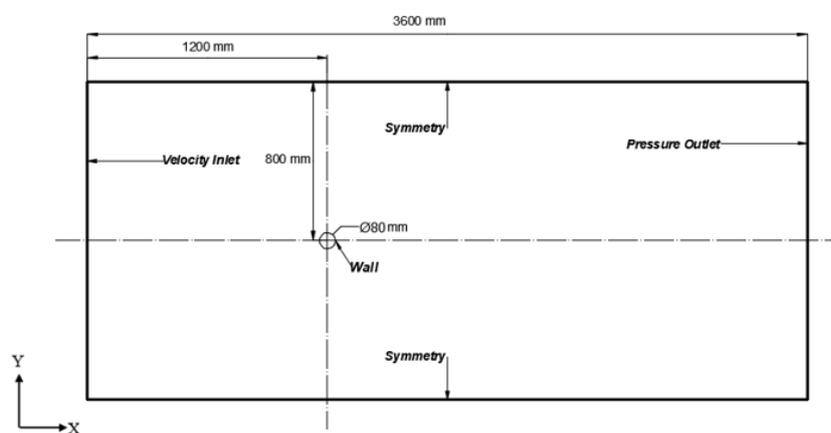


(C)

Gambar 3. 3 (A) *Mesh Circular Cylinder* (B) *Detail Mesh* disekitar *Smooth Circular Cylinder* dengan Jumlah Elemen 155,168 (C) *Detail Mesh* disekitar *Wired Circular Cylinder* dengan Jumlah Elemen 164,846

3.2.4 *Boundary condition*

Langkah selanjutnya setelah melakukan *Meshing* yaitu menentukan *boundary condition*. *Boundary condition* merupakan batasan yang diterapkan pada sisi domain. Dalam penelitian ini daerah batas pada domain yang digunakan antara lain: *velocity inlet* yang digunakan untuk pada sisi depan domain, *symmetric* yang digunakan pada sisi atas dan bawah domain, *pressure outlet* yang diterapkan pada bagian *outlet domain*, serta *wall* yang diterapkan pada silinder sirkular. Gambar 3.4 menunjukkan *boundary condition* pada domain penelitian ini.



Gambar 3. 4 *Boundary Condition* Simulasi

3.3 Tahap *Processing*

Setelah membuat model benda uji, domain, *Meshing* dan menentukan *boundary condition* yang ada dalam tahap *pre-processing*, tahap berikutnya yaitu tahap *processing*. Dalam tahap *processing*/ tahap *solver* ada beberapa parameter yang perlu diatur dalam *software fluent 2021 R2*. Tabel 3.2 menunjukkan beberapa parameter yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Penentuan Parameter Simulasi Tahap *Processing*

No	Parameter	Input	Keterangan
1	General	2 Dimensi (<i>planar</i>)	
		<i>Absolute Velocity</i>	
		<i>Pressure Based</i>	
		<i>Transient</i>	
2	Model	<i>Viscous Model (Re 6000)</i>	<i>Standard K-Epsilon</i>
		<i>Viscous Model (Re 20000 dan 40000)</i>	<i>SST K-ω</i>
3	Operating Conditions		
	<i>Material Fluid</i>	<i>Air</i>	T = 25 °C $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 1.849 \times 10^{-5}$
	Material silinder sirkular	Alumunium	$\rho = 2719 \text{ kg/m}^3$
	Boundary Condition		
4	<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i>	V = 1.17 m/s, TI = 1%, l=0.0056 V = 3.90 m/s, TI = 1%, l=0.0056 V = 7.81 m/s, TI = 1%, l=0.0056
	<i>Outlet</i>	<i>Pressure outlet</i>	0 Pa Gauge Pressure
	Silinder sirkular	<i>Wall</i>	<i>No Slip</i>
	<i>Symmetry</i>	<i>Symmetry</i>	-
	Solution set up		
	Metode solusi	<i>Pressure - velocity coupling</i>	<i>Simple</i>
5	Diskritisasi spasial	<i>Gradient</i>	<i>Leats Square cell based</i>
		<i>pressure</i>	<i>Second Order</i>
		<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
		<i>Turbulent kinetic energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
	<i>Speciefic Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
<i>Transient Formulation</i>	<i>Second Order Implicit</i>		
6	Initialization	<i>Hybrid Initialization</i>	
7	Convergence	<i>Residual</i>	10^{-5}
8	Run Calculation	<i>Time Step size (Sekon)</i>	0.0001 (Re 6000 dan Re 40000). 0.0021 (Re 20000)
		<i>Inner Iteration</i>	75 iterasi / <i>time step size</i>

Tabel 3.2, pada bagian *general* menunjukkan bahwa simulasi didalam penelitian ini dianalisa secara 2 dimensi dengan kondisi *transient*. *Viscous model* yang digunakan yaitu *standard K-epsilon* pada Bilangan Reynolds 6000 dan *SST K- ω* (*shear stress transport K-Omega*) pada Bilangan Reynolds 20000 dan 40000. Pemilihan *viscous model standard K-epsilon* dan *SST K- ω* dikarenakan mampu memvisualisasikan model turbulensi yang terjadi dekat dinding benda uji, selain itu *viscous model* ini dipilih karena mengikuti referensi penelitian yang dilakukan Wei Chen *et al* dan Imogen *et al* yang memiliki *case* serupa untuk *smooth cylinder* dengan Re 3900 dan Re 42000. Temperatur fluida yang dipilih pada simulasi dipenelitian ini yaitu sebesar 25 °C. Temperatur yang digunakan dipilih berdasarkan SNI 03-6572-2001 terkait suhu rata-rata ruangan nyaman yang ada di Indonesia. Pada bagian *Boundary Condition*, terlihat kecepatan *inlet* berbeda-beda, hal ini dikarenakan menyesuaikan dengan Bilangan Reynolds. Pada bagian *inlet* dan *outlet* diatur nilai *Turbulent Intensity* sebesar 1% dan *length scale* sebesar 0.0056 mm. Persyaratan yang digunakan untuk mencapai konvergensi pada penelitian ini sebesar 10^{-5} . *Time Step size* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 0.0001 sekon untuk bilangan Reynolds 6000 serta 40000 dan pada penelitian ini sebesar 0.0021 sekon untuk bilangan Reynolds 20000, hal ini dikarenakan semakin kecil nilai *time step size* maka semakin bagus dalam menangkap fenomena *vortex shedding* selain itu pemilihan *time step size* didasarkan pada penelitian Imogen *et al* yang menggunakan *time Step size* 0.0001 dalam penelitiannya.

3.4 Tahap *Post-Processing*

Tahap *Post-Processing* merupakan tahapan yang dilakukan setelah melakukan proses simulasi pada *software fluent 2021 R2*. Tahap *Post-Processing* yaitu tahap melakukan pengolahan data yang didapatkan dari hasil simulasi numerik. Pada penelitian ini, data yang didapat kemudian diolah dan divisualisasikan menjadi data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif yang diambil dan diolah pada penelitian ini yaitu Koefisien *Drag* (C_D), Koefisien *Lift* (C_L), Koefisien *Pressure* (C_p) dan *Strouhal Number*, sedangkan data kualitatif yang divisualisasikan pada penelitian ini meliputi plot kontur *velocity magnitude*, plot kontur tekanan, dan *streamline* baik pada *smooth circular cylinder* maupun pada *circular cylinder* dengan *wire*.

Pengambilan data simulasi *unsteady* dilakukan ketika nilai residual sebesar 10^{-5} sudah tercapai (*convergence*) dan grafik Koefisien *Drag* (C_D) serta grafik Koefisien *Lift* (C_L) yang ditampilkan dalam *software fluent* sudah mulai menunjukkan nilai C_D , C_L stabil (tidak terjadi perbedaan nilai C_D dan C_L yang signifikan pada rentang *flow time* tertentu). Data kuantitatif berupa nilai C_D , C_L yang didapat kemudian dirata-rata pada rentang *flow time* dimana C_D , C_L stabil. Data kuantitatif yang didapat bisa diolah dengan menggunakan *software Microsoft Excel*. Selain data kuantitatif terdapat data kualitatif, dimana untuk mendapatkan data kualitatif pada simulasi 2 dimensi berupa plot kontur *velocity magnitude*, plot kontur tekanan, dan *streamline* tidak perlu mengatur area potongan pada ketinggian yang diinginkan, cukup dengan memilih *surface* yang ingin ditampilkan konturnya pada menu *result* fitur *contours* pada *software fluent 2021 R2* atau dapat dilakukan dalam *software CFD Post 2021 R2*, selanjutnya data kualitatif yang ingin didapatkan akan dipilih pada bagian *screen*. Data kualitatif yang telah didapat berupa visualisasi gambar disimpan dengan perbesaran sesuai yang diinginkan pada eksistensi file jpg atau png.

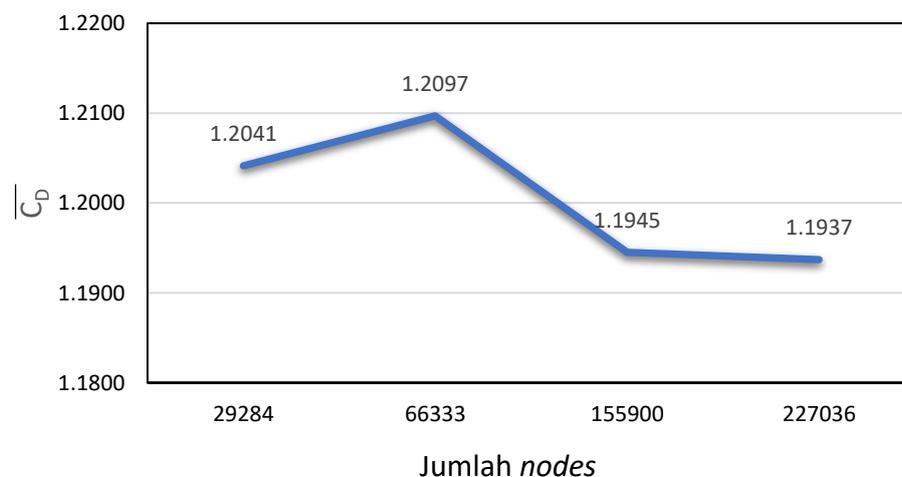
3.5 Sensitivity Analysis

3.5.1 Grid independency test

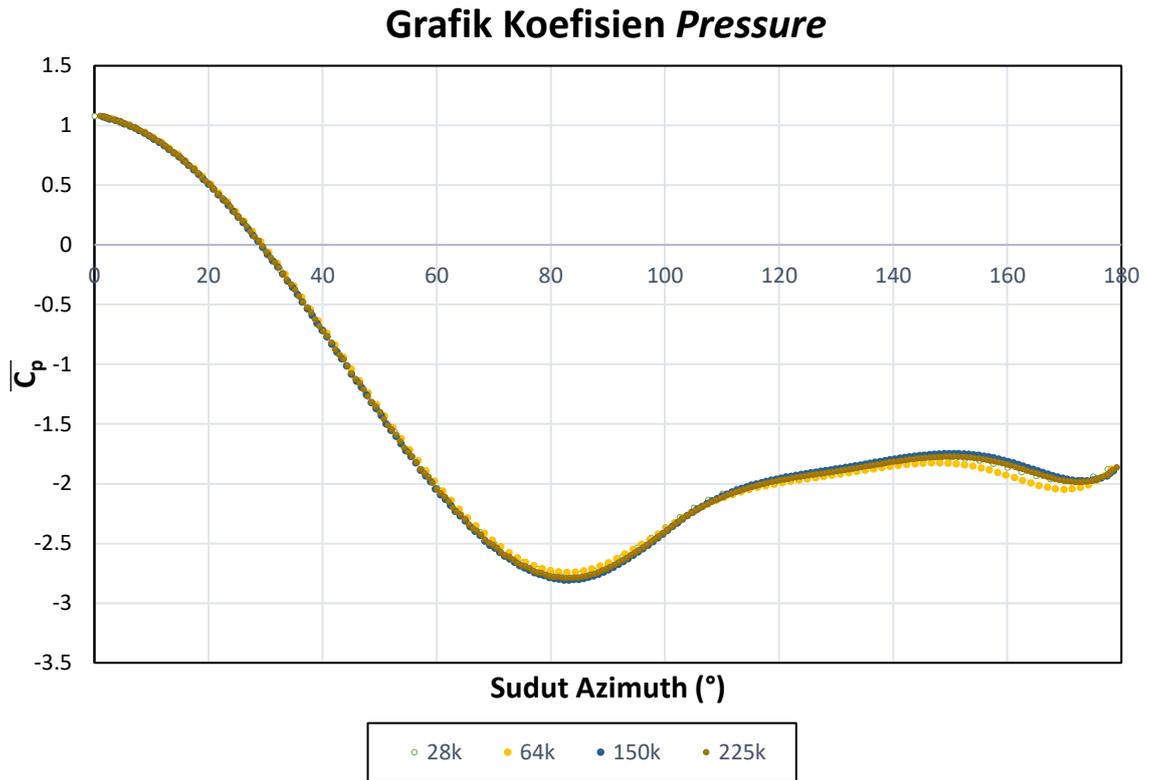
Grid independency merupakan salah satu pengujian yang dilakukan terhadap beberapa variasi *Mesh* dengan jumlah yang berbeda-beda dengan minimal perbedaan jumlah *cell* dan *nodes* pada *Mesh* sebesar 1.5. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil data simulasi dari setiap variasi *Mesh* yang telah dibuat dan disimulasi. Tujuan *grid independency* untuk mendapatkan jumlah elemen *Mesh* yang sesuai dan efisien pada penelitian ini. Proses *grid independency* pada penelitian ini dilakukan pada kondisi *unsteady/transient* dengan menggunakan model benda uji *smooth circular cylinder* dan *dirunning* pada $Re\ 40000$. *Meshing* yang dibuat pada penelitian ini divariasikan dengan jumlah *Mesh* antara 29000 – 227000. Berdasarkan hasil yang didapat dari proses pengujian *grid independency* didapatkan jumlah *Mesh* yang optimum pada penelitian ini adalah sebesar 155900 sel. Hal ini dikarenakan pada *Mesh* 155900 *nodes* memiliki nilai $\overline{C_D}$ yang stabil, ditandakan dengan tidak terjadi perbedaan nilai $\overline{C_D}$ yang cukup signifikan apabila dibandingkan dengan $\overline{C_D}$ setiap variasi *Mesh*, selain itu salah satu cara lain yang digunakan dalam penelitian ini untuk memastikan bahwa *Mesh* sudah tidak memiliki pengaruh pada hasil $\overline{C_D}$ yaitu dengan menganalisa grafik C_p yang telah dibuat. Terlihat pada grafik C_p yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6, *Mesh* dengan jumlah *nodes* 155900 memiliki bentuk grafik yang saling berhimpit dengan variasi *Mesh* dengan jumlah *nodes* 29284, 66333 dan *Mesh* jumlah *nodes* 227036. Berikut pada Tabel 3.3 merupakan Tabel yang menunjukkan hasil pengujian *grid independency* berupa data koefisien *drag* dan Gambar 3.5 merupakan tampilan grafik dari *grid independency test* pada penelitian ini.

Tabel 3. 3 Hasil Pengujian *Grid Independency*

<i>Mesh</i>	Jumlah <i>Nodes</i>	Jumlah Elemen	$\overline{C_D}$	<i>Error</i> $\overline{C_D}$ (%)	Y+
M1	29284	28956	1.2041	-	1.0463
M2	66333	65854	1.2097	0.4608	1.0247
M3	155900	155168	1.1945	1.2720	1.0684
M4	227036	226126	1.1937	0.0670	1.0869



Gambar 3. 5 Grafik Jumlah *Nodes Mesh* Terhadap Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag*



Gambar 3. 6 Grafik Nilai Rata-Rata Koefisien *Pressure* ($\overline{C_p}$) Terhadap Sudut Azimuth (Teta) Pada Silinder Sirkular

3.5.2 Time step sensitivity analysis

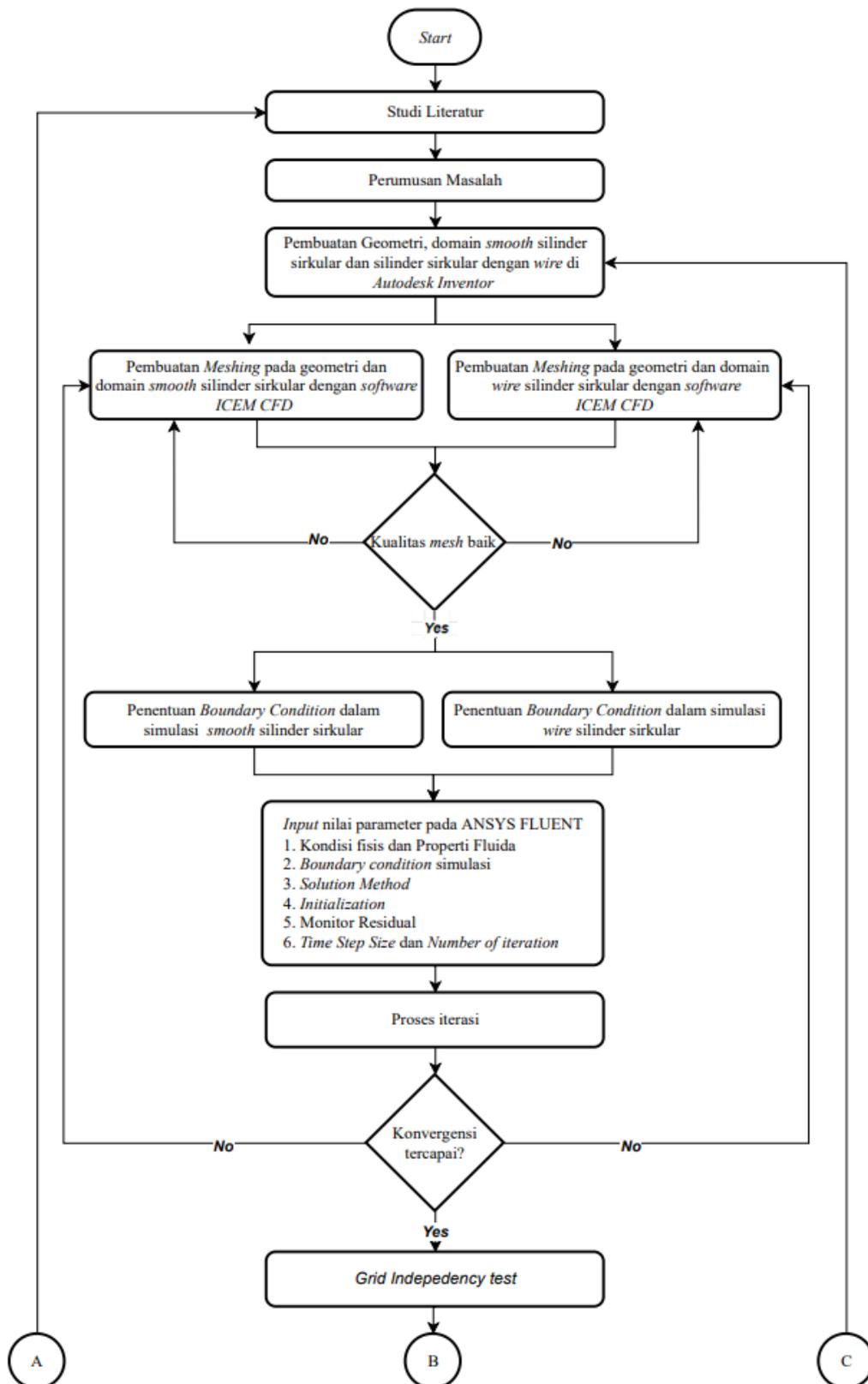
Time Step Sensitivity Analysis merupakan salah satu pengujian yang dilakukan terhadap beberapa variasi *time step size* pada simulasi *unsteady/transient* dengan nilai yang berbeda-beda. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil data simulasi dari setiap variasi *time step size* yang diaplikasikan dalam *Mesh* yang telah dipilih dalam pengujian *grid independency*. Tujuan *Time Step Sensitivity Analysis* adalah untuk mendapatkan nilai *time step size* yang paling efisien pada penelitian ini. Berdasarkan analisis terhadap hasil yang didapat dari proses pengujian *Time Step Sensitivity Analysis* didapatkan *time step size* yang paling optimum adalah sebesar 0.0001 sekon. Hal ini dikarenakan terlihat pada Tabel 3.4 untuk nilai koefisien *drag* masing-masing *time step size* yang didapat dari pengujian ini memiliki nilai yang berbeda-beda (*error* nilai $\overline{C_D}$ cukup besar), sehingga dipilih nilai *time step size* yang paling kecil agar hasil simulasi yang didapat lebih akurat.

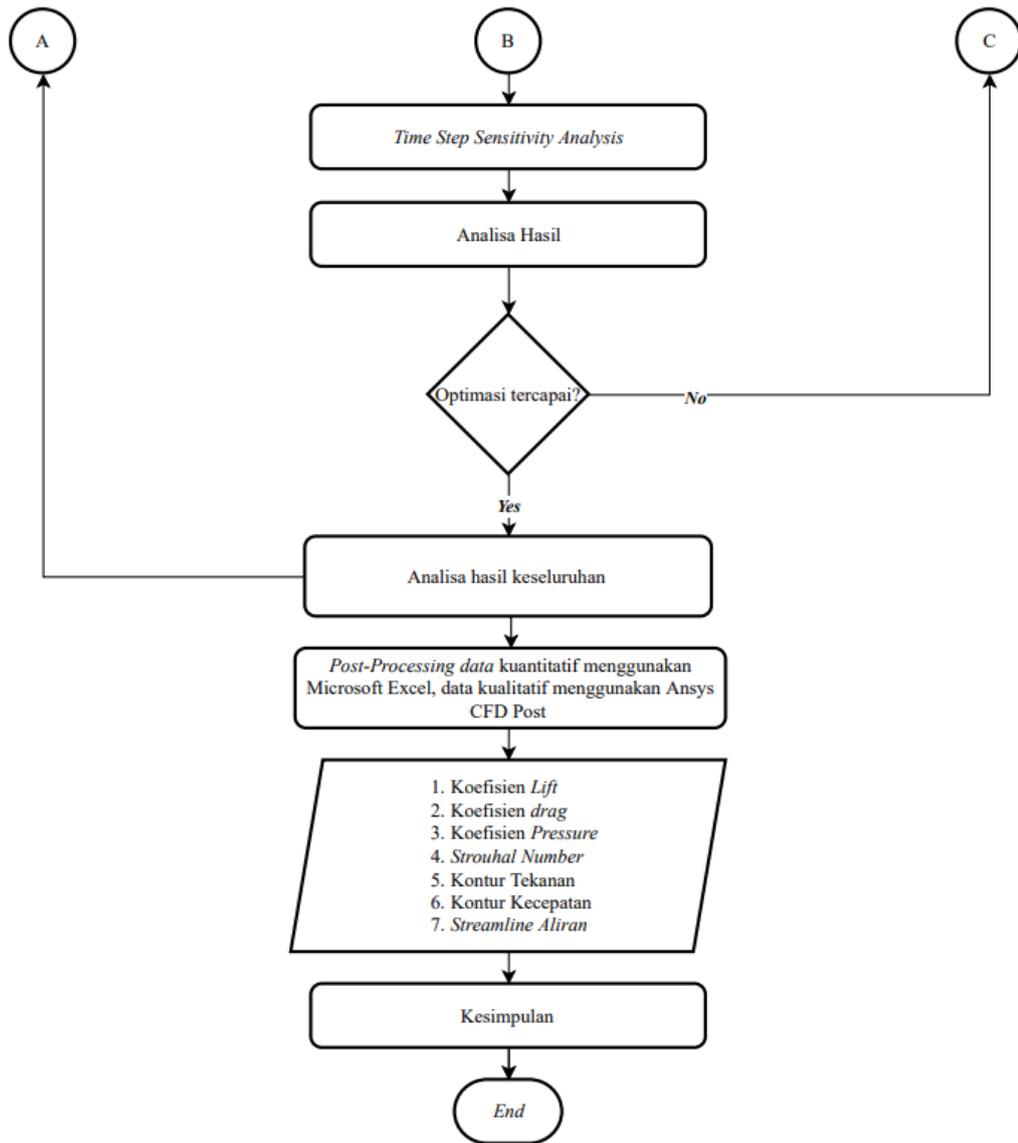
Tabel 3. 4 *Time Step Sensitivity Analysis*

No	Jumlah Nodes	Time Step Size	$\overline{C_D}$	Error $\overline{C_D}$ (%)
1	155900	0.001	1.06490	-
2		0.0007	1.10052	3.237
3		0.0004	1.12852	2.48
4		0.0001	1.14496	1.436

3.6 Diagram Alir Penelitian

Berikut pada Gambar 3.7 menunjukkan langkah-langkah dalam penelitian ini





Gambar 3. 5 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

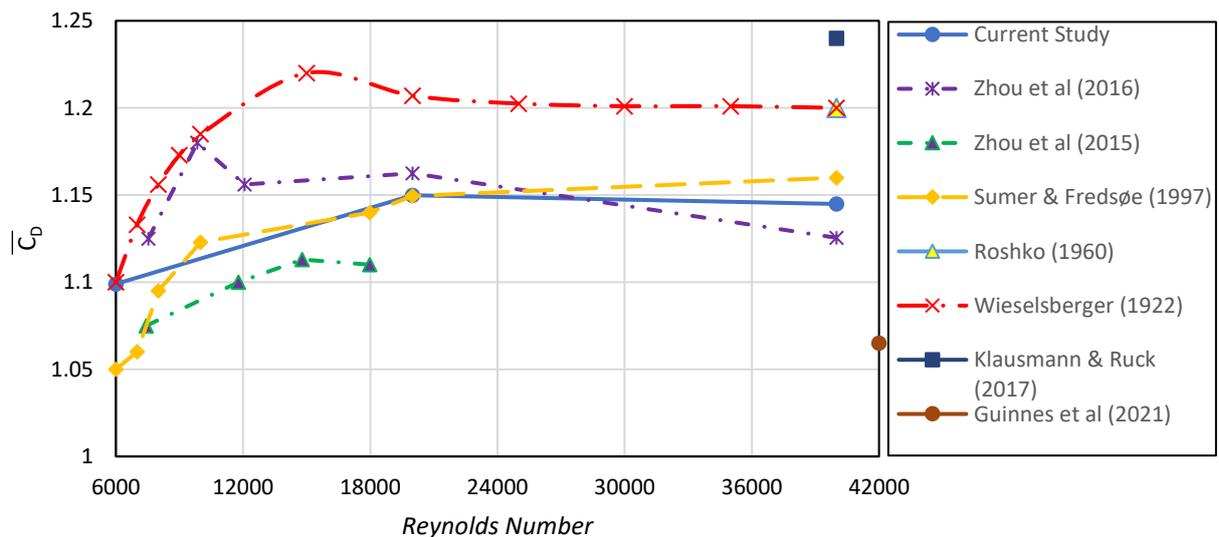
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil analisa dan diskusi dari analisa numerik untuk beberapa data yang diperoleh dari hasil simulasi CFD geometri *smooth circular cylinder* dan *circular cylinder* dengan diberi kekasaran permukaan berupa *wire* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada Bilangan Reynolds 6000, 20000, 40000 sesuai yang telah dijabarkan pada tabel 3.1.

Hasil yang akan ditunjukkan pada bab ini akan ditunjukkan dalam beberapa bentuk data antara lain data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif yang akan ditampilkan yaitu grafik *Drag Coefficient*, *Lift Coefficient* dan distribusi koefisien tekanan didaerah *circular cylinder*. Data kualitatif yang akan ditampilkan yaitu berupa kontur yang meliputi *velocity magnitude* dilengkapi dengan *streamlines*, *pressure distribution*. Pembahasan data dengan kontur dan dilakukan dengan maksud untuk mengetahui karakteristik dan struktur aliran yang melalui *circular cylinder* tanpa kekasaran permukaan dan dengan kekasaran permukaan berupa penambahan *wire*. Selain itu, pembahasan data tersebut juga dapat membantu menjelaskan terjadinya perubahan performa aerodinamik dari *circular cylinder*.

4.1 Validasi

Model numerik yang telah dibuat dan disimulasikan perlu divalidasi. Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh dari simulasi numerik yang didapatkan cukup akurat. Validasi dilakukan terhadap data yang diperoleh dari beberapa hasil penelitian eksperimen dengan geometri *smooth circular cylinder* dari penelitian yang dilakukan oleh Zhou *et al* (2015), Zhou *et al* (2016), Sumer & Fredsoe (1997), Roshko (1960), Wieselsberger (1922), Klausmann & Ruck (2017) dan Penelitian simulasi dengan geometri *smooth circular cylinder* dari penelitian yang dilakukan oleh Guinness *et al* (2021). Hasil pengukuran yang didapatkan berupa nilai rata-rata koefisien *drag* pada beberapa nilai *Reynolds Number*.



Gambar 4. 1 Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag Smooth Circular Cylinder* dengan Beberapa Penelitian Simulasi Numerik dan Eksperimen

Gambar 4.1 menunjukkan grafik perbandingan nilai rata-rata koefisien *drag* dengan beberapa penelitian eksperimen dan simulasi. Terlihat pada grafik tersebut tren grafik $\overline{C_d}$

current study mampu menduplikasi tren grafik Wieselsberger (1922) pada Bilangan Reynolds 6000, 20000 dan 40000. Pada gambar 4.1 terlihat terdapat perbedaan nilai rata-rata koefisien *drag* dari setiap penelitian pada Bilangan Reynolds yang sama. Hal ini disebabkan salah satunya karena ukuran diameter *smooth circular cylinder* yang digunakan berbeda pada setiap penelitian. Pada Gambar 4.1 terlihat pada Bilangan Reynolds 6000, 2000, 40000, nilai rata-rata koefisien *drag current study* berada diantara nilai rata-rata koefisien *drag* dari beberapa penelitian lain. Pada bilangan Reynlods 6000 nilai error terkecil didapatkan sebesar 0.09% apabila dibandingkan dengan penelitian eksperimen yang dilakukan Wieselsberger (1922), sedangkan *error* terbesar didapatkan sebesar 4.46% apabila dibandingkan dengan penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Sumer & Fredsoe (1997). Pada bilangan Reynlods 20000 nilai *error* terkecil didapatkan sebesar 0.034% apabila dibandingkan dengan penelitian eksperimen yang dilakukan Sumer & Fredsoe (1997), sedangkan *error* terbesar didapatkan sebesar 4.73% apabila dibandingkan dengan penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Wieselsberger (1922). Pada Bilangan Reynolds 40000 nilai *error* terkecil didapatkan sebesar 1.3% apabila dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Sumer & Fredsoe (1997), sedangkan *error* terbesar didapatkan sebesar 7.67% apabila dibandingkan dengan penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Klaussman & Ruck (2017).

4.2 Hasil Simulasi

Pada sub bab ini akan dijelaskan terkait hasil yang diperoleh dari penelitian ini berupa nilai rata rata *Drag Coefficient*, nilai rata rata *Lift Coefficient RMS*, nilai rata-rata distribusi koefisien tekanan, kontur kecepatan relatif yang dilengkapi dengan *streamlines*, dan kontur tekanan pada *smooth circular cylinder* dan ketiga variasi *circular cylinder* dengan kekasaran permukaan berupa penambahan *wire* di daerah *leeward* pada Bilangan Reynolds 6000, 20000, 40000.

4.2.1 Analisa koefisien *drag* dan koefisien *lift*

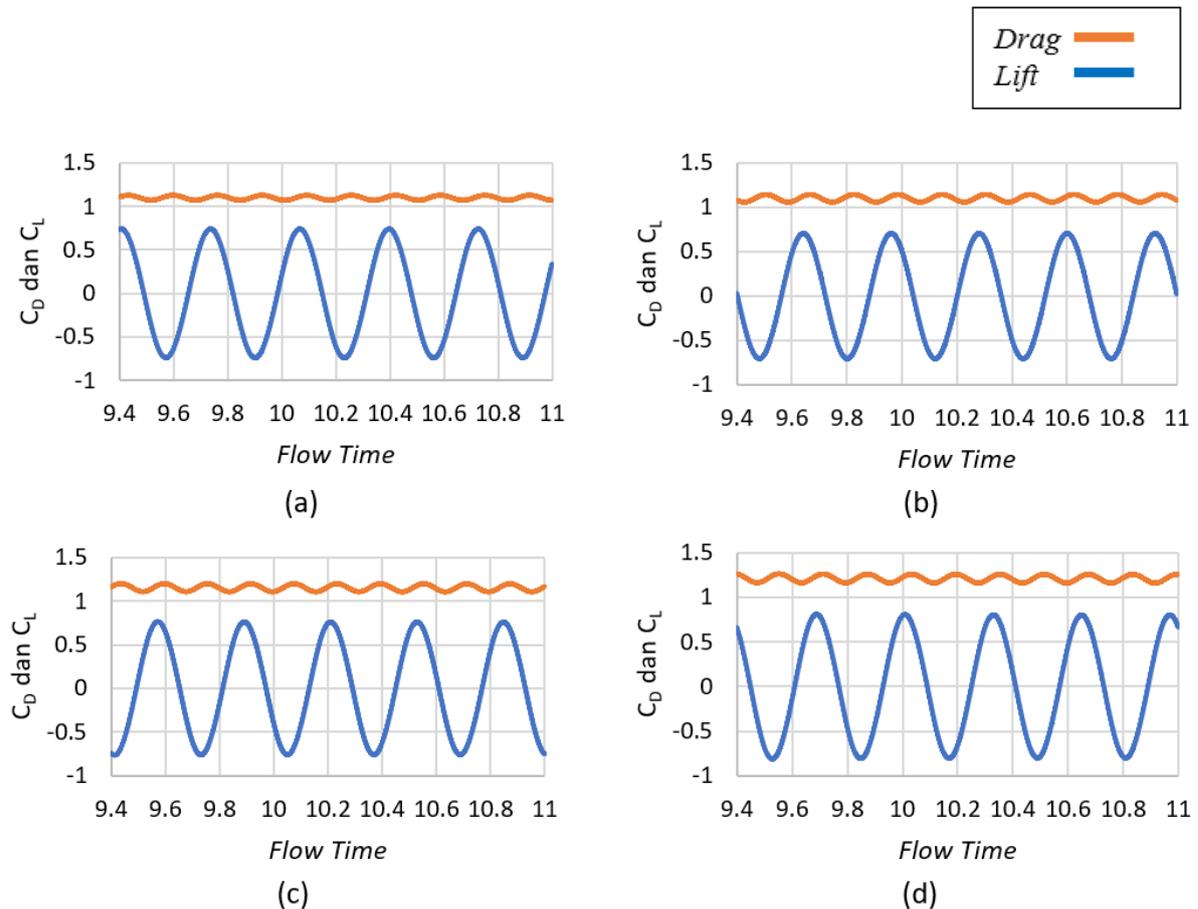
Parameter koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) merupakan dua parameter yang dapat menggambarkan performansi aerodinamik dari sebuah *circular cylinder*. Hal ini dikarenakan kedua koefisien ini didapatkan dari total resultan gaya yang bekerja karena adanya interaksi antara permukaan benda dengan fluida. (Kartika dan Sutardi, 2015).

Pada penelitian ini analisis dilakukan terhadap nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) dan koefisien *lift RMS* (C_L'). Hal ini dikarenakan nilai koefisien *drag* (C_D) dan nilai koefisien *lift* (C_L) yang didapat dalam simulasi numerik merupakan nilai sesaat pada setiap *time step*. Nilai rata-rata data koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) dan koefisien *lift* (C_L) pada setiap konfigurasi diperoleh dengan menyimulasikan model objek simulasi sampai grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* fungsi waktu setiap konfigurasi menunjukkan keadaan *steady state*. Grafik koefisien *drag* dan koefisien *lift* yang telah didapat kemudian dirata-rata pada rentang *flow time* yang sama untuk setiap Bilangan Reynolds. Khusus data koefisien *lift*, nilai rata-rata dilakukan pada nilai koefisien *lift* yang telah diolah menggunakan metode *Root Mean Square (RMS)*. Penggunaan metode *Root Mean Square (RMS)* pada koefisien *lift* berfungsi untuk mengetahui perubahan nilai yang terjadi pada koefisien *lift* terhadap perubahan penambahan kekasaran permukaan *circular cylinder* didaerah *leeward* dan nilai *Reynolds Number*.

4.2.1.1 Koefisien *drag* dan koefisien *lift rms* pada *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi diameter *wire* pada bilangan Reynolds 6×10^3

Nilai koefisien *drag* dan Koefisien *lift* dari hasil simulasi numerik yang akan dijelaskan di bawah ini berdasarkan angka Reynolds 6×10^3 untuk setiap variasi geometri *circular cylinder*

pada penelitian ini yang akan dijabarkan dalam bentuk grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) fungsi waktu yang dilengkapi dengan grafik perbandingan rata-rata nilai koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) beserta koefisien *lift RMS* (C_L').

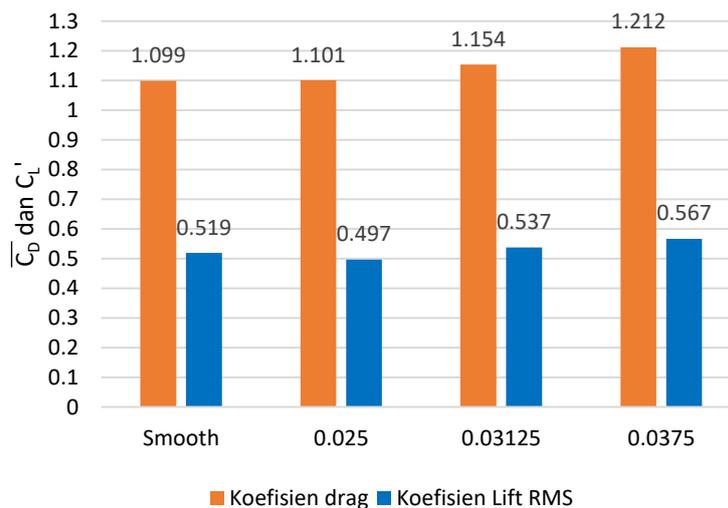


Gambar 4. 2 Grafik Koefisien *Drag* (C_D) dan Koefisien *Lift* (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 6 \times 10^3$: (a) *Smooth Circular Cylinder*, (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$, (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Gambar 4.2 menunjukkan grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu untuk *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* pada $Re = 6 \times 10^3$. Data koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) diambil pada *flow time* 9.4 – 11 sekon. Pengambilan data dilakukan pada *flow time* tersebut dikarenakan aliran sudah mencapai kondisi *steady state* dengan ditandai tidak terjadi perbedaan pola setiap gelombang dalam grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 terlihat untuk *smooth circular cylinder* memiliki nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.099 dan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 0.519. Pada Gambar 4.3 untuk setiap konfigurasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 menunjukkan nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.101; 1.154; 1.212, sedangkan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 0.4967; 0.537; 0.567. Berdasarkan dari data yang diperoleh, apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, maka pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 untuk nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) terjadi peningkatan nilai dengan presentase sebesar 0.18%; 4.77%; 9.32%, sedangkan untuk nilai koefisien *lift RMS* (C_L') terjadi peningkatan C_L' pada *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.03125$ dan $d/D = 0.0375$ sebesar 3.35% dan 8.47%. Pada variasi *wired circular cylinder*

dengan $d/D = 0.025$ terjadi penurunan nilai C_L' sebesar 4.43%. Berdasarkan penjelasan sebelumnya dapat diketahui bahwa nilai koefisien *lift* terkecil dihasilkan pada *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.025$ dan nilai koefisien *lift* terbesar dihasilkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$, selain itu dapat diketahui juga nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan pada *smooth circular cylinder* dan nilai koefisien *drag* terbesar dihasilkan pada *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$. Hal ini menjelaskan bahwa peningkatan gaya *lift* terbesar terjadi pada variasi *circular cylinder* dengan penambahan *wire* di daerah *leeward* dengan $d/D = 0.03125$ dan $d/D = 0.0375$, namun reduksi gaya *drag* justru semakin berkurang pada seluruh variasi akibat dari penambahan *wire* seiring dengan peningkatan diameter *wired* di daerah *leeward circular cylinder*.

Amplitudo koefisien *drag* (C_D) terhadap nilai rata-rata untuk *circular cylinder* dengan penambahan *wire* juga lebih tinggi, sekitar 1.5 kali dari nilai *smooth circular cylinder*, sedangkan amplitudo koefisien *lift* (C_L) terhadap nilai rata-rata untuk *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 juga lebih tinggi sekitar 1.05 kali. Pada *circular cylinder* dengan penambahan *wire* variasi d/D sebesar 0.025 terjadi penurunan amplitudo sebesar 0.9 kali dari nilai *smooth circular cylinder*.



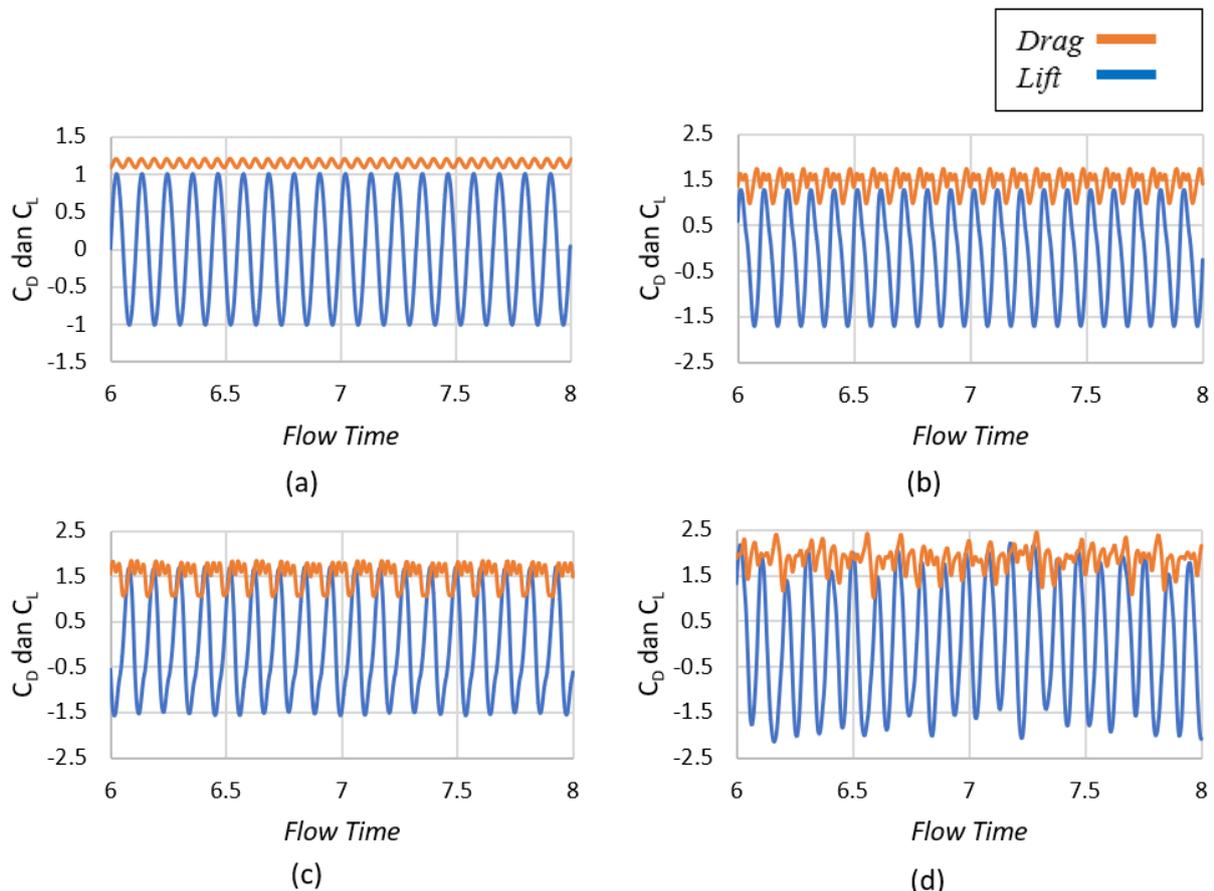
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift RMS* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3

4.2.1.2 Koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi diameter *wire* pada bilangan Reynolds 2×10^4

Nilai koefisien *drag* dan Koefisien *lift* dari hasil simulasi numerik yang akan dijelaskan dibawah ini berdasarkan angka Reynolds = 2×10^4 untuk setiap variasi geometri *circular cylinder* pada penelitian ini yang akan dijabarkan dalam bentuk grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) fungsi waktu yang dilengkapi dengan grafik perbandingan rata-rata nilai koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) beserta nilai koefisien *lift RMS* (C_L').

Gambar 4.4 menunjukkan grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu untuk *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* pada $Re = 2 \times 10^4$. Data koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) diambil pada *flow time* 6 – 8 sekon. Pengambilan data dilakukan pada *flow time* tersebut dikarenakan aliran sudah mencapai kondisi

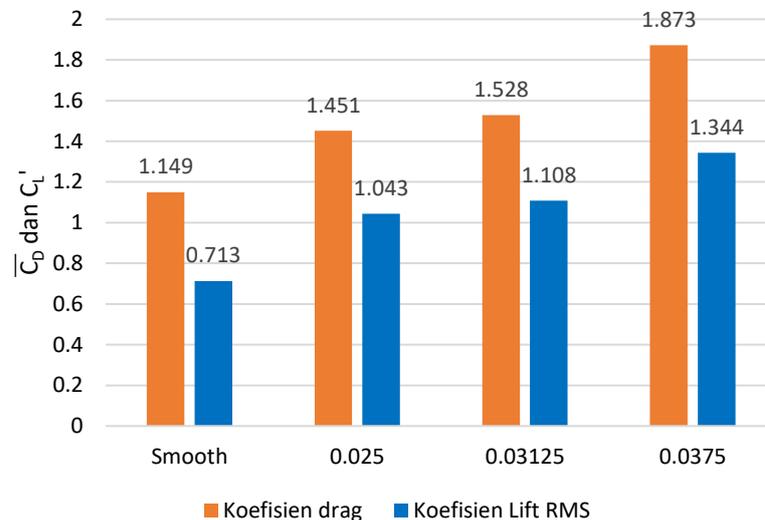
steady state dengan ditandai tidak terjadi perbedaan pola setiap gelombang dalam grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 terlihat untuk *smooth circular cylinder* memiliki nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.149 dan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 0.713. Pada Gambar 4.5 untuk setiap konfigurasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 menunjukkan nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.451; 1.528; 1.873, sedangkan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 1.043; 1.108; 1.344. Berdasarkan dari data yang diperoleh, apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, maka pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 untuk nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) terjadi peningkatan nilai dengan presentase sebesar 20.8%; 24.8%; 38.7%, sedangkan untuk nilai koefisien *lift RMS* (C_L') terjadi peningkatan pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 sebesar 31.63%; 35.64%; 46.94%. Dari penjelasan sebelumnya dapat diketahui bahwa nilai koefisien *lift* terkecil dihasilkan pada *smooth circular* dan nilai koefisien *lift* terbesar dihasilkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$, selain itu dapat diketahui juga nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan pada *smooth circular cylinder* dan nilai koefisien *drag* terbesar dihasilkan pada *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$.



Gambar 4. 4 Grafik Koefisien *Drag* (C_D) dan Koefisien *Lift* (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 2 \times 10^4$: (a) *Smooth Circular Cylinder*, (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$, (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Informasi yang didapatkan dari penjelasan sebelumnya menjelaskan bahwa peningkatan gaya *lift* terbesar terjadi pada variasi *circular cylinder* dengan penambahan *wire* di daerah *leeward*, namun reduksi gaya *drag* justru semakin berkurang pada seluruh variasi *circular*

cylinder akibat dari penambahan *wire* seiring dengan peningkatan diameter *wire* di daerah *leeward circular cylinder*. Amplitudo koefisien *drag* (C_D) terhadap nilai rata-rata untuk *circular cylinder* dengan penambahan *wire* juga lebih tinggi, sekitar 1.15 kali dari nilai *smooth circular cylinder*, sedangkan amplitudo koefisien *lift* (C_L) terhadap nilai rata-rata untuk *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 juga lebih tinggi sekitar 1.3 kali.



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift RMS* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 2×10^4

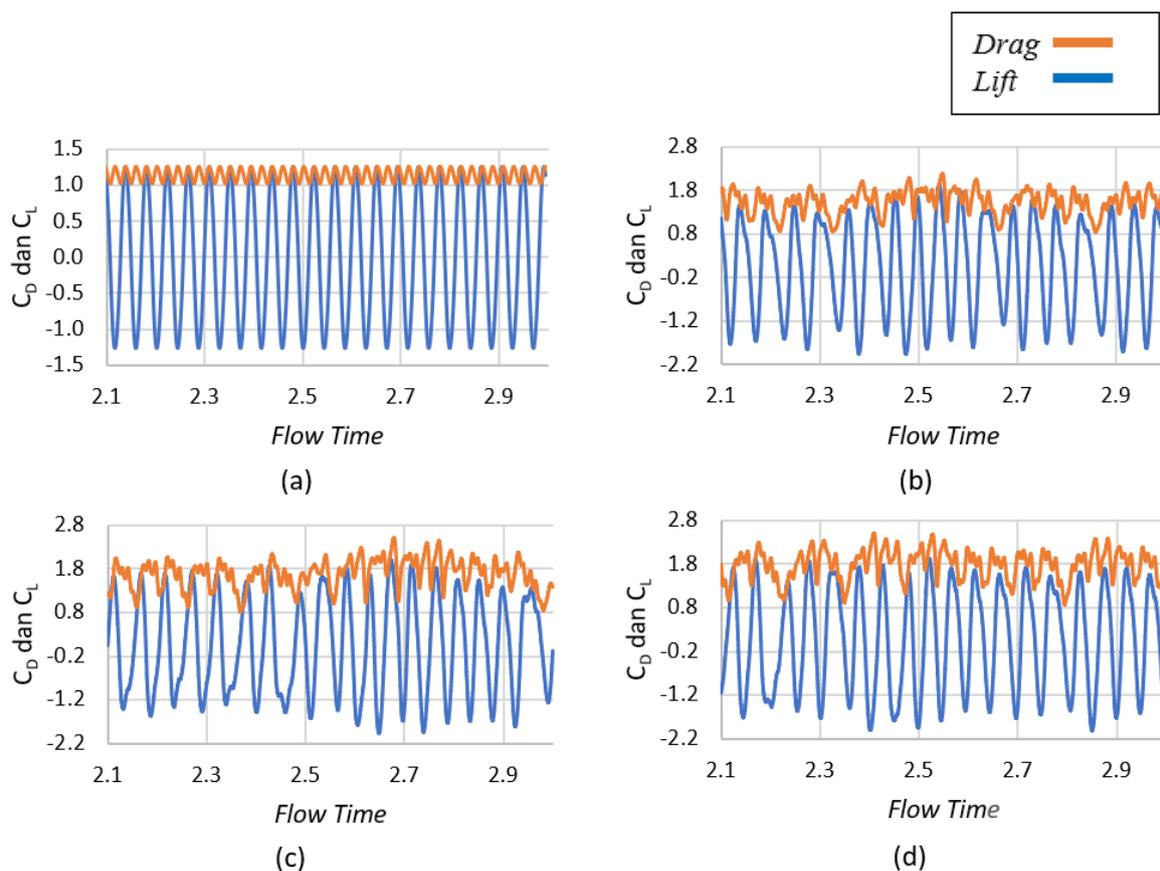
4.2.1.3 Koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi diameter *wire* pada bilangan Reynolds 4×10^4

Nilai koefisien *drag* dan Koefisien *lift* dari hasil simulasi numerik yang akan dijelaskan dibawah ini berdasarkan angka Reynolds = 4×10^4 untuk setiap variasi geometri *circular cylinder* pada penelitian ini yang akan dijabarkan dalam bentuk grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) fungsi waktu yang dilengkapi dengan grafik perbandingan rata-rata nilai koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) beserta rata-rata koefisien *lift RMS* (C_L').

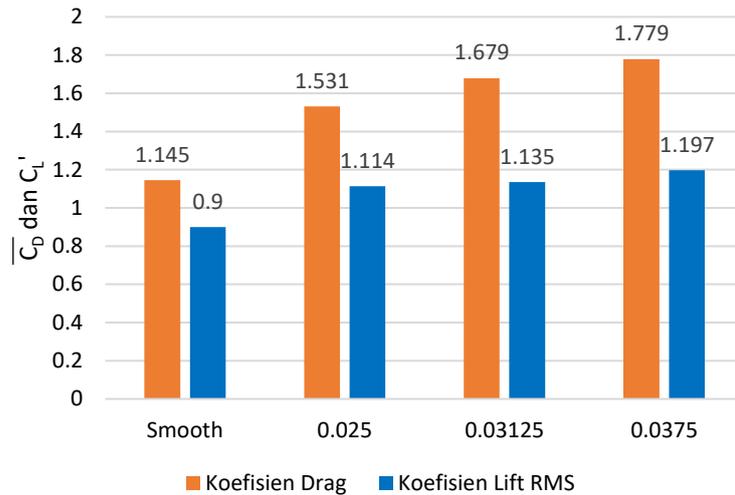
Gambar 4.6 menunjukkan grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu untuk *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* pada $Re = 4 \times 10^4$. Data koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) diambil pada *flow time* 2.1 – 3 sekon. Pengambilan data dilakukan pada *flow time* tersebut dikarenakan aliran sudah mencapai kondisi *steady state* dengan ditandai tidak terjadi perbedaan pola setiap gelombang dalam grafik koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* (C_L) sesaat sebagai fungsi waktu. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 terlihat untuk *smooth circular cylinder* memiliki nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.145 dan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 0.9. Pada Gambar 4.7 untuk setiap konfigurasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 menunjukkan nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) sebesar 1.531; 1.679; 1.779, sedangkan nilai koefisien *lift RMS* (C_L') sebesar 1.114; 1.135; 1.197. Berdasarkan dari data yang diperoleh, apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, maka pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 untuk nilai rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) terjadi peningkatan nilai dengan presentase sebesar 25.2%; 31.8%; 35.63%, sedangkan untuk nilai koefisien *lift RMS* (C_L') terjadi peningkatan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 sebesar 19.2%; 20.7%; 24.8%. Dari penjelasan sebelumnya

dapat diketahui bahwa nilai koefisien *lift* terkecil dihasilkan pada *smooth circular* dan nilai koefisien *lift* terbesar dihasilkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$, selain itu dapat diketahui juga nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan pada *smooth circular cylinder* dan nilai koefisien *drag* terbesar dihasilkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan $d/D = 0.0375$. Hal ini menjelaskan bahwa peningkatan gaya *lift* terbesar terjadi pada variasi *circular cylinder* dengan penambahan *wire* di daerah *leeward*, namun reduksi gaya *drag* justru semakin berkurang pada seluruh variasi *circular cylinder* akibat dari penambahan *wire* seiring dengan peningkatan diameter *wire* di daerah *leeward circular cylinder*.

Amplitudo koefisien *drag* (C_D) terhadap nilai rata-rata untuk *circular cylinder* dengan penambahan *wire* juga lebih tinggi, sekitar 1.03 kali dari nilai *smooth circular cylinder*, sedangkan amplitudo koefisien *lift* (C_L) terhadap nilai rata-rata untuk *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 juga lebih tinggi sekitar 1.03 kali.



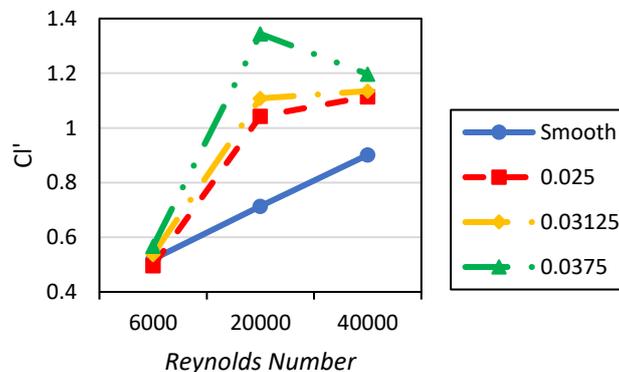
Gambar 4. 6 Grafik Koefisien *Drag* (C_D) dan Koefisien *Lift* (C_L) Fungsi Waktu pada $Re_D = 4 \times 10^4$: (a) *Smooth Circular Cylinder*, (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$, (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$



Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift RMS* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 4×10^4

4.2.1.4 Perbandingan nilai koefisien *lift rms* dan koefisien *drag* rata-rata pada *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi *d/D* 0.025, 0.03125, 0.0375 pada bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4

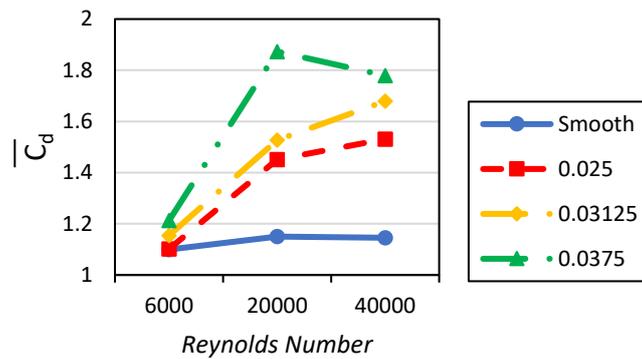
Pada penelitian ini juga turut membandingkan nilai rata-rata koefisien *Lift RMS* setiap konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6000, 20000 dan 40000, untuk mengetahui variasi diameter *wire* yang mampu menghasilkan koefisien *Lift RMS* terbesar sehingga mampu meningkatkan gaya *lift* yang lebih baik dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* pada setiap Bilangan Reynolds. Besarnya koefisien *lift RMS* terhadap Bilangan Reynolds ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik Perbandingan Nilai Koefisien *Lift RMS* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4

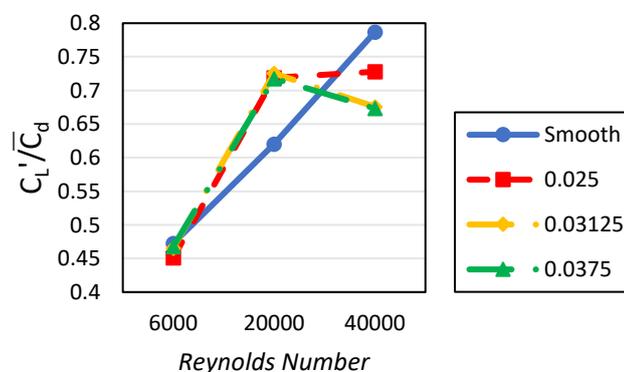
Pada Gambar 4.8 terlihat nilai koefisien *lift RMS* mengalami peningkatan pada seluruh konfigurasi pada Bilangan Reynolds 20000 dan 40000. Pada Bilangan Reynolds 6000 seluruh konfigurasi mengalami kenaikan nilai koefisien *lift RMS* terhadap *smooth circular cylinder*, kecuali konfigurasi *wired circular cylinder* dengan *d/D* sebesar 0.025, nilai koefisien *lift RMS* sedikit mengalami penurunan sebesar 4.43% apabila dibandingkan dengan nilai koefisien *lift RMS smooth circular cylinder*. Nilai koefisien *lift RMS* terbesar pada setiap Bilangan Reynolds dihasilkan pada variasi *d/D* = 0.0375, dimana pada Bilangan Reynolds 20000 variasi *d/D* =

0.0375 menghasilkan nilai koefisien *lift RMS* yang paling besar yaitu bernilai 1.344. Nilai koefisien *lift RMS* terkecil pada setiap Bilangan Reynolds untuk variasi penambahan *wire* di daerah *leeward circular cylinder* dihasilkan pada variasi $d/D = 0.025$. Hal ini menjelaskan bahwa peningkatan gaya *lift* yang terjadi pada hampir setiap konfigurasi seiring dengan peningkatan diameter *wire* di daerah *leeward circular cylinder*. Gambar 4.8 secara tidak langsung menunjukkan bahwa dengan penambahan *wire* di daerah *leeward circular cylinder* dapat meningkatkan nilai $C_{L\ RMS}$ cukup efektif, dibuktikan dengan semakin meningkatnya nilai $C_{L\ RMS}$ pada hampir setiap konfigurasi.



Gambar 4. 9 Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4

Pada penelitian ini juga turut membandingkan nilai rata-rata koefisien *drag* seluruh konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6000, 20000 dan 40000, untuk mengetahui variasi diameter *wire* yang mampu menghasilkan koefisien *drag* terkecil sehingga mampu mereduksi gaya *drag* yang lebih baik dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* pada setiap Bilangan Reynolds. Sesuai dengan hasil yang didapat pada Gambar 4.9, untuk seluruh konfigurasi pada setiap Bilangan Reynolds memiliki nilai koefisien *drag* yang lebih besar apabila dibandingkan dengan nilai koefisien *drag* yang dihasilkan *smooth circular cylinder*. Nilai koefisien *drag* terbesar pada setiap Bilangan Reynolds dihasilkan pada variasi d/D 0.0375, dimana pada Bilangan Reynolds 20000 variasi d/D 0.0375 menghasilkan nilai koefisien *drag* yang paling besar yaitu bernilai 1.873.



Gambar 4. 10 Grafik Perbandingan Nilai Koefisien *Lift RMS* dengan Nilai Rata-Rata Koefisien *Drag* setiap Konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 , 4×10^4

Pada penelitian ini juga membandingkan ratio nilai koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata Koefisien *drag* seluruh konfigurasi pada Bilangan Reynolds 6000, 20000 dan 40000, untuk mengetahui variasi diameter *wire* yang mampu menghasilkan *ratio* yang paling efektif dalam menghasilkan getaran arah transversal apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 pada Bilangan Reynolds 6000 dan 40000, seluruh variasi diameter *wire* yang diletakkan pada daerah *leeward circular cylinder* kurang cukup efektif dalam menghasilkan getaran untuk menghasilkan energi listrik, hal ini dikarenakan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ yang didapat pada seluruh konfigurasi variasi diameter *wire* bernilai lebih rendah dari nilai $C_L'/\overline{C_D}$ *smooth circular cylinder*, dimana *smooth circular cylinder* mampu menghasilkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling besar dengan nilai 0.473 pada Bilangan Reynolds 6000 dan 0.787 pada Bilangan Reynolds 40000, sehingga pada Bilangan Reynolds tersebut *smooth circular cylinder* memiliki performa terbaik dalam menghasilkan getaran untuk menghasilkan energi listrik apabila ditinjau dari gaya aerodinamik. Pada Bilangan Reynolds 20000, terlihat pada gambar 4.10 hampir seluruh variasi diameter *wire* memiliki nilai $C_L'/\overline{C_D}$ lebih besar dari *smooth circular cylinder*. Diketahui dari gambar 4.10 variasi $d/D = 0.03125$, pada Bilangan Reynolds 20000 memiliki nilai $C_L'/\overline{C_D}$ lebih besar dari variasi lainnya dengan nilai 0.725 dengan peningkatan nilai sebesar 14.5% apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Pada variasi $d/D = 0.025$ dan $d/D = 0.0375$ dengan Bilangan Reynolds 20000 memiliki nilai $C_L'/\overline{C_D}$ bernilai 0.718 dan 0.717 dengan peningkatan nilai sebesar 13.7% dan 13.6% apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Hal ini menunjukkan dengan penambahan *wire* di daerah *leeward circular cylinder* pada Bilangan Reynolds 20000 secara efektif dapat meningkatkan performa dalam menghasilkan getaran *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan performa dari *smooth circular cylinder* terutama pada variasi $d/D = 0.03125$.

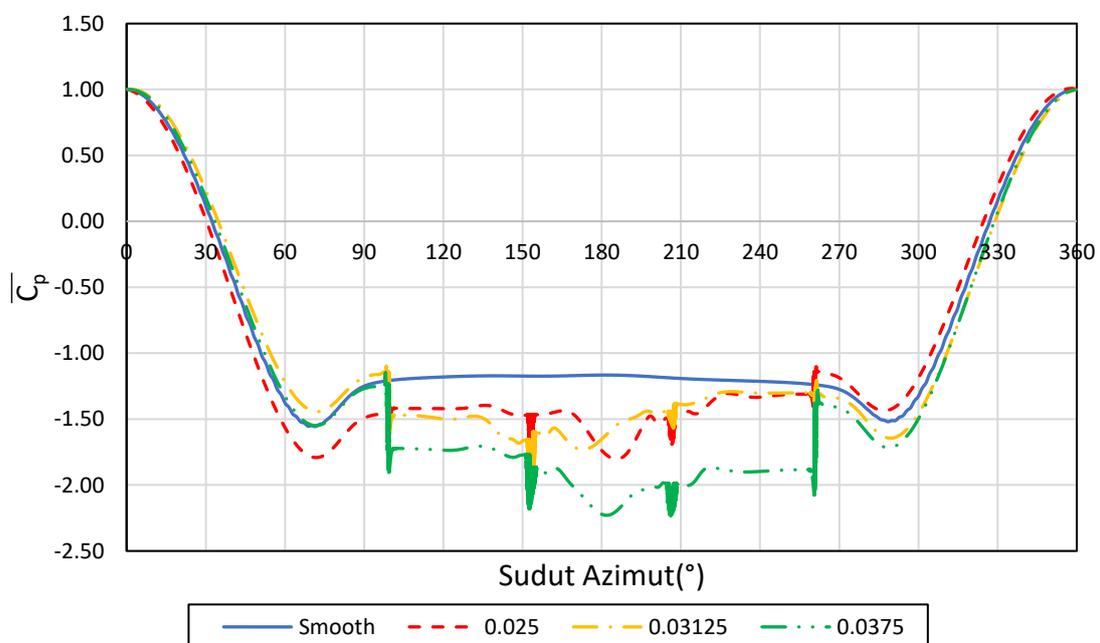
4.2.2 Analisa koefisien *pressure* (C_p)

Pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa variasi $d/D = 0.03125$ yang diletakkan pada daerah *leeward circular cylinder* dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 memberikan performa terbaik dalam menghasilkan getaran apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Pada subbab ini akan dijelaskan lebih detail terkait koefisien *pressure circular cylinder* yang terjadi terhadap sudut azimut. Data koefisien *pressure* setiap variasi *circular cylinder* didapat dari data koefisien *pressure* sesaat pada setiap titik dalam satu gelombang koefisien *lift* sesaat fungsi waktu (Jumlah titik sebanyak 12) yang kemudian diolah menjadi koefisien *pressure* rata-rata ($\overline{C_p}$).

Gambar 4.11 merupakan grafik perbandingan distribusi tekanan antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi $d/D = 0.025, 0.03125, 0.0375$ pada Bilangan Reynolds 2×10^4 . Terlihat pada Gambar 4.11 grafik distribusi tekanan pada sisi *upper side* dan *lower side* variasi diameter *wire circular cylinder* memiliki bentuk yang berbeda dengan grafik distribusi tekanan *smooth circular cylinder*. Pada gambar 4.1 terlihat setelah titik stagnasi ($\overline{C_p} = 1$) pada seluruh variasi *circular cylinder* aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik C_p hingga aliran memiliki kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan paling rendah. Pada *upper side* aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 75° , sedangkan pada *lower side* aliran mengalami kecepatan maksimum pada sudut sekitar 285° . Aliran kemudian mengalami perlambatan akibat adanya adanya *adverse pressure gradient* yang ditandai dengan terjadinya peningkatan nilai distribusi tekanan. Pada sudut tertentu aliran mulai tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* dan gesekan yang terjadi, sehingga aliran mengalami separasi yang ditandai dengan

nilai koefisien tekanan yang mulai *steady*. Pada *smooth circular cylinder* separasi terjadi pada sudut 87° untuk *upper side* dan sudut 271° untuk *lower side*. Pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 untuk *upper side* masing-masing titik sparasi terjadi pada sudut 92° , 94° , 95° . Pada sisi *lower side* masing-masing titik sparasi terjadi pada sudut 268° , 267° , 265° .

Terlihat grafik distribusi tekanan untuk d/D 0.025 terjadi penurunan yang tajam pada sudut *wire* 260° , sedangkan untuk variasi d/D 0.03125 terjadi penurunan yang tajam pada sudut *wire* 100° dan variasi diameter d/D 0.0375 pada sudut 100° dan sudut 260° . Hal ini dikarenakan efek dari penempatan *wire*. Penurunan distribusi tekanan secara tajam di daerah sudut *wire* mengindikasikan bahwa *wire* memberikan efek pada *boundary layer* sehingga momentum aliran dalam *boundary layer* meningkat. Momentum *boundary layer* meningkat menyebabkan aliran yang telah terseparasi *re-attachment* di permukaan *wire*. Pada titik tertentu di daerah *wire*, momentum aliran tidak sanggup melawan *wall shear stress* pada *wire*, sehingga aliran kembali mengalami separasi di daerah *wire*. Titik separasi terjadi pada sudut dengan nilai yang besar lebih besar pada sisi *upper side*, sedangkan pada sisi *lower side* titik separasi terjadi pada sudut yang lebih kecil. Akibat dari separasi yang terjadi di *wire* menyebabkan *shear layer* yang terbentuk lebih dekat dengan silinder, sehingga menyebabkan *vortex* yang terbentuk lebih dekat dengan *circular cylinder*. Berbeda dengan *smooth circular cylinder*, dimana letak *vortex* cukup jauh dari permukaan *circular cylinder*. Efek *vortex* yang lebih dekat dengan permukaan *circular cylinder* menyebabkan tekanan yang terjadi pada daerah *wake* lebih kecil apabila dibandingkan dengan *vortex* yang letaknya lebih jauh dari permukaan *circular cylinder*, oleh karena itu pada daerah *wake flow* untuk grafik variasi diameter *wire* (daerah *wake flow* ditunjukkan pada sudut azimuth sekitar 102° - 259°) menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan tekanan yang terjadi pada daerah *wake flow smooth circular cylinder*.

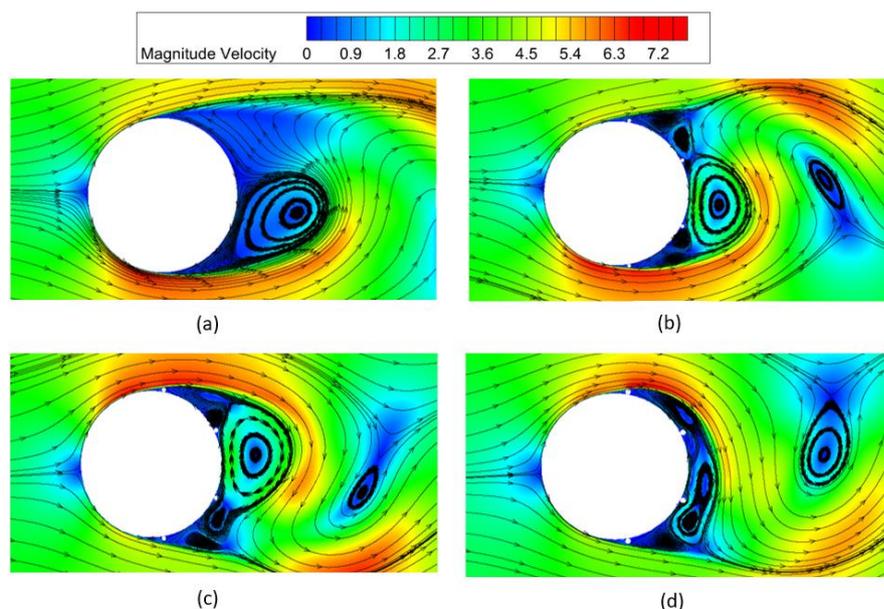


Gambar 4. 11 Grafik Koefisien *Pressure Smooth Circular Cylinder, Wired Circular Cylinder* dengan Variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada Bilangan Reynolds 2×10^4

Pada sudut 153° dan 207° terjadi penurunan tekanan pada variasi diameter *wire*, hal ini dikarenakan *wire* pada sudut tersebut akan memberi gangguan pada *vortex* yang terjadi di daerah *wake*, sehingga momentum *vortex* meningkat dan menyebabkan tekanan pada sudut tersebut turun. Pada gambar 4.11 juga terlihat bahwa grafik koefisien *pressure* untuk variasi diameter *wire* tidak simetris, hal ini menandakan bahwa *vortex* yang terbentuk semakin tidak simetris. Akibat *vortex* yang tidak simetris menyebabkan nilai dari koefisien *lift RMS* meningkat. Terlihat pada grafik koefisien tekanan variasi $d/D = 0.03125$ dan $d/D = 0.0375$ terjadi penurunan tekanan pada sudut 170° dan 181° , hal ini dikarenakan pada sudut tersebut aliran/ *vortex* mengalami percepatan maksimum. Percepatan ini dikarenakan aliran tertarik ke daerah *lower side*, ditandai pada grafik koefisien tekanan yang menunjukkan bagian *lower side* daerah *wake* yang terbentuk lebih lebar dibandingkan daerah *wake* bagian *upper side*. pada grafik koefisien tekanan variasi $d/D = 0.025$ terjadi penurunan tekanan pada sudut 190° , hal ini dikarenakan pada sudut tersebut aliran/ *vortex* mengalami percepatan maksimum. Percepatan ini dikarenakan aliran tertarik ke daerah *upper side*, ditandai pada grafik koefisien tekanan yang menunjukkan bagian *upper side* daerah *wake* yang terbentuk lebih lebar dibandingkan daerah *wake* bagian *lower side*.

4.2.3 Analisa kontur kecepatan, kontur tekanan dan streamlines

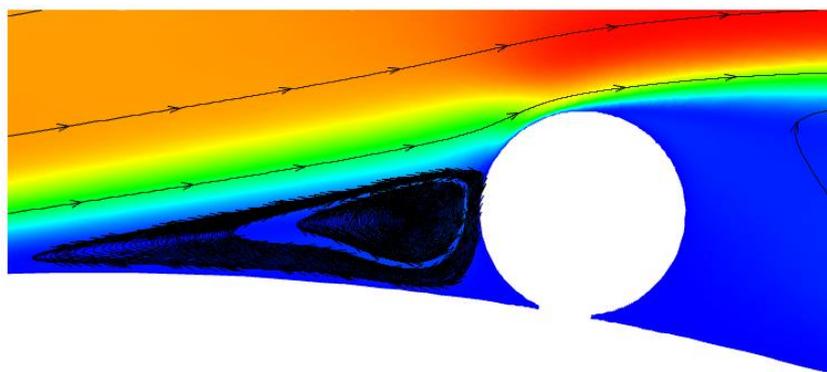
Pada pembahasan subbab sebelumnya diketahui bahwa variasi $d/D = 0.03125$ yang diletakkan pada daerah *leeward circular cylinder* dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 memberikan performa terbaik dalam menghasilkan getaran apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, selain itu informasi lain yang telah didapat bahwa nilai C_L' untuk Bilangan Reynolds 2×10^4 mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya ukuran diameter *wire*. Pada subbab ini akan dianalisis kontur kecepatan sesaat yang dilengkapi dengan *streamlines* dan kontur tekanan sesaat pada posisi puncak dari gelombang koefisien *lift* fungsi waktu untuk mengetahui penyebab nilai C_L *RMS* meningkat pada Bilangan Reynolds 2×10^4 yang telah dibahas pada subbab sebelumnya.



Gambar 4. 12 Kontur Kecepatan Sesaat pada *Peak* Koefisien *Lift* dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 (a) *Smooth Circular Cylinder* (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$ (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Gambar 4.12 menunjukkan bentuk kontur kecepatan relatif beserta *streamlines* aliran yang melewati *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375. Terlihat pada Gambar 4.12 *vortex* yang terjadi di daerah *wake* antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* berbeda. Pada kasus *smooth circular cylinder*, *vortex* yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder*, sedangkan pada *wired circular cylinder*, *vortex* yang terjadi lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* dan tidak simetris. Pada gambar 4.12 (b), (c), dan (d) menunjukkan ketidaksimetrisan *vortex* yang terjadi pada daerah *wake wired circular cylinder*, dimana pada gambar 4.12 (c) dan (d) *vortex* yang terbentuk pada daerah *wake wired circular cylinder* cenderung terbentuk pada satu sisi saja, yaitu sisi *lower side*, sedangkan pada gambar 4.12 (b) *vortex* yang terbentuk pada daerah *wake wired circular cylinder* cenderung terbentuk sisi *upper side*. Hal ini menyebabkan distribusi tekanan yang terjadi pada permukaan *circular cylinder* menjadi tidak lebih merata, sehingga mengakibatkan amplitudo *circular cylinder* menjadi lebih tinggi.

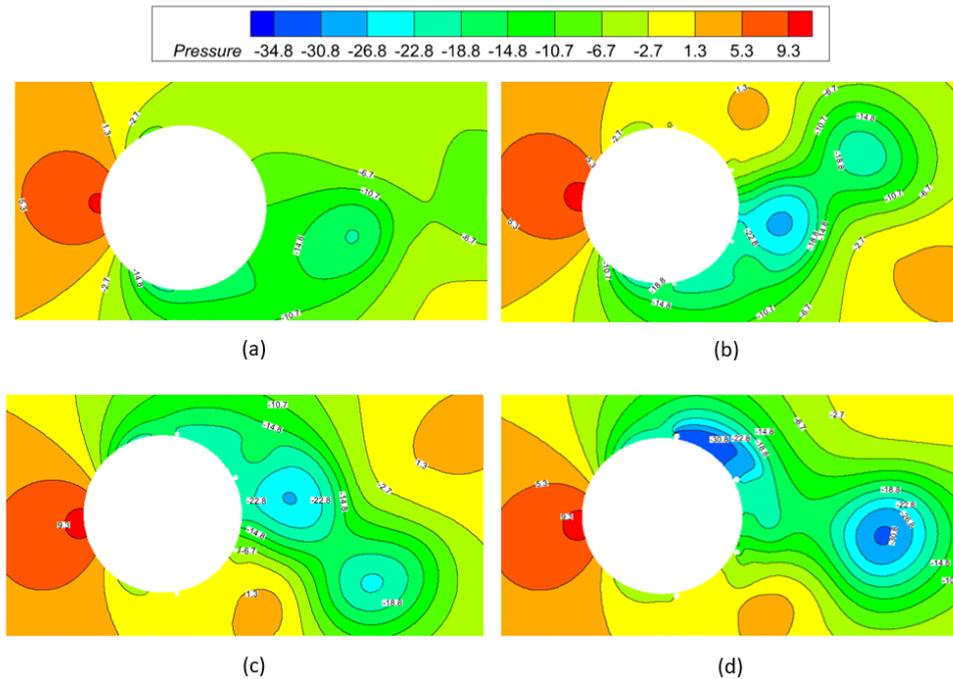
Penyebab *vortex* yang terbentuk pada *wired circular cylinder* di daerah *wake* bisa lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* yaitu dikarenakan titik separasi aliran yang terjadi semakin tertunda akibat efek dari *windward recirculation* yang terbentuk pada posisi sesaat sebelum posisi peletakan *wire* pertama pada sisi *upper side* atau *lower side*. *Windward recirculation* ini berkontribusi dalam meningkatkan momentum aliran sehingga menyebabkan aliran yang telah terseparasi dari permukaan *circular cylinder* mengalami *re-attachment* di permukaan *wire*. Hal ini tentunya berakibat pada penurunan distribusi tekanan secara tajam di daerah sudut *wire* utama pada sisi *upper side* dan *lower side*. Kondisi ini mendukung penjelasan pada subbab sebelumnya mengenai penyebab penurunan distribusi tekanan secara tajam di daerah sudut *wire*. *Windward recirculation* yang terjadi secara jelas ditunjukkan pada Gambar 4.14 (d), dimana terlihat kontur tekanan pada posisi sesaat sebelum posisi *wire* utama sisi *upper side* berwarna biru tua yang mengindikasikan di daerah tersebut tekanan yang terjadi sangat kecil. Tekanan sangat kecil terjadi akibat peningkatan momentum aliran di daerah tersebut yang disebabkan oleh *windward recirculation*. Fenomena *windward recirculation* yang terjadi juga ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Fenomena *Windward Recirculation* pada *Wired Circular Cylinder* dengan Variasi $d/D = 0.0375$ pada Bilangan Reynolds 2×10^4

Pada saat aliran *re-attachment* di permukaan *wire*, di titik tertentu pada permukaan *wire*, momentum aliran tidak sanggup melawan *wall shear stress* pada permukaan *wire*, sehingga aliran kembali mengalami separasi di permukaan *wire*. Titik separasi terjadi pada sudut dengan nilai jauh lebih besar pada sisi *upper side*, sedangkan pada sisi *lower side* titik separasi terjadi

pada sudut yang lebih kecil. Akibat dari separasi yang terjadi di *wire* menyebabkan *shear layer* yang terbentuk lebih dekat dengan silinder, sehingga menyebabkan *vortex* yang terbentuk lebih dekat dengan *circular cylinder*. Berbeda dengan *smooth circular cylinder*, dimana letak *vortex* cukup jauh dari permukaan *circular cylinder* akibat titik separasi aliran terjadi lebih awal.



Gambar 4. 14 Kontur Tekanan pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 2×10^4
 (a) *Smooth Circular Cylinder* (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$ (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Efek dari *vortex* yang terjadi lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* di daerah *wake* menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai rendah. *Low pressure* yang terjadi pada daerah *wake* geometri *wired circular cylinder* ditunjukkan pada Gambar 4.14 (b), (c), dan (d). Terlihat pada Gambar 4.14 (b) dan (c) daerah *wake* sisi *lower side* berwarna hijau muda, hijau toska dan biru tua yang menandakan tekanan pada daerah tersebut kecil. Pada gambar 4.14 (d) terlihat daerah *wake* sisi *upper side* berwarna biru tua, biru muda dan hijau toska. Hal ini menandakan tekanan pada daerah tersebut sangat kecil akibat adanya *vortex* yang sangat dekat pada permukaan *circular cylinder*. Pada Gambar 4.14 terlihat juga pada sisi *windward* mengalami tekanan yang tinggi akibat dari aliran yang mengalami stagnasi pada daerah tersebut, fenomena ditunjukkan pada Gambar 4.14 dengan kontur berwarna merah dan oranye tua. Terjadinya perbedaan tekanan yang besar antara sisi *windward* dan *Leeward* menyebabkan *pressure drag* semakin meningkat. Hal inilah yang menyebabkan pada variasi *wired circular cylinder* juga mengalami peningkatan nilai koefisien *drag*.

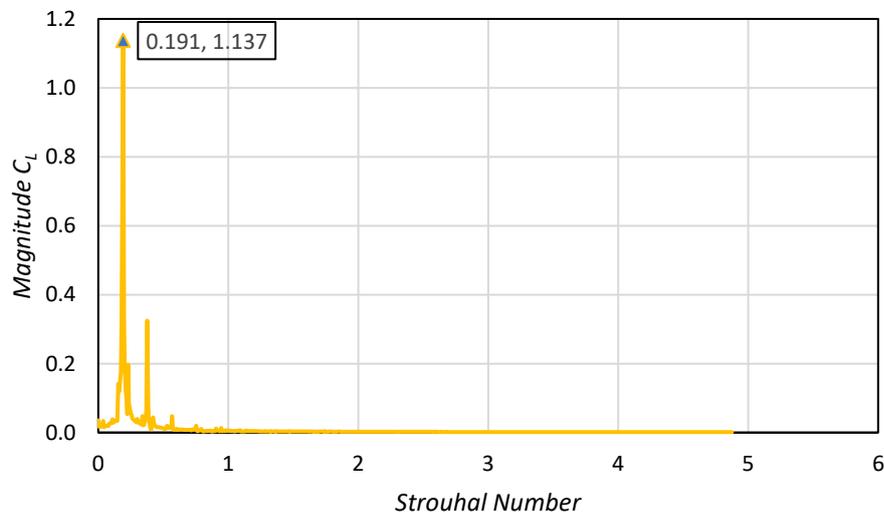
4.2.4 Analisa nilai *strouhal*

Pada Subbab ini akan menganalisa *Strouhal number* pada *smooth circular cylinder* dan variasi *circular cylinder* dengan diberi kekasaran berupa penambahan *wire* didaerah *leeward* dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 dan 4×10^4 .

Tabel 4. 1 *Strouhal Number Smooth Circular Cylinder dan Wired Circular Cylinder pada Bilangan Reynolds 6×10^3 , 2×10^4 dan 4×10^4*

Re	Smooth Circular Cylinder	Wired Circular Cylinder		
	St _D	d/D	St _a	St _a /St _D
6×10^3	0.219	0.025	0.208	0.950
		0.03125	0.205	0.936
		0.0375	0.201	0.918
2×10^4	0.182	0.025	0.215	1.181
		0.03125	0.191	1.049
		0.0375	0.213	1.170
4×10^4	0.244	0.025	0.205	0.840
		0.03125	0.195	0.799
		0.0375	0.205	0.840

Tabel 4.1 menunjukkan *Strouhal number* pada setiap variasi. *Strouhal number* diperoleh dari data koefisien *lift* fungsi waktu yang diolah dengan menggunakan metode *FFT (Fast Fourier Transform)*. Nilai *Strouhal* pada setiap kasus dipilih pada nilai *peak magnitude* terbesar. Pada gambar 4.15 merupakan salah satu contoh grafik *magnitude C_L* terhadap *Strouhal number* pada variasi d/D 0.03125 dengan Bilangan Reynolds 2×10^4 . Terlihat pada gambar 4.15 *peak magnitude* terbesar bernilai 1.137 dengan nilai *Strouhal* sebesar 0.191.



Gambar 4. 15 Grafik *Magnitude C_L* terhadap *Strouhal Number* pada variasi *Wired circular cylinder* d/D 0.03125 dengan Bilangan Reynolds 2×10^4

Pada tabel 4.1 terlihat untuk variasi *wired circular cylinder* dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 menunjukkan nilai *Strouhal* yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. *Strouhal number* terendah adalah $St_a/St_D = 0.918$ pada variasi d/D = 0.0375, sedangkan *Strouhal number* tertinggi adalah $St_a/St_D = 0.950$ pada variasi d/D = 0.025. Pada Bilangan Reynolds 2×10^4 menunjukkan *Strouhal* variasi *wired circular cylinder* bernilai lebih besar apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. *Strouhal number* terendah adalah

$St_d/St_D = 1.049$ pada variasi $d/D = 0.03125$, sedangkan *Strouhal number* tertinggi adalah $St_d/St_D = 1.181$ pada variasi $d/D = 0.025$. Pada Bilangan Reynolds 4×10^4 menunjukkan nilai *Strouhal* variasi *wired circular cylinder* bernilai lebih kecil apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. *Strouhal number* terendah adalah $St_d/St_D = 0.799$ pada variasi $d/D = 0.03125$, sedangkan *Strouhal number* tertinggi adalah $St_d/St_D = 0.840$ pada variasi $d/D = 0.025$ dan $d/D = 0.0375$. Berdasarkan dari data yang telah diperoleh menunjukkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 dan Bilangan Reynolds 4×10^4 tidak dapat meningkatkan kekuatan *vortex shedding* yang terbentuk di daerah *wake*, hal ini dikarenakan nilai *Strouhal* yang didapat bernilai lebih rendah dari nilai *Strouhal smooth circular cylinder*. Pada Bilangan Reynolds 2×10^4 terlihat dengan pemberian *wire* di daerah *leeward circular cylinder* dapat meningkatkan nilai kekuatan *vortex shedding* yang terbentuk di daerah *wake* ditandai dengan nilai *Strouhal* yang bernilai lebih besar dari nilai *Strouhal smooth circular cylinder*.

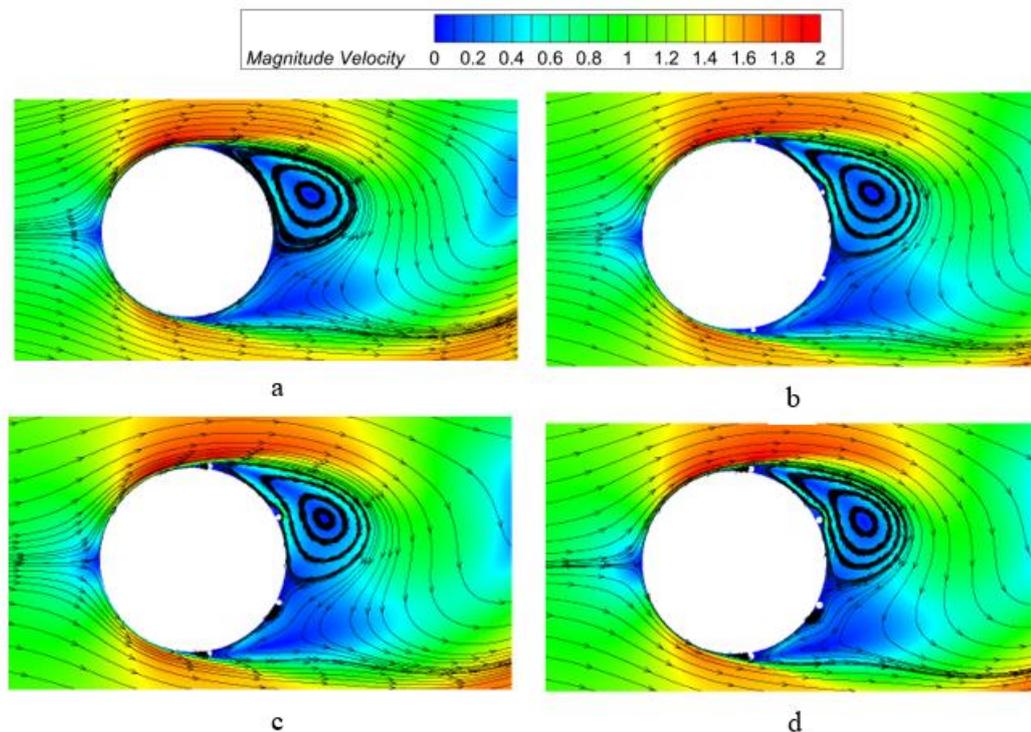
4.2.5 Hasil diskusi

Setelah dilakukan pembahasan terkait hasil penelitian pada subbab sebelumnya, ditemukan beberapa hal penting dari hasil penelitian yang patut untuk ditulis. Pada kasus *bluff body* gaya *drag* disebabkan oleh *pressure drag* dan *friction drag*, dimana *pressure drag* disebabkan oleh *pressure force* yang bekerja pada komponen gaya arah sumbu horizontal dari *circular cylinder* sedangkan *friction drag* disebabkan oleh *friction force* yang bekerja pada komponen gaya arah sumbu horizontal dari *circular cylinder*. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sumer dan Fredsoe (1997) dan Anchenbach (1968, 1971) menyatakan bahwa gaya *drag* yang terjadi pada kasus *smooth circular cylinder* didominasi oleh *pressure drag* yang berkontribusi $> 97\%$ sedangkan pengaruh *friction drag* memiliki pengaruh terhadap gaya *drag* hanya sebesar $1 - 3\%$. Gaya *lift* yang terjadi pada *circular cylinder* dalam penelitian ini juga disebabkan oleh *pressure drag* dan *friction drag*, dimana *pressure drag* disebabkan oleh *pressure force* yang bekerja pada komponen gaya arah sumbu vertikal dari *circular cylinder* sedangkan *friction drag* disebabkan oleh *friction force* yang bekerja pada komponen gaya arah sumbu vertikal dari *circular cylinder*. Dalam penelitian ini gaya *lift* yang terjadi didominasi oleh *pressure drag* yang disebabkan oleh *pressure force* yang bekerja pada komponen gaya arah vertikal dari *circular cylinder*. *Pressure force* yang bekerja pada komponen gaya arah vertikal dari *circular cylinder* bisa terbentuk dikarenakan pusat *vortex* utama yang terbentuk memiliki simpangan yang cukup jauh terhadap sumbu horizontal dari *circular cylinder*, dikarenakan *vortex* utama yang terbentuk memiliki simpangan terhadap sumbu horizontal dari *circular cylinder* sehingga menyebabkan *pressure force* yang terjadi memiliki komponen gaya arah vertikal dan komponen gaya arah horizontal. Semakin jauh simpangan yang terjadi pada *vortex* utama yang terbentuk terhadap sumbu horizontal dari *circular cylinder* maka semakin besar nilai komponen gaya arah vertikal akibat *pressure force* yang meningkat, sehingga menyebabkan gaya *lift* yang terjadi pada *circular cylinder* juga meningkat.

Pada penelitian ini terlihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ yang ditunjukkan Gambar 4.10 pada seluruh variasi setiap bilangan Reynolds memiliki nilai yang berbeda-beda. Hal ini dikarenakan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ tergantung pada masing-masing nilai C_L' dan $\overline{C_D}$ yang dihasilkan dari seluruh variasi geometri *circular cylinder* pada setiap bilangan Reynolds. Nilai C_L' dan $\overline{C_D}$ yang dihasilkan dari seluruh variasi geometri *circular cylinder* pada setiap bilangan Reynolds tidak memiliki hubungan yang linier sehingga nilai $C_L'/\overline{C_D}$ yang dihasilkan juga memiliki nilai yang berbeda-beda. Pada kasus bilangan Reynolds 6000 terlihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada

variasi *smooth circular cylinder* dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.473. Pada kasus bilangan Reynolds 20000 terlihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.725. Pada kasus bilangan Reynolds 40000 terlihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada variasi *smooth circular cylinder* dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.787.

Pada kasus bilangan Reynolds 6000, seperti yang diketahui sebelumnya nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada variasi *smooth circular cylinder* dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.473. Pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 didapatkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ berturut-turut sebesar 0.451; 0.466; 0.468. Telihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling rendah didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025.



Gambar 4. 16 Kontur Kecepatan Sesaat pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 (a) *Smooth Circular Cylinder* (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$ (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Gambar 4.16 menunjukkan bentuk kontur kecepatan relatif beserta *streamlines* aliran yang melewati *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375. Terlihat pada Gambar 4.16 antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder*, *vortex* yang terbentuk pada daerah *wake* tidak simetris, dimana cenderung terbentuk pada salah satu sisi saja yaitu sisi *upper side*, selain itu karakteristik *vortex* yang terbentuk antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* sedikit berbeda. Pada kasus *smooth circular cylinder*, *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder*, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 dan d/D 0.0375, *vortex* utama yang terjadi lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* dan simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi sedikit lebih jauh apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* dari sumbu horizontal *circular cylinder*. Pada *wired circular*

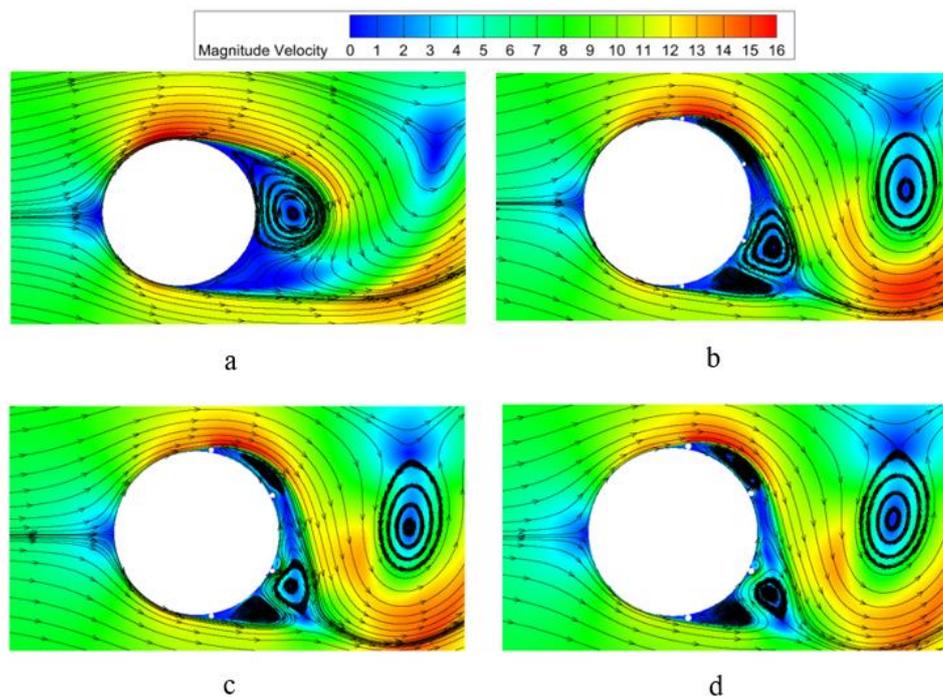
cylinder variasi d/D 0.025 terlihat *vortex* utama yang terjadi lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* dan simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi sedikit lebih dekat dari sumbu horizontal *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Berdasarkan penjelasan sebelumnya didapatkan informasi bahwa nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada variasi *smooth circular cylinder* hal ini dikarenakan $\overline{C_D}$ yang didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder* bernilai paling rendah apabila dibandingkan dengan *wired circular cylinder* yaitu sebesar 1.09 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Nilai $\overline{C_D}$ yang didapatkan rendah pada *smooth circular cylinder* akibat dari *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder* sehingga menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai lebih tinggi apabila dibandingkan dengan dengan *wired circular cylinder*. Pada sisi *windward*, daerah stagnasi memiliki *pressure* yang tinggi. Terjadinya perbedaan tekanan yang lebih kecil pada *smooth circular cylinder* antara sisi *windward* dan *leeward* apabila dibandingkan dengan perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *windward* dan *leeward* pada *wired circular cylinder* menyebabkan *pressure drag* yang terjadi lebih kecil, sehingga menyebabkan $\overline{C_D}$ yang didapatkan bernilai rendah. Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3, walaupun dalam penelitian ini nilai C_L' yang didapatkan pada *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025 bernilai lebih kecil apabila dibandingkan dengan nilai C_L' *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.3125 dan d/D 0.0375 akibat dari simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi sedikit lebih dekat terhadap sumbu horizontal *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.3125 dan d/D 0.0375, namun nilai $\overline{C_D}$ yang didapatkan *wired circular cylinder* bernilai lebih besar dari $\overline{C_D}$ yang didapatkan *smooth circular cylinder*, dimana peningkatan nilai $\overline{C_D}$ *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.03125 dan d/D 0.0375 tidak sebanding dengan peningkatan C_L' sehingga menyebabkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ pada variasi d/D 0.03125 dan d/D 0.0375 bernilai lebih kecil dari *smooth circular cylinder*. Pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025 memiliki nilai $C_L'/\overline{C_D}$ yang paling kecil, hal ini dikarenakan terjadi penurunan nilai C_L' apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* akibat dari simpangan pusat *vortex* utama yang terbentuk sedikit lebih dekat dari sumbu horizontal *circular cylinder*. Selain itu nilai $C_L'/\overline{C_D}$ bernilai paling kecil pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025 dikarenakan terjadi peningkatan nilai $\overline{C_D}$ apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* akibat dari *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih dekat dari permukaan *circular cylinder* sehingga menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai lebih rendah apabila dibandingkan dengan dengan *smooth circular cylinder*. Terjadinya perbedaan tekanan yang lebih besar pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025 antara sisi *windward* dan *leeward* apabila dibandingkan dengan perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *windward* dan *leeward* pada *smooth circular cylinder* menyebabkan *pressure drag* yang terjadi lebih besar, sehingga menyebabkan $\overline{C_D}$ yang didapatkan bernilai besar. Akibat dari nilai C_L' yang lebih rendah dan nilai $\overline{C_D}$ yang bernilai lebih tinggi dari *smooth circular cylinder*, menyebabkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025 memiliki performa aerodinamik yang paling rendah.

Pada kasus bilangan Reynolds 20000, seperti yang diketahui sebelumnya nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada *wired circular cylinder* variasi d/D 0.03125 dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.725. Pada variasi *smooth circular cylinder* didapatkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.62 sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.0375 didapatkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ berturut-turut sebesar 0.719; 0.718. Telihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling rendah didapatkan pada variasi

smooth circular cylinder. Gambar 4.12 menunjukkan bentuk kontur kecepatan relatif beserta *streamlines* aliran yang melewati *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375. Terlihat pada Gambar 4.12 (a) *vortex* yang terbentuk pada daerah *wake smooth circular cylinder* tidak simetris, dimana cenderung terbentuk pada salah satu sisi saja. Pada Gambar 4.12 (b), (c), (d) terlihat terbentuk *vortex* utama pada daerah *leeward* dan kantong *vortex* pada daerah *leeward* sisi *upper* dan sisi *lower*. Karakteristik *vortex* yang terbentuk antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* sedikit berbeda. Pada kasus *smooth circular cylinder*, *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder*, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125 dan 0.0375, *vortex* utama beserta kantong *vortex* yang terjadi lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* dan simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi lebih jauh apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder* dari sumbu horizontal *circular cylinder*. Berdasarkan penjelasan sebelumnya didapatkan informasi bahwa nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125, hal ini dikarenakan $\overline{C_D}$ yang didapatkan pada variasi tersebut memiliki kenaikan nilai paling rendah apabila dibandingkan dengan $\overline{C_D}$ yang didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* yang lainnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Nilai peningkatan $\overline{C_D}$ yang rendah pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 terhadap *wired circular cylinder* variasi d/D 0.025 akibat dari *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung sedikit lebih dekat pada permukaan *circular cylinder* sehingga menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai lebih rendah apabila dibandingkan dengan dengan *wired circular cylinder* variasi d/D 0.025. Pada sisi *windward* daerah stagnasi memiliki *pressure* yang tinggi. Terjadinya perbedaan tekanan yang lebih besar pada *wired circular cylinder* variasi d/D 0.03125 antara sisi *windward* dan *leeward* apabila dibandingkan dengan perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *windward* dan *leeward* pada *wired circular cylinder* variasi d/D 0.025 menyebabkan *pressure drag* yang terjadi lebih besar, sehingga menyebabkan $\overline{C_D}$ yang didapatkan bernilai sedikit lebih besar. Hal ini berbeda pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375, dimana terlihat pada Gambar 4.12 *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung sangat dekat pada hampir seluruh permukaan *circular cylinder* bagian *leeward* sehingga menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai sangat rendah apabila dibandingkan dengan variasi *circular cylinder* lainnya. Pada sisi *windward* daerah stagnasi memiliki *pressure* yang tinggi. Terjadinya perbedaan tekanan yang lebih besar pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375 antara sisi *windward* dan *leeward* apabila dibandingkan dengan perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *windward* dan *leeward* pada variasi *circular cylinder* lainnya menyebabkan *pressure drag* yang terjadi sangat besar, sehingga menyebabkan $\overline{C_D}$ yang didapatkan bernilai lebih besar. Pada Gambar 4.12 (b), (c) dan (d) terlihat terbentuk kantong *vortex* pada variasi *wired circular cylinder*. Kantong *vortex* berperan dalam memberikan tekanan pada sisi *upper* dan sisi *lower* dari *circular cylinder*, sehingga kantong *vortex* juga turut berkontribusi dalam kenaikan komponen arah gaya vertikal dari *circular cylinder* yaitu gaya *lift*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5, dalam penelitian ini nilai C_L' yang didapatkan pada *wired circular cylinder* lebih tinggi dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, dimana pada variasi d/D 0.0375 memiliki nilai C_L' yang lebih besar apabila dibandingkan dengan nilai C_L' *smooth circular cylinder* dan C_L' *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025 dan d/D 0.03125 akibat dari simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi cukup jauh terhadap sumbu horizontal *circular cylinder* dan kantong *vortex* yang terbentuk tidak simetris antara sisi *upper* dan sisi *lower*, sedangkan nilai $\overline{C_D}$ yang didapatkan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375 bernilai

lebih besar dari $\overline{C_D}$ yang didapatkan pada variasi *circular cylinder* lainnya. Peningkatan nilai $\overline{C_D}$ pada variasi *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025 dan d/D 0.0375 tidak sebanding dengan peningkatan C_L' sehingga menyebabkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ pada variasi tersebut bernilai lebih kecil dari *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125.

Pada kasus bilangan Reynolds 40000, seperti yang diketahui sebelumnya nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada variasi *smooth circular cylinder* dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.787. Pada variasi *wired circular cylinder* dengan d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 didapatkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ berturut-turut sebesar 0.728; 0.676; 0.673. Telihat nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling rendah didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375.



Gambar 4. 17 Kontur Kecepatan Sesaat pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 4×10^4 (a) *Smooth Circular Cylinder* (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$ (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$

Gambar 4.17 menunjukkan bentuk kontur kecepatan relatif beserta *streamlines* aliran yang melewati *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375. Terlihat pada Gambar 4.17 antara *smooth circular cylinder* dan *wired circular cylinder*, karakteristik *vortex* yang terbentuk berbeda. Pada kasus *smooth circular cylinder*, *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder*, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 terlihat terbentuk *vortex* utama dan beberapa kantong *vortex* pada sisi *upper* dan sisi *lower circular cylinder* dengan ukuran yang hampir sama dengan *vortex* utama, dimana *vortex* di daerah *wake* yang terbentuk lebih dekat pada hampir seluruh permukaan *circular cylinder* dan simpangan pusat *vortex* utama maupun kantong *vortex* yang terbentuk lebih jauh dari sumbu horizontal *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Berdasarkan penjelasan sebelumnya didapatkan informasi bahwa nilai $C_L'/\overline{C_D}$ paling optimum terjadi pada variasi *smooth circular cylinder*, hal ini dikarenakan $\overline{C_D}$ yang didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder* bernilai paling rendah apabila dibandingkan dengan *wired*

circular cylinder yaitu sebesar 1.145 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai $\overline{C_D}$ yang didapatkan rendah pada *smooth circular cylinder* akibat dari *vortex* utama yang terbentuk di daerah *wake* cenderung lebih jauh dari permukaan *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *vortex* yang terbentuk pada *wired circular cylinder*, sehingga menyebabkan *pressure* pada daerah tersebut bernilai lebih tinggi apabila dibandingkan dengan *wired circular cylinder*. Pada sisi *windward*, daerah stagnasi memiliki *pressure* yang tinggi. Terjadinya perbedaan tekanan yang lebih kecil pada *smooth circular cylinder* antara sisi *windward* dan *leeward* apabila dibandingkan dengan perbedaan tekanan yang terjadi antara sisi *windward* dan *leeward* pada *wired circular cylinder* menyebabkan *pressure drag* yang terjadi lebih kecil, sehingga menyebabkan $\overline{C_D}$ yang didapatkan bernilai rendah. Selain itu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7, walaupun dalam penelitian ini nilai C_L' yang didapatkan pada *smooth circular cylinder* bernilai lebih kecil apabila dibandingkan dengan nilai C_L' *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.3125 dan d/D 0.0375 akibat dari simpangan pusat *vortex* utama yang terjadi sedikit lebih dekat terhadap sumbu horizontal *circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.3125 dan 0.0375, namun nilai $\overline{C_D}$ yang didapatkan *wired circular cylinder* bernilai lebih besar dari $\overline{C_D}$ yang didapatkan *smooth circular cylinder*, dimana peningkatan nilai $\overline{C_D}$ *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.025, 0.03125 dan 0.0375 tidak sebanding dengan peningkatan C_L' sehingga menyebabkan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ pada seluruh variasi *wired circular cylinder* bernilai lebih kecil dari *smooth circular cylinder*.

Pada penelitian ini juga turut dilakukan analisis terhadap daya yang dihasilkan dari sistem *circular cylinder*. Dikarenakan pada penelitian ini *circular cylinder* dianalisa dalam keadaan diam (bukan dalam keadaan bergetar) sehingga ada beberapa variabel yang tidak diketahui besarnya baik pada persamaan 2.20, persamaan 2.21 dan persamaan 2.22 terkait perhitungan daya yang didapatkan dari sistem *circular cylinder* yang bergetar, sehingga penulis hanya bisa melakukan analisa daya berdasarkan hubungan nilai Strouhal atau frekuensi *vortex shedding* terhadap beberapa variabel yang berkaitan dari setiap persamaan dalam memperoleh daya. Berdasarkan Persamaan 2.13 dapat diketahui nilai Strouhal berbanding lurus dengan nilai frekuensi *vortex shedding*, ketika nilai Strouhal besar maka nilai frekuensi *vortex shedding* besar, begitu juga dengan sebaliknya. Pada persamaan 2.20 dapat diketahui bahwa nilai frekuensi *vortex shedding* berbanding terbalik dengan nilai amplitudo *circular cylinder*. Pada persamaan 2.21 dan persamaan 2.22 dapat diketahui bahwa nilai amplitudo *circular cylinder* memiliki nilai yang berbanding lurus dengan kecepatan *circular cylinder* dan kecepatan *circular cylinder* berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan dari sistem *circular cylinder* yang bergetar. Berdasarkan pada penjelasan sebelumnya dapat diketahui nilai frekuensi *vortex shedding* berbanding terbalik dengan daya yang dihasilkan dari sistem *circular cylinder* yang bergetar.

Pada Tabel 4.1 menunjukkan nilai Strouhal yang didapatkan dalam penelitian ini. Pada bilangan Reynolds 6000 terlihat nilai strouhal untuk *smooth circular cylinder* sebesar 0.219, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125 dan d/D 0.0375 memiliki nilai Strouhal sebesar 0.208; 0.205; 0.201. Pada bilangan Reynolds 20000 terlihat nilai strouhal untuk *smooth circular cylinder* sebesar 0.182, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125 dan d/D 0.0375 memiliki nilai Strouhal sebesar 0.215; 0.191; 0.213. Pada bilangan Reynolds 40000 terlihat nilai strouhal untuk *smooth circular cylinder* sebesar 0.244, sedangkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025,

0.03125 dan d/D 0.0375 memiliki nilai Strouhal sebesar 0.205; 0.195; 0.205. Terlihat nilai Strouhal paling kecil pada bilangan Reynolds 6000 didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375, sedangkan nilai Strouhal paling besar didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder*. Pada bilangan Reynolds 20000 terlihat nilai Strouhal paling kecil didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder*, sedangkan nilai Strouhal paling besar didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025. Pada bilangan Reynolds 40000 terlihat nilai Strouhal paling kecil didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125, sedangkan nilai Strouhal paling besar didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder*.

Berdasarkan pada penjelasan sebelumnya diketahui nilai Strouhal berbanding lurus dengan nilai frekuensi *vortex shedding*, sehingga dapat diketahui pada bilangan Reynolds 6000 frekuensi *vortex shedding* paling besar didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder* sedangkan frekuensi *vortex shedding* paling kecil didapatkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375. Pada bilangan Reynolds 20000 frekuensi *vortex shedding* paling besar didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025 sedangkan frekuensi *vortex shedding* paling kecil didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder*. Pada bilangan Reynolds 40000 frekuensi *vortex shedding* paling besar didapatkan pada variasi *smooth circular cylinder* sedangkan frekuensi *vortex shedding* paling kecil didapatkan pada variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125.

Pada penjelasan sebelumnya diketahui bahwa nilai frekuensi *vortex shedding* berbanding terbalik dengan daya yang dihasilkan dari sistem *circular cylinder* yang bergetar, sehingga dapat diketahui pada bilangan Reynolds 6000 daya paling besar dihasilkan oleh *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375 dan daya paling kecil dihasilkan oleh *smooth circular cylinder*. Pada bilangan Reynolds 20000 daya paling besar dihasilkan oleh variasi *smooth circular cylinder* dan daya paling kecil dihasilkan oleh variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025. Pada bilangan Reynolds 40000 daya paling besar dihasilkan oleh variasi variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 dan daya paling kecil dihasilkan oleh variasi *smooth circular*. Dapat diketahui bahwa pada bilangan Reynolds 6000, *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375 merupakan desain yang memiliki performa terbaik dalam menghasilkan energi listrik apabila ditinjau dari besaran daya yang dihasilkan. Pada bilangan Reynolds 20000, variasi *smooth circular cylinder* merupakan desain yang memiliki performa terbaik dalam menghasilkan energi listrik apabila ditinjau dari besaran daya yang dihasilkan, sedangkan pada bilangan Reynolds 40000, variasi *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 merupakan desain yang memiliki performa terbaik dalam menghasilkan energi listrik apabila ditinjau dari besaran daya yang dihasilkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pengaruh variasi diameter *wire* pada performa *circular cylinder* telah dilakukan pada penelitian ini sehingga dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Penambahan *wire* pada daerah *leeward circular cylinder* secara keseluruhan dapat memberikan dampak berupa peningkatan koefisien *lift RMS* (C_L') jika dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Pada bilangan Reynolds 6000 peningkatan koefisien *lift RMS* tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai C_L' sebesar 0.567. Pada bilangan Reynolds 20000 peningkatan koefisien *lift RMS* tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai C_L' sebesar 1.344. Pada bilangan Reynolds 40000 peningkatan koefisien *lift RMS* tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai C_L' sebesar 1.197.
2. Penambahan *wire* pada daerah *leeward circular cylinder* secara keseluruhan dapat memberikan dampak berupa peningkatan rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) jika dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Pada bilangan Reynolds 6000 peningkatan rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai $\overline{C_D}$ sebesar 1.212. Pada bilangan Reynolds 20000 peningkatan rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai $\overline{C_D}$ sebesar 1.873. Pada bilangan Reynolds 40000 peningkatan rata-rata koefisien *drag* ($\overline{C_D}$) tertinggi dialami *wired circular cylinder* pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai $\overline{C_D}$ sebesar 1.779.
3. Penambahan *wire* pada daerah *leeward circular cylinder* dapat memberikan pengaruh pada performa *circular cylinder*. Pada Bilangan Reynolds 6000 terjadi penurunan ratio koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata koefisien *drag* dari *wired circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Penurunan rasio $C_L'/\overline{C_D}$ paling besar terjadi pada variasi d/D 0.025 dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.45. Pada Bilangan Reynolds 20000 terjadi peningkatan ratio koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata koefisien *drag* dari *wired circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Peningkatan rasio $C_L'/\overline{C_D}$ paling besar terjadi pada variasi d/D 0.03125 dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.725. Pada Bilangan Reynolds 40000 terjadi penurunan ratio koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata koefisien *drag* dari *wired circular cylinder* apabila dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Penurunan rasio $C_L'/\overline{C_D}$ paling besar terjadi pada variasi d/D 0.0375 dengan nilai $C_L'/\overline{C_D}$ sebesar 0.673. Peningkatan ratio koefisien *lift RMS* dengan nilai rata-rata koefisien *drag* paling optimum terjadi pada Bilangan Reynolds 2×10^4 , dengan peningkatan $C_L'/\overline{C_D}$ pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 sebesar 13.7; 14.5% dan 13.6%.
4. Penambahan *wire* pada daerah *leeward circular cylinder* tidak memberikan dampak yang signifikan pada nilai Strouhal (St) *circular cylinder*, sehingga frekuensi yang dimiliki masing masing konfigurasi cenderung memiliki nilai yang tidak terlalu jauh berbeda pada bilangan Reynolds yang sama. Pada Bilangan Reynolds 6000 nilai Strouhal paling besar didapatkan pada *smooth circular cylinder* dengan nilai St sebesar 0.219 dan nilai Strouhal paling kecil didapatkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.0375 sebesar 0.201. Pada Bilangan Reynolds 20000 nilai Strouhal paling besar didapatkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D

0.025 sebesar 0.215 dan nilai Strouhal paling kecil didapatkan pada *smooth circular cylinder* sebesar 0.182. Pada Bilangan Reynolds 40000 nilai Strouhal paling besar didapatkan pada *smooth circular cylinder* dengan nilai St sebesar 0.244 dan nilai Strouhal paling kecil didapatkan pada *wired circular cylinder* dengan variasi d/D 0.03125 sebesar 0.195.

5. Dilihat dari karakteristik aliran yang terbentuk berdasarkan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p), kontur kecepatan dan kontur tekanan pada *circular cylinder* dengan penambahan kekasaran permukaan berupa *wire* di daerah *leeward*, terlihat fenomena *vortex* dan kantong *vortex* yang terbentuk pada daerah *wake* tidak simetris. Fenomena tersebut ditandai dengan terbentuknya *windward recirculation* dan *reattachment* aliran pada permukaan *wire*.

5.2 Saran

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

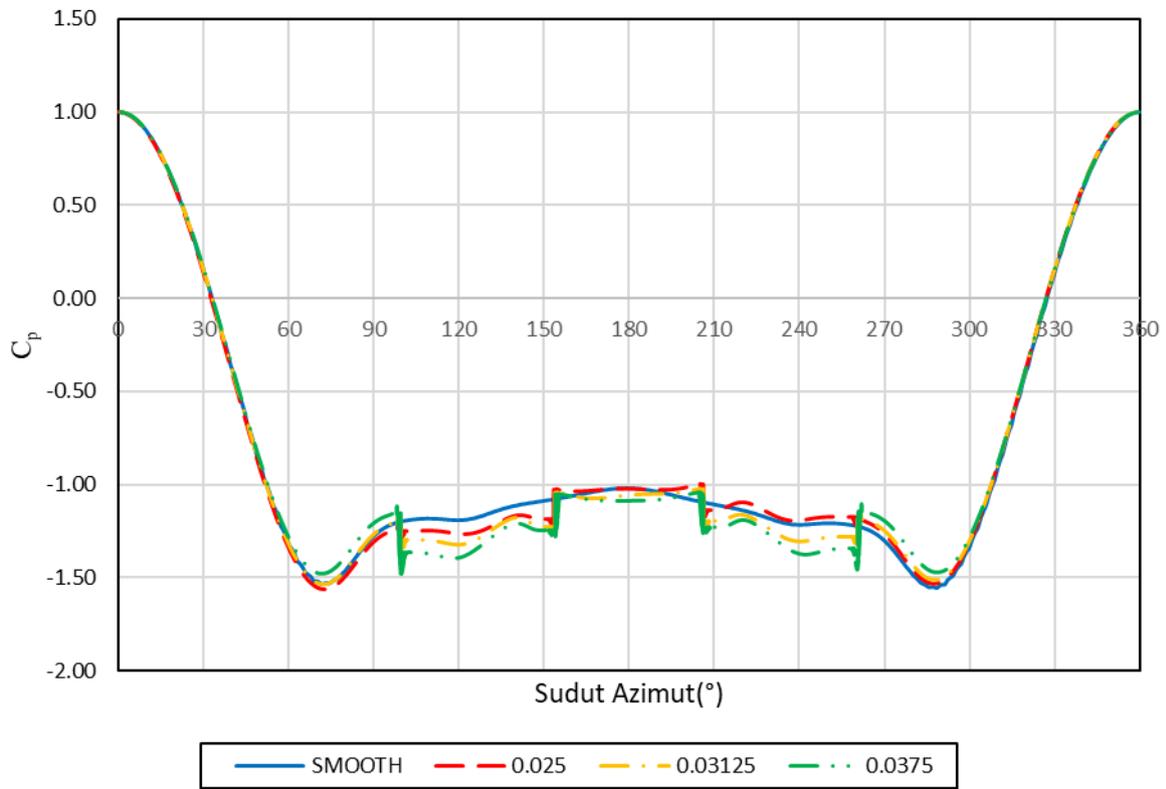
1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut terkait parameter geometri *wire* seperti diameter *wire*, posisi *wire*, dan jumlah *wire* sehingga didapatkan geometri yang optimum.
2. Perlu adanya penelitian tentang *wire* sebagai *active flow control* sehingga didapatkan peningkatan performa yang lebih tinggi.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

DAFTAR PUSTAKA

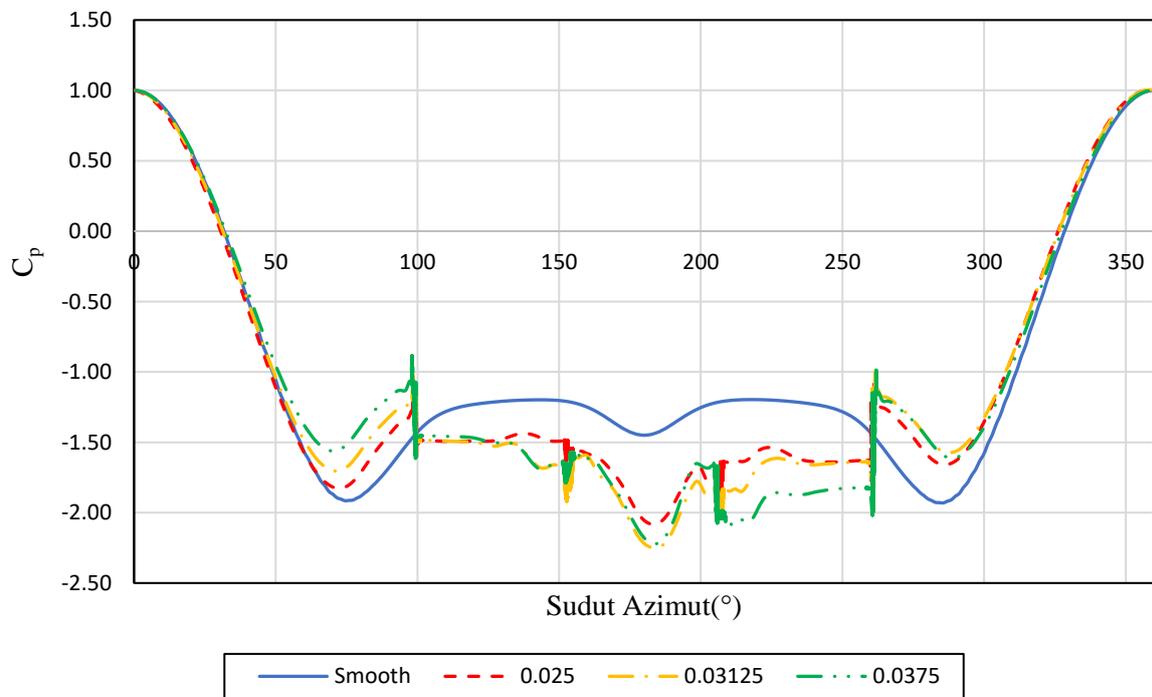
- Achenbach, E., & Heinecke, E. (1981). On Vortex Shedding from Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers 6×10^3 to 5×10^6 . *Journal of Fluid Mechanics*, 109, 239–251
- Arisandi, Biga. 2017. "Analisa Studi Eksperimental Aliran Fluida Melewati Silinder Sirkular dengan Variasi Permukaan Silinder." Tugas Akhir, Surabaya, 80.
- BR, Munson, Okiishi Theodore H, Huebsch Wade W, and Rothmayer Alric P. 2013. "Fundamental of Fluid Mechanics 7th Edition." (ohn Wiley & sons).
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (Third). McGraw-Hill.
- Fernandes, A C, S Mirzaeisefat, and L V Cascao. 2014. "Fundamental Behavior of Vortex Self Induced Vibration (VSIV)." 183-191.
- Fox, R.W., Pritchard, P.J. and McDonald, A.T. 2011. *Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics*. eight ed. Chicester: John Wiley and Sons, Inc
- Govardhan, R, and C.H.K Williamson. 2002. "Resonance Forever: Existence of a Critical Mass and an Infinite Regime of Resonance in Vortex-Induced Vibration." 473: 147-166.
- Gunness, Imogen, Tim Persoons. 2021. *Passive Flow Control for Drag Reduction on a Cylinder in Cross-Flow Using Leeward Partial Porous Coatings*. *Fluids* 2021, 6, 289.
- Hall-stinson, A. (2011). *Energy Generation From Vortex Induced Vibrations*. 240–243.
- J D, Anderson. 2011. *Fundamental of Aerodynamics Fifth Edition*. USA: McGraw-Hill.
- Katopodes, Nikolaos D. 2019. "Free-Surface Flow." *Environmental Fluid Mechanics* 324-426. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815489-2.00005-8>.
- Khalak, Asif, Charles H.K, and Williamson. 1997. "Investigation of Relative Effects of Mass and Damping in Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder." 69-71: 341-350.
- M, Sumer, and Fredsoe J. 2006. "Hydrodynamics Around Cylindrical Structure." (FuIsland Offset Printing (S) Pte Ltd).
- Nishi, Yoshiki, and Luis Antonio Rodrigues Quadrante. 2014. "Amplification/Suppression of Flow-Induced Motions of an Elastically Mounted Circular Cylinder by Attaching Tripping Wires." *Journal of Luids and Structures*.
- Norberg, C. (2003). Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. In *Journal of Fluids and Structures* (Vol. 17).
- Park, H., Bernitsas, M. M., & Kim, E. S. (2014). Selective Surface Roughness to Suppress Flow-Induced Motions of Two Circular Cylinders at $30,000 < Re < 120,000$. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 136(4).
- Pritchard, Philip J., and John C. Leylegian. 2011. *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. United States of America: Copyright Clearance Center, Inc., 222.

- Sarker, MA. 1998. "Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV)." *Flow Meas* 9: 217-227.
- Schewe, G. 1983. "On The Force Fluctuations Acting on A Circular Cylinder in Crossflow from Subcritical Up To Transcritical Reynolds Numbers." *J. Fluid Mech* 133, 265-285.
- Yan, Fei, Haifeng Yang, and Lihui Wang. 2021. "Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface." *Water* 13: 1-20.
- Zdravkovich, M.M. 1981. "Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means For Suppressing Vortex Shedding." *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn* 7, 145-189.
- Zhou, Bo, Yalin Li, Zikun Wang, Wei Guo, and Soon-Keat Tan. 2016. "Experimental Study of Dynamic Drag and Lift Characteristic of Dimpled Cylinders." *Marine Technology Society Journal* 50: 56-61.

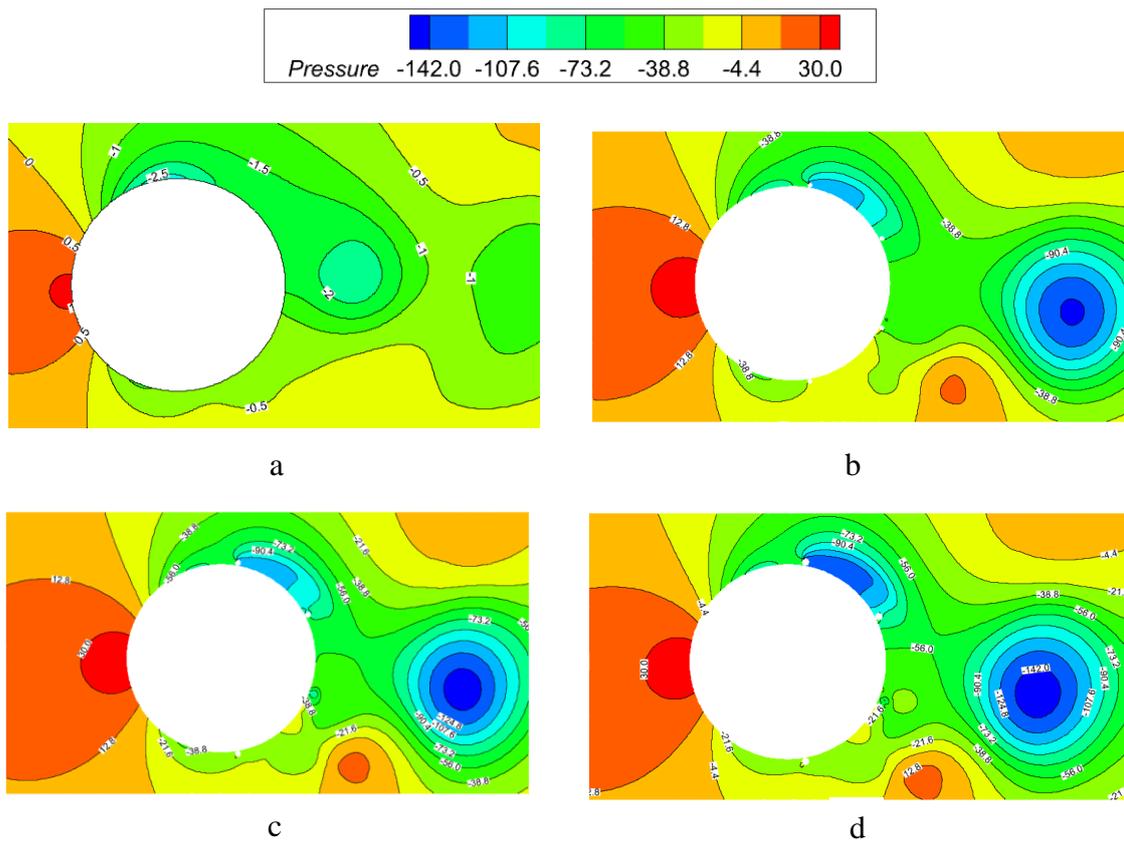
LAMPIRAN



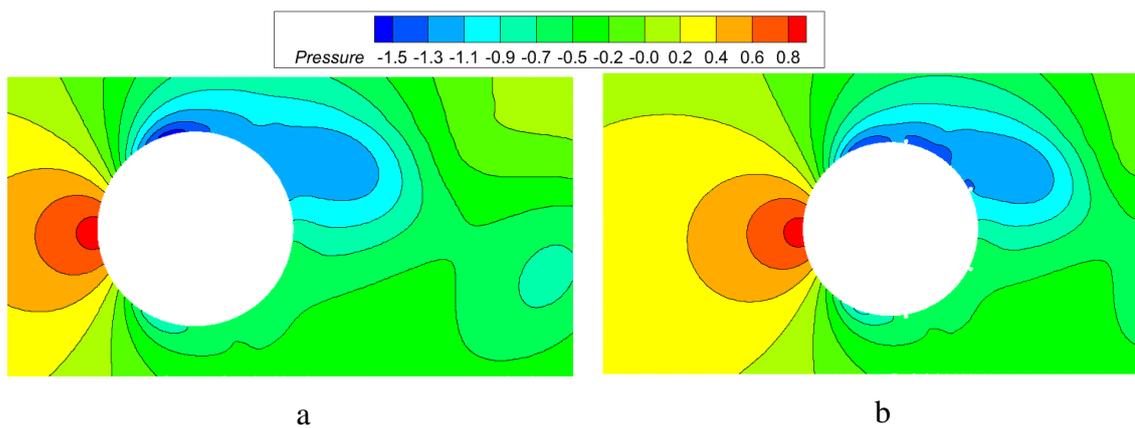
Gambar 1. Grafik Koefisien *Pressure Smooth Circular Cylinder, Wired Circular Cylinder* dengan Variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada Bilangan Reynolds 6×10^3



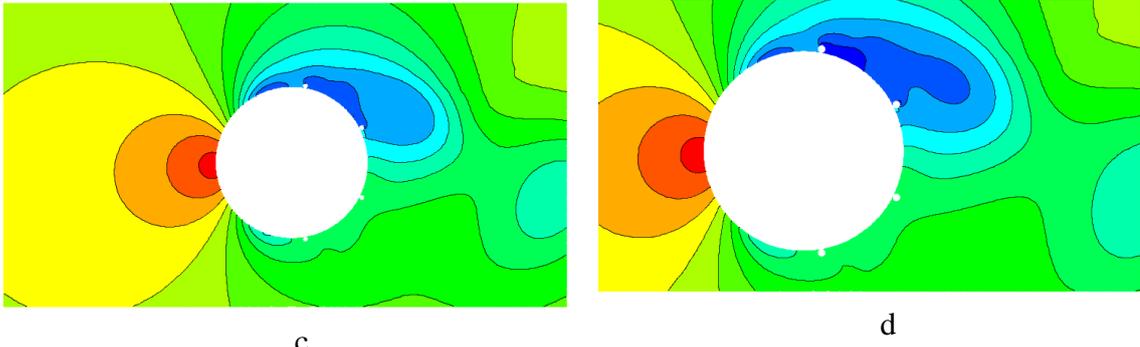
Gambar 2. Grafik Koefisien *Pressure Smooth Circular Cylinder, Wired Circular Cylinder* dengan Variasi d/D 0.025, 0.03125, 0.0375 pada Bilangan Reynolds 4×10^4



Gambar 3. Kontur Tekanan pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 6×10^3 (a) *Smooth Circular Cylinder* (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$ (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$



Gambar 4. Kontur Tekanan pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 4×10^4 (a) *Smooth Circular Cylinder*, (b) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.025$



Gambar 4. Kontur Tekanan pada *Peak Koefisien Lift* dengan Bilangan Reynolds 4×10^4
 (c) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.03125$, dan (d) *Wired Circular Cylinder* $d/D = 0.0375$
(Lanjutan)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan Di Surabaya, 9 Februari 2001, merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal yaitu di SD Muhammadiyah 15 Surabaya, SMP Muhammadiyah 5 Surabaya, dan SMA Muhammadiyah 2 Surabaya. Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 0211184000006.

Di Departemen Teknik Mesin Penulis mengambil Bidang Studi Konversi Energi. Selama menempuh perkuliahan, Penulis turut aktif dalam berbagai kegiatan baik dalam dan luar kampus. Pada tahun pertama perkuliahan, Penulis mendapatkan amanah untuk menjadi staff dalam organisasi JMMI ITS. Pada tahun kedua penulis kembali mendapatkan amanah menjadi *middle* dalam organisasi JMMI ITS dan menjadi *staff* dalam Tim Bayucaraka ITS. Pada tahun ketiga perkuliahan Penulis mendapat amanah untuk menjadi koordinator bidang administrasi Tim Bayucaraka ITS. Penulis juga aktif sebagai Asisten Praktikum Mekanika Fluida Dasar I dan II. Pada tahun ke-4 perkuliahan penulis terlibat dalam program MBKM Kedaireka antara PT PJB UP. Paiton dengan ITS sebagai tim mechanical dalam perancangan turbin Hidrokinetik. Selain itu Penulis juga aktif baik sebagai panitia maupun peserta di beberapa kegiatan kepanitiaan dan pengembangan diri.