

**TUGAS AKHIR - TM184835**

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

**MHD. MUFLIH HABIB RITONGA**

**NRP 02111840000056**

Dosen Pembimbing

**Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.**

**NIP 198105292003122001**

**TEKNIK MESIN**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

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

**MHD. MUFLIH HABIB RITONGA**

NRP 02111840000056

Dosen Pembimbing

**Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.**

NIP 198105292003122001

**TEKNIK MESIN**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



**FINAL PROJECT - TM184835**

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

**MHD. MUFLIH HABIB RITONGA**

**NRP 02111840000056**

Advisor

**Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.**

**NIP 198105292003122001**

**MECHANICAL ENGINEERING**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

## LEMBAR PENGESAHAN

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

### TUGAS AKHIR

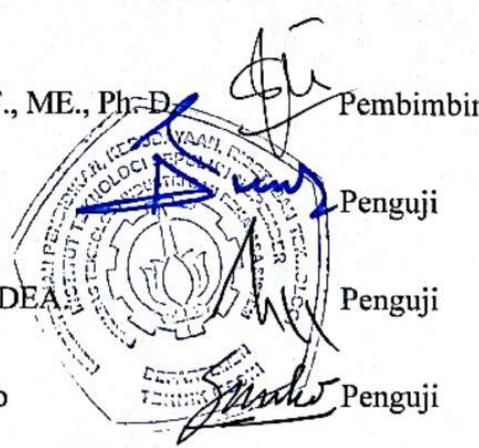
Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat  
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada  
Program Studi S-1 Teknik Mesin  
Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **MHD. MUFLIH HABIB RITONGA**

NRP. 02111840000056

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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



**SURABAYA**

**Juli, 2022**

## APPROVAL SHEET

### NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF THE NUMBER OF WIRES 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 degree Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **MHD. MUFLIH HABIB RITONGA**

NRP. 02111840000056

Approved by Final Project Advisor :

1. Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.  Advisor
2. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng  Examiner
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.  Examiner
4. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko  Examiner

**SURABAYA**

**July, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa / NRP : Mhd. Muflih Habib Ritonga / 0211184000056

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D. /

198105292003122001

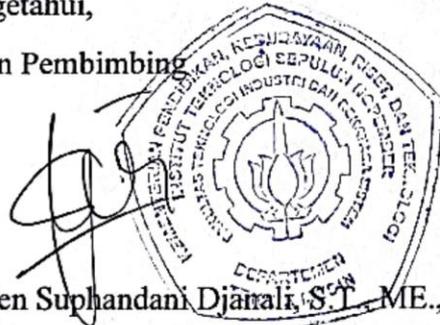
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Jumlah *Wire* terhadap Performa *Circular Cylinder* dengan  $D = 80$  mm dan Variasi *Reynolds Number* untuk *Energy Harvesting* pada *Ducting System*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, 20 Juli 2022

Mengetahui,

Dosen Pembimbing



(Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.)

NIP. 198105292003122001

Mahasiswa,



(Mhd. Muflih Habib Ritonga)

NRP. 0211184000056

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student / NRP : Mhd. Muflih Habib Ritonga / 0211184000056  
Department : Mechanical Engineering  
Advisor / NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D. /  
198105292003122001

hereby declare that the Final Project with the title of “Numerical Study of The Effect of The Number of Wires 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, July 20 2022

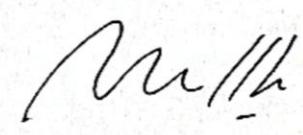
Acknowledged,

Advisor

  
(Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.)

NIP. 198105292003122001

Student,

  
(Mhd. Muflih Habib Ritonga)

NRP. 02111840000056

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

Nama Mahasiswa / NRP : Mhd. Muflih Habib Ritonga / 02111840000056  
Departemen : Teknik Mesin FTIRS - ITS  
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.

**Abstrak**

Ketersediaan dan keterjangkauan energi listrik kini menjadi hal yang sangat diandalkan dalam berbagai aspek kehidupan dan teknologi. Salah satu upaya pemerolehan energi listrik alternatif yang berkelanjutan adalah pemanfaatan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) pada *circular cylinder* sebagai *energy harvesting*. Getaran yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan *piezoelectric transducer*. Desain *cylinder* yang tepat dibutuhkan untuk menghasilkan amplitudo *lift* dan frekuensi yang optimum. Penambahan kekasaran permukaan “*wire*” pada *wake region* merupakan salah satu upaya yang dapat dilakukan. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu analisis untuk mengetahui pengaruh penambahan *wire* pada permukaan *circular cylinder*, serta pengaruh variasi jumlah *wire* terhadap karakteristik aliran, khususnya koefisien *lift* dan *Strouhal number*.

Penelitian dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan menggunakan *software* Ansys Fluent 2021 R2. *Viscous* model yang digunakan pada penelitian ini adalah URANS (*Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes*) dengan model  $k-\omega$  SST (*Shear Stress Transport*). Jenis *cylinder* yang digunakan adalah *circular cylinder* berdiameter 80 mm dengan diameter *wire* seragam sebesar 1 mm. Variasi dilakukan dengan menambahkan kekasaran permukaan *wire* dengan jumlah *wire* 6, 8, dan 10, dengan dua *wire* utama diletakkan pada sudut  $90^\circ$  dan simetri terhadap titik stagnasi, kemudian *wire* lainnya akan ditempatkan pada sisi *leeward* dengan jarak yang sama antar *wire*. Adapun variasi *Reynolds number* yang digunakan adalah  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, penambahan kekasaran permukaan *wire* pada sisi *leeward* efektif dalam meningkatkan nilai  $C_{L\text{RMS}}$  dan  $C_{L\text{RMS}} / \overline{C_D}$ . *Cylinder* dengan 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  mampu meningkatkan nilai  $C_{L\text{RMS}}$  secara maksimal hingga 150% dengan  $C_{L\text{RMS}} = 1,44$ . Sedangkan pada  $Re = 4 \times 10^4$ , *cylinder* hanya mampu meningkatkan nilai  $C_{L\text{RMS}}$  55% pada  $C_{L\text{RMS}} = 1,25$ . Adapun nilai *Strouhal number* mengalami penurunan untuk seluruh variasi. Variasi yang menghasilkan penurunan nilai terbesar adalah *cylinder* dengan 6 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  (sekitar -21,15%). Sedangkan variasi yang mampu meminimalkan penurunan nilai *Strouhal number* adalah *cylinder* dengan 8 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  (sekitar -1,91%).

**Kata kunci:** *Circular Cylinder, Energy Harvesting, Koefisien Lift, Strouhal Number, Vortex-Induced Vibration (VIV)*.

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

**Student Name / NRP** : Mhd. Muflih Habib Ritonga / 0211184000056  
**Department** : Mechanical Engineering FTIRS - ITS  
**Advisor** : Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.

## Abstract

Electrical energy is currently a dependable energy source in many facets of life and engineering due to its availability and accessibility. One of the efforts to obtain sustainable alternative energy is the use of Vortex-Induced Vibration (VIV) in circular cylinders as energy harvesting by collecting energy in nature. A piezoelectric transducer is then used to transform the generated vibrations into electrical energy. The right cylinder design is needed to produce the optimum lift coefficient amplitude and frequency. Adding the surface roughness “wire” to the wake region is one of the possible effort. It is therefore necessary to conduct an analysis to ascertain the impact of wire addition on the surface of the circular cylinder as well as the impact of wire number fluctuations on flow parameters, particularly the lift coefficient and Strouhal number.

The method used for this research is a numerical method using Ansys Fluent 2021 R2 software using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The viscous model used in this study is URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes) with the SST (Shear Stress Transport)  $k-\omega$  model. The type of cylinder used is a circular cylinder with a diameter of 80 mm with a uniform wire diameter of 1 mm. Variations are made by adding the surface roughness of the wire with the number of wires 6, 8, and 10, with the two main wires placed at an angle of  $90^\circ$  and symmetrical to the stagnation point, then another wire will be placed in the leeward side with the same distance between wires. The Reynolds number variations used are  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .

According to the research that has been carried out, the addition of surface roughness “wire” on the leeward side is effective in increasing the values of  $C_{L\text{RMS}}$  and  $C_{L\text{RMS}} / \overline{C_D}$ . Cylinder with 10 wires at  $Re = 6 \times 10^3$  maximally increased  $C_{L\text{RMS}}$  by 150% with  $C_{L\text{RMS}} = 1.44$ . Whereas in  $Re = 4 \times 10^4$ , the cylinder was only able to increase the  $C_{L\text{RMS}}$  value by 55% on  $C_{L\text{RMS}} = 1.25$ . The Strouhal numbers have decreased for all variations. The variation that resulted in the greatest decrease in value was the cylinder with 6 wires at  $Re = 6 \times 10^3$  (about -21.15%). While the variation that is able to minimize the decrease in the Strouhal number value is the cylinder with 8 wires on  $Re = 2 \times 10^4$  (about -1.91%).

**Keywords:** *Circular Cylinder, Energy Harvesting, Koefisien Lift, Strouhal Number, Vortex-Induced Vibration (VIV).*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan izin-Nya, sehingga penulisan Tugas Akhir dengan judul “**Studi Numerik Pengaruh Jumlah Wire terhadap Performa Circular Cylinder dengan  $d = 80$  mm dan Variasi Reynolds Number untuk Energy Harvesting pada Ducting System**” ini terselesaikan sebagai syarat pemerolehan gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Selama pelaksanaan dan penulisan Tugas Akhir ini tentunya banyak bimbingan, petunjuk, nasihat, dan dukungan dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis sampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Shofni Wathy Nasution dan Saparuddin Ritonga atas ridho, do'a, semangat, dan kasih sayang diberikan hingga pada akhirnya Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
2. Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D., selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu menuntun, meluangkan waktu, serta memberikan ilmu, masukan, dan motivasi kepada penulis, sehingga mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat pada waktunya.
3. Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko, Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., dan Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan ilmu, kritik dan saran kepada penulis untuk dapat menyempurnakan Tugas Akhir ini.
4. Mohammad Khoirul Effendi, ST., Msc.Eng., Ph.D., selaku dosen wali yang telah membimbing penulis dalam menjalani proses perkuliahan di Departemen Teknik Mesin ITS.
5. Keluarga penulis, Eka Listya Ritonga, Mhd. Ali Wijaya Ritonga, Ade Yusrina Ritonga, Mhd. Hasry Ritonga, Mhd. Fazry Ritonga, dan anggota keluarga lainnya atas semangat dan do'a yang telah diberikan.
6. Civitas Akademika Teknik Mesin ITS atas dukungan, bimbingan, ajaran, serta bantuan yang telah diberikan selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Mesin, FTI-RS ITS.
7. Sahabat *Brother till Jannah* REBAHN yang selama ini menemani, mendukung, dan memberi semangat hingga saat ini. Sahabat penulis yang selalu ada disaat senyum maupun sedu.
8. Keluarga U.S.G Nurul 'Ilmi FDS 2018, Keluarga Teknik Mesin ITS 2018 (M-61), Keluarga Ash-Shaff 2018, *Athalaric's Family* (SC-6), Keluarga Lab Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida 2018, dan Tim Silinder.
9. Semua pihak yang telah memberikan semangat dan banyak membantu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan, baik dalam segi penulisan, pengambilan data maupun analisis yang dilakukan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan masukan dari semua pihak. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan pembaca untuk perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi masa depan, terutama pada desain *cylinder* untuk *energy harvesting* sebagai

alternatif sumber energi listrik terbarukan dan modern, untuk kehidupan yang lebih bersih dan aman terhadap lingkungan.

Surabaya, 20 Juli 2022

**Penulis**

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	<b>xviii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Penelitian Terdahulu.....	4
2.2 Aliran <i>Inviscid</i> dan <i>Viscous</i> .....	23
2.3 Aliran Internal dan Eksternal.....	23
2.4 Aliran <i>Compressible</i> dan <i>Incompressible</i> .....	23
2.5 Aliran <i>Steady</i> dan <i>Unsteady</i> .....	24
2.6 <i>Reynolds Number</i> .....	25
2.7 <i>Boundary Layer</i> .....	26
2.8 Aliran Melewati <i>Circular Cylinder</i> .....	28
2.8.1 Koefisien <i>Pressure</i> ( $C_p$ ) .....	30
2.8.2 Koefisien <i>Lift</i> ( $C_L$ ).....	31
2.8.3 Koefisien <i>Drag</i> ( $C_D$ ).....	31
2.9 <i>Vortex Shedding</i> .....	32
2.10 <i>Flow-Induced Vibration</i> .....	33
2.11 <i>Energy Harvesting</i> .....	35
<b>BAB 3 METODOLOGI</b> .....	<b>37</b>
3.1 Tahapan Penelitian .....	37
3.2 Tahap <i>Pre-Processing</i> .....	37
3.2.1 Pemodelan Geometri dan Domain Simulasi .....	37
3.2.2 Konfigurasi dan Variasi .....	38

3.2.3	<i>Meshing</i> .....	39
3.3	Tahap <i>Processing</i> .....	42
3.3.1	<i>Grid Independency Test (GIT)</i> .....	43
3.3.2	<i>Time Step Sensitivity</i> .....	44
3.3.3	Validasi.....	45
3.4	Tahap <i>Post-Processing</i> .....	46
3.4.1	Prosedur Pengambilan Data Koefisien <i>Drag</i> dan <i>Lift</i> .....	47
3.4.2	Prosedur Pengambilan Data Koefisien <i>Pressure</i> .....	47
3.4.3	Prosedur Pengambilan Data <i>Strouhal Number</i> .....	47
3.4.4	Prosedur Pengambilan Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, dan <i>Streamlines</i> .....	48
3.5	Diagram Alur Penelitian .....	48
<b>BAB 4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>51</b>
4.1	Analisis Koefisien <i>Lift</i> dan Koefisien <i>Drag</i> .....	51
4.2	Analisis Koefisien <i>Pressure</i> .....	56
4.3	Analisis Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan dan <i>Streamlines</i> .....	59
4.4	Analisis <i>Strouhal Number</i> .....	64
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>66</b>
5.1	Kesimpulan.....	66
5.2	Saran .....	66
	<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>68</b>
	<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>71</b>
	<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>79</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Jenis dan Posisi Kekasaran Permukaan yang dapat Mengganggu <i>Vortex Shedding</i> : (i) <i>Surface Protrusions</i> ((a) <i>Omnidirectional</i> dan (b) <i>Unidirectional</i> ), (ii) <i>Shrouds</i> , (iii) <i>Nearwake Stabilisers</i> ((+) Berefek dan (-) Tidak Berefek) (Zdravkovich, 1981).....	5
<b>Gambar 2.2</b> Geometri <i>Circular Cylinder</i> dengan 2 Buah <i>Wire</i> (Igarashi, 1986).....	6
<b>Gambar 2.3</b> Model <i>Cylinder</i> (dengan 2 <i>Tripwire</i> ) (dimana D adalah diameter <i>wire</i> dan posisi <i>station</i> dari <i>cylinder</i> adalah X/D) (Mamouri et al., 2016). ....	7
<b>Gambar 2.4</b> Model <i>Cylinder</i> dengan 8 Buah <i>Tripwire</i> (Mamouri et al., 2016).....	7
<b>Gambar 2.5.</b> Grafik: (a) <i>Strouhal Number</i> dan (b) Koefisien <i>Drag</i> , untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> dengan Variasi Jumlah <i>Wire</i> dengan $d/D = 0,075$ untuk $Re = 10.000$ dan $Re = 35.000$ (Mamouri et al., 2016). ....	8
<b>Gambar 2.6</b> Geometri Penampang <i>Cylinder</i> dengan <i>Wire</i> (Quadrante & Nishi, 2014).....	8
<b>Gambar 2.7</b> Skema Ilustrasi Eksperimen terhadap <i>Circular Cylinder</i> dengan <i>Wire</i> (Quadrante & Nishi, 2014). ....	9
<b>Gambar 2.8</b> Pengukuran Data untuk Tes <i>Cylinder</i> Diam. (a) Koefisien <i>Lift</i> , (b) Koefisien <i>Drag</i> , (c) <i>Strouhal Number</i> terhadap Posisi Angular <i>Wire</i> (Quadrante & Nishi, 2014). ....	10
<b>Gambar 2.9</b> Amplitudo <i>Plain Cylinder</i> terhadap Penurunan Kecepatan ( $^{\circ}$ ) Dibandingkan dengan Hasil Penelitian Khalak A & Williamson C.H.K. (1997) ( $\bullet$ ) (Quadrante & Nishi, 2014).....	11
<b>Gambar 2.10</b> (a) Amplitudo (b) Frekuensi Akibat Getaran <i>Cylinder</i> Terhadap Penurunan Kecepatan $\circ$ : <i>plain cylinder</i> , $\square$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 60^{\circ}$ , and $\blacktriangle$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 75^{\circ}$ (Quadrante & Nishi, 2014). ....	11
<b>Gambar 2.11</b> (a) Koefisien <i>Lift</i> (b) Koefisien <i>Drag</i> Akibat Getaran <i>Cylinder</i> terhadap Penurunan Kecepatan $\circ$ : <i>Plain Cylinder</i> , $\square$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 60^{\circ}$ , dan $\blacktriangle$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 75^{\circ}$ (Quadrante & Nishi, 2014). ....	12
<b>Gambar 2.12</b> (a) Koefisien <i>Lift</i> (b) Koefisien <i>Drag</i> Akibat Getaran <i>Cylinder</i> terhadap Penurunan Kecepatan $\circ$ : <i>Plain Cylinder</i> , $\square$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 120^{\circ}$ , dan $\blacktriangle$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 105^{\circ}$ (Quadrante & Nishi, 2014). ....	12
<b>Gambar 2.13</b> (a) Amplitudo (b) Frekuensi Akibat Getaran <i>Cylinder</i> terhadap Penurunan Kecepatan $\circ$ : <i>Plain Cylinder</i> , $\square$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 120^{\circ}$ , dan $\blacktriangle$ : <i>Wire</i> pada $\beta= 105^{\circ}$ (Quadrante & Nishi, 2014). ....	13
<b>Gambar 2.14</b> Variasi Kekasaran Permukaan <i>Circular Cylinder</i> : (a) <i>Net</i> , (b) <i>Dimples</i> , (c) Gambar Detail <i>Dimple</i> (Zhou et al., 2015).....	14
<b>Gambar 2.15</b> Variasi Kekasaran Permukaan dengan Menggunakan Amplas (Zhou et al., 2015).....	14
<b>Gambar 2.16</b> Koefisien <i>Drag</i> dan Koefisien <i>Lift</i> pada $Re = 12.080$ (Zhou, 2014). ....	15
<b>Gambar 2.17</b> Grafik $C_D$ vs $Re$ untuk <i>Smooth</i> , <i>Rough</i> dan <i>Dimple Cylinder</i> (Zhou et al., 2015).....	15

<b>Gambar 2.18</b> Grafik $C_{L\ RMS}$ vs Re untuk <i>Smooth, Rough</i> dan <i>Dimple Cylinder</i> (Zhou et al., 2015).....	16
<b>Gambar 2.19</b> Koefisien <i>Drag</i> dan Koefisien <i>Lift</i> pada Re = 17.980 (Zhou et al., 2015).....	17
<b>Gambar 2.20</b> Grafik $C_D$ vs Re <i>Dimple Cylinder</i> , untuk $7,43 \times 10^3 < Re < 1,798 \times 10^4$ (Zhou et al., 2015).....	18
<b>Gambar 2.21</b> Grafik $C_{L\ RMS}$ vs Re <i>Dimple Cylinder</i> , untuk $7,43 \times 10^3 < Re < 1,798 \times 10^4$ (Zhou et al., 2015).....	18
<b>Gambar 2.22</b> Koefisien <i>Drag</i> dan Koefisien <i>Lift</i> pada Re = 80.000: (a) <i>Smooth Cylinder</i> ; (b) <i>Full-Sparse Dimpled Cylinder</i> ; (c) <i>full-dense dimpled cylinder</i> (Zhou et al., 2016).....	19
<b>Gambar 2.23</b> Grafik $C_D$ vs Re <i>Dimple Cylinder</i> , untuk $4 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$ (Zhou et al., 2016).....	19
<b>Gambar 2.24</b> Grafik $C_{L\ RMS}$ vs Re <i>Dimple Cylinder</i> , untuk $4 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^4$ (Zhou et al., 2016).....	20
<b>Gambar 2.25</b> Geometri <i>Cylinder</i> dengan <i>Porous Coating</i> (Guinness & Persoons, 2021). ....	21
<b>Gambar 2.26</b> Aliran <i>Inviscid</i> dan Aliran <i>Viscous</i> (Fox et al., 2011).....	23
<b>Gambar 2.27</b> Variasi Aliran yang Melalui <i>Cylinder</i> 2D (Lienhard, 1966).....	26
<b>Gambar 2.28</b> <i>Boundary Layer</i> pada Permukaan Melengkung (Sumer & Fredsøe, 1997).....	27
<b>Gambar 2.29</b> Pola Separasi Aliran dengan Penambahan <i>Wire</i> pada Permukaan <i>Cylinder</i> (Ekmekci & Rockwell, 2010).....	27
<b>Gambar 2.30</b> Aliran Melalui <i>Circular Cylinder</i> (Fox et al., 2011).....	28
<b>Gambar 2.31</b> Perubahan Pola Aliran di Sekitar <i>Circular Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i> (Sato & Kobayashi, 2012).....	29
<b>Gambar 2.32</b> Gaya yang Bekerja pada <i>Body</i> yang Dilewati Aliran (Nakayama, 2018).....	30
<b>Gambar 2.33</b> Distribusi Tekanan di Sekitar <i>Circular Cylinder</i> terhadap Sudut <i>Azimuth</i> : (a) Re = $1,1 \times 10^5$ ; (b) Re = $6,7 \times 10^5$ ; (c) Re = $8,4 \times 10^5$ (Nakayama, 2018).....	31
<b>Gambar 2.34</b> Koefisien <i>Drag</i> untuk <i>Smooth Circular Cylinder</i> sebagai Fungsi <i>Reynolds Number</i> (Fox et al., 2011).....	32
<b>Gambar 2.35</b> <i>Vortex Shedding</i> pada <i>Circular Cylinder</i> 2D.....	32
<b>Gambar 2.36</b> Insiden Runtuhnya Jembatan Tacoma Narrows pada Tahun 1940, Washington (Miller et al., 2008).....	33
<b>Gambar 2.37</b> Grafik Hubungan antara <i>Strouhal Number</i> dengan <i>Reynolds Number</i> pada <i>Circular Cylinder</i> (Achenbach & Heinecke, 1981; Lienhard, 1966).....	34
<b>Gambar 2.38</b> Frekuensi <i>Vortex Shedding</i> Fungsi Kecepatan Aliran, Diameter, Massa Jenis dan Viskositas Dinamik (Kaneko et al., 2014).....	35
<b>Gambar 3.1</b> Geometri 2D <i>Smooth Circular Cylinder</i> . ....	37
<b>Gambar 3.2</b> Domain Simulasi.....	38

<b>Gambar 3.3</b> Variasi Jumlah <i>Wire</i> : (a) $n = 6$ , (b) $n = 8$ , dan (c) $n = 10$ .	39
<b>Gambar 3.4</b> <i>Mesh</i> pada Komputasi Domain untuk <i>Smooth Circular Cylinder</i> , dengan Jumlah Elemen 155.168: (a) <i>Mesh</i> Keseluruhan Domain Simulasi, (b) <i>Mesh</i> di Sekitar <i>Cylinder</i> (2,5D), dan (c) <i>Mesh</i> pada Dinding <i>Cylinder</i> .	40
<b>Gambar 3.5</b> <i>Mesh</i> pada Komputasi Domain untuk <i>Wired Circular Cylinder</i> dengan 10 <i>Wire</i> pada Sisi <i>Leeward</i> : (a) <i>Mesh</i> di Sekitar <i>Wired Cylinder</i> (2,5D), (b) <i>Mesh</i> pada Dinding <i>Cylinder</i> , dan (c) <i>Mesh</i> pada Dinding <i>Wire</i> .	41
<b>Gambar 3.6</b> Grafik <i>Grid Independency Test</i> (GIT).	43
<b>Gambar 3.7</b> Grafik <i>Instantaneous</i> $C_P$ terhadap Sudut <i>Azimuth</i> pada Salah Satu Sisi <i>Circular Cylinder</i> pada $t = 2s$ dengan $Re = 4 \times 10^4$ .	44
<b>Gambar 3.8</b> Grafik <i>Instantaneous Velocity</i> terhadap $x/D$ di <i>Wake Region</i> pada $t = 2s$ dengan $Re = 4 \times 10^4$ .	44
<b>Gambar 3.9</b> Grafik Perbandingan Nilai $C_D$ <i>Cylinder</i> Simulasi dengan Beberapa Eksperimen yang Telah Dilakukan.	46
<b>Gambar 3.10</b> Grafik $C_D$ dan $C_L$ <i>Smooth Circular Cylinder</i> sebagai Fungsi Waktu pada $Re = 4 \times 10^4$ : (a) Grafik $C_D$ , dan (b) Grafik $C_L$ .	47
<b>Gambar 3.11</b> Diagram Alir Penelitian.	50
<b>Gambar 4.1</b> Grafik Koefisien <i>Drag</i> ( $C_D$ ) dan Koefisien <i>Lift</i> ( $C_L$ ) pada $Re = 4 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ .	52
<b>Gambar 4.2</b> $C_{L\ RMS}$ vs $Re$ <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> , untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .	53
<b>Gambar 4.3</b> $C_D$ vs $Re$ <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> , untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .	54
<b>Gambar 4.4</b> Grafik $C_{L\ RMS} / C_D$ vs $Re$ <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> , untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .	56
<b>Gambar 4.5</b> Grafik Koefisien <i>Pressure</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 6 \times 10^3$ : (a) $n = 6$ , (b) $n = 8$ , (c) $n = 10$ .	57
<b>Gambar 4.6</b> Grafik Perbandingan <i>Vorticity</i> dan <i>Wall Shear-Stress</i> Rata-Rata antara <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wired Cylinder</i> ( $n = 6$ ), pada $Re = 6 \times 10^3$ .	59
<b>Gambar 4.7</b> Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 20$ s dengan $Re = 6 \times 10^3$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ .	60
<b>Gambar 4.8</b> Kontur Kecepatan Sesaat <i>Wired Cylinder</i> ( $n = 6$ ) pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ (+) dan $t = 20,18$ s dengan $Re = 6 \times 10^3$ : (a) <i>Wake Region</i> dan (b) <i>Wire</i> Utama.	61
<b>Gambar 4.9</b> Grafik Perbandingan <i>Turbulence Intensity</i> antara <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wired Cylinder</i> (dengan $n = 6$ ), pada $Re = 6 \times 10^3$ .	61
<b>Gambar 4.10</b> Komparasi Kontur Kecepatan Sesaat antara <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wired Cylinder</i> ( $n = 6$ ) pada $Re = 4 \times 10^4$ .	62
<b>Gambar 4.11</b> Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 20$ s dengan $Re = 6 \times 10^3$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ .	63

<b>Gambar 4.12</b> Grafik <i>Magnitude</i> $C_L$ terhadap <i>Strouhal Number</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 6 \times 10^3$ .....	64
<b>Gambar A.1</b> Grafik Koefisien <i>Drag</i> ( $C_D$ ) dan Koefisien <i>Lift</i> ( $C_L$ ) pada $Re = 6 \times 10^3$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ .....	71
<b>Gambar A.2</b> Grafik Koefisien <i>Drag</i> ( $C_D$ ) dan Koefisien <i>Lift</i> ( $C_L$ ) pada $Re = 2 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ .....	72
<b>Gambar B.1</b> Grafik Koefisien <i>Pressure</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 2 \times 10^4$ : (a) $n = 6$ , (b) $n = 8$ , (c) $n = 10$ . ....	73
<b>Gambar B.2</b> Grafik Koefisien <i>Pressure</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 4 \times 10^4$ : (a) $n = 6$ , (b) $n = 8$ , (c) $n = 10$ . ....	74
<b>Gambar C.1</b> Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 7$ s dengan $Re = 2 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ . ....	75
<b>Gambar C.2</b> Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 7$ s dengan $Re = 2 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ . ....	76
<b>Gambar C.3</b> Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 2$ s dengan $Re = 4 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ . ....	76
<b>Gambar C.4</b> Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi <i>Peak</i> $C_L$ dan $t = \pm 2$ s dengan $Re = 4 \times 10^4$ : (a) <i>Smooth Cylinder</i> , (b) $n = 6$ , (c) $n = 8$ , dan (d) $n = 10$ . ....	77
<b>Gambar D.1</b> Grafik <i>Magnitude</i> $C_L$ terhadap <i>Strouhal Number</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 2 \times 10^4$ .....	78
<b>Gambar D.2</b> Grafik <i>Magnitude</i> $C_L$ terhadap <i>Strouhal Number</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> pada $Re = 4 \times 10^4$ .....	78

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Dimensi Sistem <i>Cylinder</i> dengan <i>Wire</i> (Quadrante & Nishi, 2014).....	9
<b>Tabel 2.2</b> Konfigurasi dan Kode <i>Dimple</i> (Zhou et al., 2016; 2015). ....	16
<b>Tabel 2.3</b> Hasil Simulasi <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Cylinder</i> dengan <i>Porous Coating</i> (Guinness & Persoons, 2021). ....	21
<b>Tabel 2.4</b> Penelitian Terdahulu .....	22
<b>Tabel 3.1</b> Variasi Penelitian.....	39
<b>Tabel 3.2</b> Kualitas <i>Mesh Smooth Circular Cylinder</i> , dengan Jumlah Elemen 155.168. ....	41
<b>Tabel 3.3</b> <i>Setup-Solution</i> Simulasi pada Tahap <i>Processing</i> Ansys Fluent 2021 R2.....	42
<b>Tabel 3.4</b> <i>Grid Independency Test</i> (GIT).....	43
<b>Tabel 3.5</b> <i>Time Step Sensitivity</i> pada $Re = 4 \times 10^4$ . ....	45
<b>Tabel 3.6</b> Pendekatan Nilai <i>Time Step</i> pada $Re = 6 \times 10^3$ dan $Re = 2 \times 10^4$ .....	45
<b>Tabel 3.7</b> <i>Time Step</i> untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^4$ .....	45
<b>Tabel 4.1</b> Perbandingan Hasil $C_{L\text{RMS}} / CD$ pada <i>Smooth</i> dan <i>Wire Cylinder</i> , untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ . ....	56
<b>Tabel 4.2</b> <i>Strouhal Number</i> untuk <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wired Cylinder</i> , untuk $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .....	65

## DAFTAR SIMBOL

### Simbol

$\Delta p$	: Selisih Tekanan
$\Delta t$	: <i>Time Step</i>
A	: Luas Permukaan
$C_D$	: Koefisien <i>Drag</i>
$C_{L\text{ RMS}}$	: Koefisien <i>Lift, Root Mean Square</i>
$C_L$	: Koefisien <i>Lift</i>
$C_P$	: Koefisien <i>Pressure</i>
D	: Diameter <i>Cylinder</i>
d	: Diameter <i>Wire</i>
d/D	: Rasio Diameter <i>Wire</i> dengan Diameter <i>Cylinder</i>
$f_n$	: Frekuensi Natural
$f_s$	: Frekuensi <i>Vortex Shedding</i>
k	: Konstanta Kekakuan Pegas
k/D	: Koefisien Kekasaran atau Rasio Kedalaman <i>Dimple</i> dengan Diameter <i>Cylinder</i>
l	: <i>Turbulence Length Scale</i>
L	: Panjang Karakteristik Geometri
M	: <i>Mach Number</i>
n	: Jumlah <i>Wire</i>
P	: Daya
$P_{\text{avg}}$	: Daya Rata-Rata
p	: Tekanan
Re	: <i>Reynolds Number</i>
St	: <i>Strouhal Number</i>
t	: Waktu
Tu	: <i>Turbulence Intensity</i>
U	: Kecepatan Aliran
$U_\infty$	: <i>Free Stream Velocity</i>

## Simbol Yunani

$\alpha$	: <i>Azimuth Angle</i>
$\beta$	: Posisi angular <i>wire</i>
$\eta$	: Properti Fluida
$\theta$	: <i>Angle of Attack</i>
$\theta_A$	: Posisi Angular <i>Wire</i> Utama terhadap Titik Stagnasi
$\theta_{w, n}$	: Jarak Angular antar <i>Wire</i>
$\mu$	: Viskositas Dinamik
$\pi$	: <i>Dimensionless Parameter</i>
$\rho$	: <i>Density</i>
$\omega$	: Kecepatan Sudut
$\omega_n$	: Frekuensi Natural
$\omega_v$	: <i>Vorticity</i>
$\nu$	: Viskositas Kinematik
$\zeta$	: <i>Damping Ratio</i> Fluida

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik kini menjadi sumber energi yang sangat diandalkan dalam berbagai aspek kehidupan. Ketersediaan dan keterjangkauannya menjadi semakin penting sejak teknologi yang kini mulai beralih kepada energi listrik. *International Energy Agency (IEA)* dalam *World Energy Outlook 2021 (WEO-2021)* menyatakan bahwa konsumsi energi dunia telah meningkat secara stabil selama beberapa dekade terakhir dan pada akhir tahun 2021 telah mencapai 20%. Pada *Net-Zero Emissions (NZE)*, energi listrik menyumbang sekitar 50% dari penggunaan energi 2050 (sekitar 30% di APS). IEA juga menyatakan bahwa, sejak 2016 investasi global di sektor ketenagalistrikan secara konsisten lebih tinggi dari pada pasokan *oil & gas* (Energy Agency, 2021). Oleh karena itu, dalam rangka memenuhi ketersediaan energi listrik di masa mendatang diperlukan upaya pemerolehan energi listrik alternatif yang berkelanjutan dan *modern*. Salah satunya adalah pemanfaatan *Flow-Induced Vibration (FIV)* sebagai *energy harvesting*.

*Flow-Induced Vibration (FIV)* merupakan fenomena kompleks dimana getaran *low-frequency* terjadi akibat fluktuasi gaya *lift* suatu aliran yang berinteraksi dengan permukaan *bluff bodies*, seperti *circular cylinder*. FIV tidak hanya berlaku untuk kondisi aliran *unsteady*, pada kondisi aliran eksternal dan *steady*, getaran dapat terjadi akibat *Von Karman vortex shedding* yang terbentuk pada daerah *wake*. Kondisi getaran seperti ini disebut *Vortex Induced Vibration (VIV)* (Kaneko et al., 2014). Pada umumnya, fenomena ini memberikan dampak yang merugikan, karena gaya *drag*, gaya *lift*, ataupun getaran yang dihasilkan dapat mengurangi efisiensi energi. Namun, penelitian terbaru menunjukkan bahwa getaran tersebut dapat dimanfaatkan sebagai alternatif energi dengan cara mengkonversi energi kinetik akibat getaran menjadi energi listrik dengan menggunakan *piezoelectric transducer*, seperti penelitian yang dilakukan oleh Quadrante & Nishi (2014). Energi yang telah dikonversi, kemudian dihimpun sedikit demi sedikit. Konsep pengumpulan energi semacam ini disebut *energy harvesting*. VIV memanfaatkan fluktuasi gaya *lift* untuk menghasilkan getaran mekanis, sehingga membutuhkan fluktuasi gaya *lift* yang maksimal dengan gaya *drag* yang minimal. *Circular cylinder* biasanya digunakan untuk menginduksi *Von Karman vortex street* dan menghasilkan *vortices* yang lebih kuat dan stabil, sehingga gaya *drag* dan gaya *lift* yang dihasilkan menjadi lebih besar. Kedua gaya tersebut merupakan gaya yang diproyeksikan melalui gaya aerodinamis fluida pada *circular cylinder*. Gaya *lift* merupakan gaya yang tegak lurus arah aliran, sedangkan gaya *drag* merupakan gaya yang searah arah aliran. Kedua gaya tersebut dapat diwakili oleh suatu bilangan tak berdimensi yang disebut koefisien *lift* dan koefisien *drag*.

VIV terjadi karena perilaku *vortex shedding* pada daerah *wake*. Perilaku tersebut dapat diubah dengan menambahkan atau mengubah bentuk permukaan (*roughness surface*) dari *circular cylinder*. Properti *wake* dari aliran yang melewati *circular cylinder* telah dipelajari oleh banyak peneliti. Pola aliran *wake* dapat dikontrol dengan berbagai metode, salah satunya dengan menambahkan *wire* pada permukaan *cylinder*. Igarashi (1986), melakukan sebuah eksperimen dengan menambahkan dua buah *tripping wire* pada permukaan *cylinder*. *Wire* diletakkan pada posisi angular tertentu simetris terhadap titik stagnasi. Eksperimen dilakukan untuk *Reynolds number* berada pada *subcritical regime*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan *wire* pada sisi *upstream* mampu menurunkan nilai koefisien *drag*. Hasil yang sama juga diperoleh Mamouri et al. (2016) pada *Reynolds number regime* yang sama dengan meneliti pengaruh penambahan jumlah *wire* pada permukaan *cylinder* terhadap

perubahan nilai koefisien *drag*. Kesamaan kedua penelitian ini adalah melakukan penelitian dengan menambahkan *wire* pada sisi *upstream*. Nishi, *et al* (2014) mencoba melakukan eksperimen untuk mengetahui pengaruh penambahan *wire* pada sisi depan maupun belakang untuk rentang *Reynolds number*  $1,3 \times 10^3$  hingga  $9,6 \times 10^4$ . Eksperimen dilakukan melalui dua tahapan, yaitu tes silinder diam dan tes silinder bergerak. Tes silinder diam menunjukkan bahwa posisi sudut  $20^\circ - 52,5^\circ$  atau lebih dari  $97,5^\circ$  mampu menurunkan gaya hidrodinamik dan posisi sudut antara  $52,5^\circ$  hingga  $97,5^\circ$  akan meningkatkan nilai dari gaya hidrodinamik dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Namun, penelitian ini tidak meletakkan *wire* tepat pada permukaan benda uji, melainkan pada gap tertentu dari permukaan *cylinder*. Kemudian, Zhou *et al.* (2016, 2015) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh posisi penempatan dan jumlah kekasaran permukaan *dimple* terhadap perubahan nilai amplitudo, koefisien *drag*, dan koefisien *lift*. Penelitian dilakukan pada *Reynolds number* dengan *subcritical regime*. Berdasarkan kedua penelitian tersebut, dapat diketahui bahwa dengan meletakkan *dimple* pada sisi belakang (*Dense Dimple Half Backward*), mampu meningkatkan nilai koefisien *lift* secara maksimal pada *Reynolds number*  $20.000 < Re < 80.000$ . Guinness & Persoons (2021) mendukung hasil tersebut melalui simulasi yang ia lakukan dengan menambahkan *porous coating* pada permukaan *cylinder* pada  $Re = 4,2 \times 10^4$ . *Cylinder* dengan sudut *coating*  $\beta = 160^\circ$  secara signifikan mampu menaikkan nilai koefisien *lift* RMS,  $C_{L\text{ RMS}}$  yang cukup besar dengan nilai 1.187, sehingga efisiensi meningkat 40,3%. Namun, nilai koefisien *drag*,  $C_D$  juga mengalami kenaikan sebesar 1.528.

Berdasarkan uraian di atas, diperlukan suatu analisis koefisien *lift*, koefisien *drag*, dan frekuensi untuk memperoleh bentuk *cylinder* dengan posisi dan jumlah *wire* yang tepat, agar diperoleh fluktuasi gaya *lift* yang maksimal untuk getaran yang lebih besar, dan dengan nilai gaya *drag* yang minimal untuk menghindari pengurangan efisiensi energi dalam fenomena aliran udara *unsteady* 2D pada *ducting system*, untuk kebutuhan *energy harvesting*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Fenomena *Vortex-Induced Vibration* (VIV) terjadi ketika aliran *unsteady* menghasilkan *vortex shedding* di permukaan dan sekitar *bluff body* seperti *circular cylinder*. *Vortex* yang dihasilkan menginduksi tekanan ke permukaan bodi *cylinder*. Perbedaan tekanan antara *upper side* dan *lower side* secara periodik akan menghasilkan fluktuasi gaya *lift* yang pada akhirnya akan menghasilkan getaran mekanis *low-frequency* di sekitar *cylinder*. Kekasaran permukaan (*surface roughness*) *cylinder* merupakan salah satu faktor yang menentukan tingkat frekuensi dan amplitudo yang dihasilkan. Penambahan *wire* pada permukaan *body* merupakan salah satu upaya dalam menciptakan kekasaran permukaan. Jumlah, diameter dan posisi penempatan *wire* akan menentukan seberapa baik desain *circular cylinder* dalam menghasilkan getaran mekanis akibat *vortex shedding* untuk kebutuhan *energy harvesting*. Hipotesis awal penelitian ini adalah ketika *wire* diletakkan pada *wake region*, maka bentuk *wake* akan berubah menjadi lebih tidak simetris dan selisih *vortex shedding* akan terganggu. Perubahan bentuk *wake* dalam arah transversal akan meningkatkan nilai amplitudo koefisien *lift*, sehingga daya yang dihasilkan menjadi semakin besar. Peningkatan amplitudo nantinya akan mempengaruhi frekuensi sistem yang dihasilkan. Nilai koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada dasarnya berbanding lurus. Ketika nilai koefisien *lift* meningkat, maka nilai koefisien *drag* juga meningkat. Namun peningkatan nilai tersebut belum dapat dihitung secara matematis. Hal ini akan menjadi masalah karena akan mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus untuk meneliti bagaimana pengaruh penambahan jumlah *wire* dengan diameter dan posisi penempatan tertentu terhadap koefisien *lift*, koefisien *drag*, dan frekuensi yang dihasilkan pada *circular cylinder*.

### 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Aliran fluida *unsteady*, *viscous*, dan *incompressible*
2. Aliran eksternal
3. Kecepatan aliran fluida konstan dan *uniform* pada sisi *upstream* dengan variasi *Reynolds number*:  $6 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^4$ , dan  $4 \times 10^4$
4. *Circular cylinder* dianalisis dalam keadaan diam
5. Simulasi dilakukan secara 2D menggunakan *software* Ansys Fluent 2021 R2
6. Perpindahan panas diabaikan.

### 1.4 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui bentuk permukaan *circular cylinder* yang sesuai sehingga dapat menghasilkan *Vortex-Induced Vibration* (VIV) paling optimum. Variasi *Reynolds number* dan jumlah kekasaran permukaan “*wire*” pada *circular cylinder* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui, menggambarkan, dan memahami pengaruh penambahan *wire* pada permukaan *circular cylinder* terhadap koefisien *lift*, koefisien *drag*, koefisien *pressure*, frekuensi *vortex shedding* jika dibandingkan dengan *smooth surface cylinder*.

### 1.5 Manfaat

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sebagai bahan studi untuk mengetahui pengaruh penambahan dan jumlah *wire* terhadap karakteristik aliran yang melewati *circular cylinder*, terutama koefisien *lift* dan *Strouhal number*
2. Sebagai bahan pengembangan energi terbarukan dan *modern*
3. Sebagai referensi penelitian selanjutnya

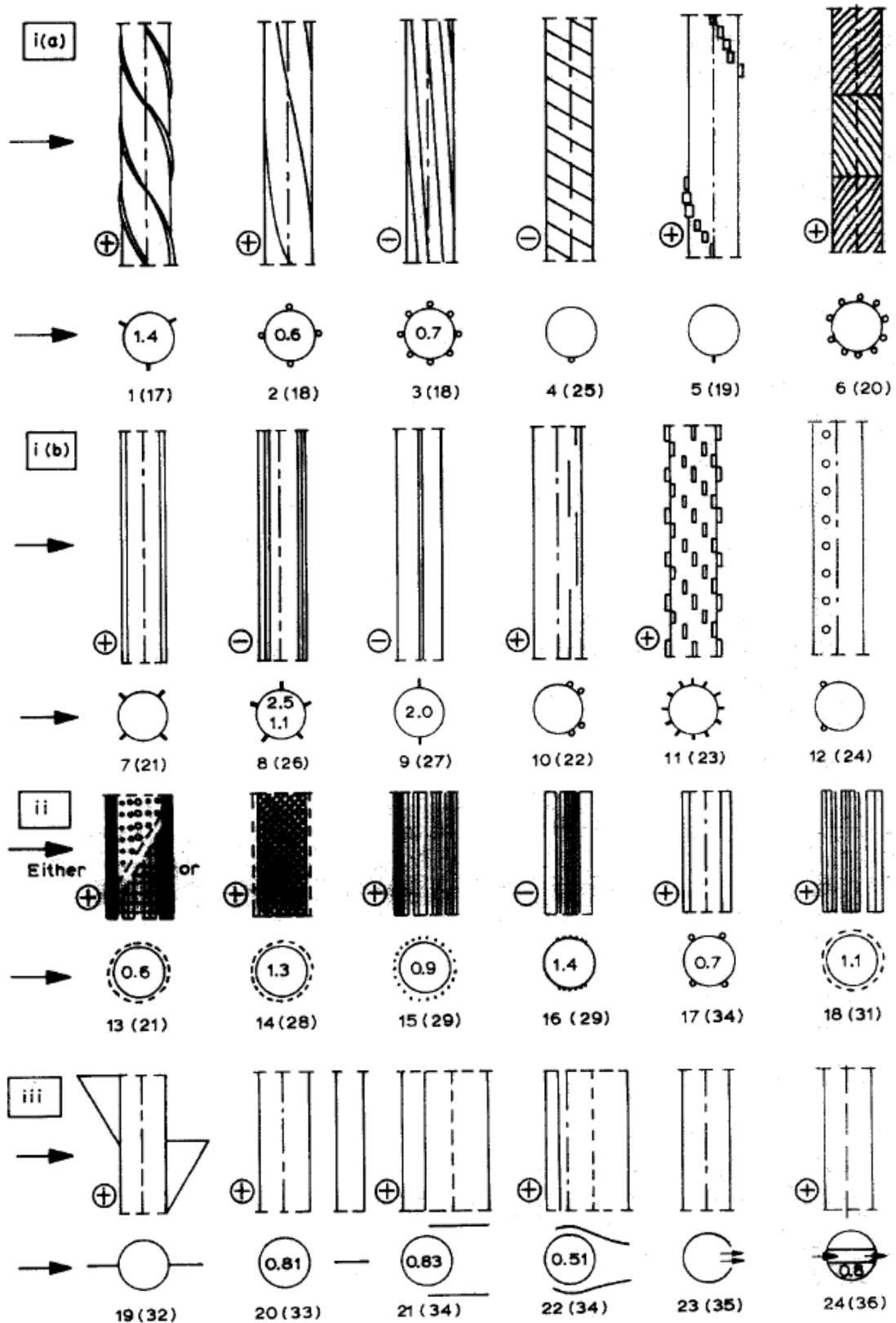
## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Aliran eksternal yang melewati badan *cylinder* atau dekat *cylinder* telah menjadi bidang penelitian dalam bidang *engineering* dalam beberapa dekade. Penerapannya dalam berbagai komponen atau sistem *engineering* seperti bangunan, jembatan, *boiler*, *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE), *water heater* dan *steam generator* membuatnya menjadi obyek penelitian yang sangat menarik. Namun penelitian ini masih menjadi persoalan yang menantang walaupun geometrinya yang sederhana. Jenis aliran yang dihasilkan oleh *circular cylinder* sangat kompleks karena koeksistensi antara *boundary layer*, *free-shear layers* dan *vortex shedding* yang terbentuk secara periodik di belakang badan *cylinder*. Begitupun juga dengan *wake flow* yang terbentuk akibat separasi aliran. Gaya aerodinamis yang timbul akibat aliran yang kompleks, serta *Strouhal number* menjadi faktor utama dalam melakukan desain *circular cylinder*.

Karakteristik aliran yang terbentuk di daerah *wake* telah dipelajari oleh banyak peneliti karena sifatnya yang pada umumnya merugikan, sehingga banyak peneliti yang melakukan studi untuk mengurangi gaya *drag* yang dihasilkan oleh *wake flow*, seperti yang dilakukan oleh Kuo et al. (2007). Kuo mengamati aliran yang terjadi pada daerah *wake* dengan menambahkan sebuah *cylinder* kecil dekat *cylinder* utama. Penelitian dilakukan untuk *Reynolds number* 80 – 300. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, nilai koefisien *drag* dan koefisien *lift* menurun dengan menambahkan *body* pengganggu di depan *cylinder* utama. Igarashi (1986) melakukan penelitian yang sama dengan Kuo, untuk mengetahui efek penambahan *vortex generator* terhadap *circular cylinder*. Namun, tidak selamanya fluktuasi gaya *lift* dan gaya *drag* yang terbentuk memberikan dampak yang merugikan. Beberapa studi dilakukan untuk memperoleh gaya *lift* yang tinggi, tujuannya adalah untuk memperoleh amplitudo getaran yang tinggi sebagai *energy harvesting*, seperti yang dilakukan oleh Quadrante & Nishi (2014). Peneliti lainnya juga melakukan studi untuk mengamati pola aliran yang terbentuk dan mempelajari bagaimana cara mengontrol aliran di sekitar *circular cylinder* terutama pada daerah *wake*. Aliran *wake* dapat dikontrol dengan beberapa cara, seperti mengubah nilai *Reynolds number*, menambahkan *body* pengganggu seperti yang dilakukan oleh Kuo et al. (2007), mengubah nilai aspek rasio seperti yang dilakukan oleh Rehimi et al. (2008), atau menambahkan kekasaran permukaan (*surface roughness*) seperti yang dilakukan oleh Zdravkovich (1981), Igarashi (1986), Hover et al. (2001), dan Mamouri et al. (2016).

Metode mengubah kekasaran permukaan merupakan salah satu metode yang secara signifikan mampu mengubah karakteristik aliran fluida, baik koefisien *lift*, koefisien *drag*, distribusi tekanan dan *Strouhal number*. Cara mengubah bentuk permukaan pun beragam. Sebagian peneliti mengubah permukaan *circular cylinder* dengan menambahkan beberapa fin, ada pula yang menambahkan *wire*, *dimple*, atau *coating* pada permukaan *cylinder*. Lokasi/posisi penempatan juga menjadi salah satu faktor yang sangat dipertimbangkan dalam mendesain *circular cylinder*. Zdravkovich (1981), melakukan penelitian untuk beberapa jenis dan posisi kekasaran permukaan. Penelitian dilakukan untuk melihat perubahan bentuk *vortices* akibat efek garis separasi dan/ atau separasi *shear layer* dengan menambahkan kekasaran permukaan berupa *strike*, *wire*, *fin*, *stud*, atau *sphere* seperti pada Gambar 2.1.



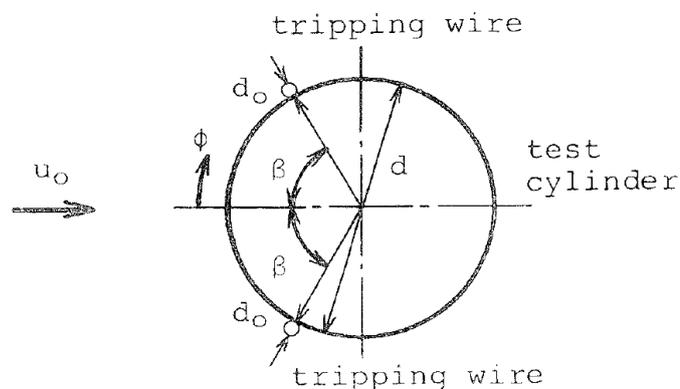
**Gambar 2.1** Jenis dan Posisi Kekasaran Permukaan yang dapat Mengganggu *Vortex Shedding*: (i) *Surface Protrusions* ((a) *Omnidirectional* dan (b) *Unidirectional*), (ii) *Shrouds*, (iii) *Nearwake Stabilisers* ((+) Berefek dan (-) Tidak Berefek) (Zdravkovich, 1981).

Gambar 2.1 menunjukkan beberapa jenis dan posisi kekasaran permukaan pada *circular cylinder* dan pengaruhnya dalam mengganggu *vortex shedding*. Variasi-variasi tersebut diklasifikasikan menjadi 3 kategori, yaitu:

- i. *Surface protrusions (strikes, wires, fins, studs, dan lain-lain)*, yang mempengaruhi garis separasi dan/atau separasi *shear layer*.
  - a. *Omnidirectional*, yang berarti tidak dipengaruhi oleh arah kecepatan fluida.
  - b. *Unidirectional*, yang berarti hanya efektif pada satu arah kecepatan fluida;
- ii. *Shrouds (berlubang, kasa, axial slats, axial rods)*, yang mempengaruhi *entrainment layers*;
- iii. *Nearwakes stabilisers (splitter dan plat gergaji, guiding plates, vanes, slits cut)*, yang mempengaruhi titik pertemuan.

Berdasarkan penelitian tersebut, bentuk dan posisi penempatan kekasaran permukaan sangat mempengaruhi *vortex shedding street* yang terbentuk. Penambahan *wire* menjadi salah satu metode yang paling signifikan dalam menaikkan/ menurunkan nilai gaya dan *Strouhal number cylinder*, terutama pada *subcritical regime – Reynolds number* yang mampu meningkatkan fluktuasi gaya *lift* secara maksimum.

Igarashi (1986), melakukan penelitian dengan menambahkan sepasang *wire* pada permukaan *circular cylinder*. Konfigurasi *circular cylinder* diilustrasikan seperti Gambar 2.2, dimana model dilakukan untuk *circular cylinder* dengan diameter 34, 40 dan 50 mm. Dua buah *wire* diletakkan pada dinding *cylinder* pada posisi angular  $\beta = 50^\circ$  dan  $60^\circ$  simetri terhadap garis stagnasi. Adapun diameter *wire* adalah 0,4 ; 0,6 ; 0,7 ; 0,8 dan 1,0 mm.

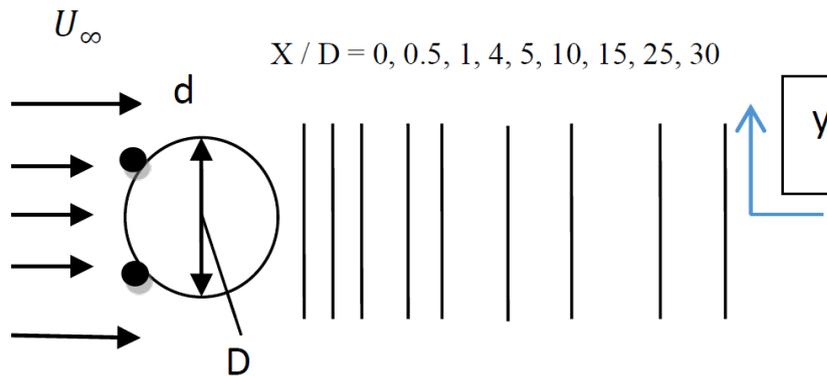


**Gambar 2.2** Geometri *Circular Cylinder* dengan 2 Buah *Wire* (Igarashi, 1986).

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan *wind tunnel*. *Free stream velocity*,  $U_o$  berada pada rentang 6 hingga 30 m/s dan *Turbulence Intensity* sebesar 0,5%. Adapun *Reynolds number* berada pada *subcritical regime* untuk rentang  $1,3 \times 10^3 \leq Re \leq 9,6 \times 10^4$ . Pengukuran dilakukan terhadap frekuensi *vortex shedding* pada daerah *wake* dan rata-rata distribusi tekanan di sekitar *cylinder* serta korelasi antara *Strouhal number* dan koefisien *drag*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, penambahan *tripping wire* pada bagian depan (*upstream*) sebagai *passive control* akan menurunkan nilai koefisien *drag*, sehingga meletakkan *wire* pada bagian depan menghasilkan efek yang sama dengan *vortex generator*, yaitu menurunkan nilai koefisien *drag* dengan mengubah (*tripped*) *boundary layer* dari laminar menjadi turbulen.

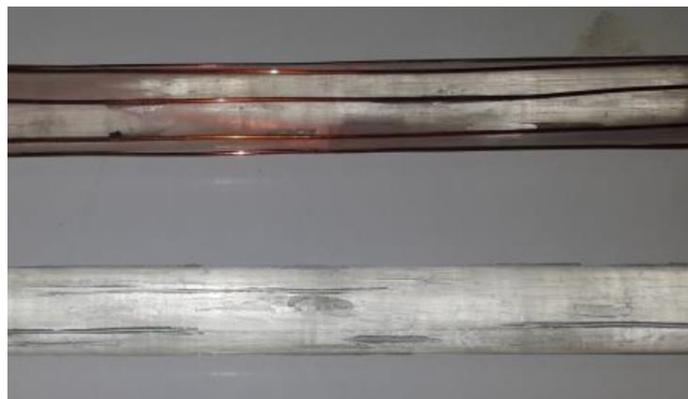
Hasil yang sama juga diperoleh Mamouri et al. (2016). Mamouri et al., melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan *wire* pada permukaan *circular cylinder*

terhadap kontrol *wake* aliran, terkhusus kepada *Strouhal number*, koefisien *drag*, kecepatan rata-rata, dan *turbulence intensity*. Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan menggunakan *Open-Circuit Wind Tunnel* dengan ukuran panjang x lebar x tinggi sebesar (168 x 40 x 40) cm dengan kecepatan *free-stream velocity*,  $U_\infty \sim 7,5$  m/s dan 26 m/s (untuk *Reynolds Number* 10.000 dan 35.000). *Honeycomb* diletakkan pada bagian *inlet* untuk membentuk aliran secara *uniform*. *Hot wire* berdiameter 0,0005  $\mu\text{m}$  diletakkan pada dua *stand tunnel* untuk memastikan bahwa aliran terbentuk *uniform* sempurna dengan *turbulence intensity* telah *uniform* dengan nilai kurang dari 0,1% *free-stream velocity*. Skema lengkap tampak pada Gambar 2.3.



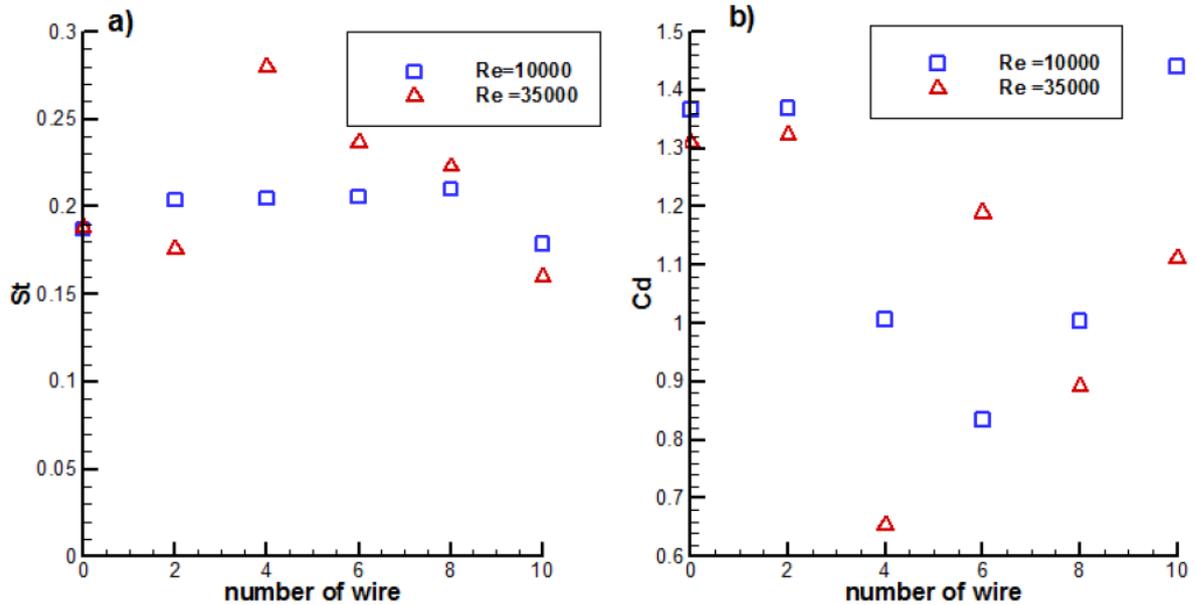
**Gambar 2.3** Model *Cylinder* (dengan 2 *Tripwire*) (dimana D adalah diameter *wire* dan posisi *station* dari *cylinder* adalah  $X/D$ ) (Mamouri et al., 2016).

Eksperimen dilakukan dengan variasi jumlah *wire* sebanyak 2, 4, 6, 8, dan 10 dengan rasio antara diameter *wire* terhadap diameter *cylinder* sebesar 0,075 dan dengan dua *Reynolds Number* berbeda, yaitu  $Re = 10.000$  dan  $Re = 35.000$ . Adapun posisi angular *wire* divariasikan sebesar  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  dan  $36^\circ$  simetri terhadap titik stagnasi dan dengan jarak angular yang sama satu sama lain dimulai dari daerah datangnya fluida. Ilustrasi bahan uji terlihat pada Gambar 2.4.



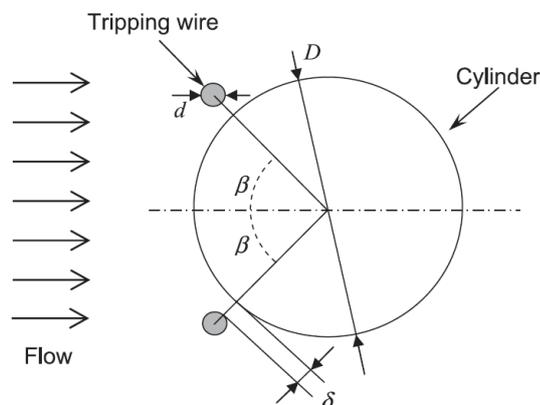
**Gambar 2.4** Model *Cylinder* dengan 8 Buah *Tripwire* (Mamouri et al., 2016).

Berdasarkan eksperimen tersebut, diketahui bahwa *wire* dengan posisi  $45^\circ$  (dengan 4 buah *tripwire*) mampu menurunkan koefisien *drag* secara maksimum sebesar 53% dan 65.5% untuk *Reynolds number* sebesar  $Re = 10.000$  dan  $Re = 35.000$  jika dibandingkan dengan koefisien *drag* tanpa *wire*, serta penambahan *tripping wire* mampu meningkatkan *Stouhal number* kecuali variasi 10 *tripwire* pada kedua *Reynolds number* seperti pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** Grafik: (a) *Strouhal Number* dan (b) *Koefisien Drag*, untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* dengan Variasi Jumlah *Wire* dengan  $d/D = 0,075$  untuk  $Re = 10.000$  dan  $Re = 35.000$  (Mamouri et al., 2016).

Quadrante & Nishi (2014), melakukan penelitian untuk mengetahui efek *circular cylinder* dengan *wire* pada zona *subcritical regime* (khususnya aliran dengan *Reynolds Number* berada pada rentang  $1,3 \times 10^3 - 9,6 \times 10^4$ ) terhadap vibrasi akibat fluida yang mengalir. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan *Towing Tank* dengan dimensi panjang 100 m, lebar 8 m dan kedalaman 3,5 m dengan *cylinder* berdimensi diameter luar sebesar 25 mm dan panjang 454 mm dan ditopang oleh *spring system*. Rasio antara diameter *wire* terhadap diameter *cylinder* ( $d/D$ ) adalah 0,12 sehingga digunakan *wire* dengan diameter 3 mm. Adapun *wire* diletakkan sedikit lebih jauh dari permukaan *cylinder* dengan *gap ratio* sebesar 0,1D seperti pada Gambar 2.6. Alat diatur untuk kecepatan 2 – 12 m/s dengan nilai *Reynolds number* mulai dari  $3,45 \times 10^3$  hingga  $2,04 \times 10^4$ . *Wire* ditempatkan dengan posisi angular antara  $15^\circ - 90^\circ$  dengan interval  $7.5^\circ$  dengan 2 variasi arah datangnya angin, yaitu dari depan dan belakang.



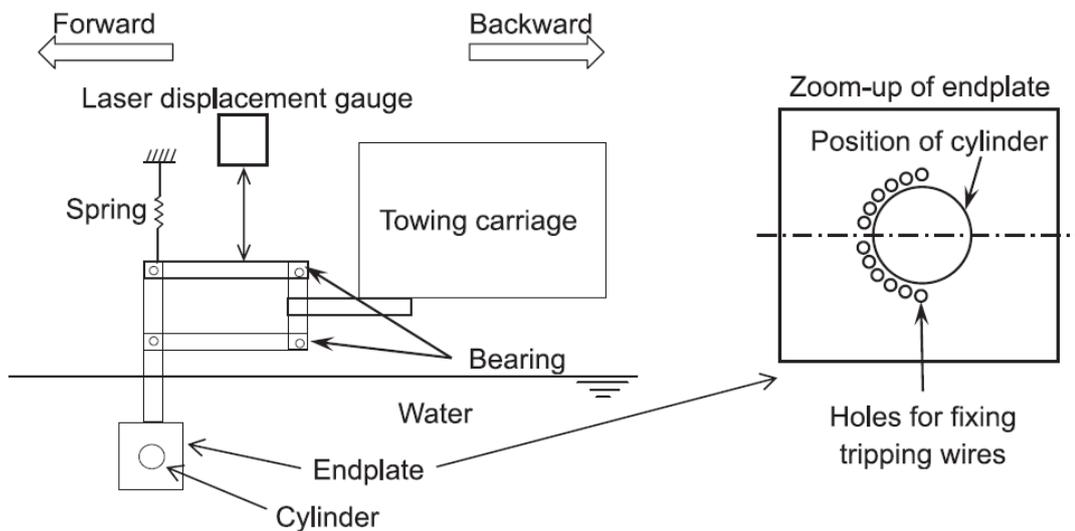
**Gambar 2.6** Geometri Penampang *Cylinder* dengan *Wire* (Quadrante & Nishi, 2014).

Tabel 2.1 menunjukkan dimensi benda uji yang digunakan pada eksperimen ini, dengan rasio antara diameter *cylinder* dan *wire* sebesar 2,5 mm.

**Tabel 2.1** Dimensi Sistem *Cylinder* dengan *Wire* (Quadrante & Nishi, 2014).

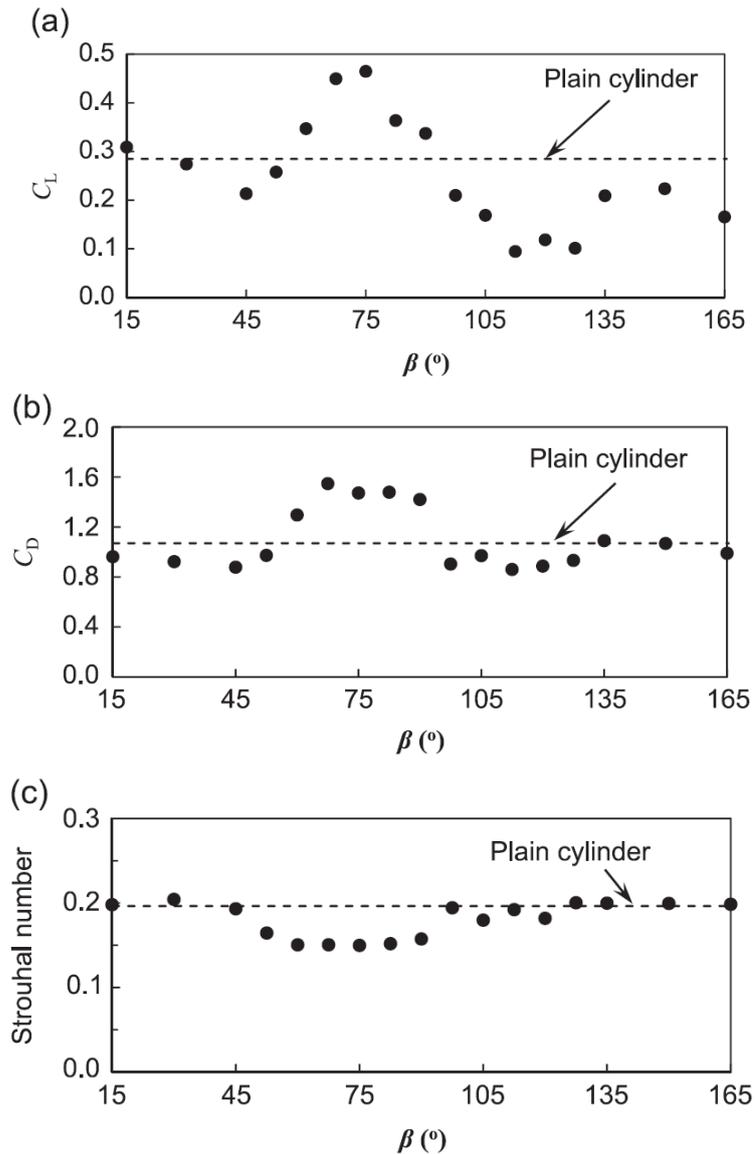
Symbol	Definition	Value
$L$	Longitudinal length of cylinder	454 mm
$D$	Diameter of cylinder	25 mm
$d$	Diameter of tripping wire	3 mm
$m^*$	Mass ratio of cylinder	6.13
$Z$	Damping ratio	0.016
$\delta$	Gap between cylinder and tripping wires	2.5 mm

Pada tahap awal, penelitian dilakukan dengan *clamped cylinder* (tes *cylinder* diam) dengan posisi angular  $15^\circ - 165^\circ$  untuk mengetahui posisi angular berapa yang dapat meningkatkan atau menurunkan gaya hidrodinamik yang dihasilkan pada *circular cylinder*. Kecepatan *Towing Carriage* diatur tetap 0,3 m/s. Tes *cylinder* bergerak dilakukan menggunakan empat posisi sudut, yaitu:  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $105^\circ$  dan  $120^\circ$  untuk mengetahui bagaimana *wire* menekan vibrasi yang diinduksi oleh *cylinder*.



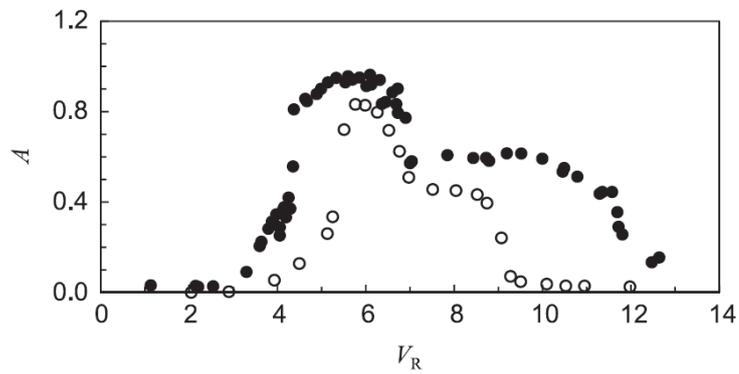
**Gambar 2.7** Skema Ilustrasi Eksperimen terhadap *Circular Cylinder* dengan *Wire* (Quadrante & Nishi, 2014).

Tes silinder diam menunjukkan bahwa posisi sudut  $20^\circ - 52,5^\circ$  atau lebih dari  $97,5^\circ$  mampu menurunkan gaya hidrodinamik dan posisi sudut antara  $52,5^\circ$  hingga  $97,5^\circ$  akan meningkatkan nilai dari gaya hidrodinamik, terutama pada sudut  $75^\circ$  yang mampu meningkatkan koefisien *lift* dan koefisien *drag* masing-masing 63% dan 44% dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Adapun sudut  $112,5^\circ$  mampu mengurangi koefisien *lift* dan *drag* masing-masing 67% dan 20%, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.

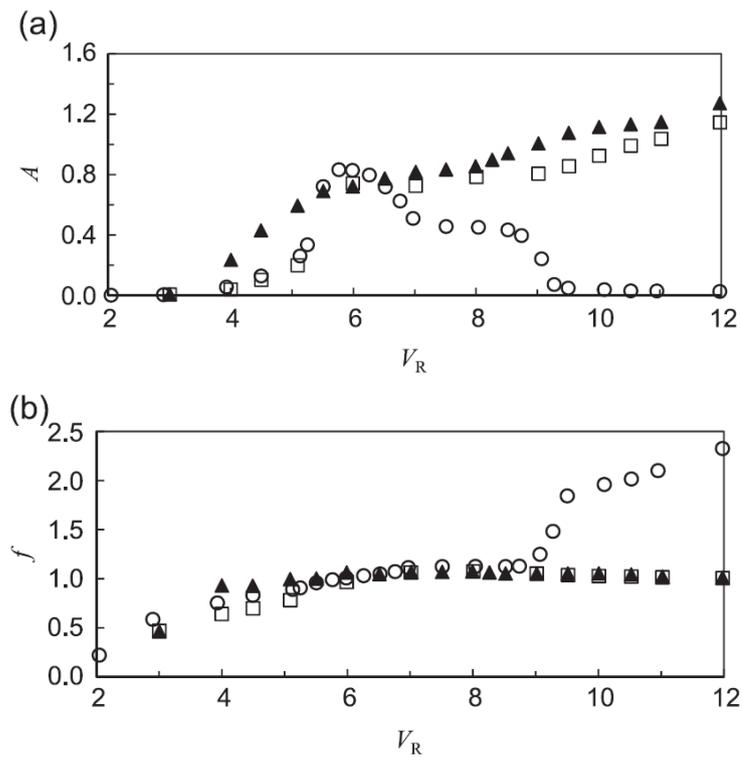


**Gambar 2.8** Pengukuran Data untuk Tes *Cylinder* Diam. (a) Koefisien *Lift*, (b) Koefisien *Drag*, (c) *Strouhal Number* terhadap Posisi Angular *Wire* (Quadrante & Nishi, 2014).

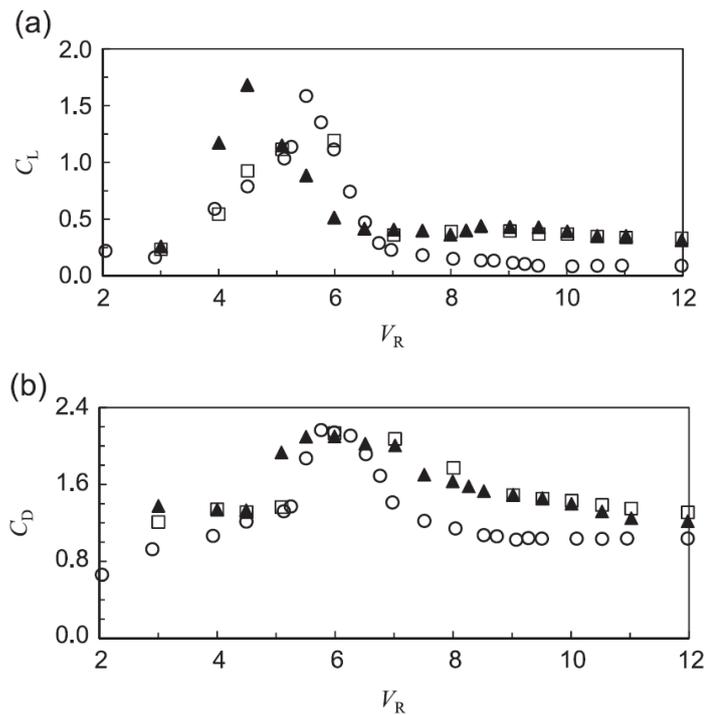
Pada tes silinder bergerak, hasil menunjukkan bahwa penambahan *wire* dapat meningkatkan nilai amplitudo *cylinder* jika dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*, seperti pada Gambar 2.9, dimana hasil eksperimen yang diperoleh dibandingkan dengan hasil yang diperoleh Khalak A & Williamson C.H.K. (1997) dengan menggunakan *cylinder* tanpa *wire*. Posisi sudut *wire*  $60^\circ$  dan  $75^\circ$  menyebabkan amplitudo meningkat seiring dengan penurunan kecepatan seperti pada Gambar 2.10, sedangkan koefisien *lift* dan koefisien *drag* juga mengalami peningkatan dibandingkan dengan *plain cylinder* (Gambar 2.11). Adapun meletakkan *wire* pada sudut  $105^\circ$  dan  $120^\circ$  akan menurunkan nilai koefisien *lift* dan koefisien *drag*, serta meredam getaran pada *cylinder*, terutama pada sudut  $120^\circ$  dimana getaran benar-benar tidak terjadi (menghilang) (Gambar 2.12 & 2.13).



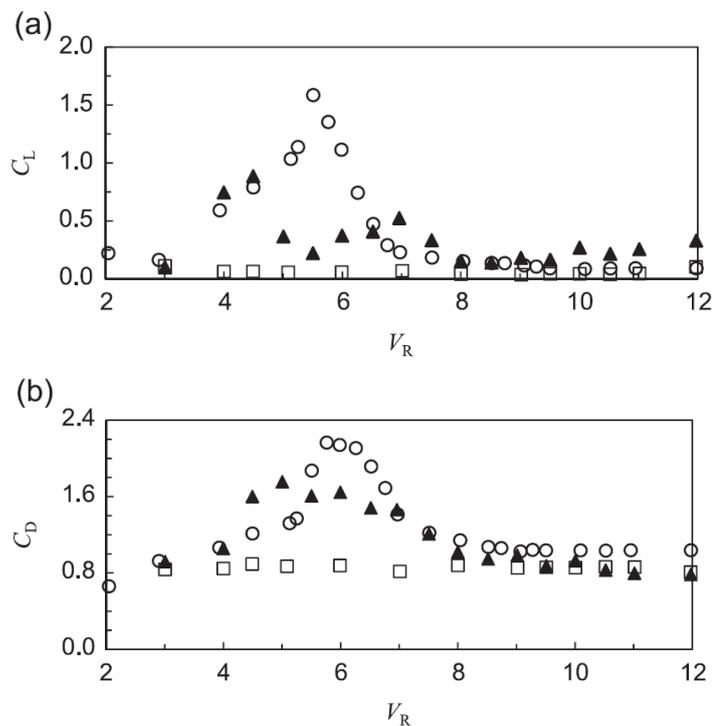
**Gambar 2.9** Amplitudo *Plain Cylinder* terhadap Penurunan Kecepatan ( $^\circ$ ) Dibandingkan dengan Hasil Penelitian Khalak A & Williamson C.H.K. (1997) ( $\bullet$ ) (Quadrante & Nishi, 2014).



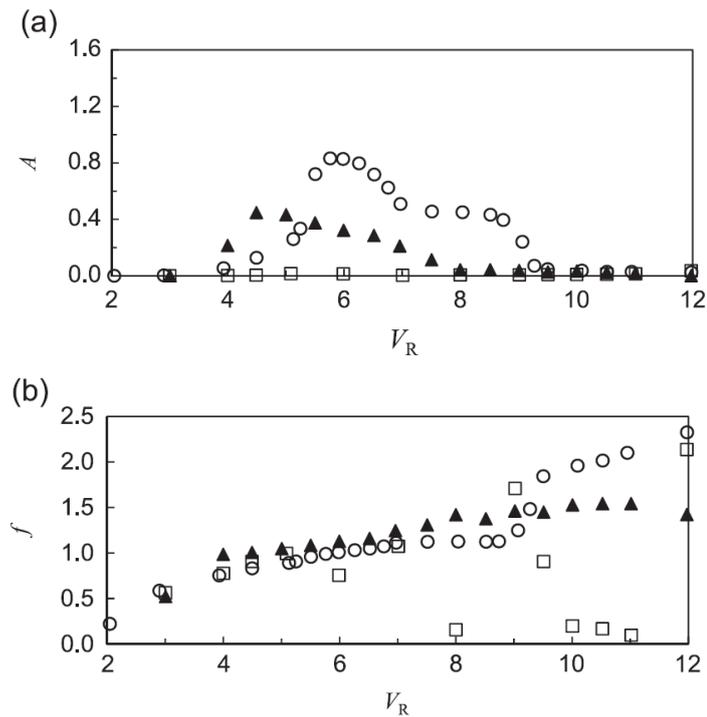
**Gambar 2.10** (a) Amplitudo (b) Frekuensi Akibat Getaran *Cylinder* Terhadap Penurunan Kecepatan  $\circ$ : *plain cylinder*,  $\square$ : *Wire* pada  $\beta = 60^\circ$ , and  $\blacktriangle$ : *Wire* pada  $\beta = 75^\circ$  (Quadrante & Nishi, 2014).



**Gambar 2.11** (a) Koefisien *Lift* (b) Koefisien *Drag* Akibat Getaran *Cylinder* terhadap Penurunan Kecepatan ○: *Plain Cylinder*, □: *Wire* pada  $\beta = 60^\circ$ , dan ▲: *Wire* pada  $\beta = 75^\circ$  (Quadrante & Nishi, 2014).



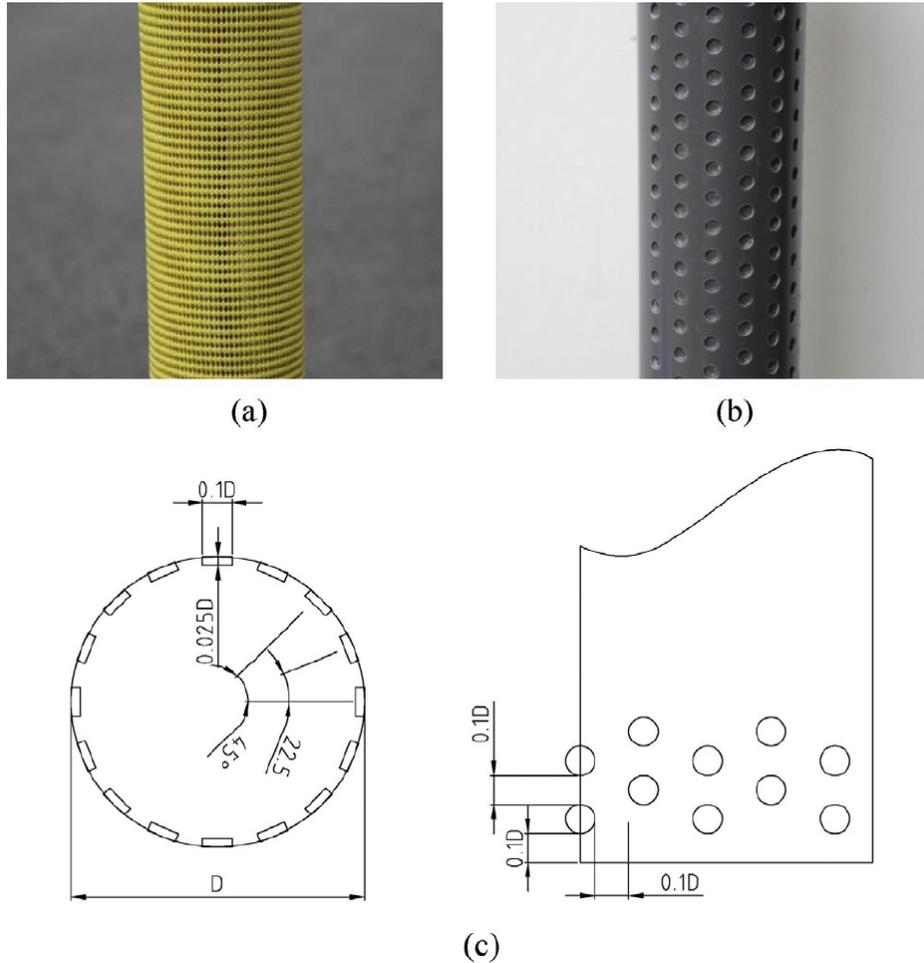
**Gambar 2.12** (a) Koefisien *Lift* (b) Koefisien *Drag* Akibat Getaran *Cylinder* terhadap Penurunan Kecepatan ○: *Plain Cylinder*, □: *Wire* pada  $\beta = 120^\circ$ , dan ▲: *Wire* pada  $\beta = 105^\circ$  (Quadrante & Nishi, 2014).



**Gambar 2.13** (a) Amplitudo (b) Frekuensi Akibat Getaran *Cylinder* terhadap Penurunan Kecepatan ○: *Plain Cylinder*, □: *Wire* pada  $\beta = 120^\circ$ , dan ▲: *Wire* pada  $\beta = 105^\circ$  (Quadrante & Nishi, 2014).

Zhou et al. (2015), melakukan eksperimen untuk mengetahui hubungan antara koefisien *drag*, koefisien *lift* dan kekasaran permukaan untuk *subcritical regime Reynolds number*  $6 \times 10^3 - 8 \times 10^4$ . Dalam melakukan eksperimennya, Zhou menggunakan 3 jenis kekasaran permukaan, yaitu dengan menggunakan amplas, *net*, dan *dimple* dengan variasi kekasaran ( $k/D$ ) sebesar  $0,0028 - 0,025$  seperti pada Gambar 2.14. Penelitian ini menggunakan 2 ukuran *cylinder*, yaitu 100 mm dan 29 mm dengan 2 media pengujian, yaitu *towing tank* untuk *cylinder* berdiameter 100 mm dan *re-circulating open water channel* untuk *cylinder* berdiameter 29 mm.

Pengujian pertama dilakukan untuk *cylinder* dengan diameter 100 mm, menggunakan kekasaran permukaan *dimple* berdiameter 5 mm ( $0,05D$ ) dengan kedalaman 2,5 mm ( $k/D = 0,025$ ), dengan  $D$  adalah diameter *cylinder* dan  $k$  adalah kedalaman *dimple* dan jumlah *dimple* sebanyak 16. Adapun kekasaran permukaan *net* dengan menggunakan ketebalan 2 mm dengan koefisien kekasaran  $k/D$  0,02. Pengujian kedua dilakukan untuk *cylinder* dengan diameter 29 mm dengan menggunakan 2 jenis kekasaran permukaan amplas, yaitu  $k/D = 0,0028$  dan  $k/D = 0,0083$  seperti pada Gambar 2.15.

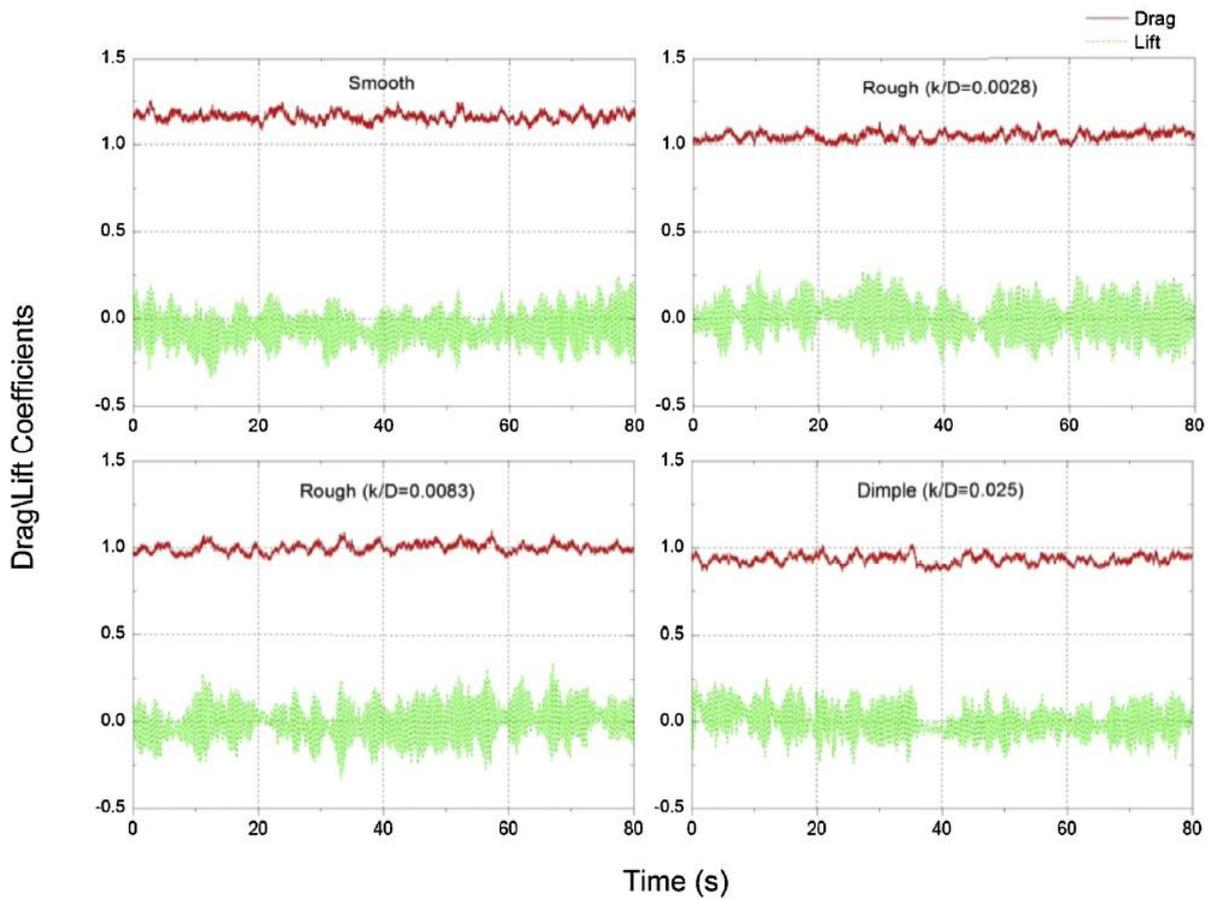


**Gambar 2.14** Variasi Kekasaran Permukaan *Circular Cylinder*: (a) *Net*, (b) *Dimples*, (c) Gambar Detail *Dimple* (Zhou et al., 2015).



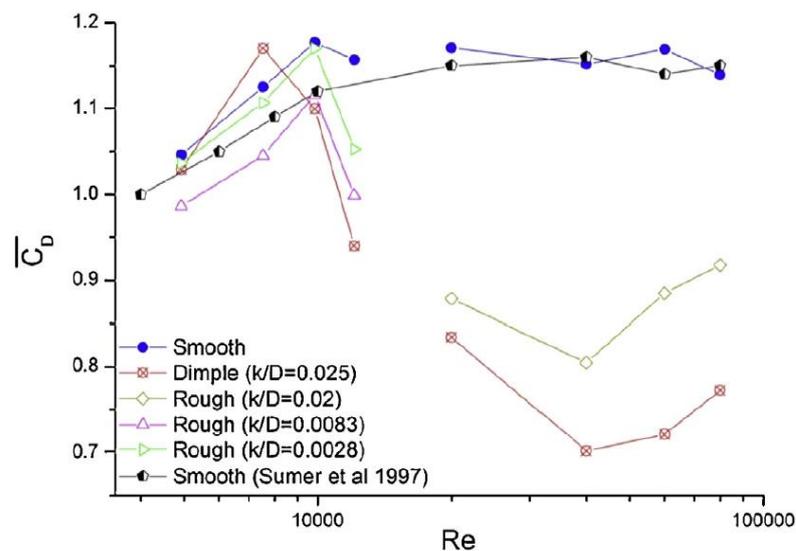
**Gambar 2.15** Variasi Kekasaran Permukaan dengan Menggunakan Amplas (Zhou et al., 2015).

Grafik hubungan antara koefisien *lift* sesaat,  $C_L$  dan koefisien drag,  $C_D$  untuk *smooth circular cylinder* dan *cylinder* dengan kekasaran permukaan (*rough cylinder*) pada  $Re = 12.080$  ditunjukkan pada Gambar 2.16. Nilai rata-rata  $C_L$  dan  $C_D$  diambil pada saat keadaan sudah mencapai *steady state*. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa nilai rata-rata  $C_D$  untuk *smooth cylinder* berfluktuasi pada nilai 1,2, sesuai dengan nilai yang ditetapkan untuk *sub-critical regime*. Adapun nilai rata-rata  $C_D$  untuk *rough cylinder* mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya nilai kekasaran.

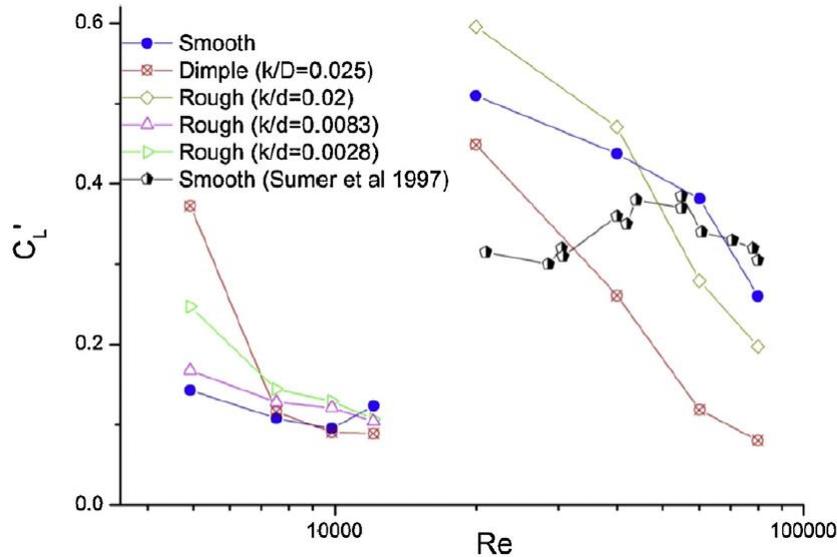


**Gambar 2.16** Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift* pada  $Re = 12.080$  (Zhou, 2014).

Gambar 2.17 memperlihatkan grafik variasi nilai rata-rata  $C_D$  terhadap *Reynolds number* untuk *smooth*, *dimple*, dan *rough cylinder*, serta hasil penelitian yang dilakukan oleh Sumer & Fredsøe (1997) sebagai pembandingan. Sedangkan Gambar 2.18 menunjukkan grafik nilai rata-rata  $C_{L\ RMS}$  (*Root Mean Square*) terhadap *Reynolds number*.



**Gambar 2.17** Grafik  $C_D$  vs  $Re$  untuk *Smooth*, *Rough* dan *Dimple Cylinder* (Zhou et al., 2015).



**Gambar 2.18** Grafik  $C_{L\text{RMS}}$  vs  $Re$  untuk *Smooth*, *Rough* dan *Dimple Cylinder* (Zhou et al., 2015).

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, kekasaran permukaan pada *circular cylinder* mampu mempengaruhi karakteristik aliran udara yang melewatinya. Perubahan nilai koefisien *lift* dan koefisien *drag* menjadi sorotan pada eksperimen ini. Pada rentang *Reynolds number*  $2 \times 10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4$ , penambahan kekasaran permukaan  $k/D = 0,025$  pada *cylinder* mampu menurunkan nilai koefisien *drag* sebanyak 30% untuk *dimple* ( $r/D = 0,1$  dan  $d/D = 0,025$ ) dan 20% untuk *rough surface* ( $k/D = 0,02$ ) jika dibandingkan dengan *smooth surface*. Adapun nilai rata-rata  $C_{L\text{RMS}}$  dari *cylinder* dengan *dimple* dan *rough* juga mengalami pengurangan dibandingkan *smooth cylinder*.

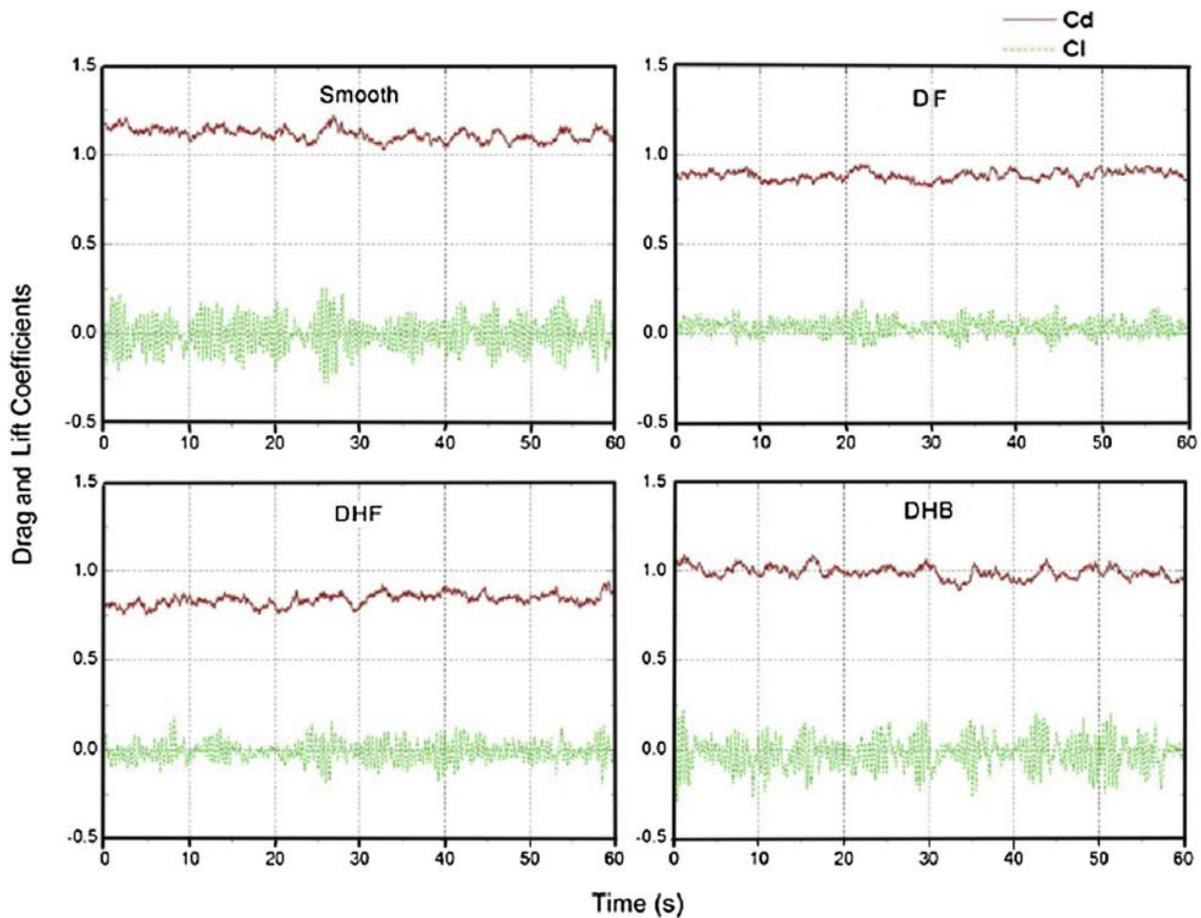
Pada tahun 2015 dan 2016, Zhou melakukan penelitian yang sama terkait *cylinder* dengan kekasaran permukaan *dimple*, namun dengan konfigurasi yang berbeda. Kali ini, eksperimen dilakukan terhadap *cylinder* dengan jumlah dan penempatan *dimple* yang berbeda-beda. Variasi tersebut terlihat seperti pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Konfigurasi dan Kode *Dimple* (Zhou et al., 2016; 2015).

No.	Sketch	Test case description	Remark
1		Smooth	Smooth
2		Dimple full	DF
3		Dense Dimple full	DDF
4		Dimple Half Forward	DHF
5		Dimple Half Side	DHS
6		Dimple Half Backward	DHB
7		Dense Dimple Half Forward	DDHF
8		Dense Dimple Half Side	DDHS
9		Dense Dimple Half Backward	DDHB

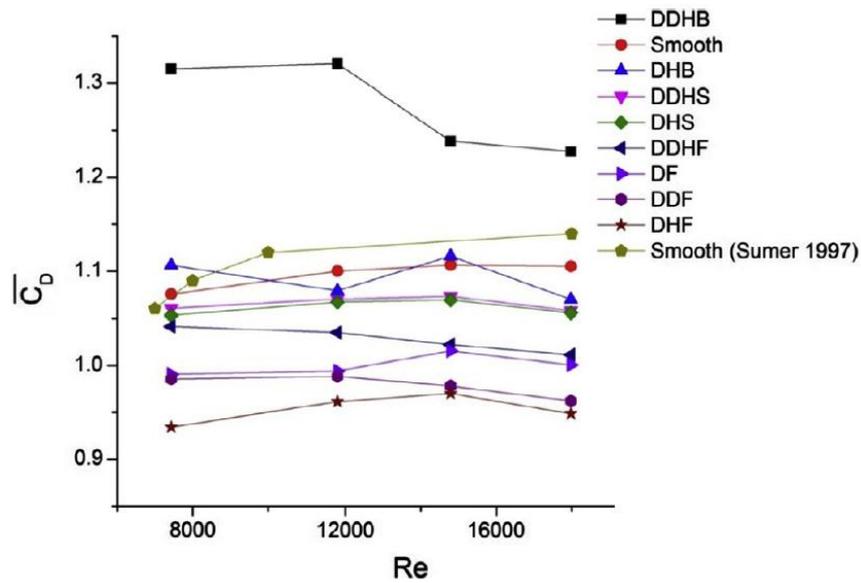
Berdasarkan Tabel 2.2, eksperimen dilakukan menggunakan 9 jenis *cylinder* dengan masing-masing kode yang digunakan dalam pembahasannya, yaitu *smooth*, *Dimple full* (DF), *Dense Dimple full* (DDF), *Dimple Half Forward* (DHF), *Dimple Half Side* (DHS), *Dimple Half Backward* (DHB), *Dense Dimple Hal Forward* (DDHF), *Dense Dimple Half Side* (DDHS), dan *Dense Dimple Half Backward* (DDHB), dengan *dense* yang berarti rapat, dengan jumlah *dimple* 2x lebih banyak dibandingkan *sparse* (jarang), yaitu 32 *dimple*. Adapun *half* berarti permukaan yang diberi *dimple* hanya sebagian. Berbeda dengan *full* yang diberikan *dimple* pada keseluruhan permukaan.

Pada tahun 2015, eksperimen dilakukan dengan benda uji *circular cylinder* 40mm dengan kekasaran permukaan  $k/D = 0,05$  dimana  $k$  adalah kedalaman *dimple* dan  $D$  adalah diameter *dimple*. Eksperimen menggunakan *open water channel* dengan variasi *Reynolds number*  $7,43 \times 10^3 - 1,798 \times 10^4$ .

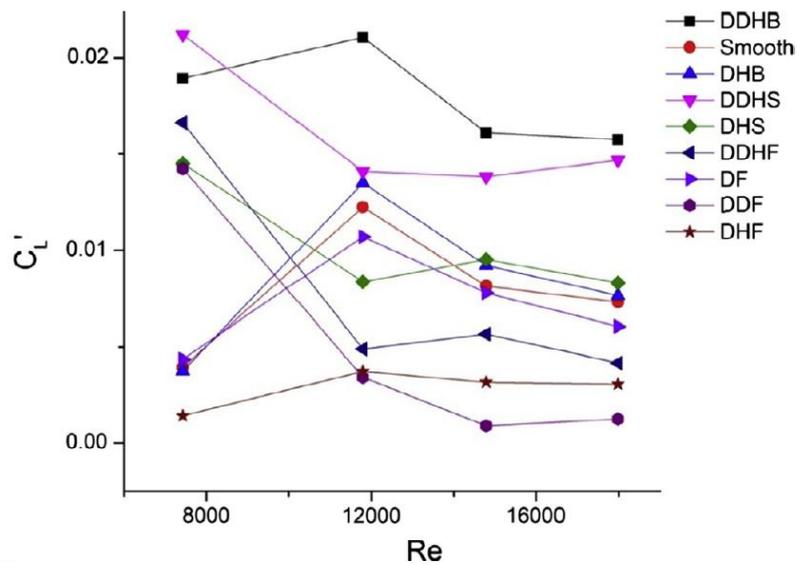


**Gambar 2.19** Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift* pada  $Re = 17.980$  (Zhou et al., 2015).

Hasil eksperimen yang dilakukan menunjukkan bahwa nilai rata-rata  $C_D$  lebih rendah dibandingkan dengan *smooth cylinder* pada *Reynolds number* 17.980 (Gambar 2.19). Fluktuasi nilai pada variasi DHB adalah yang paling tinggi dibandingkan dengan DF dan DHF. Sedangkan nilai rata-rata  $C_{L\ RMS}$  pada tiap kasus adalah sama, yaitu konstan pada  $C_L \approx 0$ . Amplitudo fluktuasi *lift* secara signifikan lebih besar dibandingkan dengan *drag*, yang menunjukkan fluktuasi tekanan karena *vortex shedding* yang dihasilkan secara periodik pada daerah *wake* dengan nilai *Strouhal number* sebesar  $St = 0,18$ .



**Gambar 2.20** Grafik  $C_D$  vs  $Re$  *Dimple Cylinder*, untuk  $7,43 \times 10^3 < Re < 1,798 \times 10^4$  (Zhou et al., 2015).

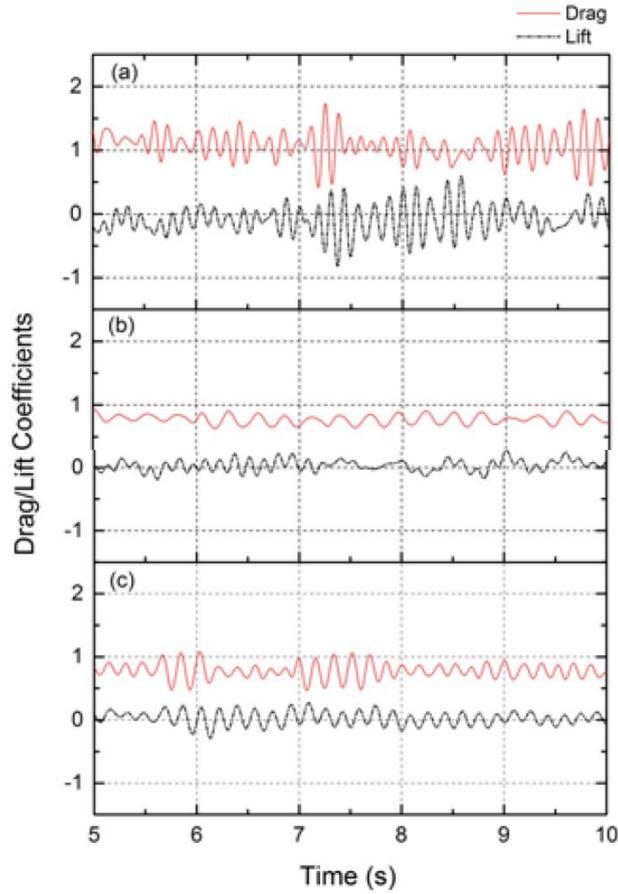


**Gambar 2.21** Grafik  $C_{L,RMS}$  vs  $Re$  *Dimple Cylinder*, untuk  $7,43 \times 10^3 < Re < 1,798 \times 10^4$  (Zhou et al., 2015).

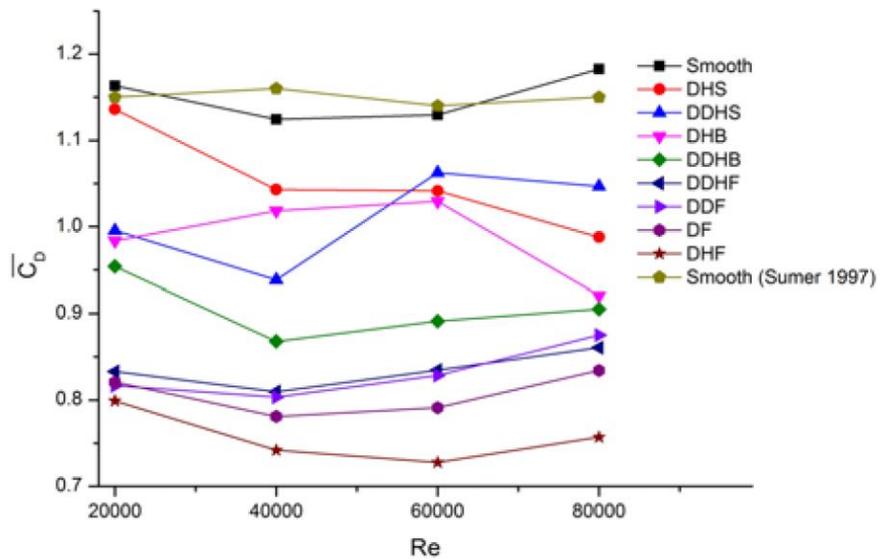
Gambar 2.20 menunjukkan variasi  $C_D$  sebagai fungsi *Reynolds number* untuk *smooth cylinder* dan *dimpled cylinder* pada  $7,43 \times 10^3 < Re < 1,798 \times 10^4$ . Berdasarkan grafik tersebut, nilai rata-rata  $C_D$  meningkat seiring dengan peningkatan nilai  $Re$  dengan nilai sekitar 1,1. Sedangkan nilai rata-rata  $C_{L,RMS}$  (Gambar 2.21) menunjukkan hasil yang beragam. *Cylinder* dengan variasi DDF menunjukkan nilai terendah sekitar 0,2 kali nilai *smooth cylinder*. Dan untuk  $Re = 1,798 \times 10^4$ , nilai terendah dihasilkan oleh DHF dengan nilai rata-rata  $C_{L,RMS}$  sekitar 0,4 kali *smooth cylinder*. Sedangkan *cylinder* dengan variasi DHS, DHB, DDHS, dan DDHB menunjukkan hasil  $C_{L,RMS}$  yang lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder*.

Sedangkan pada tahun 2016, Zhou melakukan eksperimen dengan menggunakan *cylinder* 100 mm dengan kekasaran permukaan *dimple*  $k/D = 0,025$ . Eksperimen menggunakan *towing*

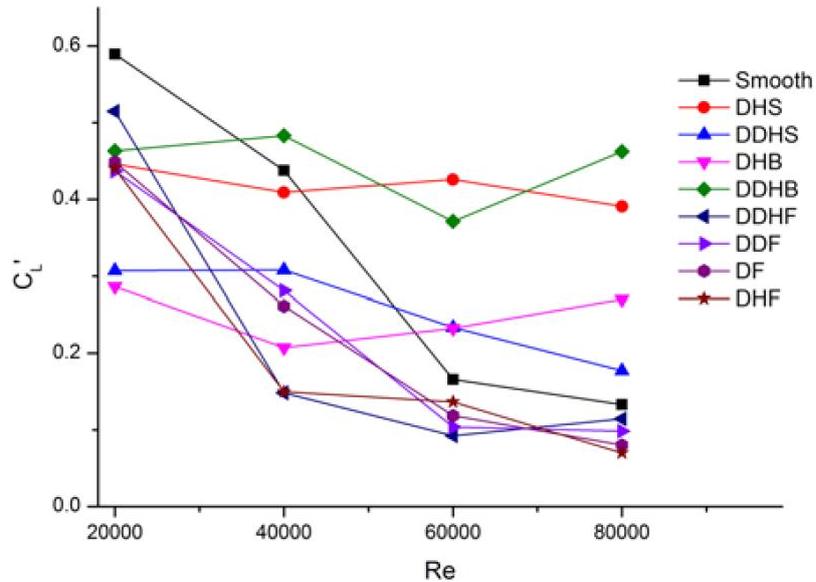
tank dengan variasi Reynolds number  $2 \times 10^4 - 8 \times 10^4$ . Model dan kode khusus yang digunakan sama dengan tahun sebelumnya (Tabel 2.2).



**Gambar 2.22** Koefisien Drag dan Koefisien Lift pada  $Re = 80.000$ : (a) *Smooth Cylinder* ; (b) *Full-Sparse Dimpled Cylinder* ; (c) *full-dense dimpled cylinder* (Zhou et al., 2016).



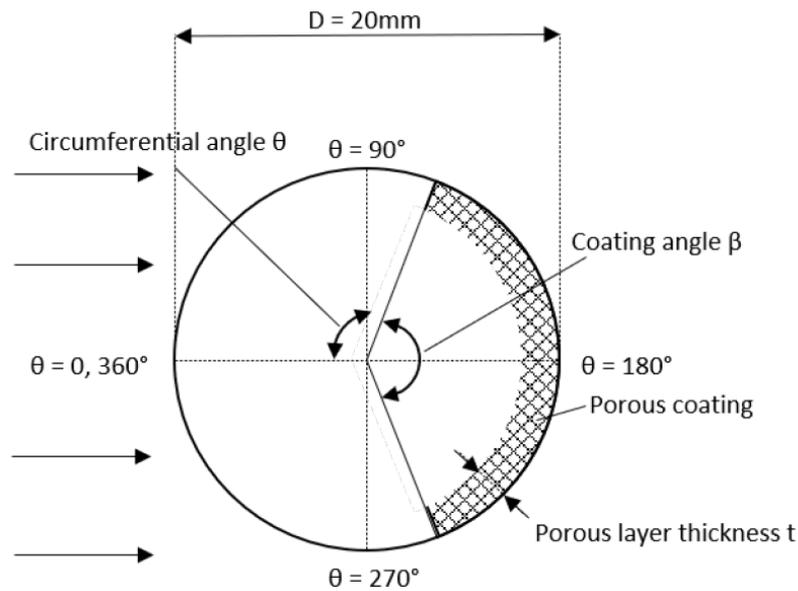
**Gambar 2.23** Grafik  $C_D$  vs  $Re$  *Dimple Cylinder*, untuk  $4 \times 10^4 < Re < 8 \times 10^4$  (Zhou et al., 2016).



**Gambar 2.24** Grafik  $C_{L RMS}$  vs Re *Dimple Cylinder*, untuk  $4 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^4$  (Zhou et al., 2016).

Gambar 2.22 menunjukkan grafik amplitudo terhadap waktu untuk *smooth*, *full-sparse dimpled*, dan *full-dense dimpled cylinder*. Gambar 2.22 (b) menunjukkan nilai rata-rata  $C_D$  dan  $C_{L RMS}$  *full-sparse dimpled cylinder* yang lebih rendah dibandingkan *smooth cylinder*, begitu juga dengan *full-dense dimpled cylinder* seperti Gambar 2.22 (c). Adapun nilai keduanya tidak jauh berbeda. Gambar 2.23 dan Gambar 2.24 menunjukkan hubungan antara rata-rata  $C_D$  terhadap Re dan rata-rata  $C_{L RMS}$  terhadap Re. Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa *cylinder* dengan nilai  $C_D$  terendah adalah DHF dan nilai  $C_D$  tertinggi adalah DHS dan DDHS. Sedangkan nilai  $C_{L RMS}$  terendah adalah DHF dan DDHF, dan nilai tertinggi adalah DHS dan DDHB. Sehingga, ditarik kesimpulan bahwa meletakkan *dimple* dengan model DHS atau DDHB secara signifikan mampu meningkatkan nilai rata-rata  $C_{L RMS}$  untuk desain *cylinder* sebagai *energy harvesting* yang lebih optimal.

Guinness & Persoons (2021), melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan *leeward porous coatings* terhadap koefisien *drag* dan koefisien *lift* pada permukaan *circular cylinder*. Penelitian dilakukan secara numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) 2-Dimensi dengan menggunakan *software* Ansys Fluent. Simulasi dilakukan untuk sebuah *circular cylinder* 20 mm dengan memvariasikan sudut *coating* ( $\beta$ ) pada permukaan *cylinder*. Adapun variasi sudut yang digunakan adalah  $0^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $100^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $160^\circ$ , dan  $360^\circ$ . Gambar skematik geometri yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.25.



**Gambar 2.25** Geometri *Cylinder* dengan *Porous Coating* (Guinness & Persoons, 2021).

Simulasi dilakukan untuk *Reynolds number*  $4,2 \times 10^4$ . Jenis *mesh* yang digunakan adalah *structured mesh* dengan  $Y^+ \approx 1$ . Jumlah *cell mesh* yang digunakan sebesar 155.000, dimana *mesh* di daerah dekat dinding *cylinder* dibuat lebih rapat untuk bisa menangkap *vortex shedding*. Properti fluida mengacu pada air dengan temperatur  $20^\circ\text{C}$ . Model turbulensi yang digunakan adalah URANS (*Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes*) dengan model *2-equations*  $K-\omega$  SST dengan *solution method* SIMPLE dan *spatial discretization* *second order implicit*. *Turbulent Intensity* sebesar 1% dan dengan *Time Step Size* yang digunakan sebesar  $1 \times 10^{-4}$  sekon.

**Tabel 2.3** Hasil Simulasi *Smooth Cylinder* dan *Cylinder* dengan *Porous Coating* (Guinness & Persoons, 2021).

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

Berdasarkan Tabel 2.3, *cylinder* dengan sudut *coating*  $\beta = 160^\circ$  mengalami kenaikan nilai koefisien *drag* sebesar 42% dari *smooth circular cylinder* sebesar 1.511 dan  $C_{L\text{ RMS}}$  yang lebih rendah sebesar 0,322. *Cylinder* dengan sudut *coating* dengan  $\beta = 160^\circ$  secara signifikan mampu menaikkan nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  yang cukup besar dengan nilai 1,187 namun nilai  $C_D$  juga mengalami kenaikan sebesar 1.528.

Berikut ini merupakan *summary* penelitian sebelumnya mengenai *circular cylinder* dengan kekasaran permukaan.

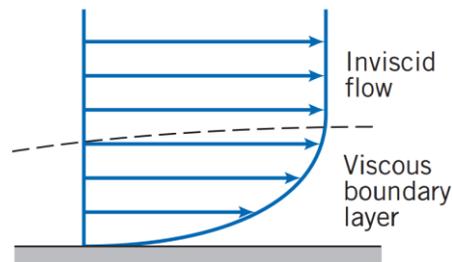
Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu.

Peneliti	E/S	Reynolds number	Kekasaran permukaan	Variasi	Kesimpulan
(Igarashi, 1986)	E	$1,3 \times 10^3 - 9,6 \times 10^4$	<i>Tripping wire</i>	Diameter <i>cylinder</i> , diameter <i>tripwire</i> , jumlah <i>tripwire</i> dan posisi <i>tripwire</i>	Penambahan <i>tripping wire</i> pada bagian depan ( <i>upstream</i> ) sebagai <i>passive control</i> akan menurunkan nilai koefisien <i>drag</i> .
(Zhou, et al., 2015)	E	$6 \times 10^3 - 8 \times 10^4$	<i>Net, dimple, dan amplas</i>	Diameter <i>cylinder</i> , kekasaran permukaan, <i>Reynolds number</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kekasaran permukaan pada <i>circular cylinder</i> mampu mempengaruhi karakteristik aliran.</li> <li>• Penambahan kekasaran permukaan menurunkan nilai rata-rata <math>C_D</math> dan <math>C_{L\ RMS}</math>.</li> </ul>
(Zhou, et al., 2015)	E	$7,43 \times 10^3 - 1,798 \times 10^4$	<i>Dimple</i>	Jumlah dan posisi <i>dimple</i>	Penambahan kekasaran permukaan <i>dimple</i> untuk model DHS, DHB, dan DDHS mampu meningkatkan nilai rata-rata $C_{L\ RMS}$ walau nilai $C_D$ mengalami peningkatan.
(Zhou et al., 2016)	E	$2 \times 10^4 - 8 \times 10^4$	<i>Dimple</i>	Jumlah dan posisi <i>dimple</i>	Penambahan <i>dimple</i> dengan model DHS dan DDHB mampu meningkatkan nilai rata-rata $C_{L\ RMS}$ .
(Quadrante & Nishi, 2014)	E	$3,45 \times 10^3$ hingga $2,04 \times 10^4$	- *( <i>Tripping wire</i> digunakan pada gap tertentu dari permukaan <i>cylinder</i> )	Posisi <i>tripwire</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posisi sudut <math>20^\circ - 52,5^\circ</math> atau lebih dari <math>97,5^\circ</math> mampu menurunkan gaya hidrodinamik dan posisi sudut antara <math>52,5^\circ</math> hingga <math>97,5^\circ</math> akan meningkatkan nilai dari gaya hidrodinamik.</li> <li>• Posisi sudut <math>60^\circ</math> dan <math>75^\circ</math> menyebabkan amplitudo, koefisien <i>lift</i>, dan koefisien <i>drag</i> meningkat seiring dengan penurunan kecepatan. Adapun sudut <math>105^\circ</math> dan <math>120^\circ</math> menurunkan nilai koefisien <i>lift</i>, serta meredam getaran pada <i>cylinder</i>, terutama pada sudut <math>120^\circ</math>.</li> </ul>
(Guinness & Persoons, 2021)	S	$4,2 \times 10^4$	<i>Porous coating</i>	Sudut <i>coating</i>	<i>Cylinder</i> dengan sudut <i>coating</i> dengan $\beta = 160^\circ$ secara signifikan mampu menaikkan nilai $C_{L\ RMS}$ yang cukup besar dengan nilai 1,187 namun nilai $C_D$ juga mengalami kenaikan sebesar 1.528.
(Hover et al., 2001)	E	$\leq 4,6 \times 10^4$	<i>Tripping wire</i>	$d/\delta$ dengan $d$ adalah diameter <i>wire</i> dan $\delta$ adalah <i>boundary layer thickness</i>	<i>Tripwire</i> dengan sudut $\pm 70^\circ$ secara signifikan menurunkan nilai koefisien <i>drag</i> dan koefisien <i>lift</i> .
(Mamouri et al., 2016)	E	$1 \times 10^4$ dan $3,5 \times 10^4$	<i>Tripping wire</i>	Jumlah, diameter, dan posisi <i>tripwire</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Wire</i> dengan posisi sudut <math>45^\circ</math> (dengan 4 buah <i>tripwire</i>) mampu menurunkan koefisien <i>drag</i> sebesar 53% dan 65.5%</li> <li>• Penambahan <i>tripwire</i> pada sisi <i>upstream</i> mampu meningkatkan frekuensi sistem.</li> </ul>

Keterangan: E = Eksperimen, S = Simulasi

## 2.2 Aliran *Inviscid* dan *Viscous*

Aliran diklasifikasikan menjadi 2 jenis berdasarkan nilai viskositasnya, yaitu aliran *inviscid* dan aliran *viscous*. Ilustrasi sederhana kedua jenis aliran ini ditunjukkan pada Gambar 2.26. Ketika dua lapisan fluida (*fluid layer*) bergerak secara relatif satu sama lain, gaya gesekan yang timbul akan mempengaruhi kedua aliran. Kecepatan aliran yang mengalami kontak langsung dengan permukaan akan semakin berkurang karena adanya tegangan geser. Lapisan ini akan memberikan efek gaya kohesi pada lapisan lainnya, begitu juga dengan lapisan-lapisan lainnya sampai kepada lapisan pada tingkat tertentu. Hal ini disebut sebagai efek *viscous*. Aliran dimana efek *viscous* terjadi secara signifikan disebut aliran *viscous*. Sedangkan aliran dengan efek *viscous* yang sangat kecil (sehingga dapat diabaikan) dibandingkan dengan inersia disebut sebagai aliran *inviscid* (Cengel *et al*, 2004).



**Gambar 2.26** Aliran *Inviscid* dan Aliran *Viscous* (Fox *et al.*, 2011).

Berdasarkan penjelasan tersebut, aliran *inviscid* merupakan aliran fluida yang memiliki nilai viskositas mendekati nol ( $\mu \rightarrow 0$ ), sehingga sering diasumsikan sebagai aliran tanpa viskositas ( $\mu = 0$ ), walaupun sebenarnya fluida dengan viskositas nol tidak pernah dijumpai. Sebaliknya, aliran *viscous* adalah aliran yang memiliki nilai viskositas ( $\mu > 0$ ), sehingga muncul gesekan pada permukaan yang dilalui oleh jenis aliran ini (Fox *et al.*, 2011).

Aliran *viscous* dapat dibedakan menjadi tiga macam, yaitu: Aliran laminar, transisi, dan turbulen. Dalam aliran laminar, partikel-partikel fluida bergerak sangat teratur mengikuti *streamline* yang sejajar dan tidak berpotongan. Aliran ini dapat terjadi apabila kecepatan aliran fluida relatif rendah atau nilai viskositasnya yang besar. Fluida yang bergerak tidak teratur biasanya terjadi pada kecepatan tinggi yang ditandai dengan adanya fluktuasi kecepatan, aliran semacam ini disebut sebagai aliran turbulen. Aliran ini biasanya terjadi pada aliran berkecepatan tinggi atau aliran dengan viskositas rendah seperti udara (Çengel & Cimbala, 2014).

## 2.3 Aliran Internal dan Eksternal

Aliran fluida diklasifikasikan menjadi aliran internal atau eksternal tergantung pada, apakah aliran dibatasi oleh permukaan padat atau mengalir di atas permukaan dengan fluida tak terbatas. Aliran fluida yang dibatasi oleh permukaan solid seperti pipa atau saluran (*duct*) disebut sebagai aliran internal atau *duct flows*. Sedangkan aliran fluida yang melalui permukaan suatu benda tanpa adanya pembatas seperti kabel atau *plate* disebut sebagai aliran eksternal (Fox *et al.*, 2011). Adapun aliran fluida cair yang terisi sebagian dan terdapat permukaan bebas seperti sungai dan saluran irigasi disebut sebagai aliran *open-channel* (Cengel & Cimbala, 2014).

## 2.4 Aliran *Compressible* dan *Incompressible*

Kemampuan suatu fluida dapat didefinisikan sebagai perubahan nilai volume karena adanya perubahan nilai tekanan pada fluida. Aliran dapat dikatakan *compressible* ketika variasi

*density* sepanjang medan aliran (*flow field*) tidak dapat diabaikan. Aliran dapat dikatakan *incompressible* ketika variasi *density* sangat kecil (< 5%) sehingga nilai *density* sepanjang aliran hampir konstan. Pada dasarnya, *density* fluida cair sangatlah konstan, sehingga fluida cair yang mengalir hampir tidak bisa dimampatkan. Sebaliknya, gas merupakan fluida yang sangat mudah dimampatkan karena jarak antar molekulnya yang sangat jauh (Çengel & Cimbala, 2014).

Pada fluida yang mengalir, aliran dapat dikatakan *incompressible* ketika kecepatan aliran, *V* sangat kecil dibandingkan dengan kecepatan suara, *c* = 346 m/s (pada kondisi standar). Rasio antara keduanya didefinisikan sebagai bilangan tak berdimensi bernama *Mach number*,

$$M \equiv \frac{U_{\sim}}{c} = \frac{\text{kecepatan aliran}}{\text{Kecepatan suara}} \dots\dots\dots (2.1)$$

dimana, jika *M* < 0,3; maka variasi *density* kurang dari 5%. Aliran gas dengan nilai *Mach number* kurang dari 0,3 diklasifikasikan sebagai aliran *incompressible* (Fox et al., 2011).

Berdasarkan nilai *Mach number* tersebut, aliran diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yaitu: *Sonic* (*M* = 1), *subsonic* (*M* < 1), *supersonic* (*M* > 1), dan *hypersonic* (*M* >> 1) (Çengel & Cimbala, 2014).

## 2.5 Aliran *Steady* dan *Unsteady*

Dalam analisa aliran 1, 2 maupun 3 Dimensi, jika properti aliran pada medan aliran (*flow field*) tidak berubah terhadap waktu, maka aliran disebut *steady*. Secara matematis ditulis dengan Persamaan (2.2),

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

dimana,

$\eta$  = properti fluida

*t* = waktu

sehingga, diperoleh hubungan antara *density* dan kecepatan fluida terhadap waktu dan posisi seperti pada Persamaan (2.3) dan (2.4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \text{ atau } \rho = \rho(x, y, z) \dots\dots\dots (2.3)$$

dan

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 \text{ atau } U = U(x, y, z) \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana,

$\rho$  = *density* (kg/m<sup>3</sup>)

*U* = kecepatan fluida (m/s).

Jika properti fluida pada setiap titik berubah terhadap waktu, maka aliran disebut *unsteady*. Pada umumnya, aliran 3-D menciptakan kondisi aliran yang *unsteady*, kecuali dalam penyederhanaan kasus (Fox et al., 2011).

## 2.6 Reynolds Number

*Reynolds number* merupakan bilangan tak berdimensi yang sangat penting dalam bidang *engineering*. Bermula dari Osborne Reynolds, seorang *engineer* berkebangsaan Inggris pada tahun 1880-an yang mempelajari transisi antara aliran laminar dan turbulen pada sebuah tabung. Reynold mendapati bahwa karakteristik aliran dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu viskositas ( $\mu$ ), massa jenis ( $\rho$ ), dan luas penampang ( $L$ ). Hubungan ketiganya ditunjukkan dengan  $\mu/(\rho l)$ . Reynold menunjukkan bahwa jika kecepatan aliran ( $U$ ) dibagi dengan nilai tersebut, maka diperoleh suatu bilangan tak berdimensi yang kini dikenal dengan nama *Reynolds number*,

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \dots\dots\dots (2.5)$$

dimana,

Re = *Reynolds number*

$\rho$  = *density* ( $\text{kg/m}^3$ )

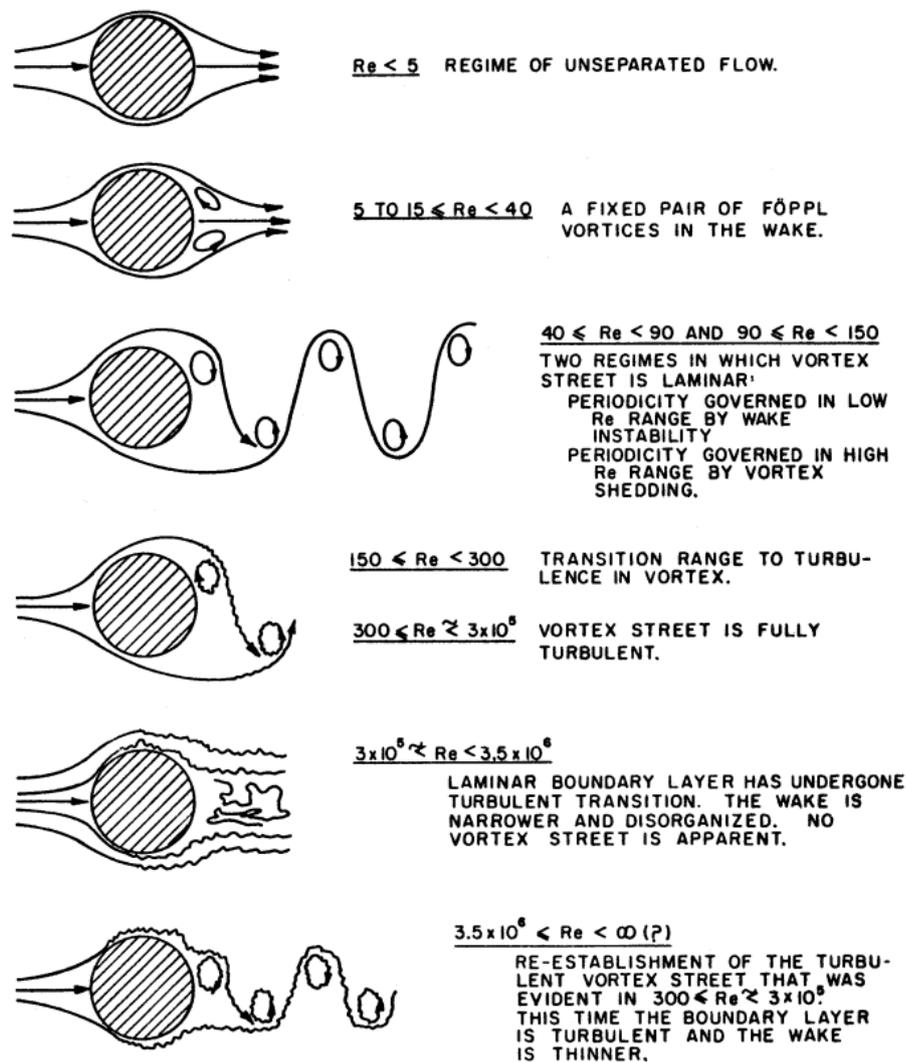
U = kecepatan aliran (m/s)

L = panjang karakteristik geometri (m)

$\mu$  = viskositas dinamik (kg/ms)

$\nu$  = viskositas kinematik ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Persamaan (2.5) merepresentasikan rasio antara gaya inersia dengan gaya *viscous*. Aliran dengan nilai *Reynolds number* yang besar umumnya menunjukkan aliran yang turbulen, sedangkan aliran dengan nilai *Reynolds number* yang kecil mengindikasikan aliran yang laminar (Fox *et al*, 2011). Lienhard (1966), mengelompokkan aliran yang melalui *cylinder* dalam beberapa *regime* berdasarkan perbedaan nilai *Reynolds number*, seperti pada Gambar 2.27.

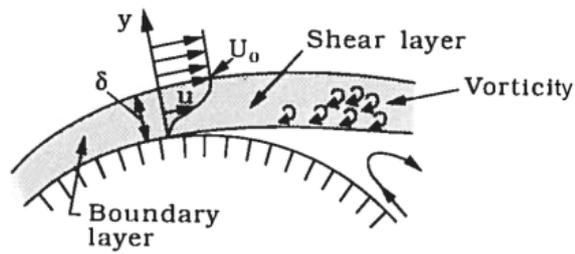


**Gambar 2.27** Variasi Aliran yang Melalui *Cylinder* 2D (Lienhard, 1966).

## 2.7 Boundary Layer

Ketika aliran melewati sebuah permukaan *non-porous*, fluida yang mengalami kontak langsung dengan permukaan akan berhenti dengan kecepatan mendekati nol relatif terhadap permukaan. Hal ini disebabkan oleh efek *viscous* yang memaksa molekul fluida untuk berhenti tepat pada lapisan dengan gaya gesek tertinggi. Kondisi seperti ini disebut dengan *no-slip condition* (Çengel & Cimbala, 2014). Pada daerah *viscous*, terjadi transisi kecepatan dan *Reynolds number*. Transisi nilai *Reynolds number* ini kemudian disebut sebagai *boundary layer* atau *frictional layer* oleh Ludwig Prandtl (1904). Semakin kecil *boundary layer* yang terbentuk, maka semakin tinggi *Reynolds number*. Namun, viskositas semakin kecil (Schlichting, 2000).

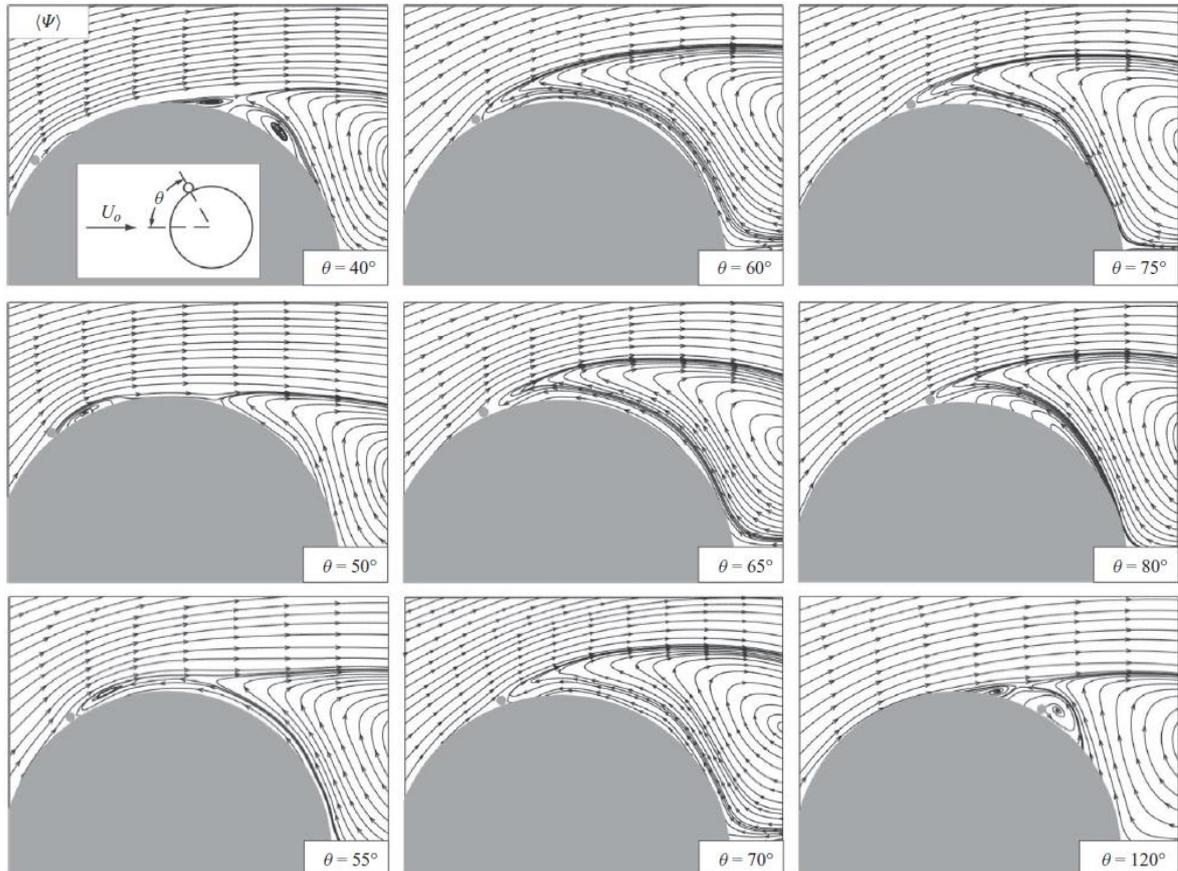
Pada aliran yang melalui permukaan melengkung seperti *circular cylinder*, *boundary layer* tidak selamanya dapat bertahan akibat tekanan yang terjadi. Pada titik tertentu, *boundary layer* akan terpisah dari permukaan. Proses semacam itu disebut *flow separation* (Çengel & Cimbala, 2014). Setelah *boundary layer* lepas dari permukaan *body*, aliran akan berkembang membentuk suatu lapisan bebas yang disebut *free-shear layer* (Gambar 2.28).



Detailed picture of flow near separation

**Gambar 2.28** *Boundary Layer* pada Permukaan Melengkung (Sumer & Fredsøe, 1997).

Titik terjadinya separasi dipengaruhi oleh beberapa hal seperti *Reynolds number*, viskositas, dan kekasaran permukaan. Banyak penelitian yang dilakukan untuk menunda terjadinya separasi, seperti yang dilakukan oleh Ekmekci & Rockwell (2010) dengan menambahkan *wire* untuk variasi posisi sudut tertentu pada permukaan *cylinder*, seperti Gambar 2.29.



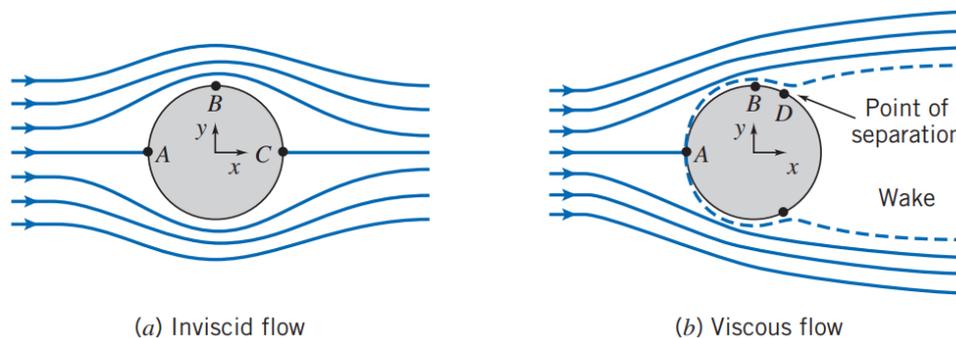
**Gambar 2.29** Pola Separasi Aliran dengan Penambahan *Wire* pada Permukaan *Cylinder* (Ekmekci & Rockwell, 2010).

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, penambahan *wire* pada permukaan *circular cylinder* mampu menunda terjadinya separasi. Penundaan separasi bertujuan untuk memperkecil daerah *wake*. Daerah *wake* yang semakin kecil akan mengurangi gaya *drag* yang terjadi, sehingga kerugian yang diterima akan semakin berkurang (Ekmekci & Rockwell, 2010).

## 2.8 Aliran Melewati *Circular Cylinder*

Aliran yang melewati *body* berbentuk *cylinder* telah banyak pelajari oleh para peneliti karena pengaplikasiannya yang banyak ditemukan pada komponen atau sistem *engineering*. Jenis aliran ini termasuk aliran kompleks walau bentuknya yang sederhana, karena koeksistensi dari *boundary layer*, *free-shear layer*, dan bentuknya yang simetris memungkinkan aliran terjadi secara periodik, seperti penelitian yang dilakukan oleh Kim et al. (2013) dan Park et al. (2013, 2014) mengenai koeksistensi *Vortex Induced Vibration* (VIV) pada *circular cylinder*. Jenis struktur yang dilewati aliran semacam ini disebut *bluff body* atau *blunt body*, contoh paling sederhana *bluff body* adalah *circular cylinder* (Mamouri et al., 2016).

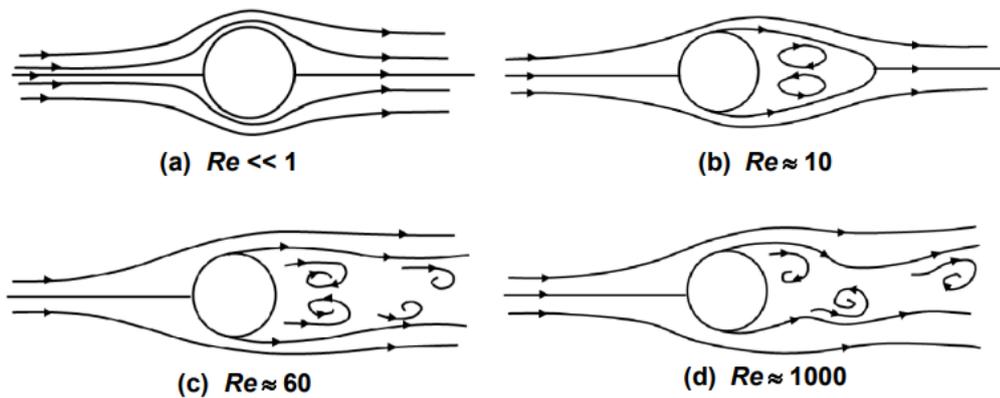
Aliran yang melalui *circular cylinder* merupakan aliran kompleks yang sangat bergantung pada *Reynolds number*. Prinsip dasarnya sama, dimana aliran yang melalui permukaan *cylinder* akan lepas pada sudut tertentu dan membentuk daerah turbulen di belakang *body*. Namun, karakteristik aliran akan berubah seiring dengan meningkatnya *Reynolds number* karena adanya efek *viscous*.



**Gambar 2.30** Aliran Melalui *Circular Cylinder* (Fox et al., 2011).

Gambar 2.30 (a) dan (b) menggambarkan perbedaan antara aliran *inviscid* dan aliran *viscous* yang melalui sebuah *circular cylinder*. Pada Gambar 2.30 (a), *streamline* yang melewati *cylinder* berbentuk simetris terhadap sumbu datangnya aliran, baik sebelum maupun sesudah melewati *cylinder*. Titik A dan C disebut sebagai titik stagnasi. Titik di mana aliran dipaksa berhenti hingga kecepatan *streamline* menjadi nol. Adapun tekanan pada titik ini relatif besar dengan nilai  $P_A = P_C$  (dimana P adalah tekanan). Sedangkan titik B merupakan lokasi dengan tekanan terendah, namun dengan kecepatan tertinggi. Distribusi tekanan adalah simetris terhadap titik stagnasi dan tidak ada hambatan akibat tekanan (Fox et al., 2011).

Gambar 2.30 (b) menggambarkan aliran yang dikenai efek *viscous*. Titik A merupakan titik stagnasi dengan kecepatan terendah namun dengan tekanan tertinggi. Aliran yang melewati permukaan *cylinder* kemudian membentuk suatu lapisan bernama *boundary layer*. Pada *boundary layer*, terjadi kenaikan kecepatan yang mengakibatkan tekanan menurun. Dari titik B ke D, tekanan meningkat seiring dengan penurunan kecepatan. Akhirnya, momentum aliran tidak sanggup lagi melawan *adverse pressure gradient* dan tegangan geser yang tercipta akibat adanya *backflow*, hingga pada akhirnya lepas dari *boundary layer*. Fenomena ini disebut juga sebagai separasi aliran dengan titik D disebut sebagai titik separasi. Daerah yang terbentuk diantara 2 titik separasi disebut daerah *wake*, daerah di belakang silinder dengan tingkat turbulensi yang tinggi (Fox et al., 2011).



**Gambar 2.31** Perubahan Pola Aliran di Sekitar *Circular Cylinder* terhadap *Reynolds Number* (Sato & Kobayashi, 2012).

Gambar 2.31 menunjukkan pola aliran yang melalui *circular cylinder* terhadap perubahan *Reynolds number*. Pada Gambar 2.31 (a) menunjukkan pola aliran yang simetris baik pada daerah datangnya aliran maupun daerah di belakang *cylinder*. Pada Gambar 2.31 (b) dengan  $Re = 10$ , *free-shear layer* mulai menggulung membentuk *vortices* simetri pada bagian belakang *cylinder*. Sisi atas membentuk *vortices* dengan arah *streamline* searah jarum jam (*clockwise*), sedangkan sisi bawah membentuk *vortices* berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise*). Semakin meningkatnya nilai *Reynolds number*, maka daerah *wake* akan semakin panjang. Pada  $Re = 60$ , *wake flow* menjadi tidak stabil seperti pada Gambar 2.31 (c). *Vortex* yang terbentuk mulai berosilasi pada arah transversal dan kemudian satu per satu memisahkan diri dari aliran utama hingga pada akhirnya menghilang. Barisan *vortex* yang terbentuk di belakang *cylinder* disebut sebagai *Von Karman Vortex Street*. Pada Gambar 2.31 (d), *vorticity* dan *vortex* bergabung secara acak dan tidak teratur membentuk aliran turbulen (Sato & Kobayashi, 2012).

Pola aliran yang berubah-ubah juga menunjukkan adanya perubahan karakteristik gaya yang bekerja pada permukaan *cylinder*. Pada *body*, terdapat beberapa jenis gaya yang bekerja pada permukaan, yaitu gaya *pressure*,  $F_p$ ; gaya *viscous* (gaya gesek/ friksi),  $F_f$ ; gaya *lift*,  $F_L$ ; dan gaya *drag*,  $F_D$ , yang didefinisikan melalui persamaan,

$$F_p = \int p dA \cos\theta \dots\dots\dots (2.6)$$

$$F_f = \int \tau dA \sin\theta \dots\dots\dots (2.7)$$

$$F_D = C_D A \frac{\rho U^2}{2} = F_D + F_f \dots\dots\dots (2.8)$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho U^2}{2} \dots\dots\dots (2.9)$$

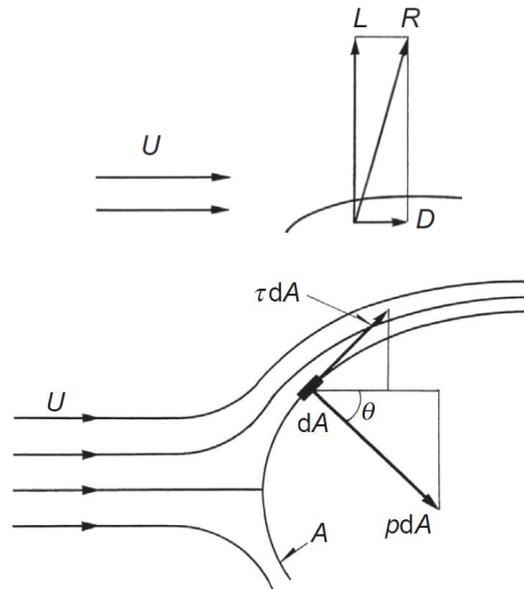
dimana,

- p = tekanan (N/m<sup>2</sup>)
- A = luas permukaan (m<sup>2</sup>)
- $\theta$  = *angle of attack* (deg)
- U = kecepatan aliran (m/s)

Berdasarkan Persamaan (2.6) gaya *pressure* didefinisikan sebagai gaya yang berbanding lurus dengan tekanan dan luas penampang, dimana gaya dihasilkan oleh tekanan akibat aliran udara

pada suatu penampang. Adapun gaya friksi didefinisikan melalui persamaan (2.7), yang merupakan gaya yang dihasilkan akibat adanya tegangan geser pada suatu penampang yang berlawanan arah dengan arah datangnya aliran. Gaya *drag* merupakan gaya dalam arah sejajar dengan aliran udara, sedangkan gaya *lift* merupakan gaya dalam arah transversal dengan arah datangnya aliran seperti pada Gambar 2.32. Untuk menghitung nilai gaya *drag* dan gaya *lift*, dapat menggunakan Persamaan (2.8) dan (2.9).

Keempat jenis gaya tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti *density* dan kecepatan, serta diwakili oleh suatu bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *pressure*,  $C_p$ ; koefisien *friction*,  $C_f$ ; koefisien *lift*,  $C_L$ ; dan koefisien *drag*,  $C_D$  (Nakayama, 2018).



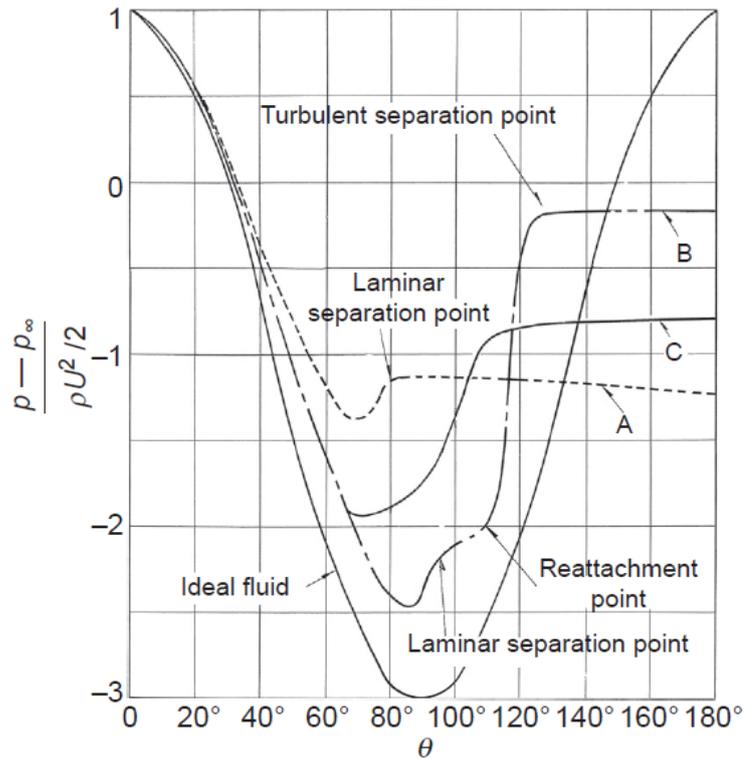
**Gambar 2.32** Gaya yang Bekerja pada *Body* yang Dilewati Aliran (Nakayama, 2018).

### 2.8.1 Koefisien *Pressure* ( $C_p$ )

koefisien *pressure* merupakan suatu nilai yang dapat mewakili besarnya gaya *pressure* yang diberikan kepada benda kerja. Besarnya nilai  $C_p$  dapat diperoleh melalui Persamaan (2.10),

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\rho U^2 / 2} \dots\dots\dots (2.10)$$

dimana,  $p - p_\infty = \Delta p =$  Perubahan tekanan (untuk  $p$  adalah tekanan pada titik tertentu dan  $p_\infty$  merupakan tekanan *freestream*). Ilustrasi untuk distribusi tekanan ditunjukkan pada Gambar 2.33 untuk beberapa nilai *Reynolds number*.



**Gambar 2.33** Distribusi Tekanan di Sekitar *Circular Cylinder* terhadap Sudut Azimuth: (a)  $Re = 1,1 \times 10^5$  ; (b)  $Re = 6,7 \times 10^5$  ; (c)  $Re = 8,4 \times 10^5$  (Nakayama, 2018).

### 2.8.2 Koefisien Lift ( $C_L$ )

*Lift* merupakan gaya yang dihasilkan oleh interaksi antara fluida yang mengalir dengan *body* dalam arah yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran. Koefisien *lift* merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat menginterpretasikan nilai *lift force* dengan Persamaan (2.11),

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \dots\dots\dots (2.11)$$

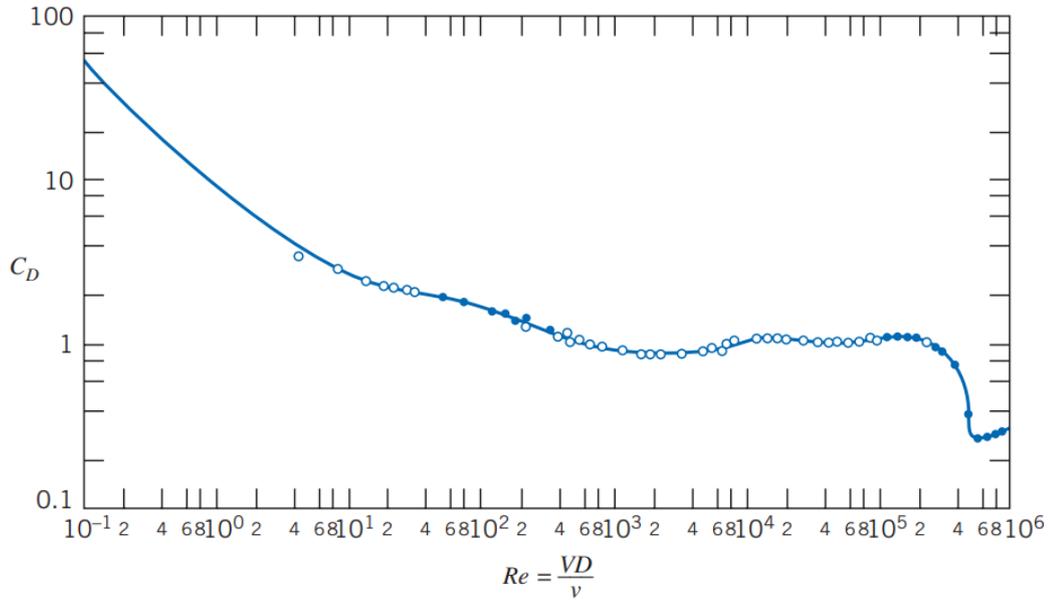
Aliran yang melalui *smooth circular cylinder* menghasilkan pola aliran yang bolak-balik yang menyebabkan adanya gaya *lift* pada *cylinder* dengan arah tegak lurus terhadap *downstream*. Osilasi sinusoidal yang terbentuk dapat menjadi sumber kerusakan pada benda. Namun, tidak selamanya *lift force* bersifat merugikan. Kini, getaran akibat *lift force* dapat dimanfaatkan sebagai *energy harvesting*, seperti penelitian yang dilakukan oleh Quadrante & Nishi (2014).

### 2.8.3 Koefisien Drag ( $C_D$ )

*Drag* merupakan komponen gaya pada *body* yang bekerja searah dengan datangnya aliran. Nilainya akan semakin besar seiring dengan pembesaran daerah *wake*. Secara matematis, nilai koefisien *drag* dapat diperoleh melalui persamaan (2.12),

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \dots\dots\dots (2.12)$$

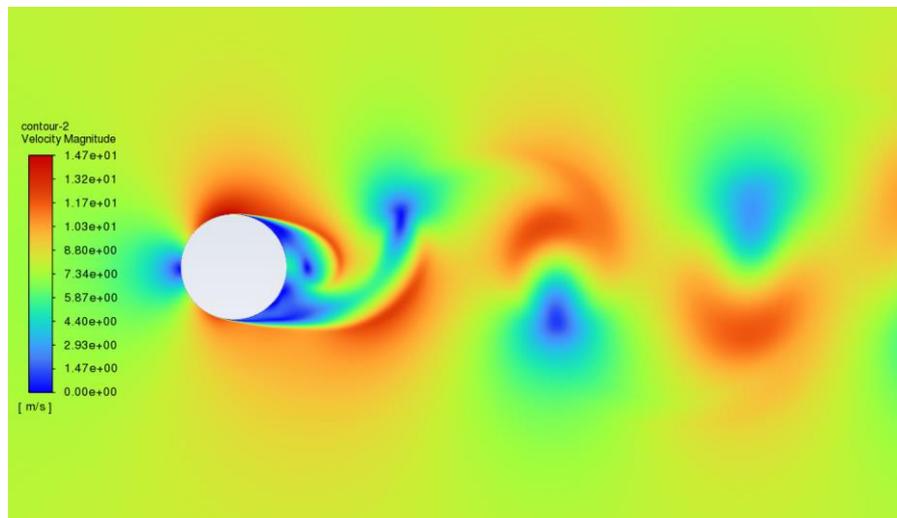
Nilai  $C_D$  pada *smooth circular cylinder* dapat dilihat pada Gambar 2.34.



**Gambar 2.34** Koefisien *Drag* untuk *Smooth Circular Cylinder* sebagai Fungsi *Reynolds Number* (Fox et al., 2011).

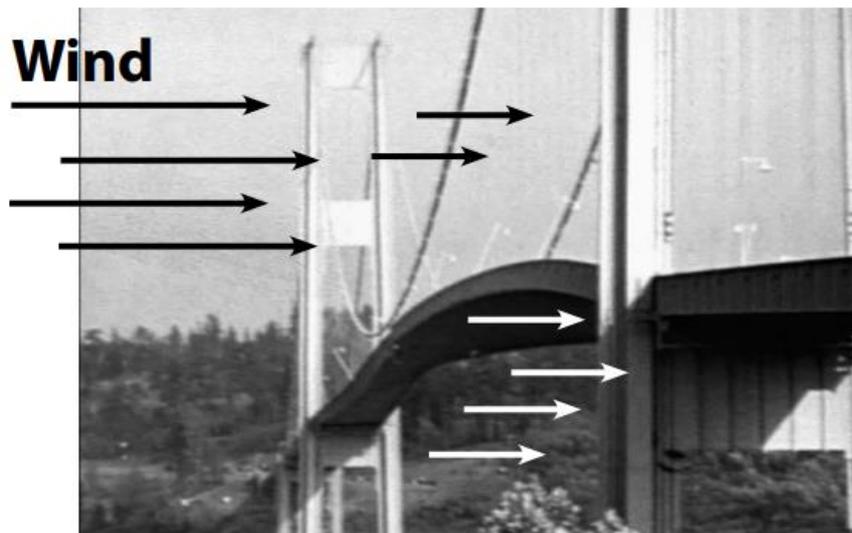
## 2.9 Vortex Shedding

Gaya *lift* dan gaya *drag* sangat tergantung kepada geometri benda yang dilewati aliran. Perubahan geometri akan memberikan dampak yang signifikan terhadap karakteristik aliran karena akan mempengaruhi proses separasi aliran dan proses pembentukan *vortices* di daerah *wake*. Regenerasi *vortices* dari *downstream* disebut *vortex shedding* atau *Karman vortex shedding*. Contoh sederhana *Karman Vortex shedding* diilustrasikan pada Gambar 2.35.



**Gambar 2.35** *Vortex Shedding* pada *Circular Cylinder 2D*

Pada *circular cylinder*, fenomena ini terjadi selama aliran berlangsung tanpa adanya gangguan untuk rentang  $Re$  tertentu. Getaran yang dihasilkan *vortices* di dekat *body* menyebabkan *body* mengalami getaran yang beresilasi (Çengel & Cimbala, 2014). Jika frekuensi yang dihasilkan sama dengan frekuensi yang dimiliki *body*, hal ini dapat menyebabkan resonansi dengan getaran tinggi, seperti insiden *Tacoma Narrows Bridge* di Washington pada tahun 1940.



**Gambar 2.36** Insiden Runtuhnya Jembatan Tacoma Narrows pada Tahun 1940, Washington (Miller et al., 2008)

### 2.10 *Flow-Induced Vibration*

Masalah akibat getaran banyak ditemukan pada suatu industri seperti pada pipa, *water heater*, *heat exchanger*, dan mesin-mesin fluida. Hal ini disebabkan oleh aliran yang mengalir melalui *equipment* tersebut. Fenomena ini dikenal sebagai *Flow Induced Vibration* (FIV). FIV merupakan fenomena dimana aliran suatu fluida menyebabkan getaran pada suatu objek karena ketidakstabilan aliran yang menyebabkan variasi gaya menjadi tidak menentu. Hal ini tidak hanya berlaku untuk kondisi *unsteady flow*, pada kondisi aliran eksternal dan *steady flow*, getaran dapat terjadi akibat *vortex shedding* maupun akibat fenomena lainnya. Kondisi getaran yang timbul akibat *Karman vortex shedding* disebut *Vortex Induced Vibration* (VIV) (Kaneko et al., 2014).

*Vortex Induced Vibration* merupakan getaran yang terjadi akibat resonansi antara frekuensi *vortex shedding* dengan frekuensi objek yang dilalui fluida. Ketika aliran melewati *bluff body* seperti *circular cylinder*, *boundary layer* akan terpisah dari permukaan membentuk *free shear layer* yang sangat tidak stabil. *Free-shear layer* akan menggulung membentuk *discrete vortex* dan terlepas dari permukaan. Hal inilah yang membentuk *shedding vortex* pada daerah *wake*. Aliran akan membentuk *vortices* secara periodik dan menginduksi tekanan yang tidak merata antara sisi atas dan sisi bawah *body* hingga pada akhirnya lepas dari *boundary layer* permukaan *body*. Pada akhirnya, getaran akan menghasilkan 2 jenis getaran dalam arah yang berbeda, yaitu arah transversal (*lift*) dan arah sejajar (*drag*). Getaran dalam arah transversal disebut sebagai *Karman vortex shedding frequency*, sedangkan getaran dalam arah sejajar sebanding dengan 2 kali nilai *Karman vortex shedding frequency* (Kaneko et al., 2014). *Karman vortex shedding frequency*,  $f_s$  didefinisikan dalam suatu bilangan tak berdimensi yang disebut *Strouhal Number*,  $St$  oleh Vincenz Strouhal (1850 – 1925).

*Strouhal Number* merupakan parameter penting dalam menganalisis suatu aliran. Bilangan ini menunjukkan hubungan antara frekuensi *vortex shedding*, diameter *body*, dan kecepatan aliran fluida. Hubungan ini digambarkan melalui Persamaan (2.13):

$$St = \frac{(f_s D)}{u} \dots\dots\dots (2.13)$$

dimana,

$St$  = *Strouhal number*

$f_s$  = *Karman vortex shedding frequency* (Hz)

$D$  = panjang atau diameter (m)

$U$  = kecepatan aliran (m/s).

Parameter lain yang mempengaruhi nilai *Strouhal number* adalah *Reynolds number* ( $Re$ ), kekasaran permukaan, dan *turbulence intensity* ( $Tu$ ). Hubungan antara *Reynolds number* dan *Strouhal number* ditunjukkan melalui Persamaan (2.14), (2.15), dan (2.16) berikut.

$$\pi_1 = \frac{f_s D}{U} = St = \text{Strouhal number} \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\pi_2 = \frac{\rho \omega D}{\mu} = Re = \text{Reynolds number} \dots\dots\dots (2.15)$$

$$St = f(Re) \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana,

$\pi$  = *dimensionless parameter*

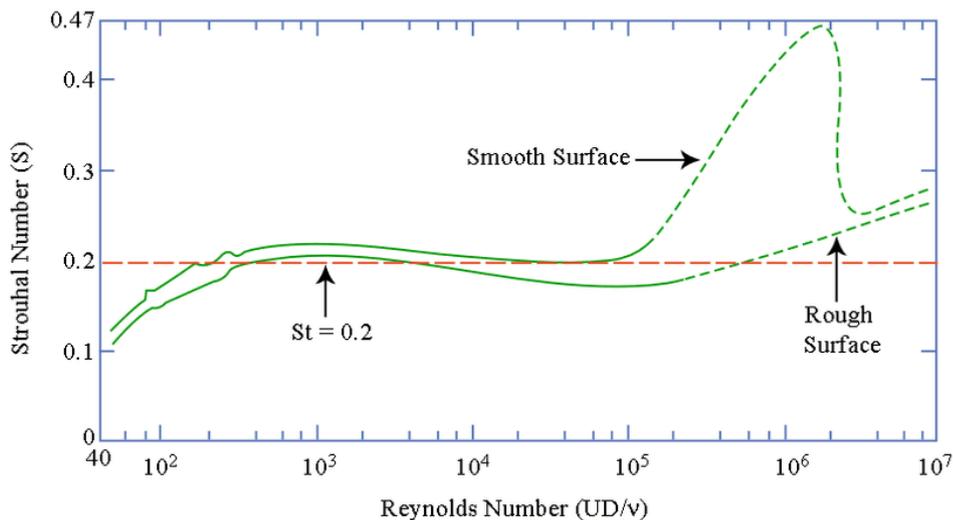
$Re$  = *Reynolds number*

$\rho$  = *density* (kg/m<sup>3</sup>)

$\omega$  = *kecepatan sudut* (rad/s)

$\mu$  = *viskositas dinamik* (kg/ms)

Hubungan yang lebih jelas ditunjukkan melalui Gambar 2.37 berikut.

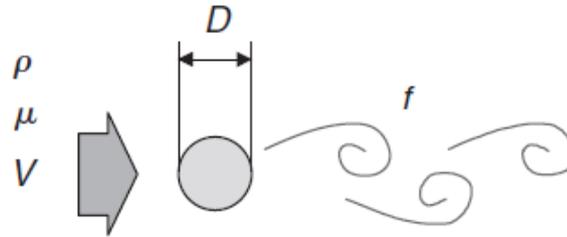


**Gambar 2.37** Grafik Hubungan antara *Strouhal Number* dengan *Reynolds Number* pada *Circular Cylinder* (Achenbach & Heinecke, 1981; Lienhard, 1966).

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara *Reynolds number* dan *Strouhal number* untuk permukaan *smooth circular cylinder* dan permukaan *circular cylinder* yang diberikan kekasaran.

Pada akhirnya, diketahui bahwa frekuensi *vortex shedding* merupakan fungsi kecepatan aliran, diameter, massa jenis dan viskositas dinamik seperti pada Persamaan (2.17) dan diilustrasikan pada Gambar 2.38.

$$f_s = f(U, D, \rho, \mu) \dots\dots\dots (2.17)$$



**Gambar 2.38** Frekuensi *Vortex Shedding* Fungsi Kecepatan Aliran, Diameter, Massa Jenis dan Viskositas Dinamik (Kaneko et al., 2014).

### 2.11 Energy Harvesting

*Energy harvesting* didefinisikan sebagai pengumpulan dan penyimpanan energi *ambient* dengan mengkonversi energi tersebut menjadi energi listrik untuk penggunaan perangkat kecil atau proses dimana energi eksternal dikumpulkan dan disimpan untuk kegunaan sistem elektrik (Adina et al., 2015). Aplikasi teknologi ini menyediakan sistem dimana sumber energi lain tidak tersedia. Konsepnya adalah menggunakan *transducer, piezoelectric* untuk mengubah energi yang ada di sekitar, seperti energi panas, energi mekanik, dan energi kimia menjadi energi listrik. Namun, tidak semua energi dapat dikonversi seperti radiasi, suara dan nuklir. Salah satu aplikasi *energy harvesting* adalah pemanfaatan getaran *circular cylinder* yang dilewati oleh aliran fluida dengan mengubahnya menjadi energi listrik dengan menggunakan *piezoelectric*.

Energi yang dikonversi oleh *piezoelectric transducer* bergantung kepada dua parameter penting, yaitu amplitudo dan frekuensi getaran sistem. Secara matematis, nilai amplitudo sesaat pada aliran yang melalui *circular cylinder* dapat diestimasi melalui Persamaan (2.18) berikut (Stinson et al., 2011).

$$A_L(t) = \frac{F_L \times \sin(\omega_n t + \frac{\pi}{2})}{k \sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2}} \dots\dots\dots (2.18)$$

dimana,

- k = konstanta kekakuan pegas (N/m)
- $f_s$  = frekuensi *vortex shedding* (Hz)
- $f_n$  = frekuensi natural (Hz)
- t = *flow-time* (s)
- $\omega_n$  = frekuensi natural *cylinder* (rad/s)
- $\zeta$  = *damping ratio* fluida

amplitudo yang diperoleh melalui persamaan di atas dapat diturunkan untuk mendapatkan besaran nilai kecepatan seperti Persamaan (2.19) (Stinson et al., 2011).

$$v_c(t) = \frac{d}{dt}A(t) \dots\dots\dots (2.19)$$

dimana,

$v_c$  = kecepatan *cylinder* (m/s)

melalui Persamaan (2.18) dan Persamaan (2.19), dapat diestimasi daya yang dihasilkan oleh sistem akibat *vortex shedding* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.20) dan (2.21) berikut (Stinson et al., 2011).

$$P(t) = v(t) \times F_L \times \sin(\omega_n t) \dots\dots\dots (2.20)$$

$$P_{avg} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (2.21)$$

dimana,

$P$  = daya (Watt)

$P_{avg}$  = daya rata-rata (Watt)

## BAB 3 METODOLOGI

### 3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan metode Simulasi Numerik – *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software* Solidworks 2020 SP0 untuk membuat geometri, Ansys ICEM 2021 untuk *meshing* geometri dan benda uji, Ansys Fluent 2021 R2 untuk melakukan simulasi, dan *Microsoft Excel* untuk *post-processing*. Terdapat tiga tahapan dalam melakukan simulasi, yaitu *Pre-processing*, *Processing* dan *Post-processing*. *Pre-processing* merupakan tahapan pemodelan sistem dengan menentukan variasi-variasi penelitian. *Processing* merupakan tahapan kalkulasi melalui metode Iterasi untuk menyelesaikan masalah. *Post-processing* merupakan tahapan pengambilan data hasil simulasi berupa data kualitatif maupun kuantitatif.

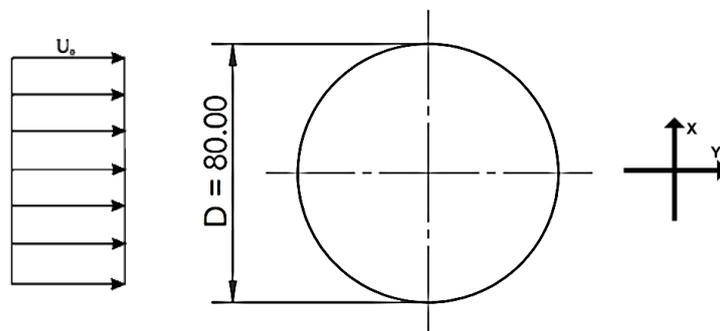
*Pre-processing* dimulai dengan pembuatan geometri dan domain simulasi dengan menggunakan *software* Solidworks 2020 SP0. Domain yang telah dibuat dengan format (.STEP) selanjutnya di-*meshing* dengan menggunakan Ansys ICEM 2021 dengan format (.uns) dengan variasi dan *boundary condition* yang telah ditentukan. Pada tahapan *processing*, *mesh* diolah menggunakan Ansys Fluent 2021 R2. Pada tahap *post-processing*, hasil pengolahan *mesh* berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Data kuantitatif berupa koefisien *drag*, koefisien *lift*, koefisien *pressure*, dan *Strouhal number*, sedangkan data kualitatif berupa kontur tekanan, kontur kecepatan, *streamline*, dan animasi. Data tersebut diambil untuk dijadikan sebagai hasil penelitian.

### 3.2 Tahap Pre-Processing

Pada tahap *pre-processing*, proses pertama yang dilakukan adalah pembuatan geometri benda uji. Proses kedua adalah *meshing* pada geometri benda uji dan domain simulasi. Proses ketiga adalah penentuan *boundary condition* untuk simulasi pada *software* CFD.

#### 3.2.1 Pemodelan Geometri dan Domain Simulasi

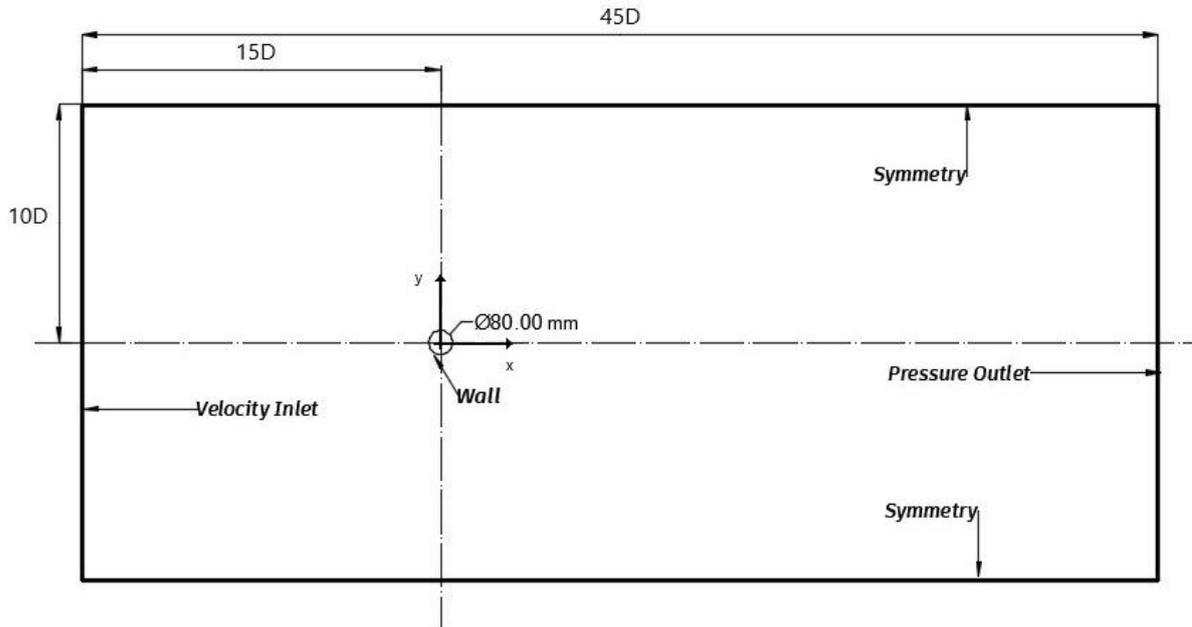
Tahapan awal dalam melakukan persiapan simulasi adalah pembuatan geometri dan domain. Geometri didesain menggunakan *software* Solidworks 2020 SP0. Ukuran *smooth circular cylinder* yang digunakan dalam model 2D dengan diameter 80 mm atau 0,08 m, seperti pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1** Geometri 2D *Smooth Circular Cylinder*.

*Computational domain* yang digunakan adalah *static domain* (domain diam) sebab analisis dilakukan untuk *cylinder* dalam keadaan diam. Ukuran domain yang digunakan adalah  $20D \times 45D$ , dengan  $20D$  adalah sisi lebar dan  $45D$  merupakan sisi panjang yang sejajar dengan arah

aliran. Adapun posisi *cylinder* adalah  $15D$  jika diukur dari sisi *upstream* dan  $10D$  jika diukur dari sisi atas/ bawah domain, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Domain Simulasi.

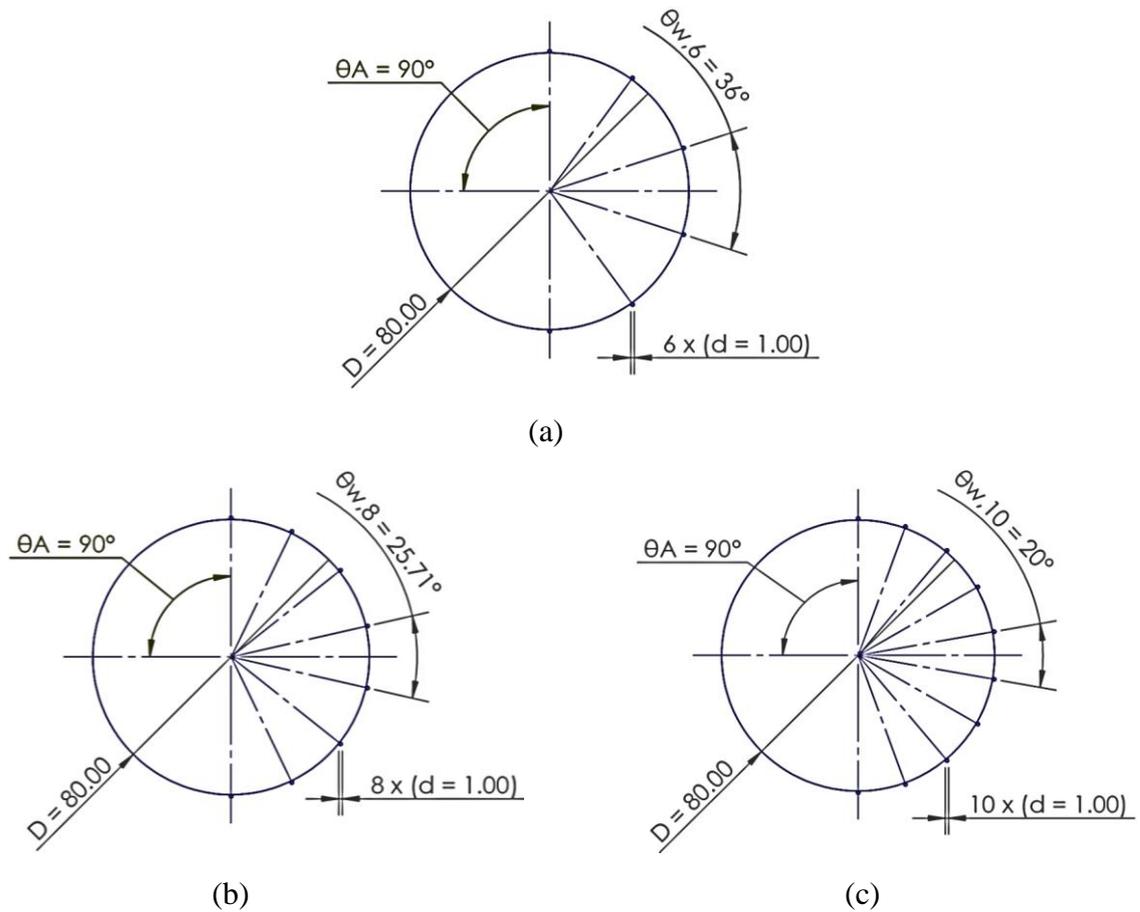
*Boundary condition* merupakan parameter dan batasan yang digunakan pada domain. Gambar 3.2, menunjukkan *boundary condition* pada setiap sisi.

- Sisi *upstream* = *Velocity inlet*
- Sisi *downstream* = *Pressure outlet*
- Sisi atas = *Symmetry*
- Sisi bawah = *Symmetry*
- *Cylinder* = *Wall (no slip condition)*

### 3.2.2 Konfigurasi dan Variasi

Pada penelitian ini, konfigurasi dilakukan dengan menambahkan *wire* pada permukaan *cylinder* untuk beberapa variasi jumlah dan untuk beberapa nilai *Reynolds number*. Hasil simulasi akan dibandingkan dengan *smooth circular cylinder*. Pada variasi jumlah *wire*, dua buah *wire* utama diletakkan pada sudut  $90^\circ$ , simetri terhadap titik stagnasi. Kemudian *wire* lainnya akan ditempatkan pada *wake region* dengan jarak angular yang sama antar *wire*. Jumlah *wire* divariasikan sebanyak 6, 8, dan 10 buah dengan diameter ( $d$ ) yang sama, yaitu 1 mm seperti pada Gambar 3.3.

Gambar 3.3 (a) merupakan model *cylinder* dengan 6 buah *wire* dan jarak angular antar *wire*,  $\theta_{w,6}$  sebesar  $36^\circ$ . Gambar 3.3 (b) merupakan model *cylinder* dengan variasi jumlah *wire* sebanyak 8 dan jarak angular antar *wire*,  $\theta_{w,8}$  sebesar  $25,71^\circ$ . Adapun Gambar 3.3 (c) merupakan model *cylinder* dengan variasi 8 *wire* dan jarak angular antar *wire*,  $\theta_{w,10}$  sebesar  $20^\circ$ . Sedangkan variasi *Reynolds number* dipilih pada *subcritical regime*, yaitu:  $6 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^4$ , dan  $4 \times 10^4$ , seperti pada Tabel 3.1.



**Gambar 3.3** Variasi Jumlah Wire: (a)  $n = 6$ , (b)  $n = 8$ , dan (c)  $n = 10$ .

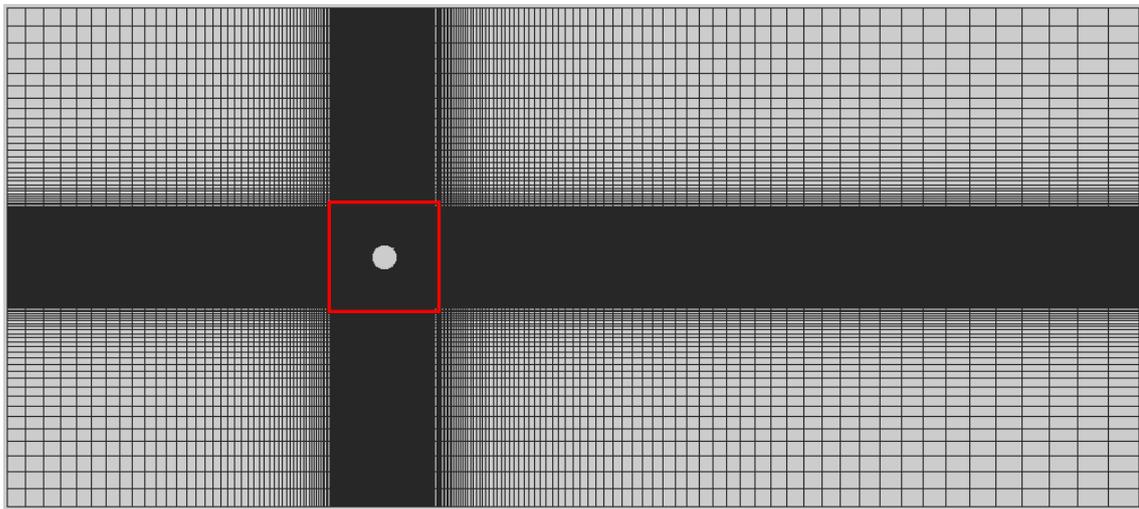
**Tabel 3.1** Variasi Penelitian.

Symbol	Definisi	Nilai	
D	Diameter <i>circular cylinder</i>	80 mm	
d	Diameter <i>wire</i>	1 mm	
d/D	Rasio diameter <i>wire</i> dengan diameter <i>circular cylinder</i>	0,0125	
Re <sub>D</sub>	<i>Reynolds number</i> terhadap diameter <i>cylinder</i>	$6 \times 10^3$ , $2 \times 10^4$ , dan $4 \times 10^4$	
n	Jumlah <i>wire</i>	6, 8, dan 10	
$\theta_A$	Posisi angular <i>wire</i> utama terhadap titik stagnasi	$\pm 90^\circ$	
$\theta_{w,n}$	Jarak angular antar <i>wire</i>	n = 6	$36^\circ$
		n = 8	$25,71^\circ$
		n = 10	$20^\circ$

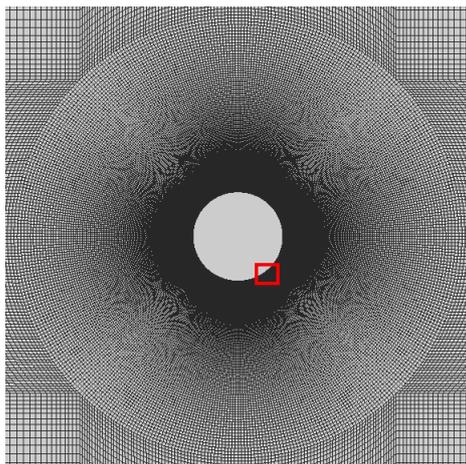
### 3.2.3 Meshing

*Meshing* merupakan suatu metode untuk mendiskritisasi suatu domain menjadi bagian-bagian kecil sehingga bisa dilakukan pendekatan *local diskrit* dari domain sebenarnya (domain yang lebih besar) (Versteeg, 1995). Pada dasarnya, *mesh* diklasifikasikan menjadi 2 jenis, yaitu *structured mesh* dan *unstructured mesh*. Pada percobaan ini digunakan metode *structured mesh*

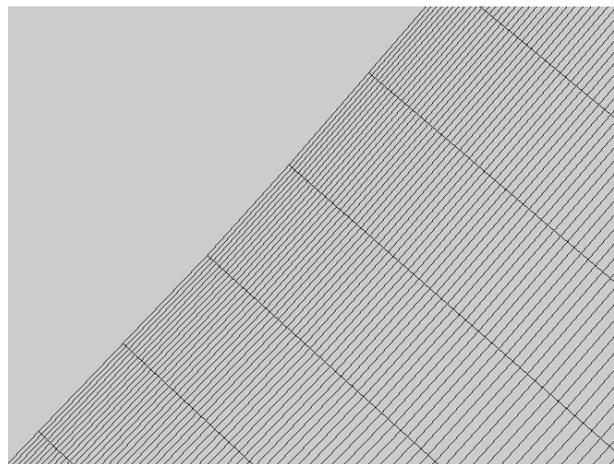
pada domain yang dilewati fluida, sedangkan bagian *cylinder* dibiarkan kosong karena simulasi yang dilakukan masih terhadap *cylinder* diam. Proses *meshing* menggunakan *software* ANSYS ICEM 2021, dengan contoh *meshing* seperti pada Gambar 3.4.



(a)



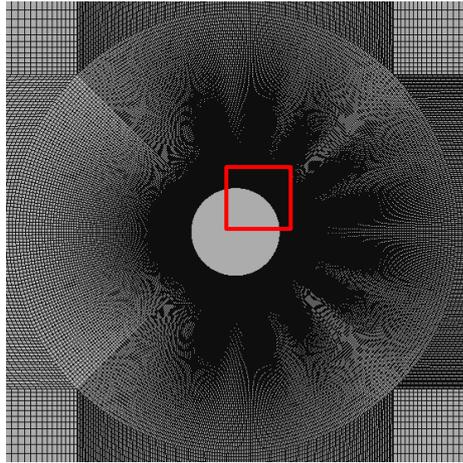
(b)



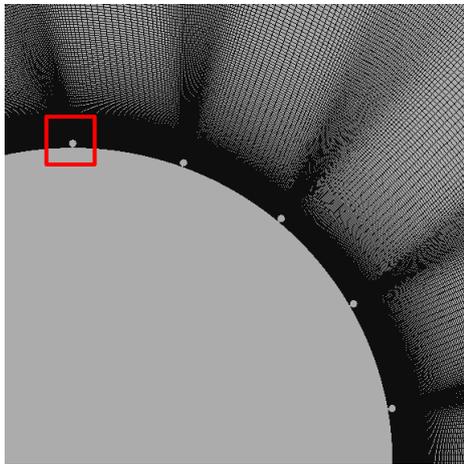
(c)

**Gambar 3.4** *Mesh* pada Komputasi Domain untuk *Smooth Circular Cylinder*, dengan Jumlah Elemen 155.168: (a) *Mesh* Keseluruhan Domain Simulasi, (b) *Mesh* di Sekitar *Cylinder* (2,5D), dan (c) *Mesh* pada Dinding *Cylinder*.

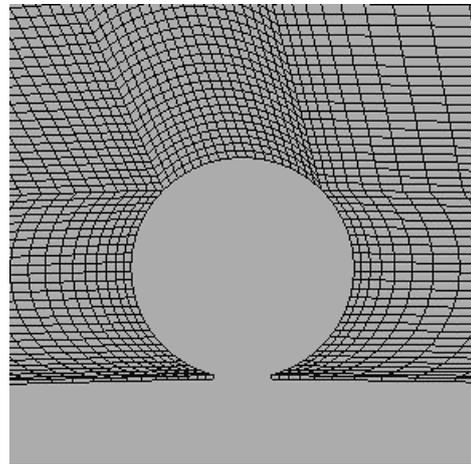
*Mesh* pada Gambar 3.5 menampilkan *mesh* untuk *wired cylinder* dengan variasi 10 *wire* pada sisi *leeward*. Proses *meshing* pada seluruh variasi jumlah *wire* dilakukan secara *structured* pada domain sistem. Adapun ukuran elemen pada permukaan *wire* disesuaikan dengan ukuran elemen terdekat dengan dinding *cylinder*.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 3.5** Mesh pada Komputasi Domain untuk *Wired Circular Cylinder* dengan 10 Wire pada Sisi Leeward: (a) Mesh di Sekitar *Wired Cylinder* (2,5D), (b) Mesh pada Dinding *Cylinder*, dan (c) Mesh pada Dinding *Wire*.

Kualitas *mesh* merupakan faktor yang sangat dipertimbangkan dalam membuat *meshing*. Tabel 3.2 menunjukkan kualitas *mesh* untuk *smooth cylinder* (Gambar 3.4) dan *mesh wired cylinder* (Gambar 3.5). Berdasarkan tabel tersebut, kualitas *mesh* sudah baik untuk digunakan.

**Tabel 3.2** Kualitas Mesh *Smooth Circular Cylinder*, dengan Jumlah Elemen 155.168.

<i>Quality Metrics</i>	<i>Smooth Cylinder</i>			<i>Wired Cylinder (n = 10)</i>		
	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Keterangan</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Keterangan</i>
<i>Quality</i>	0,98	1	<i>Excellent</i>	0,88	1	<i>Very good to Excellent</i>
<i>Aspect Ratio</i>	0,05	1	<i>Excellent</i>	0,01	1	<i>Excellent</i>
<i>Angle</i>	46,39	133,66	<i>Excellent</i>	17,51	162,76	<i>Excellent</i>
<i>Orthogonal Quality</i>	0,72	1	<i>Very good to excellent</i>	0,30	1	<i>Good to excellent</i>
<i>Skewness</i>	0	0,49	<i>Very good to excellent</i>	0	0,81	<i>Good to excellent</i>

### 3.3 Tahap Processing

Setelah melakukan *meshing* pada domain, dan menetapkan *boundary condition*, selanjutnya melakukan simulasi (*processing*) dengan menggunakan *solver* Ansys Fluent 2021 R2. Adapun parameter yang digunakan pada saat *processing* berlangsung ditampilkan pada Tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Setup-Solution Simulasi pada Tahap Processing Ansys Fluent 2021 R2.

<b>General</b>	<i>Mesh</i>	<i>Unit</i>	mm	<b>Reference Value</b>	<i>Area</i>		0,08 m <sup>2</sup>	
	<i>Solver</i>	<i>Type</i>	Pressure-Based		<i>Length</i>			0,08 m
		<i>Velocity Formulation</i>	Absolute		<i>Pressure-Velocity Coupling</i>		SIMPLE	
		<i>Time</i>	Transient (Unsteady)		<b>Methods</b>	<i>Spatial Discretization</i>	<i>Gradient</i>	Least Squares Cell Based
<i>2D Space</i>		Planar	<i>Pressure</i>	Second Order				
<b>Models</b>	<i>Viscous</i>	URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes)	k- $\omega$ SST (Shear Stress Transport)	<i>Momentum</i>			Second Order Upwind	
		<b>Materials</b>	<i>Udara</i>	<i>Temperatur</i>			25°C (298,16 K)	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>
<i>Tekanan</i>	1 atm			<i>Specific Dissipation Rate</i>	Second Order Upwind			
<i>Densitas</i>	1,184 kg/m <sup>3</sup> (konstan)			<i>Transient Formulation</i>		Second Order Implicit		
<i>Viskositas</i>	1.849 x 10 <sup>-5</sup> kg/ms (konstan)			<i>Relaxation Factor</i>		0,75		
<b>Operating Conditions</b>	<i>STP (Standard Temperature and Pressure)</i>		1 atm atau 1,013 x 10 <sup>5</sup> Pa	<b>Report</b>	<i>Koefisien Drag</i>			
<b>Boundary Conditions</b>	<i>Inlet</i>	<i>Kecepatan aliran udara</i>	Berdasarkan D dan Re (Tabel 3.1)		<i>Koefisien Lift</i>			
		<i>Turbulence Intensity, Tu (%)</i>	1%	<b>Residuals</b>	10 <sup>-5</sup> s.d. 10 <sup>-4</sup>			
		<i>Length-Scale, l (m)</i>	l = 0,07D	<b>Initialization</b>	<i>Hybrid Initialization</i>			
	<i>Outlet</i>	<i>Gauge Pressure</i>	0 Pa (g)	<b>Run Calculation</b>	<i>Time Advancement</i>	<i>Fixed</i>		
		<i>Turbulence Intensity, Tu (%)</i>	1%			<i>User-Specified</i>		
		<i>Length-Scale, l (m)</i>	l = 0,07D		<i>Time Step Size</i>	7 x 10 <sup>-4</sup> , 2 x 10 <sup>-3</sup> , 8 x 10 <sup>-3</sup>		

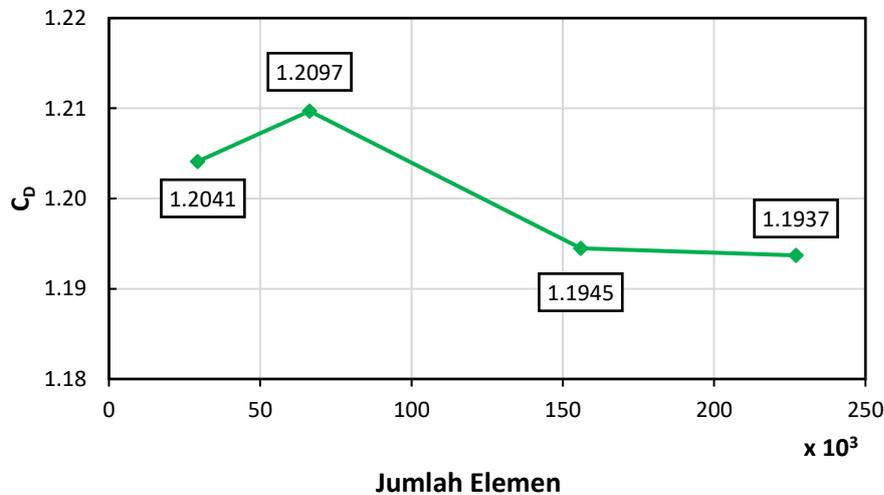
### 3.3.1 Grid Independency Test (GIT)

Pada tahap ini, dilakukan pengujian kepada beberapa *mesh* dengan jumlah elemen yang berbeda untuk mencari tahu berapa jumlah elemen *mesh* yang sesuai dan paling efisien untuk penelitian ini. GIT menggunakan 4 jenis *mesh* dengan selisih jumlah elemen pada setiap *mesh* setidaknya 1,5. Keempat *mesh* diberi kode berupa M1, M2, M3, dan M4. Adapun parameter yang digunakan pada *test* ini adalah koefisien *drag*.

Berdasarkan data Tabel 3.4 yang telah diperoleh, *error* relatif menunjukkan nilai yang cukup kecil ( $< 2\%$ ) untuk keempat jenis *mesh* dengan  $Y^+ \approx 1$ . Sedangkan Gambar 3.6 menunjukkan bahwa nilai  $\overline{C_D}$  mulai stabil pada *mesh* M3. Untuk mengurangi biaya dan waktu komputasi, maka dipilih *mesh* M3 dengan jumlah elemen 155.168.

**Tabel 3.4** Grid Independency Test (GIT).

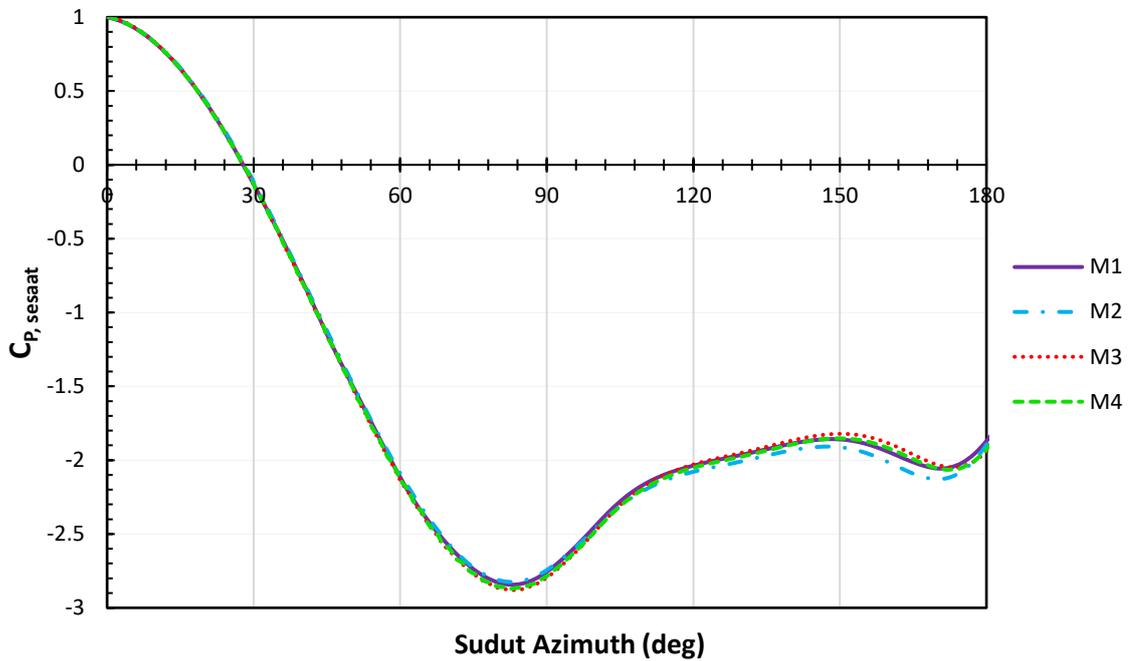
<i>Mesh</i>	Jumlah Node	Jumlah Elemen	$\overline{C_D}$	<i>Error</i> $C_D$ (%)	$C_{L\text{ RMS}}$	$Y^+$
M1	29.284	28.956	1,2041	-	0,9344	1,0463
M2	66.333	65.854	1,2097	0,4608	0,8936	1,0247
M3	155.900	<b>155.168</b>	1,1945	1,2720	0,9480	1,0684
M4	227.036	226.126	1,1937	0,0670	0,9481	1,0869



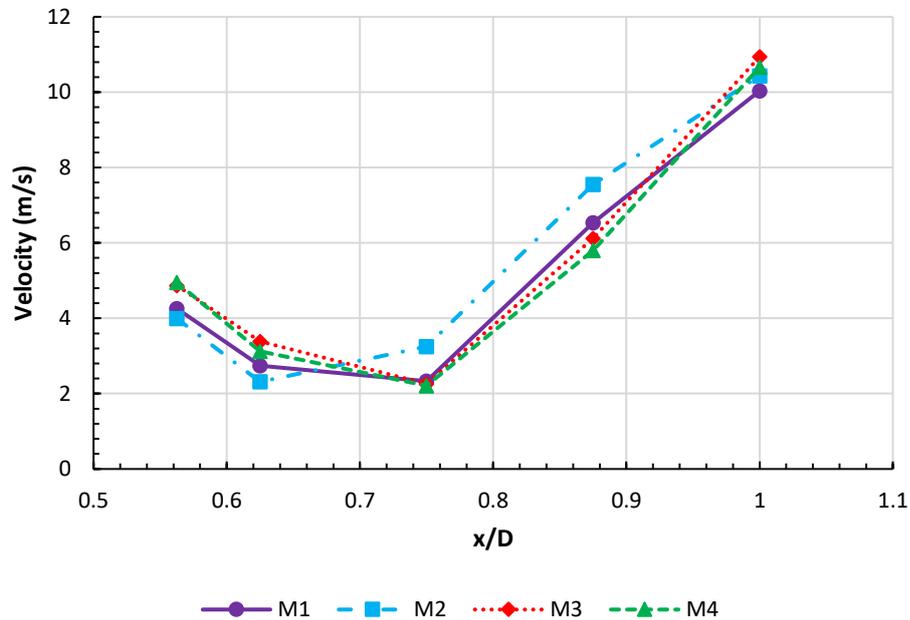
**Gambar 3.6** Grafik Grid Independency Test (GIT).

Hasil GIT di atas juga didukung oleh grafik  $C_p$  fungsi sudut *azimuth* untuk salah satu sisi *cylinder*, dimana bentuk grafik sudah tidak berubah pada *mesh* M3 relatif terhadap *mesh* yang lebih besar (M4) yang menunjukkan bahwa hasil pengukuran tekanan sesaat pada tiap sudut sudah tidak mengalami perubahan terhadap jumlah elemen *mesh*. Grafik *instantaneous*  $C_p = f(\alpha)$  dapat dilihat pada Gambar 3.7. Hal yang sama juga ditunjukkan pada Gambar 3.8 yang merupakan hasil pengukuran kecepatan partikel pada beberapa nilai  $x/D$  di belakang *cylinder* (daerah *downstream*) pada  $t = 2s$ . Pengukuran dilakukan pada  $(0,045 \leq x \leq 0,08)$  m dengan lima buah sampel pengukuran. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kecepatan partikel pada tiap

titik pengukuran untuk *mesh* M3 dan M4 memiliki *error* yang cukup kecil, ditunjukkan dengan grafik yang hampir mendekati kongruen.



**Gambar 3.7** Grafik *Instantaneous*  $C_p$  terhadap Sudut *Azimuth* pada Salah Satu Sisi *Circular Cylinder* pada  $t = 2s$  dengan  $Re = 4 \times 10^4$ .



**Gambar 3.8** Grafik *Instantaneous Velocity* terhadap  $x/D$  di *Wake Region* pada  $t = 2s$  dengan  $Re = 4 \times 10^4$ .

### 3.3.2 Time Step Sensitivity

Pemilihan *time step* simulasi merupakan hal kritis yang memerlukan pertimbangan yang khusus, terutama pada *circular cylinder*. Pemilihan *time step* yang tidak tepat dapat

menyebabkan hasil simulasi menjadi *over prediction* atau *under prediction*. Oleh karena itu, sensitivitas *time step* perlu diuji agar nantinya diperoleh nilai dengan validitas terbaik. Pengujian dilakukan untuk *mesh* M3 yang dipilih berdasarkan hasil *grid independency test* sebelumnya. Pengujian dilakukan dengan 4 jenis *time step*, yaitu 0,001 ; 0,0007 ; 0,0004 ; dan 0,0001 pada  $Re = 4 \times 10^4$  yang diperoleh dari berbagai literatur yang melakukan simulasi *smooth cylinder* dengan *reynolds number* yang sama. Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Tabel 3.5, digunakan *time step* sebesar 0,0007 untuk  $Re = 4 \times 10^4$  dengan nilai *true error* terhadap eksperimen paling kecil, yaitu 0,5% jika dibandingkan dengan Sumer & Fredsøe (1997) dan 1,79% jika dibandingkan dengan Zhou et al (2015, 2016).

**Tabel 3.5** *Time Step Sensitivity* pada  $Re = 4 \times 10^4$ .

Mesh	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Time Step	$\overline{C_D}$	True Error (%)	
					Sumer & Fredsøe (1997) $\overline{C_D} = 1,14$	Zhou et al (2015,2016) $\overline{C_D} = 1,1255$
M3	155.900	155.168	0,001	1,0888	4,49	3,26
			0,0007	1,1457	0,50	1,79
			0,0004	1,1846	3,91	5,25
			0,0001	1,1945	4,78	6,13

Adapun nilai *time step* yang digunakan pada simulasi dengan  $Re = 6 \times 10^3$  dan  $Re = 2 \times 10^4$  diperoleh dengan membandingkan nilai *time step* pada  $Re = 4 \times 10^4$  dengan periode yang diperoleh melalui persamaan empiris pada eksperimen Norberg (2003). Nilai *time step* yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 3.6.

**Tabel 3.6** Pendekatan Nilai *Time Step* pada  $Re = 6 \times 10^3$  dan  $Re = 2 \times 10^4$ .

Re	D	U	St (Norberg, 2003)	f = St.U/D	T = 1/f	$\Delta t$
	m	m/s		1/s	s	s
$6 \times 10^3$	0,08	1,1712	0,2056	3,0102	0,3322	0,0043
$2 \times 10^4$	0,08	3,9041	0,1939	9,4613	0,1057	0,0014
$4 \times 10^4$	0,08	7,8083	0,1890	18,4503	0,0542	0,0007

*note.*  $\Delta t$  diperoleh melalui perbandingan nilai antara  $\Delta t$  (untuk 40.000) dengan  $T = 1/f$

Validitas nilai yang diperoleh berdasarkan tabel di atas kemudian diuji melalui simulasi. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, maka dipilih  $\Delta t = 0,002$  untuk  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $\Delta t = 0,008$  untuk  $Re = 6 \times 10^3$  seperti pada Tabel 3.7.

**Tabel 3.7** *Time Step* untuk  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 2 \times 10^4$ .

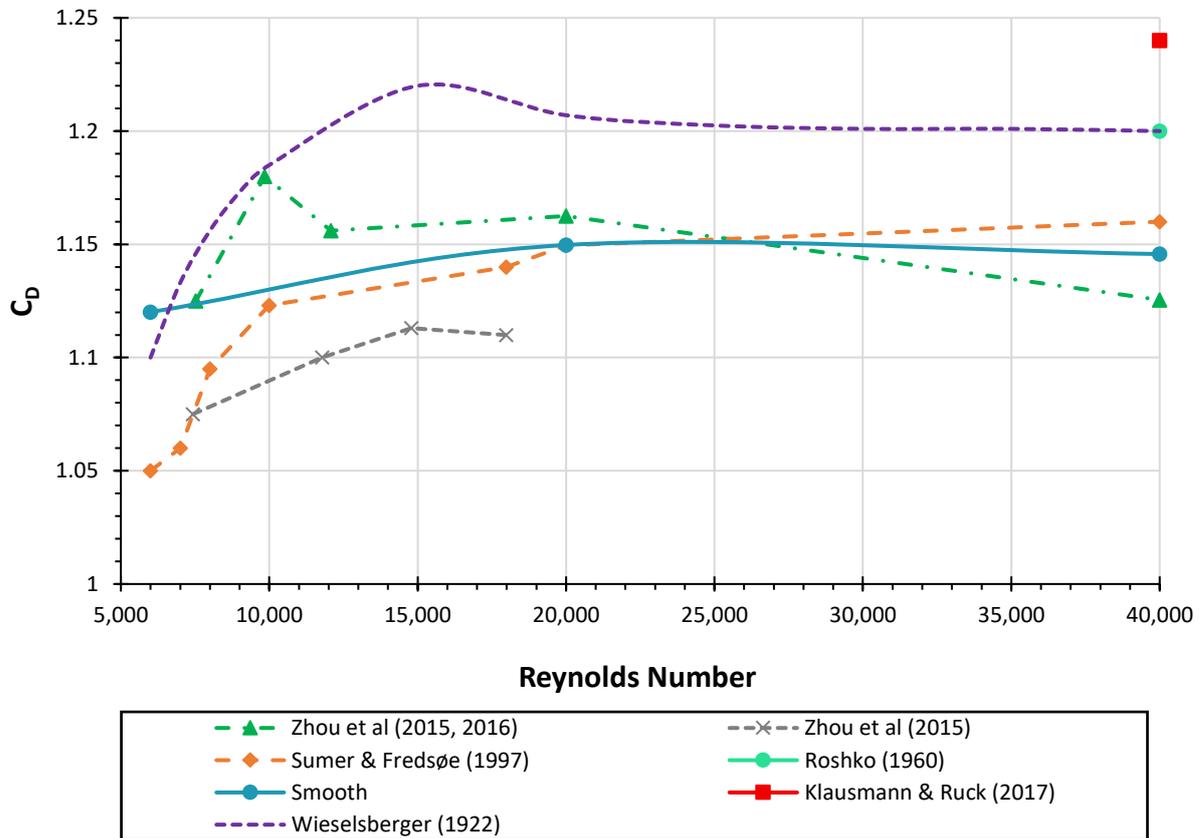
Re	$\Delta t$ (s)	$\overline{C_D}$	$C_{L\ RMS}$
$6 \times 10^3$	0,008	1,1457	0,8072
$2 \times 10^4$	0,002	1,1497	0,7132
$4 \times 10^4$	0,0007	1,1210	0,5740

### 3.3.3 Validasi

Dalam rangka mengetahui apakah metode dan *set-up* simulasi yang digunakan sesuai dalam menggambarkan fenomena aliran dalam keadaan yang sebenarnya, maka dilakukan validasi

nilai terhadap beberapa eksperimen yang telah dilakukan. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai  $\overline{C_D}$  *cylinder* antara simulasi yang dilakukan dengan beberapa eksperimen yang melakukan penelitian pada *Reynolds Number* yang sama atau mendekati nilai yang digunakan pada penelitian ini.

Gambar 3.9 memperlihatkan grafik perbandingan nilai  $\overline{C_D}$  antara simulasi yang dilakukan dengan hasil eksperimen dari berbagai eksperimen, seperti Wieselsberger (1922), Roskho (1960), Sumer & Fredsøe (1997), Zhou et al (2015), Zhou et al (2015, 2016), dan Klausmann & Ruck (2017). Dapat dilihat bahwa *trendline* grafik simulasi dan eksperimen yang dilakukan cenderung sama. Pada simulasi ini, diperoleh nilai  $\overline{C_D}$  sekitar 1,15 pada *Reynolds Number* 20.000 dan 40.000. Adapun pada  $Re = 6.000$ , nilai  $\overline{C_D}$  mengalami penurunan nilai menjadi 1,12. Penurunan nilai ini juga sesuai dengan beberapa eksperimen yang dilakukan seperti Wieselsberger (1922), Sumer & Fredsøe (1997), Zhou et al (2015), dan Zhou et al (2015, 2016). Nilai  $\overline{C_D}$  yang diperoleh dapat dikatakan valid karena masih berada pada rentang yang sama dengan hasil eksperimen yang pernah dilakukan, walaupun grafik yang dihasilkan tidak kongruen dengan beberapa hasil eksperimen terkait.



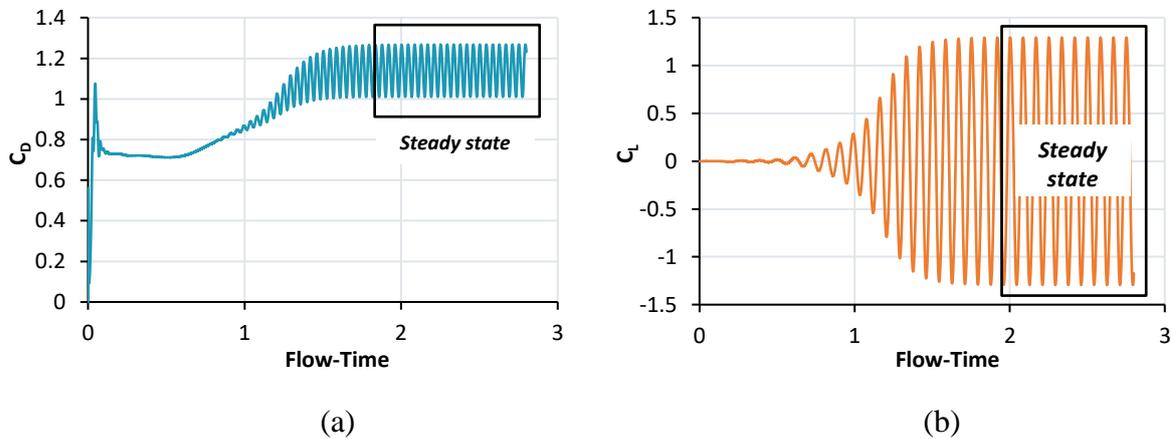
**Gambar 3.9** Grafik Perbandingan Nilai  $\overline{C_D}$  *Cylinder* Simulasi dengan Beberapa Eksperimen yang Telah Dilakukan.

### 3.4 Tahap *Post-Processing*

Tahap *post-processing* merupakan tahapan akhir dimana data yang diperoleh melalui simulasi diolah menggunakan *software* Tecplot dan Microsoft Excel. Pada penelitian ini, data yang diolah adalah koefisien *drag*, koefisien *lift* dan koefisien *pressure*, dan *Strouhal number*, serta visualisasi aliran berupa kontur kecepatan, kontur tekanan, dan *streamline*.

### 3.4.1 Prosedur Pengambilan Data Koefisien *Drag* dan *Lift*

Data yang diperoleh dari simulasi CFD adalah data koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) sesaat (*instantaneous*) sebagai fungsi waktu yang diperoleh pada setiap *time step*. Pada setiap kasus, kedua nilai tersebut ( $C_D$  dan  $C_L$ ) disimulasikan hingga mencapai keadaan “*steady state*”, seperti tampak pada Gambar 3.10. Analisis dilakukan terhadap koefisien *drag* dan koefisien *lift* rata-rata, yang kemudian dinotasikan sebagai  $\overline{C_D}$  dan  $\overline{C_L}$ . Koefisien *lift* juga dianalisis menggunakan metode *Root Mean Square* (RMS). Metode RMS umumnya diterapkan pada sejumlah data yang membentuk kurva berosilasi terhadap sumbu *imaginer*. Untuk mengetahui perubahan nilai yang terjadi pada koefisien *lift* terhadap perubahan nilai *Reynolds number* dan penambahan kekasaran permukaan terhadap *smooth cylinder*, maka metode tersebut harus digunakan. Koefisien *lift* RMS kemudian dinotasikan sebagai  $C_{L\text{ RMS}}$ . Adapun  $\overline{C_L}$  untuk setiap kasus dijaga konstan pada nilai  $\overline{C_L} \approx 0$  untuk menunjukkan kesimetrisan aliran terhadap sumbu *axis* benda uji. Melalui kedua nilai tersebut, maka akan diperoleh nilai  $C_{L\text{ RMS}}/\overline{C_D}$ .



**Gambar 3.10** Grafik  $C_D$  dan  $C_L$  *Smooth Circular Cylinder* sebagai Fungsi Waktu pada  $Re = 4 \times 10^4$ : (a) Grafik  $C_D$ , dan (b) Grafik  $C_L$ .

### 3.4.2 Prosedur Pengambilan Data Koefisien *Pressure*

Untuk memperoleh nilai koefisien *pressure* ( $C_P$ ), data simulasi diekstrak melalui *Solution Data* dengan tipe ASCII. Nilai yang diperoleh adalah  $C_P$  sesaat (*instantaneous*) sebagai fungsi posisi ( $x,y$ ). Posisi ( $x,y$ ) kemudian dikonversi menjadi sudut *azimuth* ( $\theta$ ). Pada *circular cylinder*, terjadi perubahan tekanan terhadap fungsi waktu karena adanya *Karman vortex shedding* yang terbentuk secara periodik pada *upper* dan *lower side*. Oleh karena itu, dilakukan pengambilan data pada 9 titik pada satu siklus ketika aliran telah mencapai keadaan “*steady state*”. Kemudian diambil nilai rata-rata  $C_P$  sesaat pada masing-masing sudut *azimuth* yang selanjutnya dinotasikan sebagai  $\overline{C_P}$ .

### 3.4.3 Prosedur Pengambilan Data *Strouhal Number*

Nilai *Strouhal Number* ( $St$ ) diperoleh dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) CFD pada koefisien *lift* fungsi waktu atau dapat menggunakan fungsi *vortex* rata-rata terhadap waktu. *Fast Fourier Transform* (FFT) merupakan metode matematis yang digunakan untuk mentransformasi sinyal analog (dalam hal ini adalah  $C_L$ ) menjadi sinyal digital berbasis frekuensi (dalam hal ini adalah *Strouhal Number*). Data  $C_L$  fungsi waktu yang diperoleh dikonversi menjadi nilai *magnitude* sebagai fungsi *Strouhal Number*, sehingga  $C_L$  merupakan

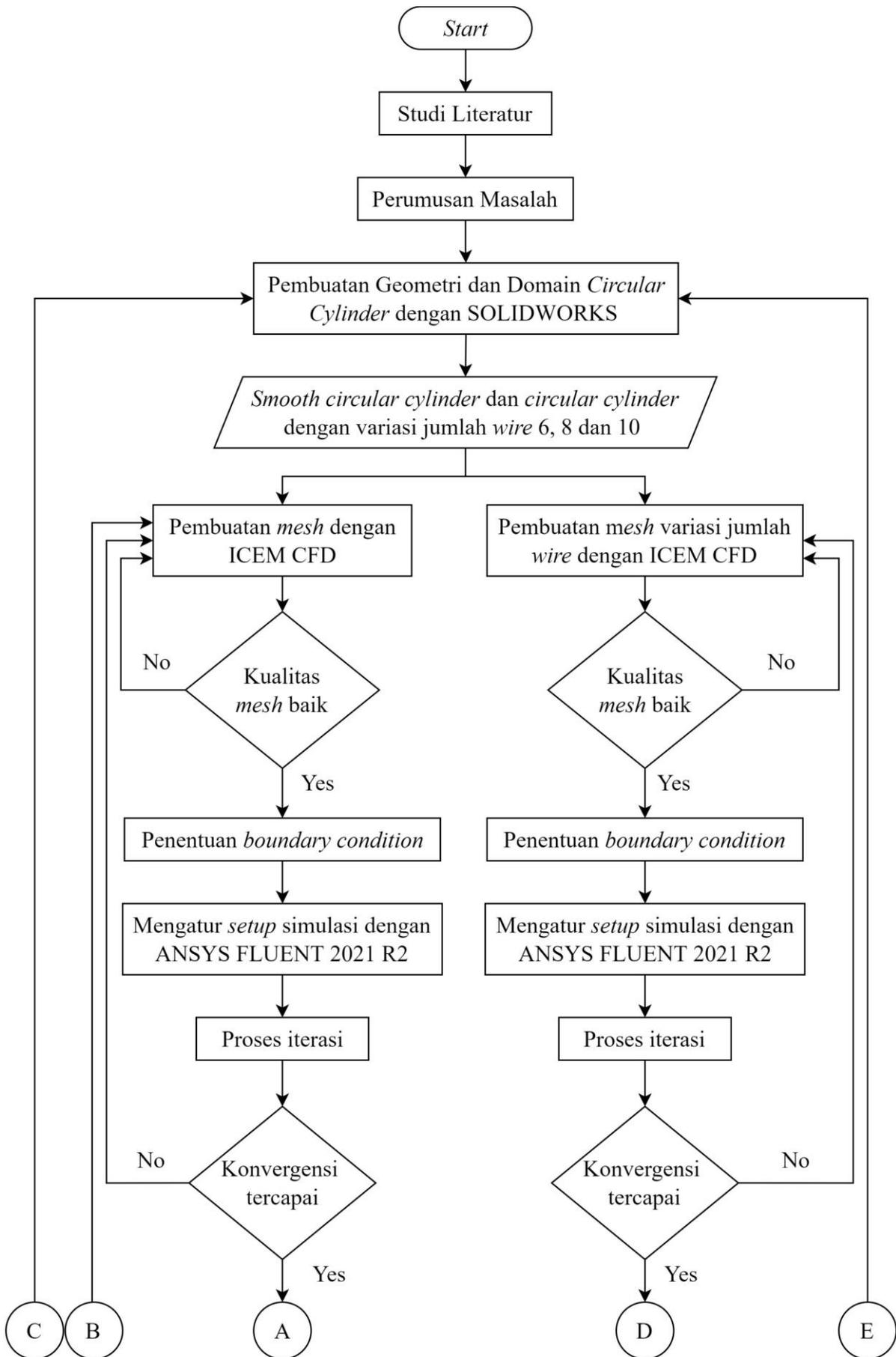
variabel axis *magnitude*, sedangkan *flow-time* merupakan variabel axis *Strouhal Number*. *Fast Fourier Transform* (FFT) kemudian akan memproses data dengan melakukan fungsi superposisi antara gelombang yang satu dengan lainnya, hingga pada akhirnya diperoleh nilai *St* dominan (pada nilai *magnitude* maksimum). Nilai tersebut merupakan nilai yang nantinya dijadikan sebagai *Strouhal Number*.

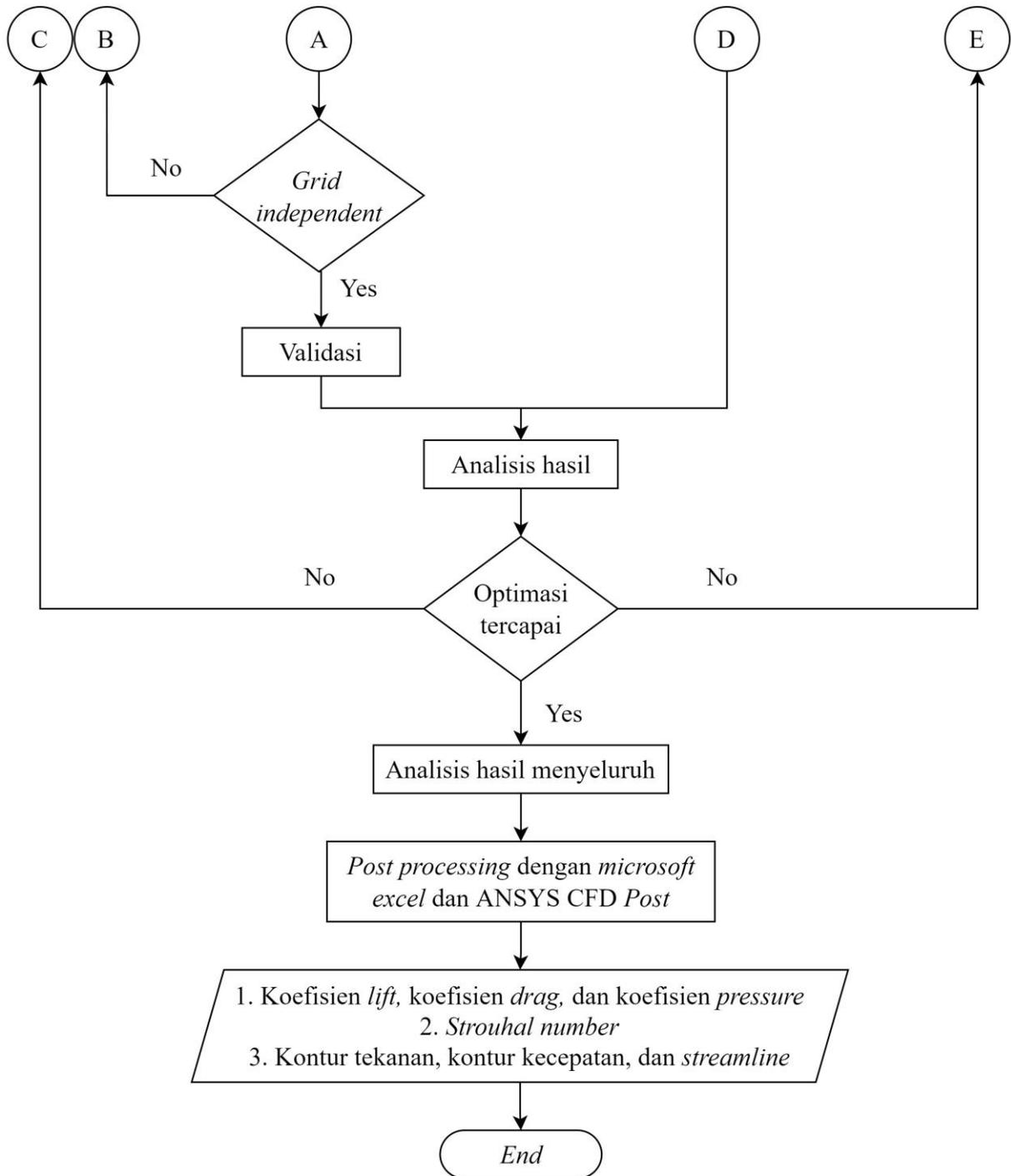
#### **3.4.4 Prosedur Pengambilan Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan, dan *Streamlines***

Dalam rangka pembuatan kontur kecepatan, tekanan, dan juga *streamline*, data hasil simulasi CFD diekstrak menjadi *file* dengan tipe Tecplot. Kemudian data diolah menggunakan *software* Tecplot, untuk nantinya divisualisasi menjadi kontur kecepatan, kontur tekanan (dalam bilangan tak berdimensi,  $C_p$ ), dan *streamline*.

### **3.5 Diagram Alur Penelitian**

Adapun diagram alur pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.11 di bawah ini.





**Gambar 3.11** Diagram Alir Penelitian.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Melalui tahap *processing*, data berupa koefisien *drag* ( $C_D$ ), koefisien *lift* ( $C_L$ ), koefisien *pressure* ( $C_P$ ), *Strouhal number* ( $St$ ), kontur kecepatan, kontur tekanan, dan *streamlines* diperoleh dan kemudian dianalisis untuk seluruh variasi (*Reynolds number* dan jumlah *wire*) dan konfigurasi (*smooth cylinder* dan *wired cylinder*). Tiga buah *cylinder* dengan jumlah *wire* yang berbeda, yaitu 6, 8, dan 10, serta *cylinder* tanpa *wire* (*smooth cylinder*) dianalisis pada  $Re = 4 \times 10^4$ ,  $2 \times 10^4$ , dan  $6 \times 10^3$ , dengan diameter *wire*,  $d = 1 \text{ mm}$  dan  $d/D = 0,0125$ .

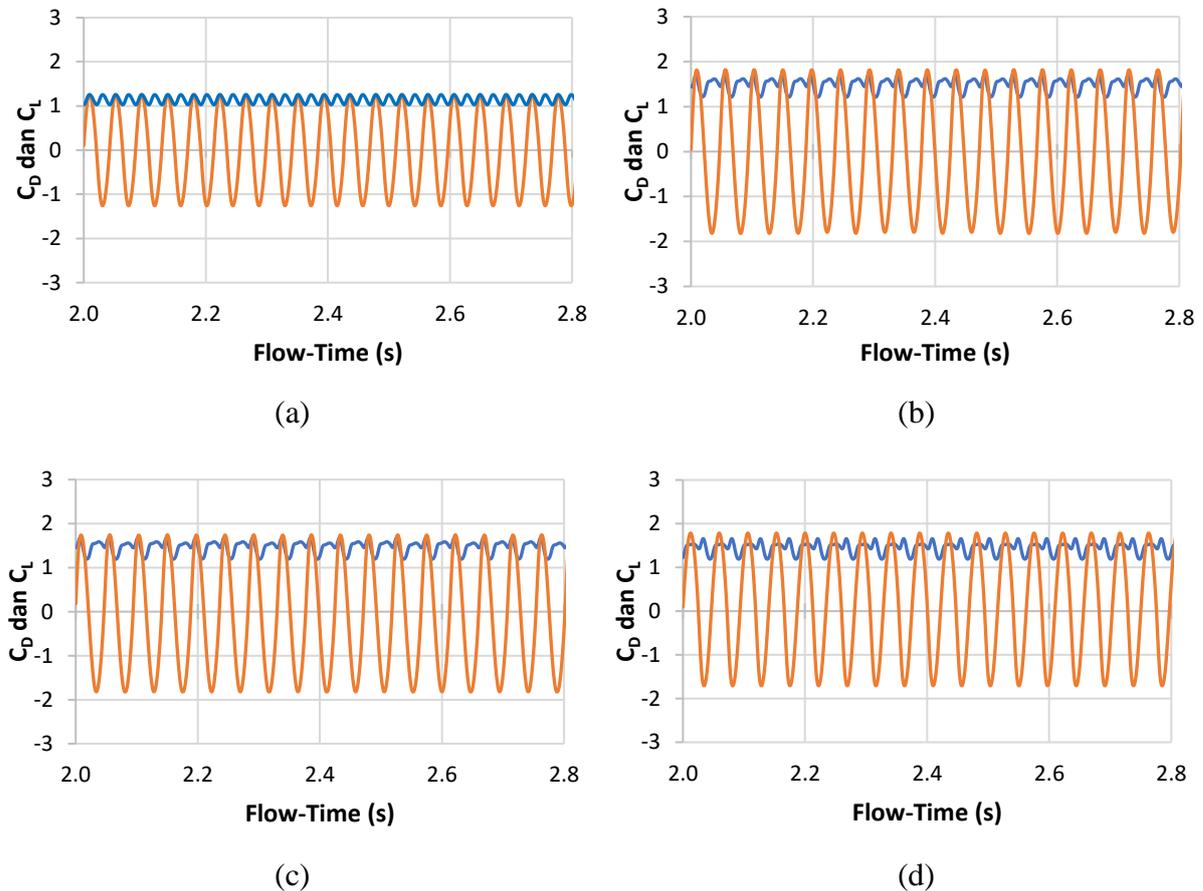
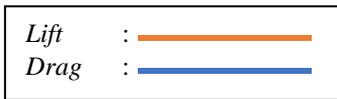
### 4.1 Analisis Koefisien *Lift* dan Koefisien *Drag*

*Energy harvesting* merupakan proses pengumpulan dan penyerapan energi eksternal dengan mengkonversi energi tersebut menjadi energi listrik untuk penggunaan perangkat kecil. Salah satu jenis energi eksternal adalah getaran yang dihasilkan oleh *circular cylinder*. Semakin besar amplitudo yang dihasilkan, maka energi yang dibangkitkan juga semakin besar, sehingga diperlukan upaya untuk mengetahui performa *cylinder* dalam menghasilkan getaran untuk beberapa jenis desain. Performa *cylinder* dapat dilihat dari beberapa parameter yang mencakup bentuk benda uji dan karakteristik aliran yang melewatinya. Salah satu parameter penting untuk dianalisis adalah gaya aerodinamik. Pada bab 2, telah dijelaskan bahwa gaya aerodinamik merupakan resultan gaya antara gaya *lift* ( $F_L$ ) dan gaya *drag* ( $F_D$ ). Dalam bilangan tak berdimensi (*dimensionless*), kedua gaya tersebut direpresentasikan sebagai koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ). Pada penelitian ini, kedua nilai tersebut dapat diperoleh melalui *solution data* Ansys Fluent, dengan menjalankan simulasi terhadap domain dan benda uji.

Dari simulasi yang telah dijalankan, diperoleh data koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) sesaat (*instantaneous*) pada tiap *time step* ( $\Delta t$ ) hingga aliran mencapai keadaan “*steady state*”. Data kemudian diolah dan dianalisis sebagai koefisien *drag* dan koefisien *lift* rata-rata ( $\overline{C_D}$  dan  $\overline{C_L}$ ). Koefisien *lift* juga dianalisis sebagai koefisien *lift* RMS ( $C_{L \text{ RMS}}$ ) untuk mengetahui perubahan nilai koefisien *lift* terhadap perubahan nilai *Reynolds number* dan penambahan kekasaran permukaan terhadap *smooth cylinder*. Adapun  $\overline{C_L}$  untuk setiap kasus dijaga konstan pada nilai  $\overline{C_L} \approx 0$ .

Koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) sesaat sebagai fungsi waktu untuk *smooth* dan *wired cylinder* pada  $Re = 4 \times 10^4$  ditunjukkan pada Gambar 4.1. Kedua grafik pada setiap kasus, merupakan nilai  $C_D$  dan  $C_L$  sesaat yang diplot sebagai fungsi waktu. Grafik tersebut diperoleh ketika aliran telah mencapai keadaan “*steady state*” pada rentang waktu tertentu, yang beresilasi terhadap nilai rata-rata ( $\overline{C_D}$  dan  $\overline{C_L}$ ). Untuk *smooth cylinder*, koefisien *drag* rata-rata,  $\overline{C_D}$ , pada  $Re = 4 \times 10^4$  adalah sekitar 1,15 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 (a). Nilai tersebut masih berada pada *range* nilai yang diperoleh melalui eksperimen pada *subcritical regime* seperti pada Gambar 3.7 pada bab sebelumnya. Sedangkan nilai koefisien *lift* RMS,  $C_{L \text{ RMS}}$  adalah 0,81 dan beresilasi pada nilai  $\overline{C_L} = 0,001$ . Untuk *wired cylinder* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 (b), (c), dan (d) masing-masing menunjukkan grafik  $C_D$  dan  $C_L$  pada *cylinder* dengan jumlah *wire* 6, 8, dan 10. Secara berturut-turut, nilai  $\overline{C_D}$  untuk *wired cylinder* dengan jumlah *wire* 6, 8, dan 10 adalah 1,49 ; 1,47 ; dan 1,45. Ketiga nilai tersebut menunjukkan peningkatan nilai  $C_D$  terhadap *smooth cylinder* dengan masing-masing peningkatan sebesar 30%, 28%, dan 26%. Dapat dilihat bahwa setiap penambahan jumlah *wire*, terjadi penurunan nilai  $\overline{C_D}$  sekitar 2%. Adapun nilai  $C_{L \text{ RMS}}$  juga mengalami peningkatan yang sangat signifikan, dengan masing-masing peningkatan sebesar 61%, 59%, dan 55% dengan nilai  $C_{L \text{ RMS}}$  sebesar 1,30 ; 1,28 ; dan 1,25 dan menurun seiring dengan penambahan jumlah *wire*. Nilai  $\overline{C_D}$  dan  $C_L$

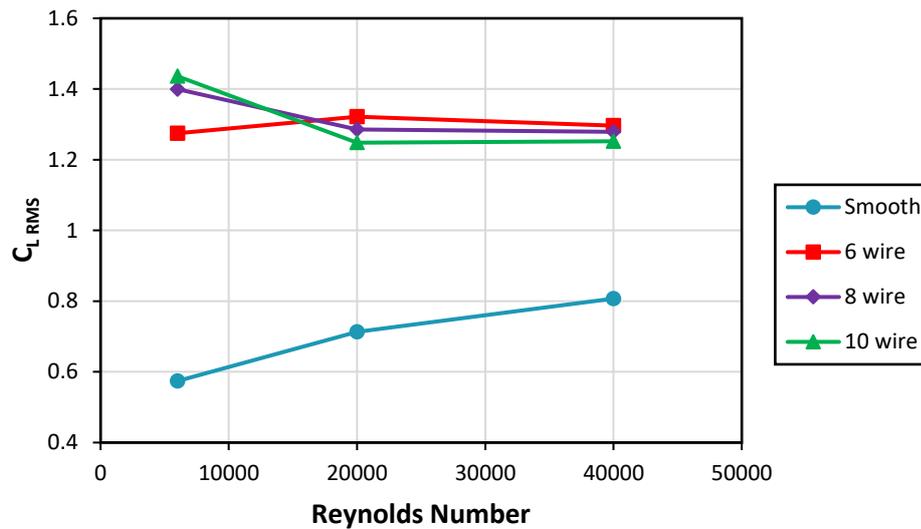
RMS pada *cylinder* dengan variasi jumlah *wire* di daerah *wake* cenderung lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder* dan sedikit menurun seiring dengan penambahan jumlah *wire*. Adapun nilai  $\overline{C_L}$  untuk setiap kasus berosilasi pada nilai  $\overline{C_L} \approx 0$ .



**Gambar 4.1** Grafik Koefisien *Drag* ( $C_D$ ) dan Koefisien *Lift* ( $C_L$ ) pada  $Re = 4 \times 10^4$ : (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

Amplitudo koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan *lift* ( $C_L$ ) terhadap nilai rata-rata ( $\overline{C_D}$  dan  $\overline{C_L}$ ) untuk *cylinder* dengan penambahan kekasaran permukaan *wire* juga lebih besar, sekitar 1,4 kali lebih besar dari nilai amplitudo *smooth cylinder*, begitu juga dengan periode yang dihasilkan. Hal ini berarti bahwa percepatan getaran dari *cylinder* dengan 6, 8, dan 10 *wire* juga cenderung lebih rendah dari pada *smooth cylinder*.

Gambar 4.2 menunjukkan data  $C_{L\text{ RMS}}$  hasil simulasi sebagai fungsi *Reynolds number* untuk *smooth* dan *wired cylinder*. Nilai RMS biasanya digunakan untuk mengkarakterisasi besarnya osilasi pada gelombang sinusoidal, dalam hal ini adalah koefisien *lift*. Grafik pada gambar tersebut menunjukkan bahwa nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  sangat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  untuk *smooth cylinder* pada  $Re = 6 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^4$ , dan  $4 \times 10^4$  berturut-turut adalah 0,57 ; 0,71 ; dan 0,81. Nilai tersebut meningkat seiring dengan peningkatan nilai *Reynolds number*.



**Gambar 4.2**  $C_{L\ RMS}$  vs  $Re$  *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder*, untuk  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .

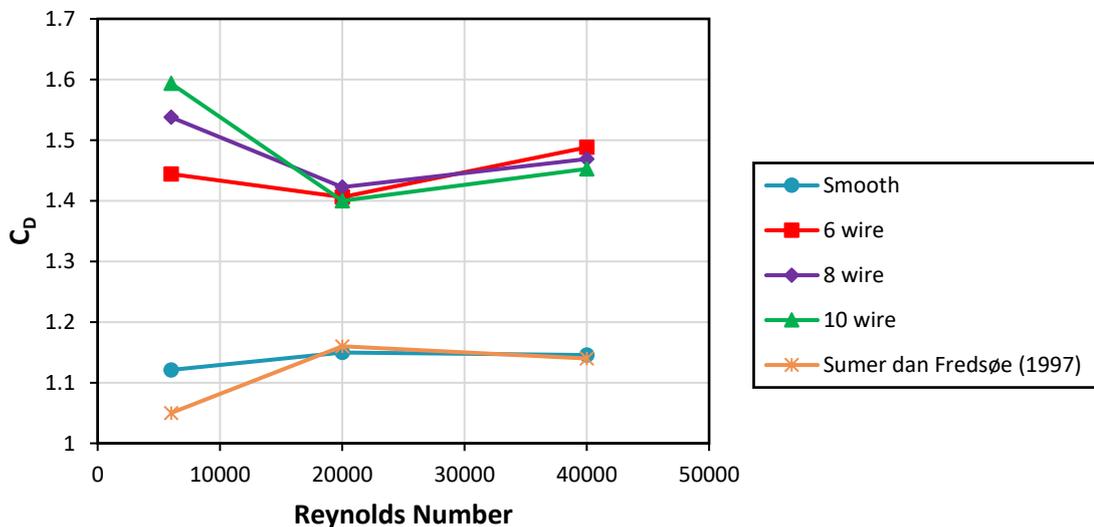
Untuk seluruh variasi *Reynolds number*, nilai  $C_{L\ RMS}$  untuk *wired cylinder* lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Pada  $Re = 6 \times 10^3$ , nilai  $C_{L\ RMS}$  yang diperoleh untuk *cylinder* dengan jumlah *wire* 6, 8, dan 10 adalah 1,27 ; 1,40 ; dan 1,44 dengan masing-masing variasi mengalami peningkatan sebesar 123%, 144%, dan 150%, jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Dapat dikatakan bahwa peningkatan yang terjadi sangat signifikan pada seluruh variasi. Bahkan pada variasi 10 *wire*, nilai  $C_{L\ RMS}$  yang diperoleh 2,5x lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Dapat dilihat bahwa pada  $Re = 6 \times 10^3$ , semakin banyak jumlah *wire* pada permukaan *cylinder*, maka peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  juga semakin besar. Berbeda halnya pada *cylinder* dengan  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $4 \times 10^4$ . Pada  $Re = 2 \times 10^4$ , nilai  $C_{L\ RMS}$  mengalami peningkatan sebesar 85%, 80%, dan 75% (dengan nilai  $C_{L\ RMS}$  sebesar 1,32 ; 1,29 ; dan 1,25), menurun seiring dengan peningkatan jumlah *wire*. Sedangkan pada  $Re = 4 \times 10^4$ , peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  yang terjadi sebesar 61%, 58%, dan 55% (dengan nilai  $C_{L\ RMS}$  sebesar 1,30 ; 1,28 ; dan 1,25) yang juga mengalami penurunan seiring dengan peningkatan jumlah *wire*. Berdasarkan nilai  $C_{L\ RMS}$  pada kedua *Reynolds number* tersebut, terjadi penurunan nilai  $C_{L\ RMS}$  secara teratur dari 6 hingga 10 *wire*. Pada  $Re = 2 \times 10^4$ , terjadi penurunan nilai  $C_{L\ RMS}$  sebesar 5% setiap penambahan jumlah *wire*. Sedangkan pada  $Re = 4 \times 10^4$ , penurunan nilai yang terjadi sebesar 3% untuk setiap penambahan jumlah *wire*. Efek penambahan jumlah *wire* ternyata tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$ . Kecuali pada  $Re = 6 \times 10^3$ , yang mengalami peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  sebesar 6-11%. Pada  $Re = 6 \times 10^3$ , nilai  $C_{L\ RMS}$  cenderung meningkat seiring dengan penambahan jumlah *wire*, sedangkan pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $4 \times 10^4$ , nilai  $C_{L\ RMS}$  cenderung menurun seiring dengan penambahan jumlah *wire*. Adapun grafik  $C_{L\ RMS}$  sebagai fungsi *Reynolds number* untuk semua variasi jumlah *wire* menunjukkan *trendline* yang sama, yaitu mengalami penurunan seiring dengan peningkatan *Reynolds number*, kecuali pada *cylinder* dengan 8 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$ .

Dapat dilihat pada Gambar 4.2 bahwa nilai  $C_{L\ RMS}$  *cylinder* dengan 10 *wire* bervariasi secara signifikan, yang mana pada  $Re = 6 \times 10^3$  terjadi peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  secara maksimal (sebesar 150%), sehingga variasi 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  merupakan pilihan terbaik untuk menghasilkan energi yang lebih besar jika dipandang dari aspek peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  walaupun nilai  $\overline{C_D}$  sebagai nilai yang tak diharapkan juga semakin besar. Nilai  $C_{L\ RMS}$  dapat merepresentasikan besaran amplitudo yang terjadi. Semakin besar nilai  $C_{L\ RMS}$ , maka amplitudo

yang dihasilkan juga menjadi lebih besar dan pada akhirnya akan menghasilkan energi yang lebih besar. Adapun *cylinder* dengan 10 *wire* pada  $Re = 4 \times 10^4$  merupakan variasi dengan peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  terkecil (sebesar 55%), sehingga variasi 10 *wire* pada  $Re = 4 \times 10^4$  bukanlah pilihan terbaik dalam meningkatkan getaran sistem.

Peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  menunjukkan bahwa penambahan *wire* pada bagian *leeward* efektif dalam meningkatkan amplitudo *cylinder*. Peningkatan amplitudo yang dihasilkan pada akhirnya akan menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Perbedaan nilai  $C_{L\ RMS}$  antara *smooth cylinder* dan *wired cylinder* kemungkinan disebabkan oleh penambahan momentum *boundary layer* ketika aliran *re-attach* ke permukaan *wire*, sehingga *vortices* yang terbentuk akan cenderung lebih dekat dengan permukaan *cylinder*. Peningkatan *near surface velocity* ini juga akan meningkatkan kekuatan *vortex shedding*. Hal ini akan mengganggu ketidaksimetrisan *vortex shedding* di belakang *cylinder* yang mana pada kasus ini cenderung memiliki simpangan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan *smooth surface cylinder*.

Peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  tentunya berbanding lurus dengan peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  sebagai nilai yang tak diharapkan. Gambar 4.3 menunjukkan data  $\overline{C_D}$  hasil simulasi sebagai fungsi *Reynolds number* untuk *smooth* dan *wired cylinder*, serta *smooth cylinder* berdasarkan eksperimen yang dilakukan oleh Sumer dan Fredsøe (1997) sebagai data pembanding. Untuk *smooth cylinder* pada penelitian ini, nilai  $\overline{C_D}$  yang diperoleh pada  $Re = 6 \times 10^3$ ,  $2 \times 10^4$ , dan  $4 \times 10^4$  secara berturut-turut adalah 1,12 ; 1,15 ; dan 1,15. Ketika  $Re > 6 \times 10^3$ ,  $\overline{C_D}$  *smooth cylinder* perlahan meningkat seiring dengan peningkatan nilai *Reynolds number*. Kemudian dipertahankan konstan pada  $\overline{C_D} \approx 1,15$  pada  $Re = 2 \times 10^4$  hingga  $4 \times 10^4$ . Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Sumer dan Fredsøe (1997) dan mengindikasikan validitas dari metode simulasi yang dilakukan terhadap metode eksperimen.



**Gambar 4.3**  $\overline{C_D}$  vs  $Re$  *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder*, untuk  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .

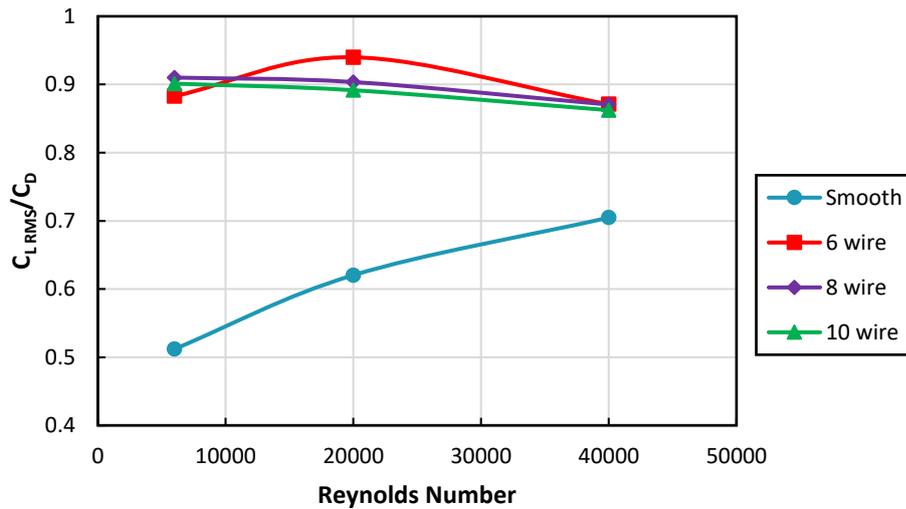
Nilai  $\overline{C_D}$  untuk *cylinder* dengan 6, 8, dan 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  adalah sekitar 1,44 ; 1,54 ; dan 1,59, yang mana lebih besar dari pada *smooth cylinder* (sekitar 29%, 37%, dan 42% lebih besar). Semakin banyak jumlah *wire*, maka  $\overline{C_D}$  yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini berbeda dengan  $\overline{C_D}$  *cylinder* pada *Reynolds number* yang lebih besar. Pada  $Re = 2 \times 10^4$ , diperoleh nilai  $\overline{C_D}$  sebesar 1,41 ; 1,42 ; dan 1,40, berturut-turut mulai dari *cylinder* dengan jumlah *wire* yang lebih sedikit hingga *cylinder* dengan jumlah *wire* yang lebih banyak.

Peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  yang terjadi masing-masing sebesar 22%, 24%, dan 22%. Pada  $Re = 4 \times 10^4$ , nilai  $\overline{C_D}$  yang diperoleh sebesar 1,49 ; 1,47 ; dan 1,45, dengan masing-masing peningkatan sebesar 30%, 28%, dan 27%. Pada  $Re = 6 \times 10^3$ , nilai  $\overline{C_D}$  cenderung meningkat seiring dengan penambahan jumlah *wire*, sedangkan pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $4 \times 10^4$ , nilai  $\overline{C_D}$  justru cenderung menurun, kecuali pada variasi 8 *wire* untuk  $Re = 2 \times 10^4$  yang mengalami peningkatan dibandingkan dengan *cylinder* dengan jumlah *wire* 6 dan 10 pada *Reynolds number* yang sama. Peningkatan nilai yang terjadi dengan menambahkan jumlah *wire* ternyata tidak memberikan dampak yang signifikan pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $4 \times 10^4$ . Perubahan nilai yang terjadi hanya sebesar 1-2%. Berbeda dengan *cylinder* pada  $Re = 6 \times 10^3$ , yang mengalami perubahan nilai sebesar 5-8%. Adapun grafik  $\overline{C_D}$  sebagai fungsi *Reynolds number* untuk semua variasi jumlah *wire* menunjukkan *trendline* yang sama. Transisi nilai  $\overline{C_D}$  dari  $Re = 6 \times 10^3$  ke  $Re = 2 \times 10^4$  mengalami penurunan nilai, dan sedikit meningkat pada  $Re = 4 \times 10^4$ . *Trendline* yang dihasilkan berkebalikan dengan *trendline smooth cylinder* pada penelitian ini maupun penelitian yang dilakukan oleh Sumer dan Fredsøe (1997), dimana nilai  $\overline{C_D}$  pada  $Re = 2 \times 10^4$  mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan  $\overline{C_D}$  pada  $Re = 6 \times 10^3$ , kemudian sedikit menurun pada  $Re = 4 \times 10^4$ .

Dapat dilihat pada Gambar 4.3 bahwa nilai  $\overline{C_D}$  *cylinder* dengan 10 *wire* bervariasi secara signifikan, dimana pada  $Re = 6 \times 10^3$  terjadi peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  secara maksimal (sekitar 42% lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder*), sehingga variasi 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  bukanlah pilihan terbaik jika dilihat dari aspek peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  sebab gaya *drag* akan mempengaruhi efisiensi *vent* atau *blower* jika desain tersebut diaplikasikan pada sebuah *ducting system*, begitu juga dengan biaya yang dikeluarkan akibat kebutuhan daya *vent* atau *blower* yang semakin besar. Adapun variasi *cylinder* dengan 10 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  merupakan variasi dengan peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  terkecil (sekitar 22%), sehingga variasi 10 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  merupakan pilihan terbaik untuk meminimalisir peningkatan kebutuhan daya *blower* yang diperlukan akibat hambatan udara yang terjadi.

Perbedaan nilai  $\overline{C_D}$  yang terjadi antara *smooth cylinder* dengan *wired cylinder* dalam hal ini adalah dengan menambahkan *wire* pada sisi *wake* pada rentang  $6 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^4$  dapat disebabkan oleh kontribusi gaya gesek *drag* yang tidak dapat diabaikan, fenomena ini juga telah dijelaskan oleh Sumer dan Fredsøe (1997). Achenbach (1968, 1971) menyatakan bahwa gaya *drag* pada *smooth cylinder* didominasi oleh bentuk permukaan (atau tekanan) yang berkontribusi  $> 97\%$ , sedangkan pengaruh gesekan (atau *viscous*) berada pada rentang 1-3%. Hal tersebut merupakan alasan mengapa pengaruh gesekan pada *smooth cylinder* dapat diabaikan. Berbeda halnya dengan *wired cylinder*, dimana tidak ada komponen nilai yang dapat diabaikan sebab *wire* yang diletakkan sesaat sebelum separasi terjadi mampu memberikan efek *viscous* yang lebih besar dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Kehadiran *wired surface* kemungkinan juga dapat menyebabkan transisi separasi pada *boundary layer* tertunda untuk mencapai keadaan turbulen. Saat aliran mengalami separasi, *wire* yang diletakkan beberapa derajat setelah titik separasi akan mengagitasi *boundary layer*, sehingga momentum dalam *boundary layer* akan meningkat dan pada akhirnya akan memperpendek jarak jatuhnya *vortices* dari permukaan *cylinder*. Nilai *drag* akhir tergantung kepada keseimbangan peningkatan gaya gesek *drag* dan juga induksi momentum oleh *vortex*.

Dalam menentukan desain paling efektif dalam meningkatkan getaran sistem dalam arah transversal dengan peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  paling minimum, dibutuhkan suatu parameter yang mampu menunjukkan variasi yang paling efektif. Grafik pada Gambar 4.4, menunjukkan rasio antara  $C_{L\ RMS}$  dengan  $\overline{C_D}$  sebagai fungsi *Reynolds number*.



**Gambar 4.4** Grafik  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  vs Re *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder*, untuk  $6 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 4 \times 10^4$ .

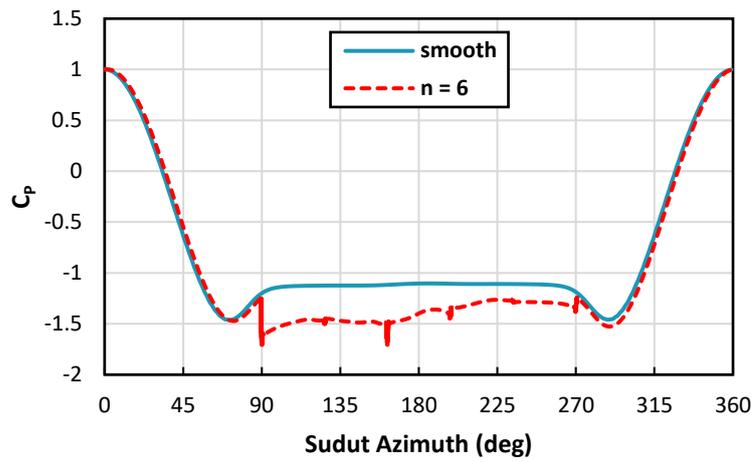
Berdasarkan grafik tersebut, diketahui bahwa *cylinder* dengan 6 buah *wire* pada  $\text{Re} = 2 \times 10^4$  memiliki rasio  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  terbesar, yakni sebesar 0,94, dengan peningkatan sebesar 51,52% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* ( $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D} = 0,62$ ), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1. Hal ini berarti bahwa desain tersebut memiliki performa terbaik dalam menghasilkan amplitudo, jika ditinjau dari aspek gaya aerodinamik. Jika ditinjau dari peningkatan nilai  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$ , maka *cylinder* dengan variasi 8 *wire* pada  $\text{Re} = 6 \times 10^3$  merupakan variasi *cylinder* dengan peningkatan tertinggi jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* (sekitar 77,75%). Sedangkan *cylinder* dengan 10 buah *wire* pada  $\text{Re} = 4 \times 10^4$  dengan rasio  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  sebesar 0,86 (dengan peningkatan sebesar 22,36%) bukanlah pilihan terbaik dalam meningkatkan amplitudo getaran akibat gaya *lift*.

**Tabel 4.1** Perbandingan Hasil  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  pada *Smooth* dan *Wire Cylinder*, untuk  $6 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 4 \times 10^4$ .

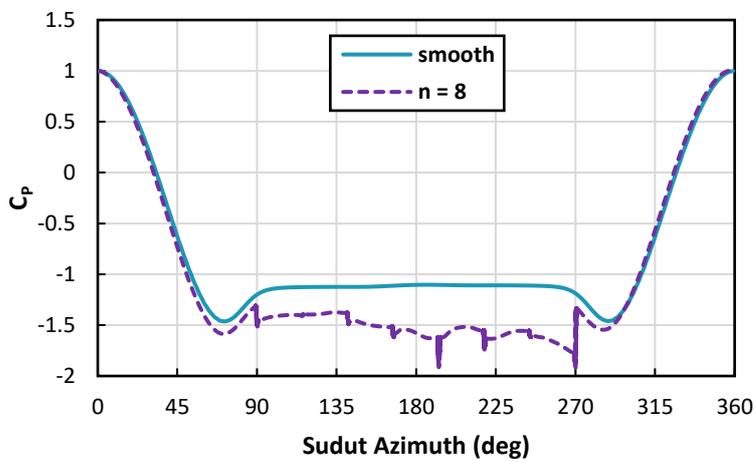
n	Re = $6 \times 10^3$		Re = $2 \times 10^4$		Re = $4 \times 10^4$	
	$C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$	$\Delta\%$	$C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$	$\Delta\%$	$C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$	$\Delta\%$
<b>0 (smooth)</b>	0.51	-	0.62	-	0.70	-
<b>6</b>	0.88	72.43	0.94	51.52	0.87	23.58
<b>8</b>	0.91	77.75	0.90	45.66	0.87	23.53
<b>10</b>	0.90	76.02	0.89	43.72	0.86	22.36

## 4.2 Analisis Koefisien Pressure

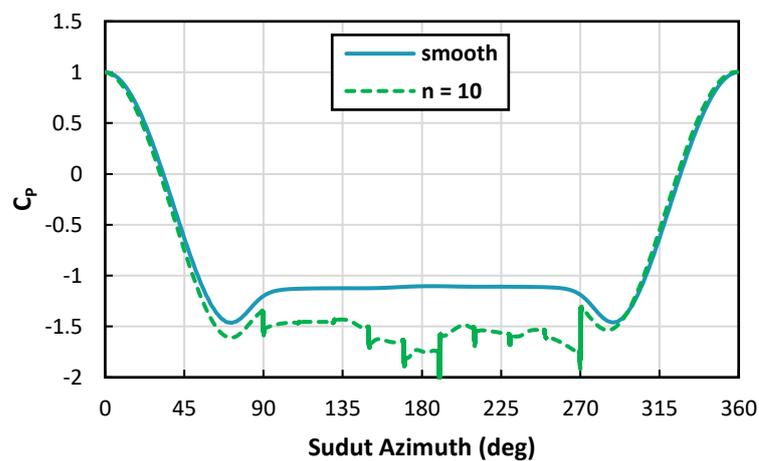
Dalam melakukan analisis koefisien *pressure*, data koefisien sesaat sebagai fungsi sudut *azimuth* pada tiap *node* diolah menjadi koefisien *pressure* rata-rata, yang selanjutnya dinotasikan sebagai  $\overline{C_p}$ . Pengambilan data dilakukan pada 9 titik (setiap  $45^\circ$ ) dalam satu siklus, kemudian diambil rata-rata nilai  $C_p$  pada tiap sudut *azimuth*. Gambar 4.5 membandingkan distribusi tekanan antara *smooth cylinder* dan *wired cylinder* dengan variasi jumlah 6, 8, dan 10 *wire* pada  $\text{Re} = 6 \times 10^3$ .



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4.5** Grafik Koefisien *Pressure* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 6 \times 10^3$ : (a)  $n = 6$ , (b)  $n = 8$ , (c)  $n = 10$ .

Grafik distribusi tekanan pada setiap variasi jumlah *wire* hampir mendekati kongruen dengan distribusi tekanan *smooth cylinder* pada sisi *windward* sampai pada sudut sekitar  $\theta \approx \pm 60^\circ$ . Setelah melewati titik tersebut, distribusi tekanan *wired cylinder* perlahan mengalami

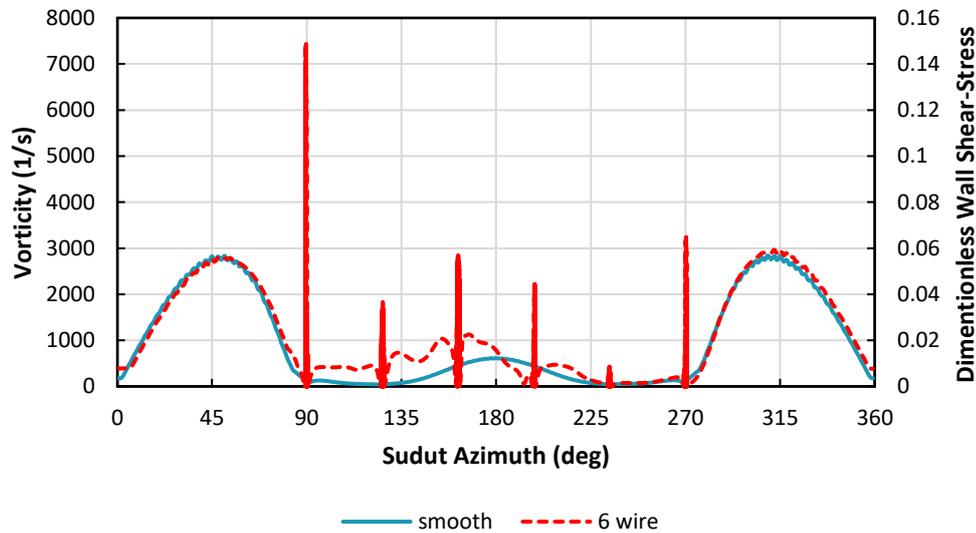
penurunan. Pada titik di mana *wire* utama diletakkan dan berakhir pada  $\theta \approx 180^\circ$ , terjadi perubahan nilai  $\overline{C_p}$  secara bertahap. Berbeda dengan distribusi tekanan pada *smooth cylinder*, dimana tekanan pada permukaan *cylinder* di sisi *wake* relatif konstan.

Grafik  $\overline{C_p}$  pada *wired cylinder* cenderung berbeda antara *upper side* dan *lower side*. Salah satu sisi *cylinder* mendominasi tekanan yang dihasilkan, seperti Gambar 4.5 (a), dimana tekanan pada *lower side* ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ) lebih besar dibandingkan dengan *upper side* ( $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ ). Adapun distribusi tekanan pada Gambar 4.5 (b) dan (c) cenderung lebih besar pada bagian *upper side*. Berbeda dengan distribusi tekanan pada *smooth cylinder* yang cenderung simetris antara *upper side* dengan *lower side* terhadap sumbu axis. Hal ini berarti bahwa tidak terdapat kecenderungan pembentukan *vortex* pada salah satu sisi *body* pada *smooth cylinder*. Kecenderungan pembentukan *vortex* pada salah satu sisi *cylinder* menyebabkan pola pembentukan *vortex* semakin asimetris terhadap sumbu axis, sehingga perbedaan tekanan antara *upper side* dan *lower side* menjadi lebih besar yang mengakibatkan peningkatan amplitudo  $C_{L\text{ RMS}}$ .

Pada *wired cylinder*, terjadi penurunan tekanan yang mendadak pada *wire* terutama pada *wire* utama ( $\theta = 90^\circ$ ). Kemungkinan bahwa kehadiran *wire* menghalangi *boundary layer surface* untuk terlepas lebih jauh dari permukaan. Ketika aliran pada *cylinder* terseparasi, sesaat sebelum *boundary layer* membentuk *free shear-layer*, lapisan tersebut *re-attach* ke permukaan *wire*. Tentunya ini akan menurunkan tekanan pada *outside boundary layer* karena adanya efek *viscous* dari permukaan *wire* dan *inside boundary layer viscous*. Pada rentang sudut  $60^\circ$ - $90^\circ$  dan  $270^\circ$ - $300^\circ$  juga mengalami penurunan nilai tekanan, walaupun tidak terjadi secara signifikan. Hal ini mungkin saja terjadi mengingat keberadaan *wire* utama akan menyebabkan terbentuknya *re-circulation zone* pada sisi *upstream* sesaat setelah separasi terjadi pada permukaan *cylinder* dan *re-attach* ke permukaan *wire* utama. Sebaliknya, pada lokasi yang sama untuk  $Re = 4 \times 10^4$  terjadi peningkatan tekanan. Kemungkinannya adalah selisih jarak antara titik separasi dengan *wire* utama pada  $Re = 4 \times 10^4$  lebih kecil dari pada selisih jarak pada *Reynolds number* yang lebih kecil, sehingga besar dan kekuatan pusaran aliran pada *re-circulation zone* juga berbeda. Semakin besar jarak anatar titik separasi dengan *wire* utama, maka *re-circulation zone* yang dihasilkan juga lebih besar. Hal ini juga sesuai dengan koefisien *pressure* pada  $Re = 2 \times 10^4$  dimana grafik antara *smooth* dan *wired cylinder* mendekati kongruen pada sudut yang sama. Namun belum diketahui pasti mengapa terjadi penurunan tekanan pada sisi *upstream* pada  $Re = 6 \times 10^3$  dan  $Re = 2 \times 10^4$ , sedangkan pada  $Re = 4 \times 10^4$  tekanan justru meningkat.

Grafik pada Gambar 4.5 untuk setiap kasus menunjukkan pola yang sama. Ketika *boundary layer* terseparasi dan menyentuh *wire* utama, terjadi penurunan tekanan yang mendadak. Hal ini disebabkan oleh peningkatan nilai skalar *vorticity* ( $\text{Curl } \mathbf{V} = \omega_v = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$ ) sesaat ketika fluida berinteraksi dengan permukaan *wire* hingga terlepas dari permukaan *wire*, seperti pada Gambar 4.6. *Vorticity* merupakan *pseudovector* yang merepresentasikan translasi, rotasi, dan deformasi lokal suatu kecepatan partikel fluida terhadap suatu titik, sehingga perubahan nilai *vorticity* dapat terjadi baik dalam keadaan laminar maupun turbulen. Pada penelitian ini, peningkatan *vorticity* terjadi setiap adanya interaksi antara fluida dengan *wire*. Sama halnya dengan koefisien *pressure*, *vorticity* yang dihasilkan cenderung lebih besar pada salah satu sisi *wire cylinder*. Pada *wired cylinder* dengan 6 *wire* di  $Re = 6 \times 10^3$ , *vorticity* yang dihasilkan pada *upper side* lebih besar dari pada *lower side*. Hal ini berkebalikan dengan koefisien *pressure* yang mana nilai yang dihasilkan pada *upper side* lebih kecil dari pada *lower side*. Penurunan tekanan ini juga tidak lepas dari pengaruh *wall shear-stress* pada permukaan *wire*. Peningkatan *wall shear-stress* sesaat pada *wire* mengindikasikan peningkatan momentum *boundary layer*.

Gambar 4.6 menunjukkan bahwa terjadi peningkatan *wall shear-stress* pada setiap interaksi antara fluida dengan *wire*. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya penurunan koefisien *pressure* pada daerah *leeward* dimana lokasi *wire* ditemukan.



**Gambar 4.6** Grafik Perbandingan *Vorticity* dan *Wall Shear-Stress* Rata-Rata antara *Smooth Cylinder* dengan *Wired Cylinder* ( $n = 6$ ), pada  $Re = 6 \times 10^3$ .

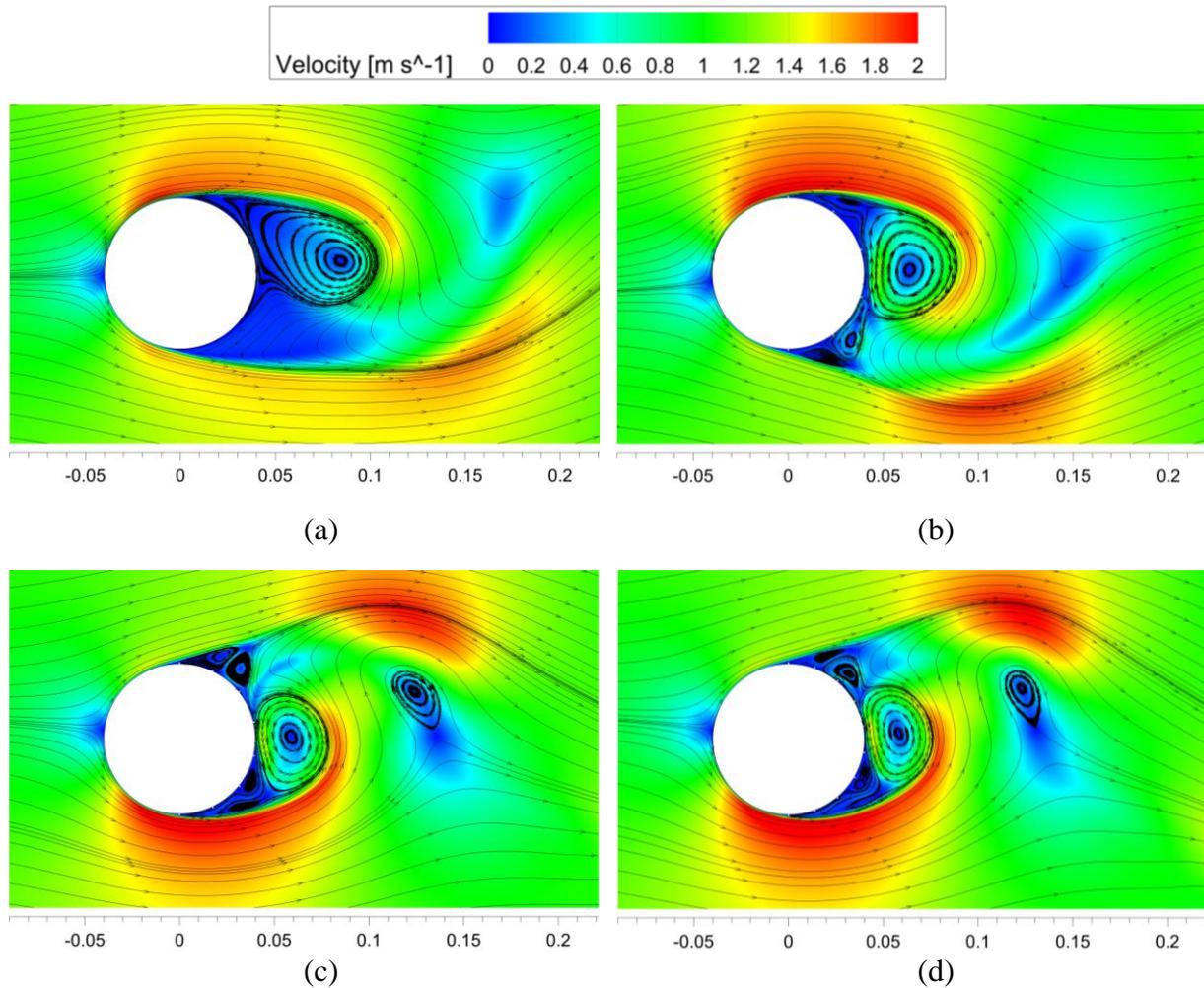
Pada setiap penambahan jumlah *wire*, terjadi penurunan koefisien *pressure*, terutama pada daerah *wake* untuk *cylinder* dengan  $Re = 6 \times 10^3$  jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Efek yang ditimbulkan dengan menambahkan jumlah *wire* tidak memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan perbedaan tekanan antara *upper side* dan *lower side*. Begitu juga pada *cylinder* dengan  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $4 \times 10^4$ .

### 4.3 Analisis Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan dan *Streamlines*

Untuk memahami mekanisme peningkatan nilai  $C_{L\ RMS}$  yang telah dibahas pada sub-bab sebelumnya, dilakukan analisis terhadap kontur kecepatan, kontur tekanan, dan *streamlines*. Gambar 4.7 memberikan ilustrasi aliran melewati *smooth cylinder* dan *wired cylinder* dalam bentuk kontur kecepatan dengan  $Re = 6 \times 10^3$ . Gambar 4.7 (a) merupakan kontur kecepatan sesaat *smooth cylinder* pada *peak* (+). Gambar tersebut memperlihatkan keadaan pembentukan *vortex* sesaat sebelum meninggalkan dinding *cylinder*. Gambar 4.7 (b), (c), dan (d) secara berturut-turut merupakan ilustrasi kontur kecepatan sesaat *wired cylinder* dengan jumlah *wire* sebanyak 6, 8, dan 10. Berdasarkan kontur kecepatan sesaat di bawah ini, terlihat jelas perbedaan antara *smooth* dan *wired cylinder*. *Vortex* yang terbentuk di daerah *wake* pada *wired cylinder* lebih dekat dengan permukaan *cylinder* dibandingkan dengan *smooth cylinder*. *Streamline* yang terbentuk juga jelas menunjukkan bahwa *vortex* yang terbentuk cenderung lebih asimetris pada *wired cylinder*. Ini merupakan salah satu alasan mengapa amplitudo yang dihasilkan *cylinder* menjadi lebih besar setelah diberi kekasaran permukaan *wire*.

Penambahan *wire* pada permukaan *cylinder* juga menyebabkan terbentuknya *vortices* kecil pada kedua sisi *cylinder*. Walaupun *vortices* terbentuk pada kedua sisi *cylinder*, namun besaran nilai kecepatan antara *upper side* dan *lower side* tidak sama. Kekuatan *Karman vortex* antara *smooth cylinder* dan *wired cylinder* jelas berbeda. Terlihat pada Gambar 4.7 (b), kecepatan sudut *vortex* jelas lebih besar dibandingkan *smooth cylinder*. Hal ini disebabkan oleh peningkatan momentum *free shear-layer* akibat agitasi *wire* utama yang nantinya membentuk

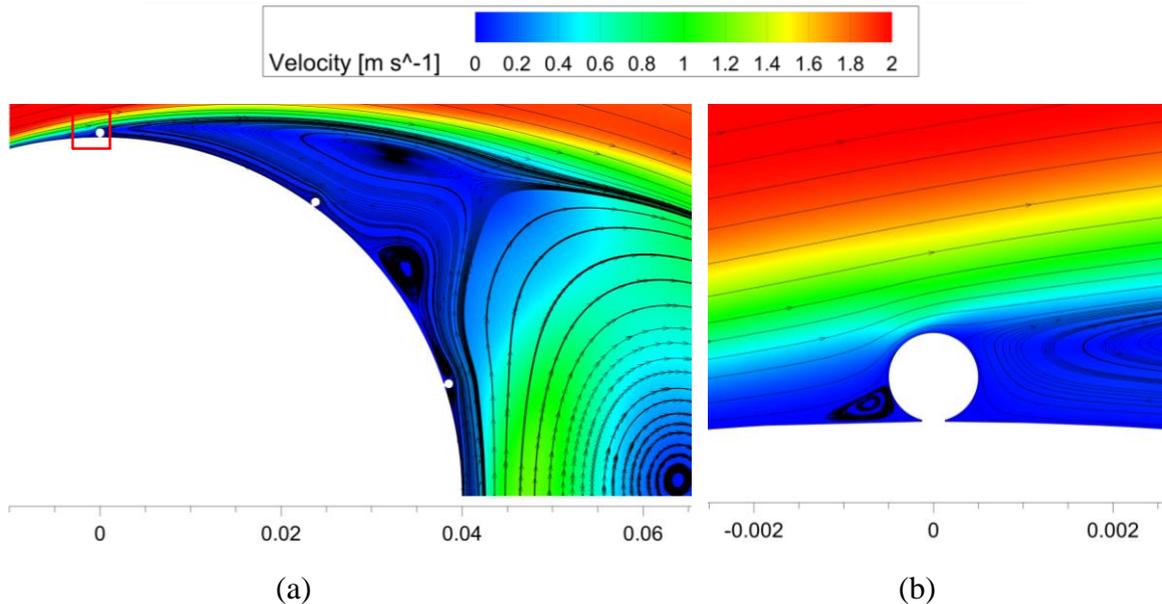
*vortex* yang lebih dekat dengan permukaan *cylinder*. *Vortex* yang berotasi kemudian *re-attach* ke permukaan *wire* lainnya, lalu *re-attach* ke permukaan *cylinder*. Hal ini berlaku untuk kedua sisi *wired cylinder*. Berdasarkan kontur tekanan sesaat yang ditampilkan, dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah *wire* pada permukaan *cylinder* maka *vortex* yang dihasilkan akan lebih dekat dengan permukaan *cylinder*. Hal ini ternyata sebanding dengan nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  dan  $\overline{C_D}$  yang dihasilkan. Semakin dekat *vortex* dengan permukaan, maka gaya aerodinamik yang dihasilkan juga semakin besar.



**Gambar 4.7** Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi *Peak*  $C_L$  dan  $t = \pm 20$  s dengan  $Re = 6 \times 10^3$ : (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

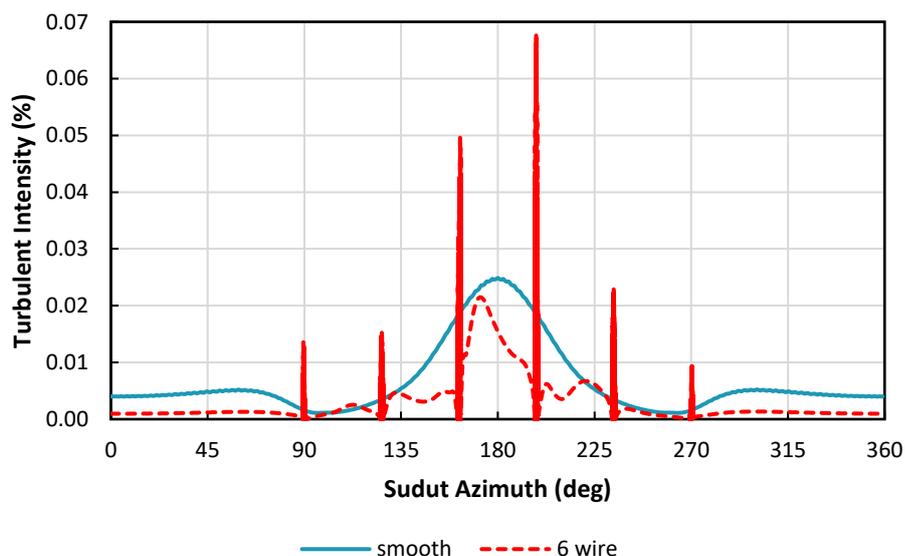
Perubahan besar momentum akibat agitasi *wire* dan proses terjadinya *re-attach* ditunjukkan pada Gambar 4.8. Gambar tersebut merupakan pembesaran Gambar 4.7 (b) untuk variasi 10 *wire* dengan  $Re = 6 \times 10^3$ . Pada *wire* utama terbentuk *re-circulation zone* yang menyebabkan separasi terjadi lebih awal kemudian *re-attach* pada permukaan *cylinder*, sehingga *wake* yang terbentuk tidak melebar ke daerah belakang *cylinder* karena peningkatan momentum dan perubahan vektor kecepatan akibat tegangan geser permukaan. Pada setiap sisi *wire* lainnya juga terbentuk *bubble separation* yang membantu meningkatkan momentum aliran. Peningkatan momentum partikel pada *vortex* semakin lama semakin berkurang, walaupun penambahan *wire* dikatakan mampu meningkatkan momentum partikel, namun peningkatan yang terjadi tidaklah sama. Hal ini sesuai dengan grafik *vortices / wall shear-stress* pada Gambar 4.6, dimana nilai *peak vortices / wall shear-stress* terjadi pada *wire* utama. Kemudian

mengecil ketika partikel menyentuh *wire* pada sudut  $162^\circ$  dan *wire* pada sudut  $126^\circ$ , hal yang sama juga berlaku pada sisi lain *wired cylinder*.



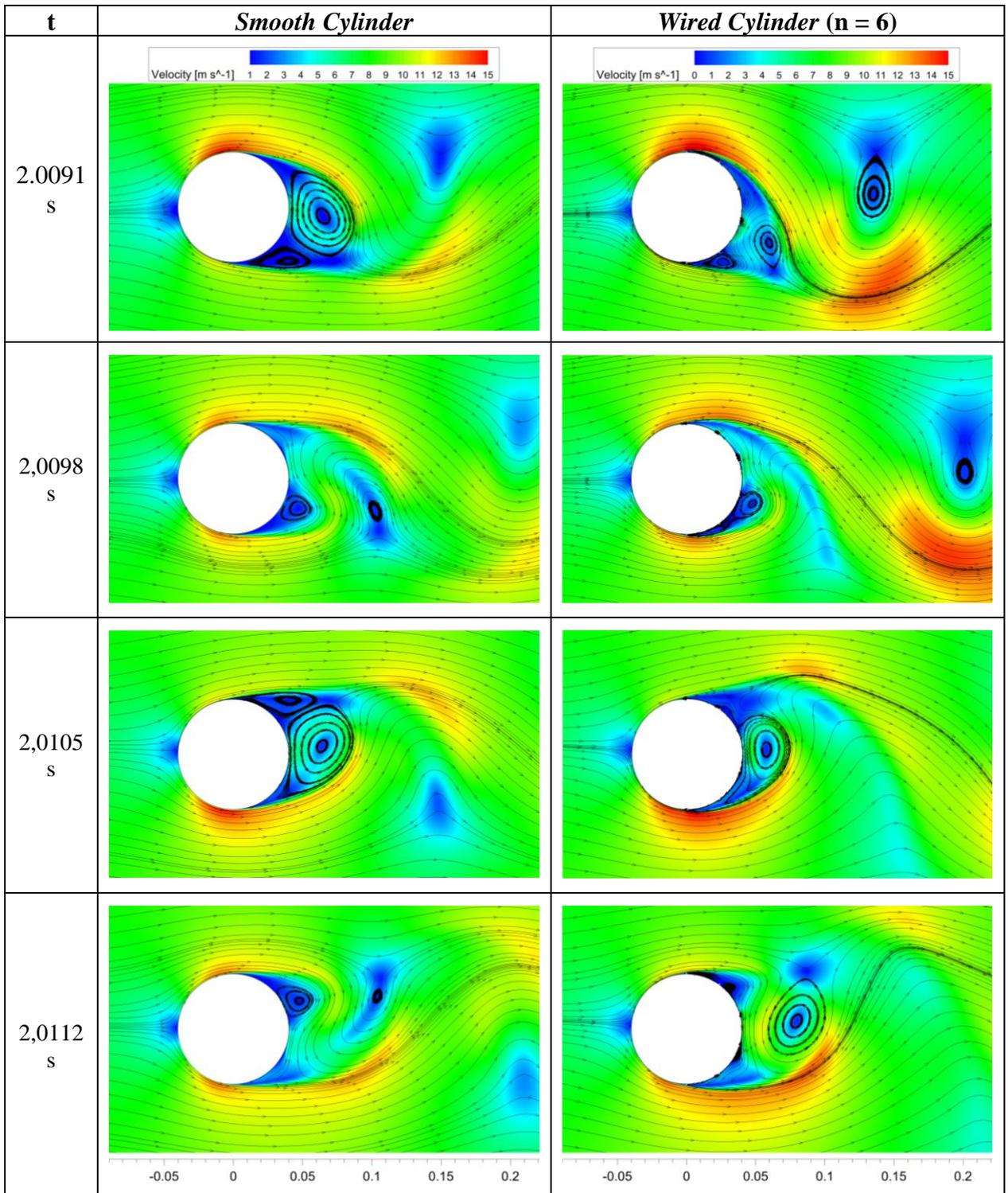
**Gambar 4.8** Kontur Kecepatan Sesaat *Wired Cylinder* ( $n=6$ ) pada Posisi  $Peak C_L (+)$  dan  $t = 20,18$  s dengan  $Re = 6 \times 10^3$ : (a) *Wake Region* dan (b) *Wire Utama*.

Perubahan kecepatan aliran yang terjadi pada *wired cylinder* ternyata tidak menyebabkan *turbulence intensity* meningkat. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9, penambahan *wire* pada sisi *downstream* ternyata cenderung mengurangi *turbulence intensity*. Peningkatan nilai  $Tu$  hanya terjadi sesaat ketika aliran melalui *wire*. Upaya *wire* dalam meningkatkan nilai *turbulence intensity* hanya terjadi sesaat saja, sampai pada akhirnya kembali pada keadaan semula. Hal ini terjadi secara berulang dari *wire* utama kepada *wire* lainnya. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka diketahui bahwa percepatan transisi aliran menjadi turbulen bukanlah alasan terjadinya peningkatan nilai  $C_{L,RMS}$ .



**Gambar 4.9** Grafik Perbandingan *Turbulence Intensity* antara *Smooth Cylinder* dengan *Wired Cylinder* (dengan  $n = 6$ ), pada  $Re = 6 \times 10^3$ .

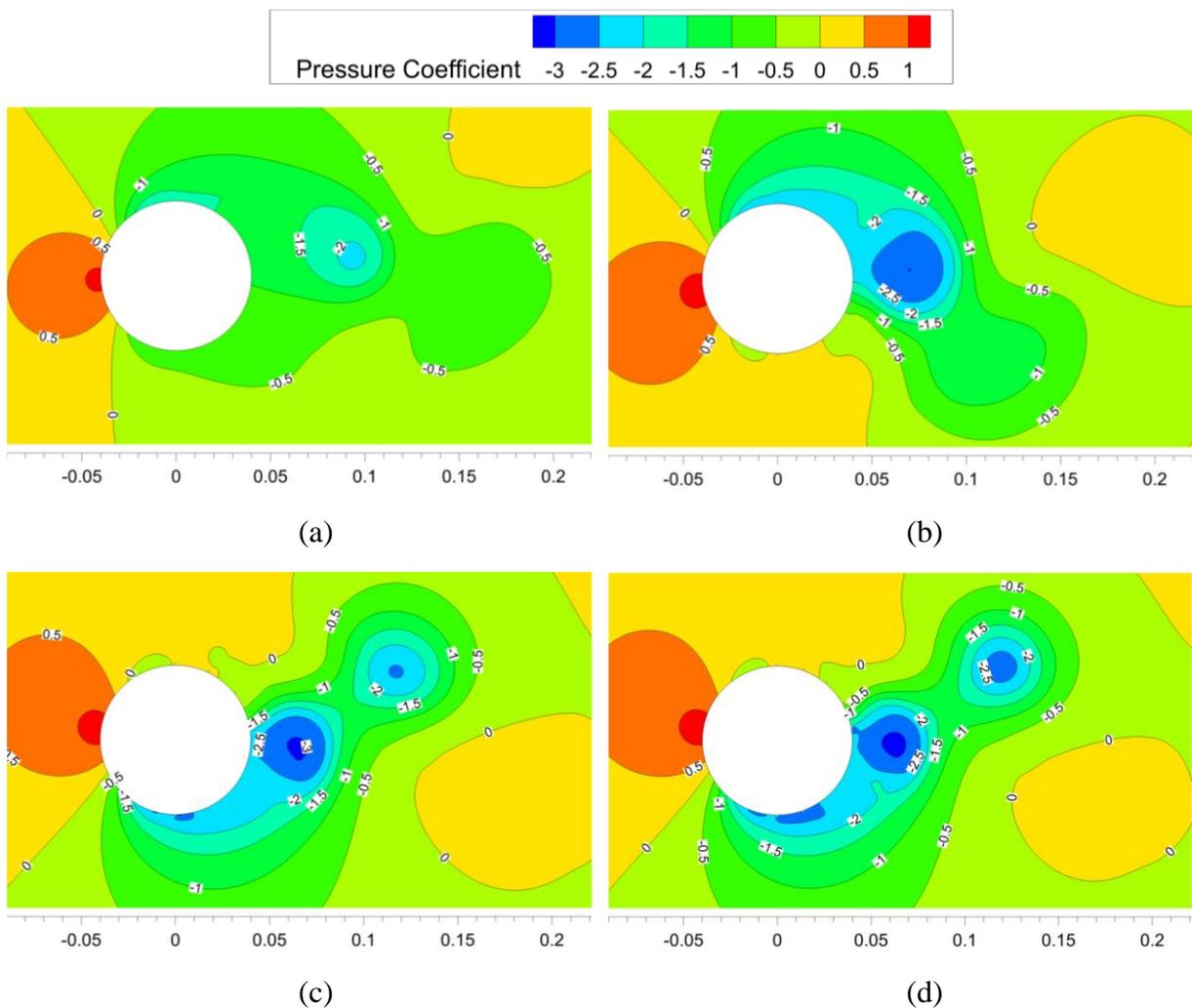
Gambar 4.10 menunjukkan komparasi proses *vortex shedding* antara *smooth cylinder* dengan *wired cylinder* dengan jumlah *wire* 6 buah. Dapat dilihat bahwa pembentukan *vortex* pada *wired cylinder* jelas lebih dekat dengan dinding *cylinder* dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Begitu juga dengan simpangan yang terjadi, dimana simpangan *wired cylinder* lebih besar dibandingkan *smooth cylinder*.



**Gambar 4.10** Komparasi Kontur Kecepatan Sesaat antara *Smooth Cylinder* dengan *Wired Cylinder* ( $n = 6$ ) pada  $Re = 4 \times 10^4$ .

Dari gambar di atas juga dapat divalidasi bahwa pembentukan *vortex* pada *wired cylinder* cenderung lebih besar pada salah satu sisi *cylinder*. Pada kasus di atas, *vortex* yang terbentuk dari *lower side* dan kemudian terlepas ke sisi atas cenderung lebih besar dibandingkan dengan sisi lainnya. Hal inilah yang menyebabkan grafik koefisien *pressure* untuk *wired cylinder* tidak simetris terhadap sumbu ordinat.

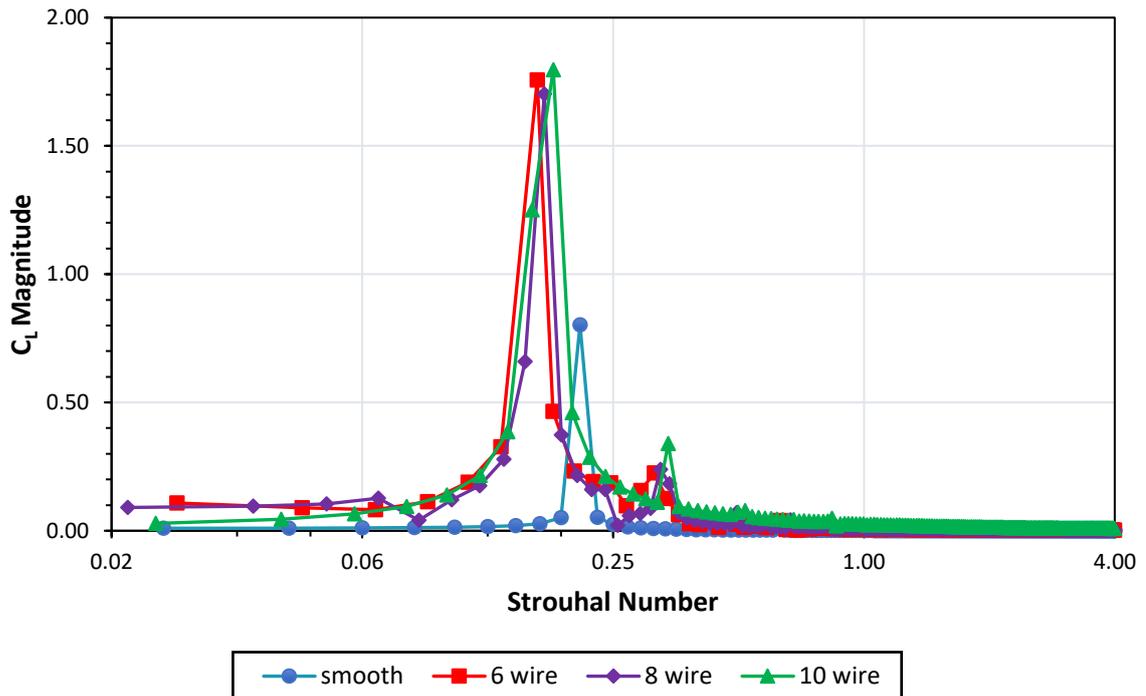
Pada paragraf sebelumnya telah dibahas bahwa pembentukan *bubble separation* berkontribusi dalam meningkatkan momentum aliran. Hal ini juga tampak pada kontur tekanan seperti pada Gambar 4.11. Misalnya pada Gambar 4.11 (d), terjadi penurunan tekanan di dekat *wire* utama dari  $C_p = -1$  menjadi  $C_p = -1,5$ . Hal ini mengindikasikan terjadinya peningkatan momentum pada daerah tersebut. Sebaliknya, terjadi peningkatan tekanan pada sisi lainnya jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, yaitu dari  $C_p = -0,5$  menjadi  $C_p = 0$ . Selisih koefisien *pressure* antara kedua sisi silinder yang meningkat menunjukkan simpangan maksimum yang dihasilkan lebih besar. Peningkatan nilai amplitudo juga berarti peningkatan nilai  $C_{L\text{ RMS}}$ . Terlihat bahwa terjadi pergeseran titik stagnasi sesaat ketika ditambahkan kekasaran permukaan *wire* jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* karena simpangan maksimum *vortex* yang terbentuk lebih besar jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*.



**Gambar 4.11** Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi *Peak*  $C_L$  dan  $t = \pm 20$  s dengan  $Re = 6 \times 10^3$ :  
 (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

Penambahan *wire* pada permukaan *cylinder* ternyata mampu meningkatkan selisih distribusi tekanan permukaan antara *upper side* dan *lower side*. Pada  $Re = 6 \times 10^3$  seperti pada Gambar 4.11, terlihat bahwa semakin banyak jumlah *wire* maka selisih tekanan tersebut akan semakin besar, terutama pada *wire* utama. Hal ini sesuai dengan amplitudo  $C_L$  yang dihasilkan. Seperti pada Gambar 4.2, semakin banyak jumlah *wire* maka nilai  $C_L$  RMS semakin besar. Berbeda untuk kasus pada *Reynolds number* yang lebih tinggi, semakin banyak jumlah *wire* maka selisih tekanan cenderung lebih kecil, sehingga amplitudo  $C_L$  juga lebih kecil.

#### 4.4 Analisis Strouhal Number



**Gambar 4.12** Grafik *Magnitude C<sub>L</sub>* terhadap *Strouhal Number* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 6 \times 10^3$ .

Gambar 4.12 di atas menunjukkan *magnitude* fluktuasi koefisien *lift* untuk *smooth cylinder* dan *wired cylinder* pada  $Re = 6 \times 10^3$ . *Magnitude* tersebut diperoleh dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) pada koefisien *lift* sebagai fungsi waktu. Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa *peak* terjadi pada  $St \approx 0,208$  untuk *smooth cylinder*, hal ini menunjukkan bahwa *vortex shedding* pada *cylinder* terjadi secara periodik dengan frekuensi paling dominan ditunjukkan pada titik tersebut. Sedangkan pada *wired cylinder*, terjadi peningkatan nilai *magnitude* dengan penurunan nilai *Strouhal number*. Secara berturut-turut, nilai *Strouhal number* yang dimiliki *cylinder* dengan jumlah *wire* 6, 8, dan 10 adalah 0,164 ; 0,171 ; dan 0,180. Peningkatan nilai *magnitude* tentunya tidak menjamin peningkatan nilai *Stouhal number* pula. Pada kasus ini, terjadi penurunan nilai *Strouhal number* sebesar -21,15% ; -18% ; dan -13,79%, berturut-turut untuk  $n = 6, 8, \text{ dan } 10$ . Hal ini juga berlaku untuk aliran dengan *Reynolds number* yang lebih besar, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Pada  $Re = 2 \times 10^4$ , nilai *Strouhal number* untuk *smooth cylinder* sebesar 0,182. Sedangkan untuk *wired cylinder* sebesar 0,170 ; 0,179 ; dan 0,172 berturut-turut mulai dari *cylinder* dengan jumlah *wire* paling sedikit hingga paling banyak. Adapun *cylinder* dengan  $Re = 4 \times 10^4$  memiliki nilai *Strouhal number* sebesar 0,244 untuk *smooth cylinder*. Sedangkan untuk *wired cylinder* sebesar 0,227 ; 0,234 ; dan 0,229

berturut-turut mulai dari *cylinder* dengan jumlah *wire* paling sedikit hingga paling banyak. Semakin rendah nilai *Strouhal number* yang diperoleh, maka frekuensi yang dicapai juga semakin rendah. Berdasarkan hasil tersebut, variasi yang menghasilkan penurunan nilai terbesar adalah *cylinder* dengan 6 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  (sekitar -21,15%). Sedangkan variasi yang mampu meminimalkan penurunan nilai *Strouhal number* adalah *cylinder* dengan 8 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  (sekitar -1,91%).

**Tabel 4.2** *Strouhal Number* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* , untuk  $6 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$ .

<b>Re</b>	<b>n</b>	<b>St<sub>CL</sub></b>	<b>Δ%</b>
$6 \times 10^3$	0	0.208	-
	6	0.164	-21.15
	8	0.171	-18.00
	10	0.180	-13.79
$2 \times 10^4$	0	0.182	-
	6	0.170	-6.64
	8	0.179	-1.91
	10	0.172	-5.77
$4 \times 10^4$	0	0.244	-
	6	0.227	-6.98
	8	0.234	-3.89
	10	0.229	-6.25

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, nilai *Strouhal number* untuk seluruh variasi mengalami penurunan nilai. Ini mengindikasikan bahwa penambahan *wire* pada *wake region* ternyata tidak membantu dalam meningkatkan kekuatan frekuensi *vortex shedding* yang terbentuk di belakang *cylinder*. Kekasaran permukaan dengan 8 *wire* cenderung memiliki efek yang lebih baik dari pada 6 dan 10 *wire* untuk mempertahankan kekuatan *vortex shedding*, kecuali pada  $Re = 6 \times 10^3$ . Penurunan nilai frekuensi yang terjadi pada *wired cylinder* kemungkinan disebabkan oleh peningkatan amplitudo koefisien *lift*, sehingga *vortex shedding* yang terjadi pada *wake region* lebih lambat untuk mencapai titik kesetimbangan pada tiap siklus. Penurunan *turbulence intensity* seperti tampak pada Gambar 4.9 juga memungkinkan terjadinya penurunan frekuensi sistem. Penurunan nilai *Tu* mengindikasikan bahwa fluktuasi kecepatan partikel fluida (turbulensi aliran) terjadi lebih lambat dan berarti bahwa frekuensi *vortex shedding* yang dihasilkan juga lebih kecil.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

“Studi Numerik Pengaruh Jumlah *Wire* terhadap Performa *Circular Cylinder* dengan  $D = 80$  mm dan Variasi *Reynolds Number* untuk *Energy Harvesting* pada *Ducting System*” menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Modifikasi kekasaran permukaan *cylinder* dengan *wire* mampu meningkatkan koefisien *lift* RMS,  $C_{L\text{ RMS}}$  dengan peningkatan terbesar dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi jumlah 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  dengan peningkatan sebesar 150% dibandingkan dengan *smooth cylinder* pada  $C_{L\text{ RMS}} = 1,44$ . Sedangkan peningkatan terkecil dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi jumlah 10 *wire* pada  $Re = 4 \times 10^4$  dengan peningkatan sebesar 55% pada  $C_{L\text{ RMS}} = 1,25$ .
2. Peningkatan nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  diikuti oleh peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  sebagai nilai yang tak diharapkan. *Cylinder* dengan variasi jumlah 10 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  merupakan variasi dengan peningkatan nilai  $\overline{C_D}$  terbesar dengan peningkatan sebesar 42% pada  $\overline{C_D} = 1,59$ . Sedangkan peningkatan terkecil dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi jumlah 10 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  dengan peningkatan sebesar 22% pada  $\overline{C_D} = 1,40$ .
3. Rasio  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  terbesar dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi 6 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  sebesar 0,94 dengan peningkatan sebesar 51,52%. Sedangkan rasio  $C_{L\text{ RMS}} / \overline{C_D}$  terkecil dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi 10 *wire* pada  $Re = 4 \times 10^4$  sebesar 0,86 dengan peningkatan sebesar 22,36%. Adapun variasi dengan peningkatan tertinggi dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi 8 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  sebesar 77,75%. Sedangkan variasi dengan peningkatan terkecil dimiliki oleh *cylinder* dengan variasi 10 *wire* pada  $Re = 4 \times 10^4$  sebesar 22,36%.
4. Penambahan *wire* pada daerah *leeward*, memberikan efek penurunan nilai *Strouhal number*. Variasi yang menghasilkan penurunan nilai terbesar adalah *cylinder* dengan 6 *wire* pada  $Re = 6 \times 10^3$  (sekitar -21,15%). Sedangkan variasi yang mampu meminimalkan penurunan nilai *Strouhal number* adalah *cylinder* dengan 8 *wire* pada  $Re = 2 \times 10^4$  (sekitar -1,91%). Penurunan nilai *Strouhal number* juga berarti bahwa frekuensi *vortex shedding* yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi *vortex shedding* milik *smooth cylinder*.
5. Penambahan *wire* pada *wake region*, efektif dalam menurunkan nilai koefisien *pressure*, terutama pada daerah *wire*. Semakin banyak jumlah *wire*, maka reduksi tekanan juga semakin besar. Penurunan distribusi tekanan diiringi oleh peningkatan *vorticity* pada sisi *downstream*.
6. Visualisasi aliran dalam bentuk kontur kecepatan, tekanan, dan *streamline*, menunjukkan peningkatan nilai  $C_{L\text{ RMS}}$  disebabkan oleh peningkatan momentum akibat agitasi yang dilakukan oleh *wire*, sehingga terjadi peningkatan momentum *boundary layer*. Peningkatan momentum sesaat tersebut menyebabkan *Karman vortex* yang terbentuk lebih dekat dengan permukaan *cylinder*, sehingga fluktuasi gaya *lift* semakin meningkat. Selain itu, *vortex* yang dihasilkan oleh *wired cylinder* cenderung lebih asimetris jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal inilah yang menyebabkan amplitudo gaya *lift* semakin meningkat.

### 5.2 Saran

Berikut merupakan saran yang diberikan dalam rangka menunjang penelitian lebih lanjut.

1. Penelitian dengan *cylinder* bergerak dibutuhkan untuk mengetahui desain sistem yang lebih baik dalam meningkatkan getaran.
2. Simulasi dengan model benda uji 3D diperlukan untuk mengetahui fenomena aliran yang terjadi secara detail.
3. Penentuan *time step* perlu ditinjau ulang untuk memperoleh nilai yang lebih valid dengan *residual* yang lebih kecil.

## DAFTAR PUSTAKA

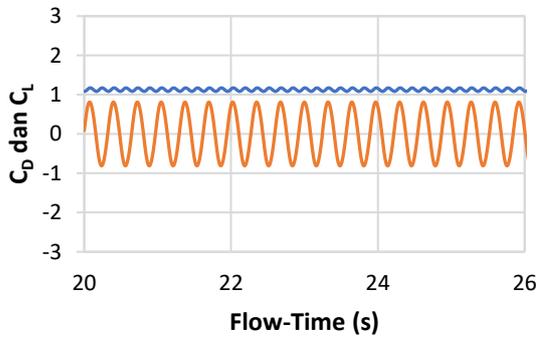
- Achenbach, E., & Heinecke, E. (1981). On Vortex Shedding from Smooth and Rough Cylinders in the Range of Reynolds Numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$ . *Journal of Fluid Mechanics*, 109, 239–251. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S002211208100102X>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (Third). McGraw-Hill.
- Ekmekci, A., & Rockwell, D. (2010). Effects of a Geometrical Surface Disturbance on Flow Past a Circular Cylinder: A Large-Scale Spanwise Wire. *Journal of Fluid Mechanics*, 665, 120–157. <https://doi.org/10.1017/S0022112010003848>
- Energy Agency, I. (2021). *World Energy Outlook 2021*. [www.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo)
- Fox, R. W., Pritchard, P. J., & McDonald, A. T. (2011). *Introduction to Fluid Mechanics* (P. J. Pritchard, Ed.; Eighth Edition). John Wiley and Sons, Inc.
- Guinness, I., & Persoons, T. (2021). Passive Flow Control for Drag Reduction on a Cylinder in Cross-Flow Using Leeward Partial Porous Coatings. *Fluids*, 6(8). <https://doi.org/10.3390/FLUIDS6080289>
- Hall-Stinson, A., Lehrman, C., & Tripp, E. (2011). *ENERGY GENERATION FROM VORTEX INDUCED VIBRATIONS A Major Qualifying Project*.
- Hover, F. S., Tvedt, H., & Triantafyllou, M. S. (2001). Vortex-Induced Vibrations of a Cylinder with Wires. *Journal of Fluid Mechanics*, 448, 175–195. <https://doi.org/10.1017/s0022112001005985>
- Igarashi, T. (1986). Effect of the Wires on the Flow around a Circular Cylinder Normal to an Airstream. *Bulletin of JSME*, 29(255), 85–144.
- Kaneko, S., Nakamura, T., Inada, F., Kato, M., Ishihara, K., Nishihara, T., Mureithi, N. W., & Langthjem, M. A. (2014). *Flow-Induced Vibrations Classifications and Lessons from Practical Experiences Second Edition* (Second). Academic Press. [www.elsevierdirect.com/rights](http://www.elsevierdirect.com/rights)
- Khalak A, & Williamson C.H.K. (1997). Fluid forces and dynamics of a hydroelastic structure with very low mass and damping. *Journal of Fluids Structure*, 11, 973–982.
- Kim, E. S., Bernitsas, M. M., & Ajith Kumar, R. (2013). Multicylinder Flow-Induced Motions: Enhancement by Passive Turbulence Control at  $28,000 < \text{Re} < 120,000$ . *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135(2). <https://doi.org/10.1115/1.4007052>
- Klausmann, K., & Ruck, B. (2017). Drag reduction of circular cylinders by porous coating on the leeward side. *Journal of Fluid Mechanics*, 813, 382–411. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.757>

- Kuo, C. H., Chiou, L. C., & Chen, C. C. (2007). Wake Flow Pattern Modified by Small Control Cylinders at Low Reynolds Number. *Journal of Fluids and Structures*, 23(6), 938–956. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.01.002>
- Lienhard, J. H. (1966). Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders. In *Bulletin 300*. Technical Extension Service.
- Mamouri, A. R., Khodadadi, M., & Bakkhosnevis, A. A. (2016). Experimental Investigation for Wake of the Circular Cylinder by Attaching Different Number of Tripping Wires. *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, 17(1).
- Miller, F., Fuller, R. G., Zollman, D. A., Campbell, T. C., Lang, C. R., Lang, R. H., Gaines, Steve., Manz, Kerry., Bartlett, Roger., Nugent, Ron., Christie, Ken., Elliott, Barney., Nebraska Videodisc Design/Production Group., & American Association of Physics Teachers. (2008). *Twin Views of the Tacoma Narrows Bridge collapse*. American Association of Physics Teachers.
- Nakayama, Y. (2018). Drag and Lift. In *Introduction to Fluid Mechanics* (pp. 177–201). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102437-9.00009-7>
- Norberg, C. (2003). Fluctuating lift on a circular cylinder: review and new measurements. In *Journal of Fluids and Structures* (Vol. 17). [www.elsevier.nl/locate/jnlabr/yjfls](http://www.elsevier.nl/locate/jnlabr/yjfls)
- Park, H., Bernitsas, M. M., & Chang, C.-C. (2013). Map of Passive Turbulence Control to Flow-Induced Motions for a Circular Cylinder at  $30,000 < Re < 120,000$ : Sensitivity to Zone Covering. *Journal of Offshore and Arctic Engineering OMAE2013*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10123>
- 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). <https://doi.org/10.1115/1.4028061>
- Quadrante, L. A. R., & Nishi, Y. (2014). Amplification/Suppression of Flow-Induced Motions of an Elastically Mounted Circular Cylinder by Attaching Tripping Wires. *Journal of Fluids and Structures*, 48, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2014.02.018>
- Rehimi, F., Aloui, F., Nasrallah, S. ben, Doublicz, L., & Legrand, J. (2008). Experimental Investigation of a Confined Flow Downstream of a Circular Cylinder Centered between Two Parallel Walls. *Journal of Fluids and Structures*, 24(6), 855–882. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.12.011>
- Roshko, A. (1960). *Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number*.
- Sato, M., & Kobayashi, T. (2012). A Fundamental Study of the Flow Past a Circular Cylinder Using Abaqus/CFD. *Mechanical Design & Analysis Corporation*.
- Schlichting, H. (2000). *Boundary-Layer Theory* (Eighth Edition). McGraw Hill.
- Sumer, B. M., & Fredsøe, J. (1997). Hydrodynamics around Cylindrical Structures. *Advanced Series on Ocean Engineering*, 26.

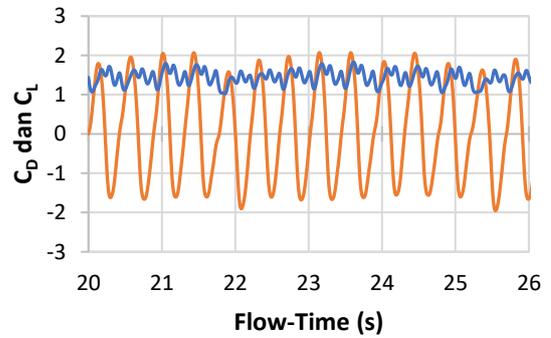
- VADEAN Adina, P., Paul Petrica, P., Latinovic, T., Barz, C., Pop-Vădean, A., Pop, P. P., Barz, C., & Latinovic, T. (2015). Research about Harvesting Energy Devices and Storage Method. In *Carpathian Journal of Electrical Engineering* (Vol. 4, Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/292154962>
- Wieselsberger C. (1922). *New Data on the Laws of Fluid Resistance*. NACA-TN-84; NASA.
- Zdravkovich, M. M. (1981). Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding. In *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (Vol. 7).
- Zhou, B., Li, Y., Wang, X., Guo, W., & Tan, S.-K. (2016). Experimental Study of Dynamic Drag and Lift Characteristics of Dimpled Cylinders. *Marine Technology Society Journal*, 50, 56–61.
- Zhou, B., Wang, X., Gho, W. M., & Tan, S. K. (2015). Force and Flow Characteristics of a Circular Cylinder with Uniform Surface Roughness at Subcritical Reynolds Numbers. *Applied Ocean Research*, 49, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2014.06.002>
- Zhou, B., Wang, X., Guo, W., Gho, W. M., & Tan, S. K. (2015). Control of Flow Past a Dimpled Circular Cylinder. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 69, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.020>

## LAMPIRAN

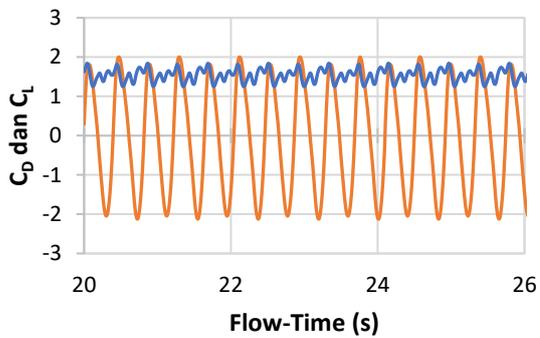
**LAMPIRAN A: Grafik Koefisien *Drag* ( $C_D$ ) dan Koefisien *Lift* ( $C_L$ ) pada  $Re = 6 \times 10^3$  dan  $Re = 2 \times 10^4$**



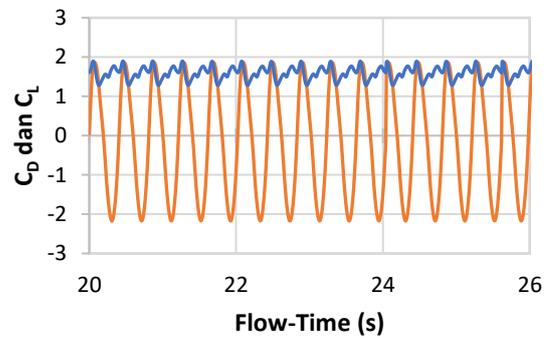
(a)



(b)

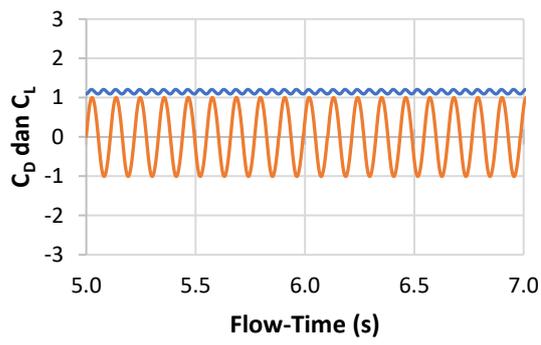


(c)

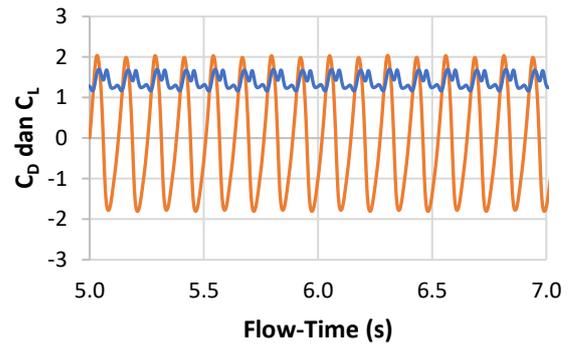


(d)

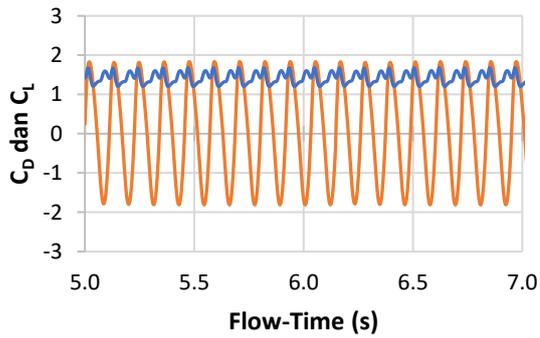
**Gambar A.1** Grafik Koefisien *Drag* ( $C_D$ ) dan Koefisien *Lift* ( $C_L$ ) pada  $Re = 6 \times 10^3$ : (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .



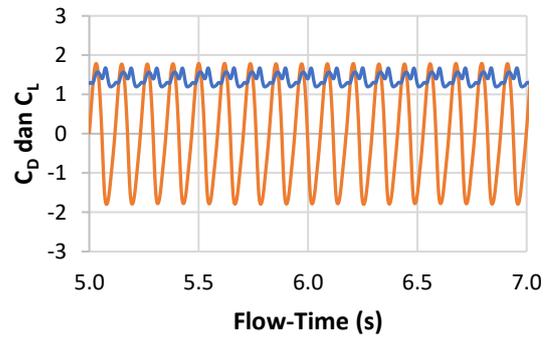
(a)



(b)



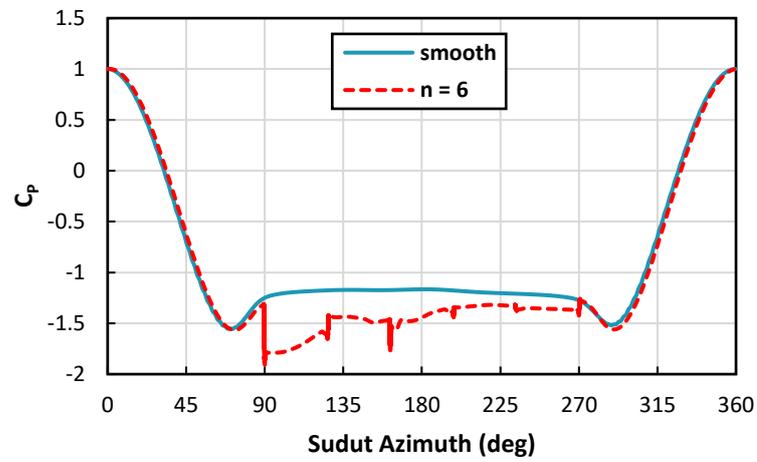
(c)



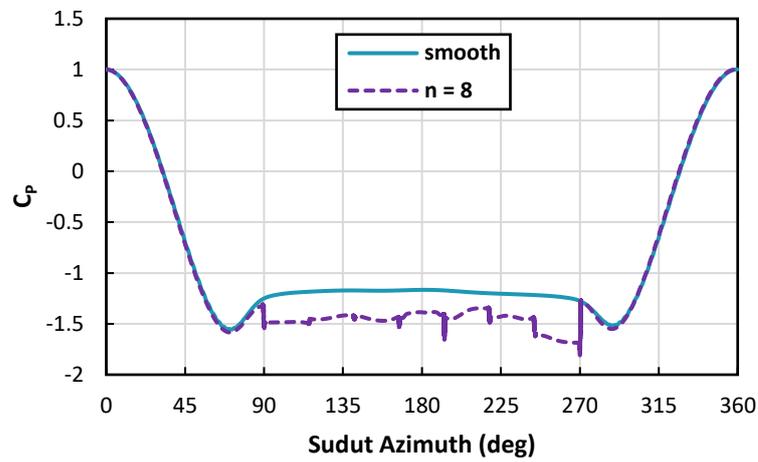
(d)

**Gambar A.2** Grafik Koefisien *Drag* ( $C_D$ ) dan Koefisien *Lift* ( $C_L$ ) pada  $Re = 2 \times 10^4$ : (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

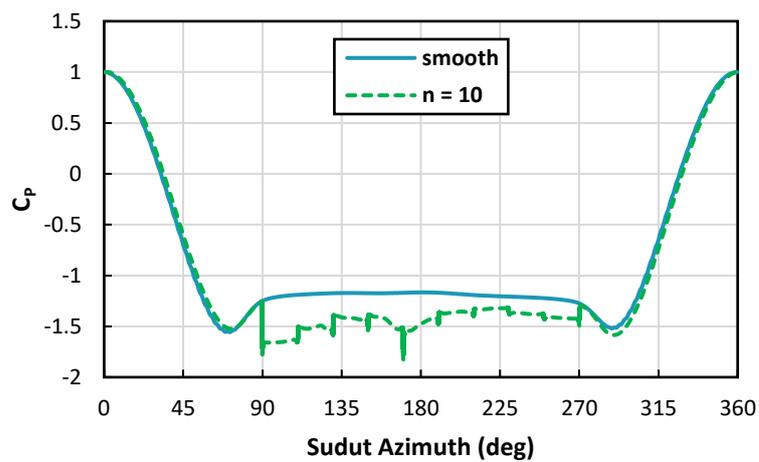
**LAMPIRAN B: Grafik Koefisien *Pressure* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $Re = 4 \times 10^4$**



(a)

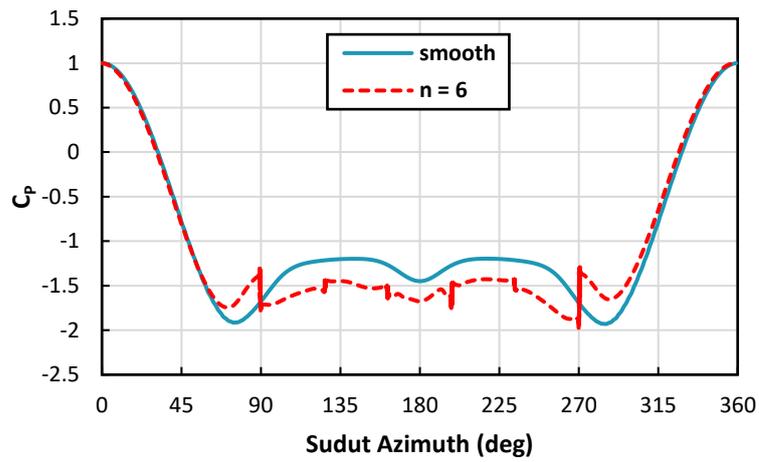


(b)

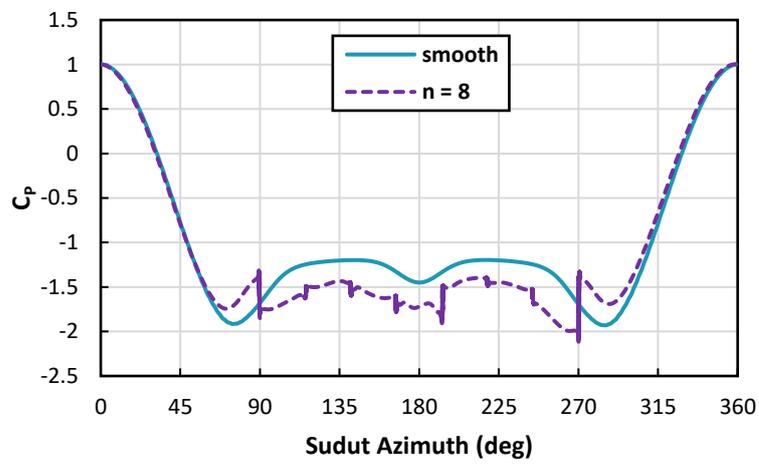


(c)

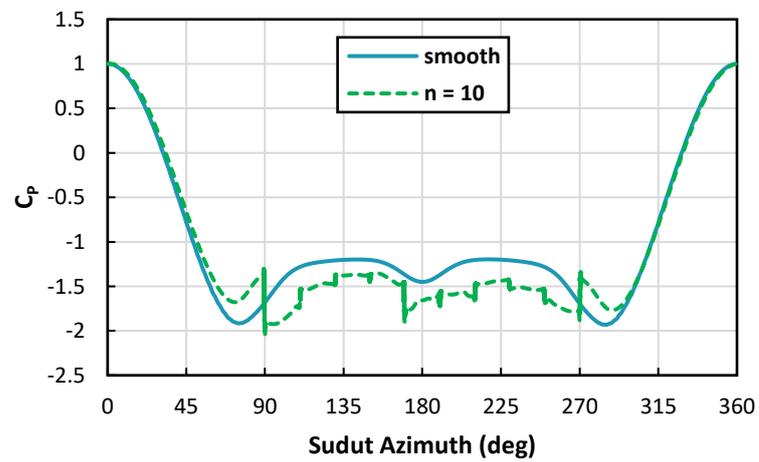
**Gambar B.1** Grafik Koefisien *Pressure* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 2 \times 10^4$ : (a)  $n = 6$ , (b)  $n = 8$ , (c)  $n = 10$ .



(a)



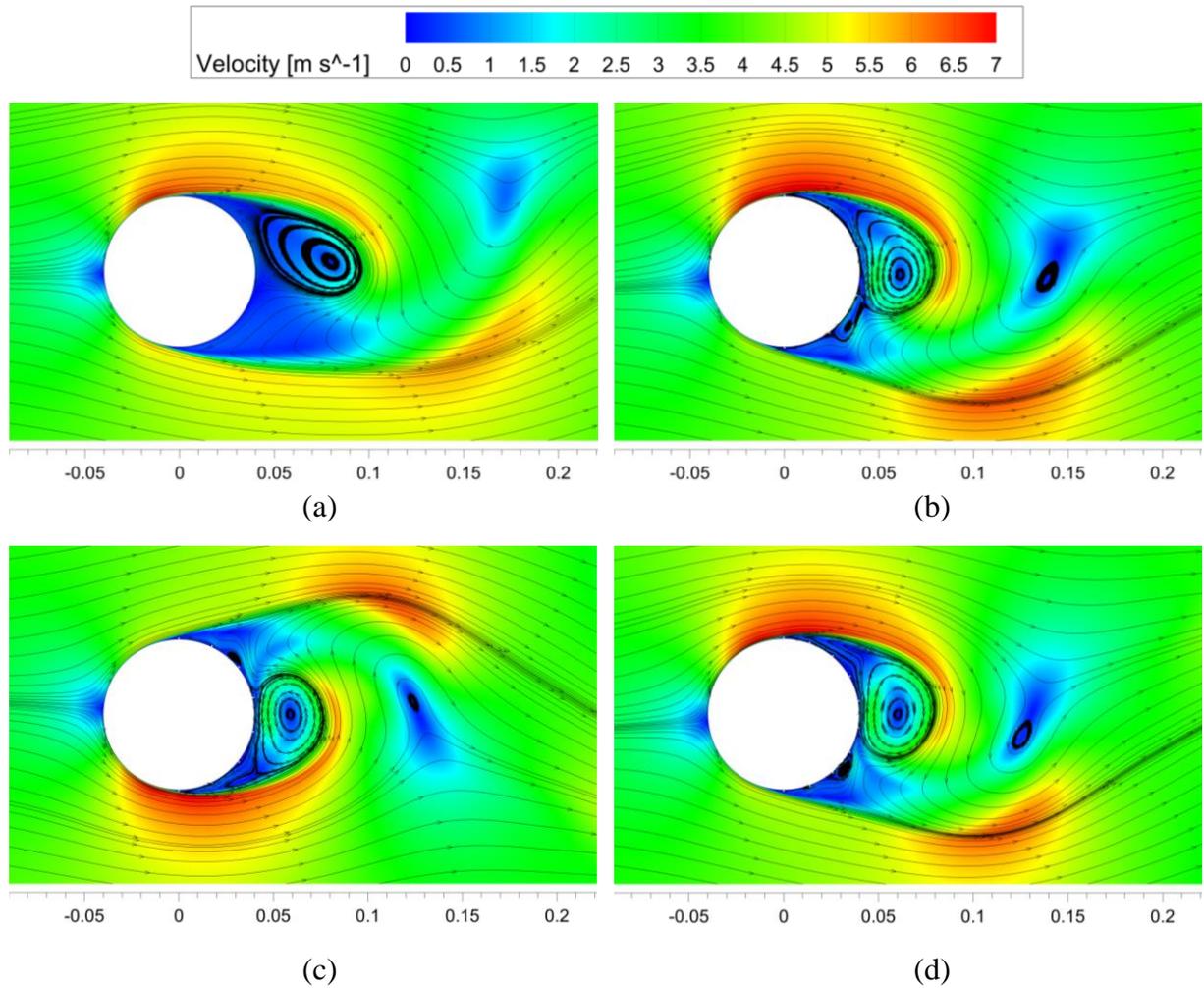
(b)



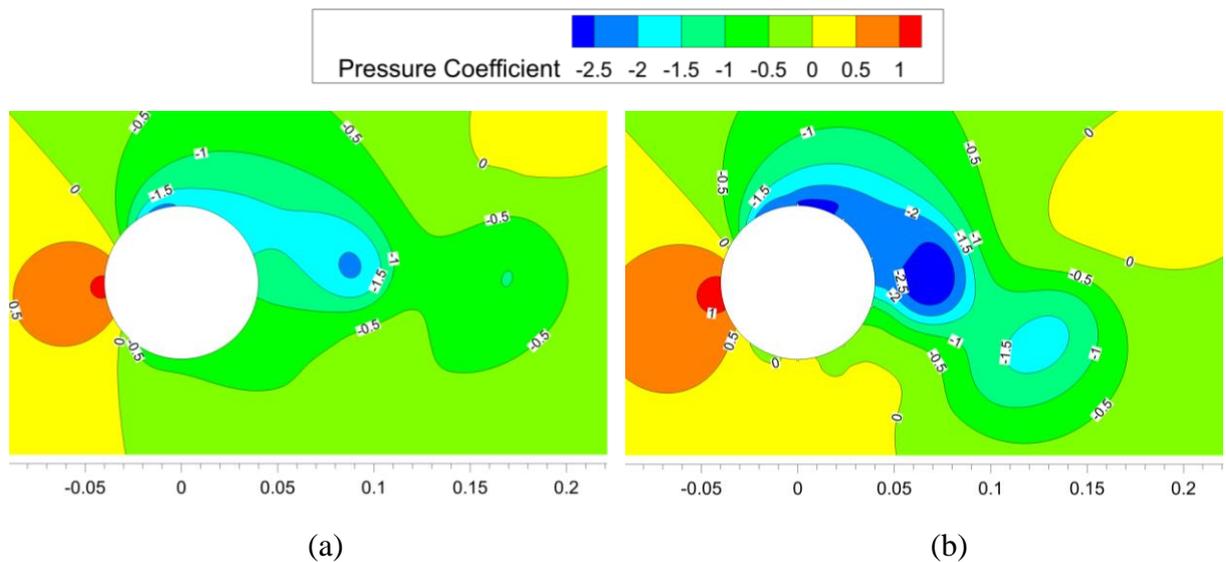
(c)

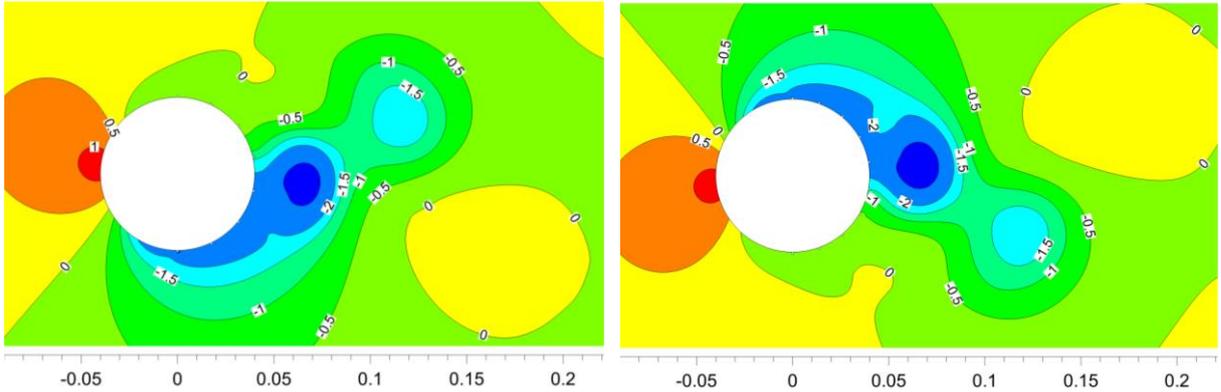
**Gambar B.2** Grafik Koefisien *Pressure* untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 4 \times 10^4$ : (a)  $n = 6$ , (b)  $n = 8$ , (c)  $n = 10$ .

**LAMPIRAN C: Kontur Kecepatan, Kontur Tekanan dan *Streamlines* Aliran Melalui *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $Re = 4 \times 10^4$**



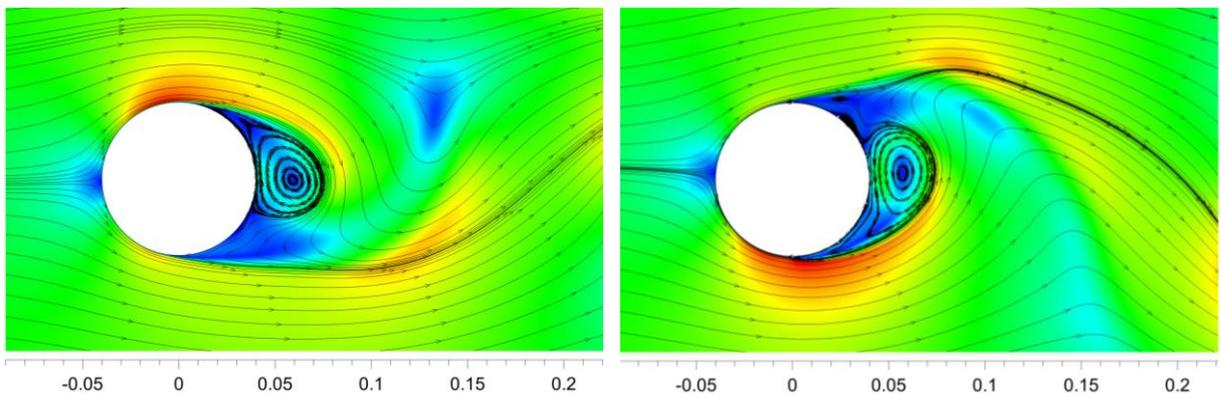
**Gambar C.1** Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi *Peak*  $C_L$  dan  $t = \pm 7$  s dengan  $Re = 2 \times 10^4$ :  
 (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .



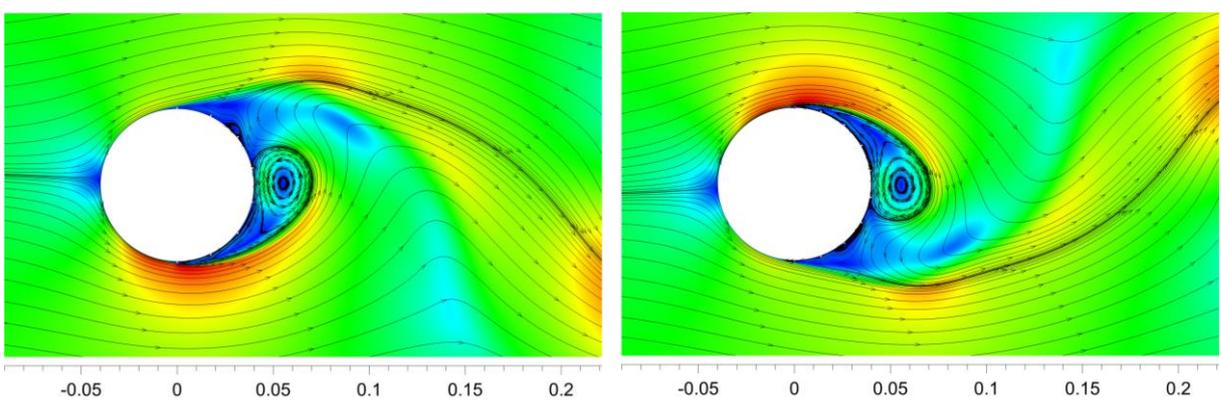


(c) (d)

**Gambar C.2** Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi  $Peak C_L$  dan  $t = \pm 7$  s dengan  $Re = 2 \times 10^4$ :  
 (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

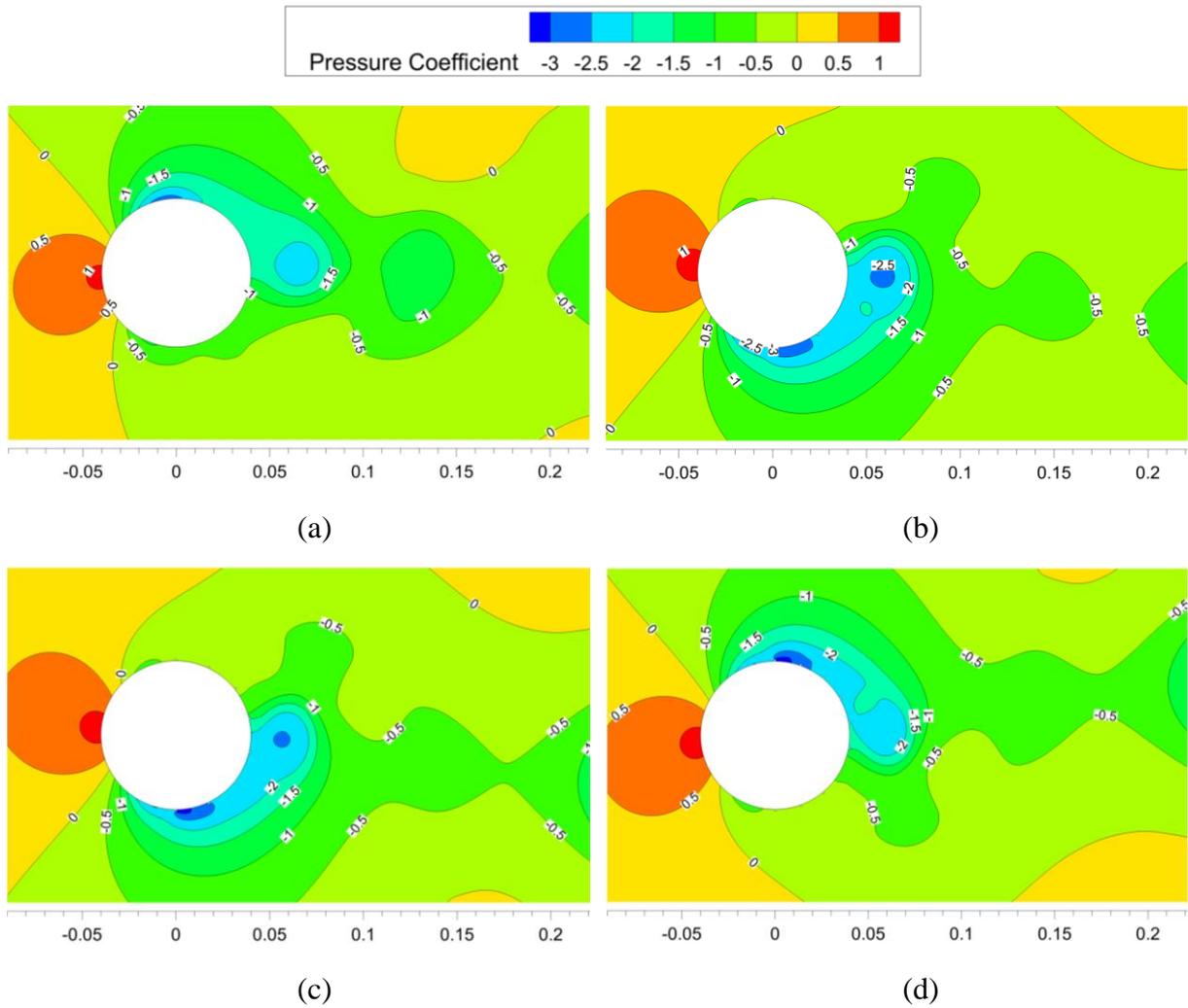


(a) (b)



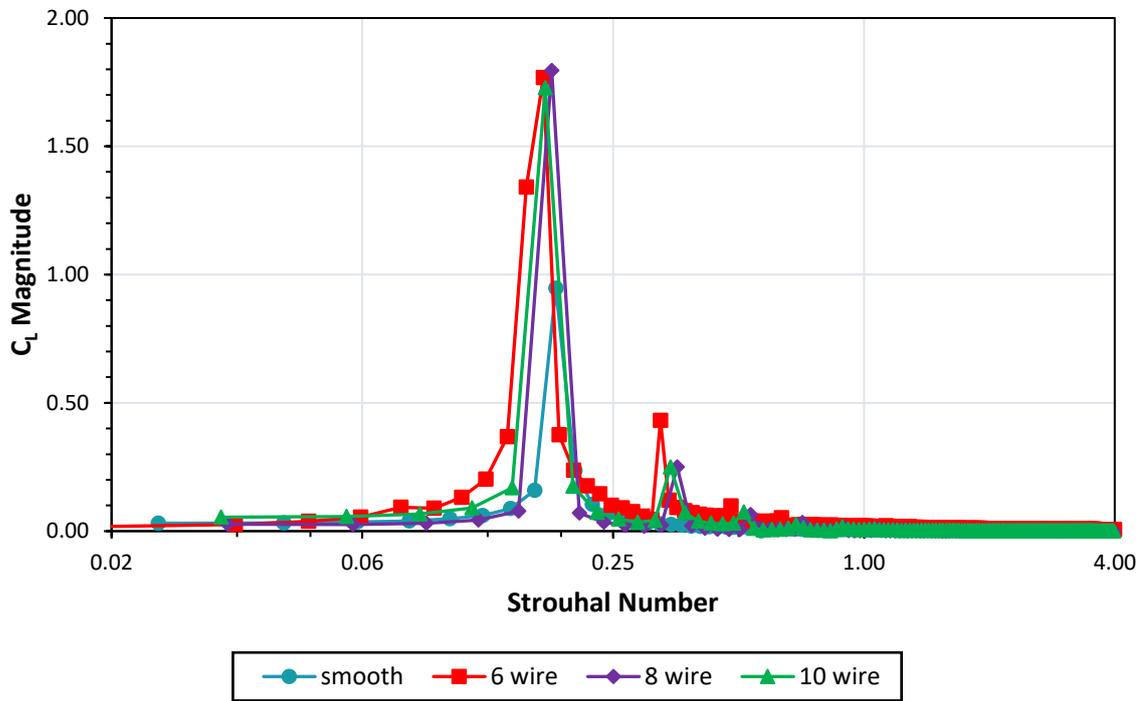
(c) (d)

**Gambar C.3** Kontur Kecepatan Sesaat pada Posisi  $Peak C_L$  dan  $t = \pm 2$  s dengan  $Re = 4 \times 10^4$ :  
 (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

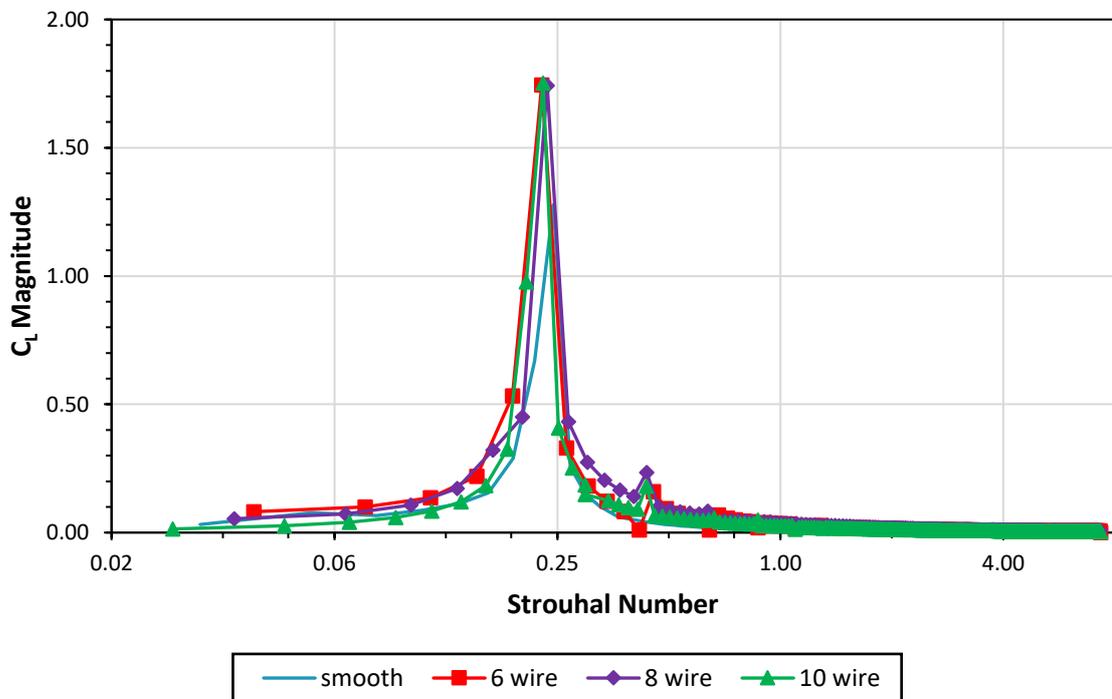


**Gambar C.4** Kontur Tekanan Sesaat pada Posisi  $Peak_{CL}$  dan  $t = \pm 2$  s dengan  $Re = 4 \times 10^4$ :  
 (a) *Smooth Cylinder*, (b)  $n = 6$ , (c)  $n = 8$ , dan (d)  $n = 10$ .

**LAMPIRAN D: Grafik  $C_L$  Magnitude terhadap  $Strouhal$  Number untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 2 \times 10^4$  dan  $Re = 4 \times 10^4$**



**Gambar D.1** Grafik  $C_L$  Magnitude terhadap  $Strouhal$  Number untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 2 \times 10^4$ .



**Gambar D.2** Grafik  $C_L$  Magnitude terhadap  $Strouhal$  Number untuk *Smooth Cylinder* dan *Wired Cylinder* pada  $Re = 4 \times 10^4$ .

## BIOGRAFI PENULIS



Mhd. Muflih Habib Ritonga, pria kelahiran Padangsidempuan, 1 Februari 2001 merupakan putra bungsu Saparuddin Ritonga dan Shofni Wathy Nasution, dengan tiga orang saudara dan dua orang saudari. Penulis menyelesaikan pendidikan formal dasar di SDN 200102/2 Padangsidempuan pada tahun 2012, dan melanjutkan pendidikan SMP dan SMA di YPI Nurul ‘Ilmi Padangsidempuan pada tahun 2015 dan 2018. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang pendidikan S-1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya pada tahun 2018 hingga 2022 dengan Bidang Studi Teknik Mesin di Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, dengan peminatan Konversi Energi.

Sebagai mahasiswa pendidikan tinggi, penulis turut aktif dalam berbagai kegiatan akademik dan non-akademik. Pengalaman organisasi di Kampus sebagai Wakil Ketua Kaderisasi LKKI Ash-Shaff pada tahun 2020-2021, dan sebagai OC maupun Mentor untuk beberapa *event* Kampus. Beberapa pelatihan juga telah ditempuh penulis seperti LKMW TD, LKMM TD, dan PKTI, begitu juga dengan berbagai forum komunikasi ilmiah seperti seminar. Ketertarikan terhadap ilmu mekanika fluida mendorong penulis untuk menjadi anggota Lab Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida, serta menjadi Asisten Praktikum Mekanika Fluida Dasar II dan Grader Mekanika Fluida Dasar I dan II. Pada tahun 2021, penulis mengikuti serangkaian kegiatan karya tulis seperti PKM Skema PKM-PI oleh Kemendikbudristek, Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi untuk alat PREHEDRIX (*Propolis Extractor and Honey Dehydrator*). Pada tahun yang sama, penulis melaksanakan Kerja Praktek di PT. Petrokimia Gresik, Departemen Rancang Bangun untuk rekayasa material dan ketebalan pipa untuk mengalirkan *Sulphuric Acid* dengan konsentrasi 90-98% selama 1 bulan dan Magang di PT. Wilmar Nabati Indonesia Gresik, Departemen Mechanical Oleo dalam program Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) – Kampus Merdeka oleh Kemendikbudristek RI selama 6 bulan mulai dari akhir tahun 2021 hingga awal tahun 2022. Pada akhirnya, penulis menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Jumlah *Wire* terhadap Performa *Circular Cylinder* dengan  $D = 80$  mm dan Variasi *Reynolds Number* untuk *Energy Harvesting* pada *Ducting System*”. Informasi, pertanyaan maupun saran mengenai Tugas Akhir ini dapat disampaikan kepada penulis melalui *e-mail*: [muflih0102@gmail.com](mailto:muflih0102@gmail.com).