

TUGAS AKHIR - TM184835

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

SANDRINA NURDIANA
NRP 02111840000047

Dosen Pembimbing
Vivien Suphandani Djanali, S.T., ME., Ph. D.
NIP 198105292003122001

PROGRAM STUDI SARJANA
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR - TM184835

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

SANDRINA NURDIANA
NRP. 0211184000047

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

PROGRAM STUDI SARJANA
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



FINAL PROJECT - TM 184835

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

SANDRINA NURDIANA
NRP. 02111840000047

Advisor
Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D.
NIP 198105292003122001

UNDERGRADUATE STUDY PROGRAM
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2022

LEMBAR PENGESAHAN

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

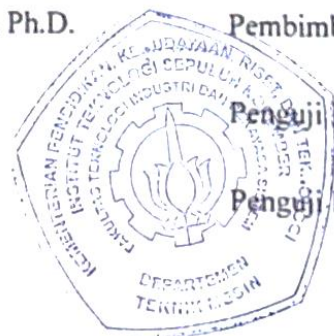
TUGAS AKHIR

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 : SANDRINA NURDIANA
NRP. 0211184000047

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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



Pembimbing

Penguji I

Penguji II

SURABAYA
2022

APPROVAL SHEET

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

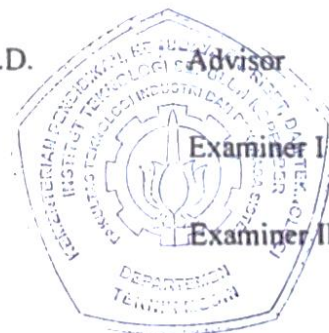
FINAL PROJECT

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

By : SANDRINA NURDIANA
NRP. 0211184000047

Approved by the Final Project Examiner Team :

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



Adviser

Examiner I

Examiner II

SURABAYA
2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa/NRP : Sandrina Nurdiana/0211184000047

Departemen : Teknik Mesin

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

198105292003122001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Penggunaan dan Lokasi Penempatan *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, 25 Juli 2022

Mengetahui,

Dosen Pembimbing

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

NIP. 198105292003122001

Mahasiswa,

Sandrina Nurdiana

NRP. 0211184000047

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of Student /NRP : Sandrina Nurdiana/0211184000047

Department : Mechanical Engineer

Supervisor/NIP : Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. /

198105292003122001

hereby declare that the Final Project with the title of “Numerical Study of The Effect Of Wire Use and Location on Performance of Circular Cylinder 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 25 2022

Acknowledged,

Advisor



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

NIP. 198105292003122001

Student,

Sandrina Nurdiana

NRP. 0211184000047

ABSTRAK

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

Nama Mahasiswa / NRP : Sandrina Nurdiana / 0211184000047
Departemen : Teknik Mesin FT-IRS ITS
Dosen Pembimbing : Vivien Suphandani Djanali, ST., ME., Ph.D.

Abstrak

Permintaan listrik global meningkat pesat pada tahun 2021 dan diperkirakan akan semakin meningkat pada tahun 2022. Listrik berbasis bahan bakar fosil, seperti batu bara telah ditetapkan untuk memenuhi 45% dari permintaan tambahan pada tahun 2021 dan 40% pada tahun 2022. Untuk mengatasi hal tersebut, telah ditetapkan pula suatu kebijakan dimana dibutuhkan peranan yang jauh lebih besar oleh sumber energi terbarukan agar penggunaan pembangkit listrik tenaga batu bara dapat turun lebih dari 6% per tahun. Untuk mendukung ketetapan tersebut, diperlukan upaya penciptaan serta pemanfaatan sumber energi terbarukan agar dapat menjadi energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan konsumsi listrik dunia. Dewasa ini telah dikembangkan upaya baru penciptaan energi alternatif yaitu dengan memanfaatkan getaran akibat aliran fluida yang melewati suatu silinder. Getaran yang terjadi pada silinder atau kemudian disebut sebagai fenomena *Flow Induced Vibration* (FIV) akan menghasilkan energi kinetik yang kemudian diubah menjadi energi listrik menggunakan *transducer piezoelectric*. Untuk meningkatkan kemampuan silinder dalam menghasilkan listrik, diperlukan peningkatan koefisien *lift* yang lebih signifikan dibandingkan dengan koefisien *drag* dengan memodifikasi geometri silinder. Pada penelitian ini, dilakukan penambahan *wire* pada permukaan bagian belakang silinder sirkular.

Penelitian ini dilakukan dengan metode simulasi numerik dua dimensi (2D) dan menggunakan *software* ANSYS FLUENT 2021 R2 X64 dengan metode $K-\omega$ SST yang melalui tiga tahapan, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Terdapat tiga variasi posisi *wire surface* yaitu pada posisi 90° , 100° , dan 110° yang dihitung dari arah datangnya aliran dan diuji dengan variasi bilangan Reynolds 6000, 20000, dan 40000 dimana hasil dikomparasi dengan *smooth* silinder. Geometri silinder yang digunakan memiliki diameter sebesar 80 mm. Kondisi batas simulasi yang digunakan adalah *velocity inlet*, *pressure outlet*, dan *wall* pada silinder uji dan *symmetry* pada permukaan atas dan bawah domain uji. Jenis *meshing* yang digunakan adalah *structured mesh*.

Hasil dari penelitian ini adalah dengan menambahkan *wire* di bagian belakang silinder sirkular dapat meningkatkan koefisien *drag* maupun *lift*. Variasi geometri paling optimum adalah *wire* 100° pada bilangan Reynolds 20000, karena efektif dalam meningkatkan rasio koefisien *lift* RMS dan koefisien *drag* (C_L'/C_D) sebesar 34,85% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Peningkatan tersebut mengartikan bahwa amplitudo gelombang yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan *smooth cylinder* dimana dapat membantu silinder sirkular menghasilkan energi lebih besar.

Kata kunci: *drag, flow induced vibration, lift, pressure, silinder, wire*

ABSTRACT

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

Student Name : Sandrina Nurdiana
NRP : 0211184000047
Department : Mechanical Engineering FT-IRS ITS
Advisory Lecturer : Vivien Suphandani Djanali, ST., ME., Ph.D.

Abstract

Global electricity demand will increase rapidly in 2021 and is expected to increase further in 2022. Fossil fuel-based electricity, such as coal has been set to meet 45% of additional demand by 2021 and 40% by 2022. To address this, A policy has also been set which requires a much greater role for renewable energy sources so that the use of coal-fired power plants can decrease by more than 6% per year. To support this provision, it is necessary to create and utilize renewable energy sources so that they can become alternative energy to meet the world's electricity consumption needs. Recently, a new effort has been developed to create alternative energy, namely by utilizing vibrations due to fluid flow passing through a cylinder. Vibration that occurs in the cylinder or later referred to as the Flow Induced Vibration (FIV) phenomenon will produce kinetic energy which is then converted into electrical energy using a piezoelectric transducer. To increase the cylinder's ability to generate electricity, it is necessary to increase the lift coefficient which is more significant than the drag coefficient by modifying the cylinder geometry. In this study, additional wire was added to the rear surface of a circular cylinder.

This research was conducted using a two-dimensional (2D) numerical simulation method and using the ANSYS FLUENT 2021 R2 X64 software with the $K-\omega$ SST method which went through three stages, namely pre-processing, processing, and post-processing. There are three variations of the wire surface position, namely at 90° , 100° , and 110° which are calculated from the direction of the flow and tested with variations in the Reynolds number 6000, 20000, and 40000 where the results are compared with smooth cylinders. The cylinder geometry used has a diameter of 80 mm. The simulation boundary conditions used are velocity inlet, pressure outlet, and wall on the test cylinder and symmetry on the top and bottom surfaces of the test domain. The type of meshing used is structured mesh.

The result of this research is that adding a wire at the back of the circular cylinder can increase the drag and lift coefficients. The most optimum geometric variation is wire 100° at Reynolds number 20000, because it is effective in increasing the ratio of lift coefficient RMS and coefficient of drag (CL'/CD) by 34.85% when compared to smooth cylinder. This increase means that the resulting wave amplitude is higher than the smooth cylinder which can help the circular cylinder produce more energy.

Keywords: cylinder, drag, flow induced vibration, lift, pressure, wire

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “**Studi Numerik Pengaruh Penggunaan dan Lokasi Penempatan Wire terhadap Performa Circular Cylinder Dengan $D = 80$ mm dan Variasi Reynolds Number untuk Energy Harvesting pada Ducting System**”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Mesin, FT-IRS ITS. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang telah membimbing, membantu, dan mendukung penulis dalam proses penyelesaian tugas akhir ini sebagai berikut.

1. Kedua orang tua penulis, Ibu Wahyu Sulistyowulan dan Bapak Mukhlis Prasetya, serta kedua adik kembar penulis, Rafi Aulia Prasetya dan Rafli Ainun Prasetya yang senantiasa mendoakan, memberi semangat, dan mendukung perjalanan penulis dari kecil hingga saat ini.
2. Ibu Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.E., Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang selalu sabar dalam memberikan ilmu, arahan, masukan, motivasi, dan bimbingan bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
3. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA. dan Prof. Dr. Ing. Herman Sasongko selaku dosen penguji Tugas Akhir yang telah berkenan memberikan masukan, saran, dan kritik yang sangat membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., selaku dosen wali penulis yang selalu memberikan motivasi dan bimbingan akademik selama penulis menempuh pendidikan tinggi di Departemen Teknik Mesin, FT-IRS ITS.
5. Civitas Akademika Teknik Mesin FT-IRS ITS atas dukungan, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan selama masa perkuliahan di Departemen Teknik Mesin, FT-IRS ITS.
6. Teman-teman simulasi silinder, Muflih dan Athallah serta seluruh anggota Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida yang selalu menemani, mendukung, membantu, dan memberikan semangat untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Sahabat penulis, Denyta dan Niva yang senantiasa menemani, mendukung, membantu, memberikan semangat, dan menghibur penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Laboratorium Sistem Manufaktur (Simanu) dan penghuninya, Mas Yoga, Mas Wildan, dan Mas Fadhil yang telah memberikan fasilitas, menemani, memberikan semangat, dan menghibur penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Keluarga M61, Himpunan Mahasiswa Mesin khususnya Departemen PSDM kepengurusan 2019/2020 hingga 2021/2022, dan SC PISTON 2022 yang telah memberikan pengalaman dan kenangan berharga selama penulis menempuh pendidikan di Departemen Teknik Mesin, FT-IRS ITS.
10. Semua pihak yang belum disebutkan di atas dikarenakan keterbatasan penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna serta masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan segala jenis masukan dan saran dari semua pihak. Penulis juga berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca maupun khalayak umum.

Surabaya, Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Aliran Internal.....	4
2.2 <i>Vortex Shedding</i>	4
2.2.1 Frekuensi <i>Vortex Shedding</i>	5
2.2.2 Gaya Akibat <i>Vortex Shedding</i>	6
2.3 Aliran Melalui Silinder	7
2.4 <i>Reynolds Number</i>	8
2.5 <i>Strouhal Number</i>	8
2.6 Perhitungan Daya.....	9
2.7 Penelitian Terdahulu	10
2.7.1 <i>Force and Flow Characteristics of a Circular Cylinder with Uniform Surface Roughness at Subcritical Reynolds Number</i>	10
2.7.2 <i>Experimental Measurements of The Drag Force and The Near-Wake Flow Patterns of a Longitudinally Grooved Cylinder</i>	14
2.7.3 <i>Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface</i> 17	
2.7.4 <i>Amplification/Suppression of Flow-Induced Motions of an Elastically Mounted Circular Cylinder by Attaching Tripping Wires</i>	21
2.7.5 <i>Passive Flow Control for Drag Reduction on a Cylinder in Cross-Flow Using Leeward Partial Porous Coatings</i>	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Tahapan Penelitian.....	25
3.2 <i>Pre-Processing</i>	25
3.2.1 Pembuatan Variasi Penelitian dan Domain Simulasi	25

3.2.2	<i>Meshing</i> dan Penentuan Kondisi Batas Simulasi	28
3.3	<i>Solver / Processing</i>	31
3.3.1	Penentuan Kondisi Fisis dan Properti Fluida	31
3.3.2	<i>Timestep Size</i>	32
3.4	<i>Post Processing</i>	32
3.4.1	<i>Grid Independency Test</i>	33
3.5	Diagram Alir Penelitian	34
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		37
4.1	Validasi	37
4.2	Analisis Perbandingan Koefisien <i>Drag</i> (C_D) pada <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wire Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i>	38
4.3	Analisis Perbandingan Koefisien <i>Lift RMS</i> (C_L') pada <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wire Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i>	40
4.4	Analisis Perbandingan Koefisien <i>Lift RMS</i> (C_L') dan Koefisien <i>Drag</i> (C_D) antara <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wire Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i>	42
4.5	Analisis Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Pressure</i> (C_P) pada <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wire Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i>	44
4.5.1	Perbandingan Koefisien <i>Pressure</i> (C_P) antara <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wire Cylinder</i> pada $Re = 6000$	44
4.5.2	Perbandingan Koefisien <i>Pressure</i> (C_P) antara <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wire Cylinder</i> pada $Re = 20000$	46
4.5.3	Perbandingan Koefisien <i>Pressure</i> (C_P) antara <i>Smooth Cylinder</i> dan <i>Wire Cylinder</i> pada $Re = 40000$	50
4.6	Perbandingan Distribusi <i>Strouhal Number</i> (S_t) pada <i>Smooth Cylinder</i> dengan <i>Wire Cylinder</i> terhadap <i>Reynolds Number</i>	52
4.6.1	Perbandingan Distribusi <i>Strouhal Number</i> (S_t) pada $Re = 6000$	52
4.6.2	Perbandingan Distribusi <i>Strouhal Number</i> (S_t) pada $Re = 20000$	53
4.6.3	Perbandingan Distribusi <i>Strouhal Number</i> (S_t) pada $Re = 40000$	55
4.7	Analisis Kontur Kecepatan Aliran Melintasi Sirkular Silinder	56
4.8	Analisis Kontur Koefisien <i>Pressure</i> Aliran Melintasi Silinder Sirkular	59
4.9	Diskusi	61
BAB V KESIMPULAN		64
5.1	Kesimpulan	64
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA.....		66
LAMPIRAN		67
BIODATA PENULIS.....		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Aliran pada wilayah pintu masuk pipa (Pritchard, 2011).	4
Gambar 2. 2 Lapisan geser. Lapisan geser di kedua sisi menggulung membentuk <i>lee-wake vortices</i> , vortisitas A dan B (Sumer & Fredsoe, 2006).....	5
Gambar 2. 3 Skema terjadinya fenomena <i>vortex shedding</i> (Sumer & Fredsoe, 2006).....	5
Gambar 2. 4 Karakteristik aliran pada silinder sirkular pada bilangan Reynolds berbeda (Anderson, 2011).....	8
Gambar 2. 5 Grafik hubungan <i>Strouhal number</i> dengan <i>Reynolds number</i> untuk <i>vortex shedding</i> (Katopodes, 2019).....	9
Gambar 2. 6 Variasi kekasaran permukaan silinder; (a) <i>Netting</i> atau jaring; (b) <i>Dimples</i> ; (c) Amplas (Bo Zhou, 2014).	11
Gambar 2. 7 Sketsa yang menunjukkan bentuk detail dari <i>dimples</i> (Bo Zhou, 2014).....	11
Gambar 2. 10 <i>Time history of the instantaneous lift and drag coefficients at $Re = 12,080$</i> (Bo Zhou, 2014).....	12
Gambar 2. 9 Skema gaya (Bo Zhou, 2014).....	12
Gambar 2. 8 <i>Towing tank</i> (Bo Zhou, 2014).	12
Gambar 2. 11 <i>Mean drag coefficient vs. Reynolds number (Re) for smooth, rough, and dimple cylinders</i> (Bo Zhou, 2014).	13
Gambar 2. 12 <i>Typical snapshots of the instantaneous flow fields for smooth and dimple cylinders at $Re = 9850$ (superimposed with contours of spanwise vorticity; cold colour: negative; warm: positive)</i> (Bo Zhou, 2014).....	13
Gambar 2. 13 <i>Towing tank</i> (Bo Zhou, 2016).	14
Gambar 2. 15 Silinder (a) <i>Smooth</i> , (b) <i>Full-sparse dimpled</i> , (c) <i>Full-dense dimpled</i> , (d) <i>Half-sparse dimpled</i> , (e) <i>Half-dense dimpled surfaces</i> (Bo Zhou, 2016).	15
Gambar 2. 14 Model silinder dan penjelasan kode kasus (Bo Zhou, 2016).	15
Gambar 2. 17 Grafik variasi <i>mean drag coefficient</i> untuk <i>smooth</i> silinder dan <i>dimple</i> pada rentang <i>Reynolds number</i> tertentu (Bo Zhou, 2016).....	16
Gambar 2. 16 <i>Drag dan lift coefficient</i> untuk (a) <i>Smooth cylinder</i> , (b) <i>Full-sparse dimpled cylinder</i> , (c) <i>Full-dense dimpled cylinder</i> pada $Re = 8 \times 10^4$ (Bo Zhou, 2016).	16
Gambar 2. 18 Grafik variasi <i>RMS lift coefficient (CL')</i> untuk <i>smooth</i> silinder dan <i>dimple</i> pada rentang <i>Reynolds number</i> tertentu (Bo Zhou, 2016).....	17
Gambar 2. 19 <i>The schematic diagrams of the computational domain and the cylinder: (a) Computational domain; (b) The distribution of four columns of dimples on the surface of the cylinder</i> (Fei Yan, 2021).	18
Gambar 2. 22 <i>Schematic diagrams of the mesh: (a) Computational grid; (b) Close-up of the grid around the cylinder</i> (Fei Yan, 2021).....	19
Gambar 2. 21 <i>Grid independence verification for the dimple cylinder at $Re = 1 \times 10^5$</i> (Fei Yan, 2021).....	19
Gambar 2. 20 <i>Grid independence verification for the smooth cylinder at $Re = 1 \times 10^5$</i> (Fei Yan, 2021).....	19
Gambar 2. 23 <i>Experimental setup in the water tank</i> (Fei Yan, 2021).....	20
Gambar 2. 24 <i>Covered experimental conditions</i> (Fei Yan, 2021).....	20
Gambar 2. 25 Skema penelitian (Nishi, 2014).	21
Gambar 2. 26 Konfigurasi silinder sirkular dengan <i>tripping wires</i> (Nishi, 2014).....	22

Gambar 2. 27 Data terukur dari tes pada <i>stationary cylinder</i> ; (a) <i>lift coefficient</i> ; (b) <i>drag coefficient</i> ; (c) <i>Strouhal number</i> (Nishi, 2014).	22
Gambar 2. 28 Gambar skematik dimensi dan sudut <i>porous coatings</i> pada sirkular silinder (Guinnes dan Persoons, 2021).	23
Gambar 2. 29 Perbandingan hasil nilai C_D dan C_L' setiap variasi sudut <i>coatings</i> (Guinnes dan Persoons, 2021).	24
Gambar 3. 1 Dimensi <i>smooth</i> silinder sirkular dalam mm.	25
Gambar 3. 3 Dimensi <i>wire</i> sirkular silinder 100°	26
Gambar 3. 4 Dimensi <i>wire</i> silinder sirkular 110°	26
Gambar 3. 2 Dimensi <i>wire</i> sirkular silinder 90°	26
Gambar 3. 5 Domain simulasi.	27
Gambar 3. 6 Meshing simulasi menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64; (a) keseluruhan domain simulasi; (b) perbesaran; (c) dekat silinder.....	29
Gambar 3. 7 Grafik perbandingan <i>pressure coefficient</i> terhadap teta.....	33
Gambar 3. 8 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan koefisien drag (C_D) terhadap Reynolds number.	38
Gambar 4. 2 Grafik perbandingan C_D pada <i>smooth cylinder</i> dengan	39
Gambar 4. 3 Grafik perbandingan C_L' pada <i>smooth cylinder</i> dengan.....	41
Gambar 4. 4 Grafik perbandingan koefisien lift RMS (C_L') dan koefisien drag (C_D) antara <i>smooth cylinder</i> dengan <i>wire cylinder</i> terhadap Reynolds number.	42
Gambar 4. 5 Grafik distribusi koefisien pressure (C_P) <i>smooth cylinder</i> pada $Re = 6000$	44
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan distribusi koefisien <i>pressure</i> (C_P)	45
Gambar 4. 7 Grafik distribusi koefisien pressure (C_P) <i>smooth cylinder</i> pada $Re = 20000$	47
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan distribusi koefisien pressure (C_P).....	48
Gambar 4. 9 Grafik distribusi koefisien pressure (C_P) <i>smooth cylinder</i> pada $Re = 40000$	50
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan distribusi koefisien pressure (C_P).....	51
Gambar 4. 11 Grafik distribusi Strouhal number (St) pada $Re = 6000$	53
Gambar 4. 12 Grafik distribusi Strouhal number (St) pada $Re = 20000$	54
Gambar 4. 13 Grafik distribusi Strouhal number (St) pada $Re = 40000$	55
Gambar 4. 14 Kontur kecepatan aliran untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 20000$; (a) <i>smooth cylinder</i> ; (b) <i>wire</i> 90° ; (c) <i>wire</i> 100° ; dan (d) <i>wire</i> 110°	57
Gambar 4. 15 Kontur koefisien pressure untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 20000$; (a) <i>smooth cylinder</i> ; (b) <i>wire</i> 90° ; (c) <i>wire</i> 100° ; (d) <i>wire</i> 110°	60

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian.....	26
Tabel 3. 2 Input Parameter.....	31
Tabel 3. 3 Properties Fluida.....	32
Tabel 3. 4 Grid Independency Test pada Smooth Cylinder.....	33
Tabel 4. 1 Perbandingan Koefisien Drag (C_D) pada Smooth Cylinder dengan Wire Cylinder terhadap Reynolds Number	39
Tabel 4. 2 Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') pada Smooth Cylinder dengan Wire Cylinder terhadap Reynolds Number	40
Tabel 4. 3 Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') dan Koefisien Drag (C_D) antara Smooth Cylinder dengan Wire Cylinder terhadap Reynolds Number.....	42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan listrik global meningkat pesat pada tahun 2021 dan diperkirakan akan semakin meningkat pada tahun 2022. Dalam *Electricity Market Report* yang dipublikasikan oleh **International Energy Agency (IEA) tahun 2021**, menyatakan bahwa permintaan listrik global yang sempat turun 1% pada tahun 2020 akan meningkat mendekati 5% pada akhir tahun 2021 dan sebesar 4% pada tahun 2022. Sebagian besar peningkatan ini akan terjadi pada kawasan Asia Pasifik, salah satunya adalah Indonesia. Listrik berbasis bahan bakar fosil, seperti batu bara telah ditetapkan untuk memenuhi 45% dari permintaan tambahan pada tahun 2021 dan 40% pada tahun 2022. Untuk mengatasi hal tersebut, telah ditetapkan pula suatu kebijakan yang tercantum dalam *Net-Zero Emissions by 2050 Scenario* yang dipublikasikan oleh IEA, dimana dibutuhkan peranan yang jauh lebih besar oleh sumber energi terbarukan agar penggunaan pembangkit listrik tenaga batu bara dapat turun lebih dari 6% per tahun.

Untuk mendukung ketetapan tersebut, diperlukan upaya penciptaan serta pemanfaatan sumber energi terbarukan agar dapat menjadi energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan konsumsi listrik dunia. Sumber energi terbarukan yang telah menyumbang sedikit dari kebutuhan energi listrik dunia antara lain air, angin, tenaga surya, dan panas bumi. Namun, dewasa ini telah dikembangkan upaya baru penciptaan energi alternatif yaitu dengan memanfaatkan getaran akibat aliran fluida yang melewati suatu silinder. Getaran yang terjadi pada silinder akan menghasilkan energi kinetik yang kemudian diubah menjadi energi listrik menggunakan *transducer piezoelectric*. Getaran dihasilkan dari adanya interaksi antara fluida dengan permukaan silinder yang dilewati, fenomena ini disebut sebagai *Flow Induced Vibration (FIV)*. Interaksi tersebut menghasilkan gaya-gaya aerodinamis yang diproyeksikan terhadap sumbu tertentu ditinjau dari arah datangnya aliran. Gaya yang sejajar dengan arah aliran disebut sebagai gaya *drag* atau gaya hambat dan gaya yang terbentuk tegak lurus terhadap arah aliran disebut gaya *lift* atau gaya angkat.

Salah satu faktor yang penting untuk diperhatikan dalam proses perancangan FIV adalah bentuk silinder yang digunakan. Bentuk silinder dapat memengaruhi karakteristik aliran yang melewatinya serta getaran yang dihasilkan. Beberapa peneliti terdahulu telah melakukan penelitian dengan memodifikasi bentuk silinder. **Bo Zhou (2014)** melakukan eksperimen untuk mengetahui korelasi antara gaya dan karakteristik aliran dengan kekasaran permukaan pada silinder. Bo Zhou (2014) menggunakan *netting* atau jaring dan *dimple* sebagai variasi kekasaran permukaan pada silinder. Gaya serta karakteristik aliran yang dihasilkan dari eksperimen FIV olehnya juga dibandingkan dengan kondisi permukaan *smooth* silinder. Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa konfigurasi tertentu dari kekasaran permukaan secara signifikan mengurangi *mean drag coefficient* ($\overline{C_D}$) dan *r.m.s lift coefficient* ($\overline{C_L}$) dibandingkan pada *smooth* silinder. **Bo Zhou (2016)** kembali melakukan eksperimen untuk memahami hubungan antara *drag reduction* pada silinder sirkular dengan kekasaran permukaan dalam bentuk *dimple*. Hasil dari eksperimen menunjukkan bahwa *dimple surface* akan memengaruhi penurunan *drag* hanya jika *dimple* silinder ditempatkan pada kondisi bilangan Reynolds tertentu, yaitu $20000 \leq Re \leq 80000$. Serta lokasi penempatan *dimple* juga diketahui memengaruhi penurunan *drag*. Dalam eksperimen yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa silinder dengan penempatan *dimple* di permukaan bagian belakang silinder jauh lebih efektif dapat menurunkan *drag* jika dibandingkan ditempatkan pada bagian depan silinder. Selanjutnya, **Fei Yan (2021)** melakukan studi numerik terkait pengaruh pola *dimple surface* silinder terhadap karakteristik penurunan *drag* jika dibandingkan dengan *smooth surface* silinder. Hasil dari studi numerik yang dilakukan didapatkan bahwa *dimple surface* dapat menurunkan *drag* secara efektif bergantung pada rentang *Reynolds number* tertentu. **Nishi, et al (2014)** mencoba melakukan eksperimen untuk

mengetahui pengaruh penambahan *wire* pada sisi depan maupun belakang. 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* pada permukaan benda uji, melainkan diletakkan pada jarak tertentu dari permukaan *cylinder*. **Guinnes dan Persoons (2021)** melakukan penelitian numerik dengan tujuan mengetahui pengaruh *leeward porous coatings* terhadap gaya *drag* di silinder sirkular. Hasil dari penelitian numerik menunjukkan *coating* dengan sudut $\beta = 40^\circ$ dan 70° dapat menurunkan koefisien *drag*. Sedangkan *coating* dengan sudut $\beta = 160^\circ$ mampu meningkatkan nilai C_L' (*Root Mean Square Lift Coefficient*) dengan diikuti kenaikan nilai koefisien *drag*.

Berdasarkan uraian di atas, FIV membutuhkan desain silinder dengan kekasaran permukaan yang dapat diperoleh dari penambahan *wire* atau kawat pada permukaan selimut silinder, hal ini bertujuan untuk menciptakan penurunan koefisien *drag*. Namun, berdasarkan teori yang ada, jika *drag* menurun maka *lift* pun umumnya menurun dimana dapat memengaruhi amplitudo serta besar energi yang akan dihasilkan. Maka dibutuhkan pemahaman yang lebih mendetail terkait pengaruh *dimple* pada permukaan silinder terutama karakteristik aliran dalam model 2D serta komparasi koefisien *lift* dan *drag* pada *dimple* silinder dengan *smooth* silinder untuk menunjang pengaplikasian pada *ducting system* agar energi rumah tangga dapat dikembangkan.

1.2 Rumusan Masalah

Energi listrik yang dihasilkan FIV dipengaruhi oleh amplitudo dan frekuensi yang terjadi akibat getaran. Berdasarkan teori yang ada, jika amplitudo dan frekuensi getaran yang dihasilkan besar maka energi yang mampu dihasilkan semakin besar. Besarnya frekuensi yang dihasilkan bergantung pada kecepatan aliran fluida yang melewati benda, sehingga untuk meningkatkan frekuensi perlu meningkatkan kecepatan aliran fluida. Sedangkan amplitudo getaran dipengaruhi oleh dua gaya aerodinamis yaitu gaya *lift* dan gaya *drag*. Untuk menghasilkan amplitudo yang besar, maka dibutuhkan gaya *lift* yang besar pula. Namun, pergerakan pertumbuhan gaya *lift* akan berbanding lurus dengan gaya *drag*.

Berdasarkan pengertiannya gaya *drag* adalah suatu gaya hambatan yang terjadi karena adanya gesekan antara permukaan benda dengan fluida di sekitarnya terutama udara, sehingga untuk mencapai kondisi optimum dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk menghasilkan gaya angkat atau *lift* maksimal dengan gaya hambat atau *drag* minimal. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi penambahan *wire* pada permukaan silinder untuk membantu meningkatkan performa dari silinder. Penelitian ini memiliki hipotesa awal bahwa dikarenakan ketika silinder dilalui oleh fluida maka akan terbentuk separasi, separasi yang terbentuk ini akan menghasilkan gaya hambat atau *drag force* yang merupakan sebuah kerugian dalam suatu struktur. Penambahan *wire* dipercaya memiliki pengaruh terhadap penurunan koefisien gaya hidrodinamis yaitu *drag coefficient*, hal ini dikarenakan penambahan *wire* dapat meningkatkan terjadinya transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen, hal ini juga menyebabkan pembentukan separasi menjadi lebih lambat dibandingkan pada *smooth cylinder*. Penempatan posisi *wire* juga memiliki pengaruh terhadap hasil dari penelitian, dimana ketika *wire* diletakkan di bagian belakang silinder tidak akan menyebabkan penurunan *lift coefficient* dimana *lift coefficient* memiliki peranan penting terhadap besar kecilnya amplitudo yang berdampak pada jumlah energi yang terbentuk.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Aliran fluida adalah *incompressible flow*

2. Simulasi dilakukan secara *unsteady* 2D
3. Diameter silinder 80 mm
4. Analisis aliran *external flow*
5. Silinder dalam keadaan statis

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini adalah mencari desain silinder yang sesuai untuk digunakan dalam pemanfaatan fenomena *Flow Induced Vibration* (FIV). Pada penelitian ini, dilakukan dengan memvariasikan permukaan silinder dengan tujuan sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penggunaan *wire* dengan variasi *Reynolds Number* terhadap C_L , C_D , C_P , dan S_t silinder.
2. Mengetahui pengaruh variasi lokasi penempatan *wire* terhadap C_L , C_D , C_P , dan S_t silinder.
3. Mengetahui pengaruh penggunaan *wire* terhadap kontur kecepatan dan koefisien tekanan silinder.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

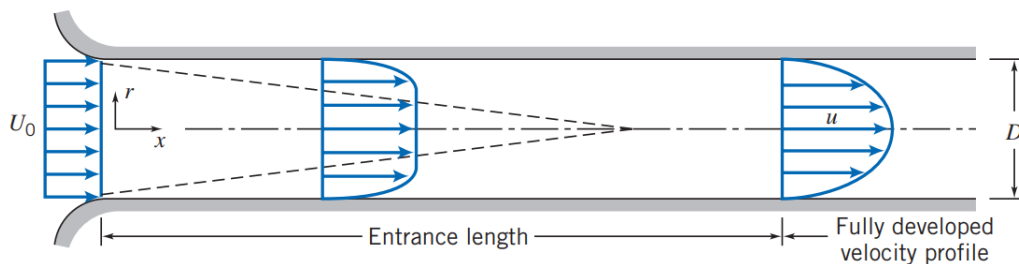
1. Sebagai referensi penelitian selanjutnya terkait pengaruh modifikasi permukaan silinder terhadap gaya aerodinamis yang bekerja.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan *wire* terhadap aliran yang melewati silinder.
3. Dapat digunakan untuk pengembangan energi terbarukan yang memanfaatkan fenomena *flow induced vibration*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aliran Internal

Aliran internal merupakan kondisi suatu aliran dimana fluida yang mengalir dibatasi oleh penampang padat tertutup. Aliran internal mencakup banyak aliran penting dan praktis seperti aliran yang melalui pipa, saluran, *nozzles*, *diffusers*, dan *valves*. Aliran dalam pipa dapat bergerak akibat adanya perbedaan tekanan gradien atau *pressure gradient*, dimana hal ini berbeda jika dibandingkan dengan aliran *external* ataupun aliran *open channel* yang memanfaatkan gravitasi sebagai mekanisme yang mendorong aliran tersebut bergerak. (Munson et. al, 2013)

Gambar 2.1 mengilustrasikan aliran laminar pada wilayah pintu masuk pada pipa melingkar. Pada wilayah pintu masuk ini, aliran memiliki kecepatan merata atau *uniform velocity*. Karena *no-slip condition* pada dinding pipa, menyebabkan besar kecepatan aliran pada dinding selalu nol sepanjang pipa. Lapisan batas atau yang biasa disebut sebagai *boundary layer* terbentuk dan terus berkembang di sepanjang dinding saluran. Permukaan padat memberikan gaya geser yang memperlambat aliran, dengan demikian kecepatan fluida di sekitar permukaan berkurang. Pada bagian yang berurutan di sepanjang pipa di daerah masuk ini, efek permukaan padat jauh lebih terasa ke dalam aliran. Hal ini terjadi akibat pengaruh tegangan geser dari dinding pipa. Aliran akan terus berkembang sampai stabil dengan profil parabolik. Wilayah saat profil kecepatan aliran stabil atau *fully developed flow* disebut sebagai *fully developed region*.



Gambar 2. 1 Aliran pada wilayah pintu masuk pipa (Pritchard, 2011).

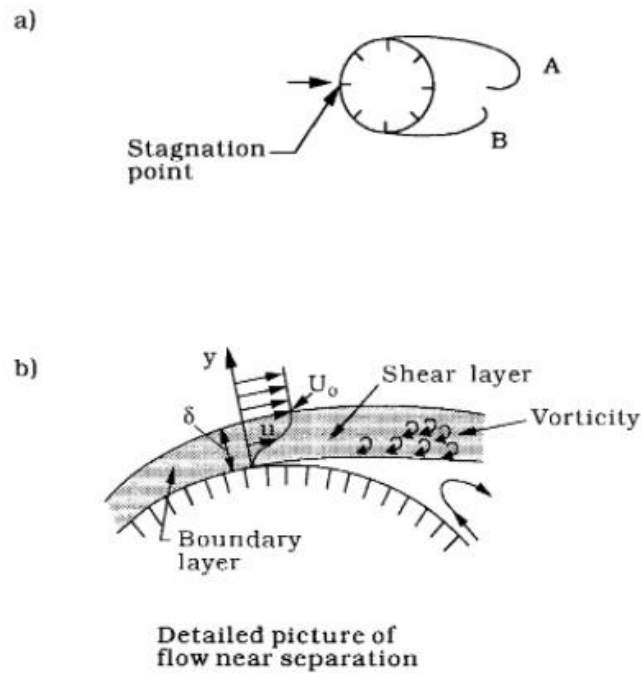
Untuk aliran *incompressible*, kekekalan massa mensyaratkan bahwa saat kecepatan di dekat dinding berkurang, maka kecepatan di daerah pusat tanpa gesekan harus sedikit meningkat untuk mengimbangnya. Untuk daerah pusat yang *inviscid* ini, maka tekanan juga harus turun. (Pritchard, 2011)

2.2 Vortex Shedding

Vortex Induced Vibration (VIV) banyak dapat ditemukan pada aplikasi di bidang teknik, seperti *aerospace*, sipil, mekanik, dan lain-lain. Fenomena interaksi struktur fluida ini terjadi karena resonansi *non-linear* struktur melalui *vortex shedding* atau pelepasan pusaran. Adanya vortisitas di sekitar struktur menyebabkan gaya periodik pada struktur yang dapat mengakibatkan osilasi horizontal dan vertikal. Contoh klasik dari VIV adalah silinder bawah air, yang merupakan sumber penting eksplorasi minyak lepas pantai. (Fernandes et.al, 2014)

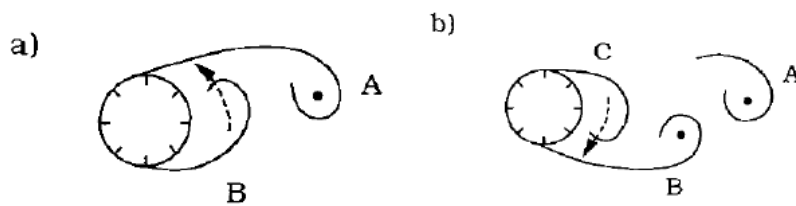
Fenomena *vortex shedding* terjadi pada aliran yang memiliki *Reynolds number* (Re) $>$ 40. Pada kondisi ini lapisan batas atau *boundary layer* aliran pada silinder terpisah oleh

perbedaan tekanan yang disebabkan oleh perbedaan geometri pola aliran pada kedua sisi silinder. Akibatnya lapisan geser terbentuk seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Lapisan geser. Lapisan geser di kedua sisi menggulung membentuk *lee-wake vortices*, vortisitas A dan B (Sumer & Fredsoe, 2006).

Akibat dari adanya lapisan geser tersebut, terbentuklah *vortex* yang berlawanan arah pada kedua sisi silinder dengan ukuran yang berbeda-beda, seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Mengikuti pelepasan *vortex A*, akan terbentuk *vortex* baru pada sisi silinder yang sama, yaitu *vortex C*. Pada kondisi ini, *vortex B* akan memerankan fungsi yang sama seperti *vortex A*, yaitu akan tumbuh dalam segi ukuran dan kekuatannya sehingga dapat menarik *vortex C* melintasi *wake*.



Gambar 2. 3 Skema terjadinya fenomena *vortex shedding* (Sumer & Fredsoe, 2006).

Pertumbuhan *vortex* yang lebih kecil suatu saat akan memotong aliran pertumbuhan dari *vortex* yang lebih besar. Akibatnya *vortex* yang lebih besar akan terlepas dan meninggalkan *vortex* yang lebih kecil. Hal ini akan terjadi secara berulang - ulang dalam batas waktu tertentu. (Sumer & Fredsoe, 2006)

2.2.1 Frekuensi *Vortex Shedding*

Nilai dari frekuensi *vortex shedding* sangat bergantung pada kecepatan aliran dan diameter silinder. Ketika nilai frekuensi *vortex shedding* mendekati frekuensi pribadi struktur, maka yang terjadi adalah gaya angkat periodik membesar secara *asymptote* dan akan terjadi

resonansi. Menurut percobaan yang dilakukan **Drescher (1956)** dalam **Sumer&Fredsoe (2006)**, besarnya frekuensi osilasi gaya drag adalah dua kali frekuensi *vortex shedding* dan besarnya frekuensi osilasi gaya lift sebesar frekuensi *vortex shedding*. Nilai frekuensi *vortex shedding* bisa didapat dari nilai *Strouhal number* yang merupakan fungsi dari bilangan Reynolds. Frekuensi *vortex shedding* saat keadaan normal secara dimensional dapat dilihat sebagai fungsi dari bilangan Reynolds yang dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2 berikut:

$$St = St (Re) \quad (2.1)$$

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2.2)$$

Keterangan:

- St = *Strouhal number (dimensionless)*
- Re = *Reynolds number (dimensionless)*
- f_v = Frekuensi *vortex shedding* (Hz)
- D = Diameter silinder (m)
- U = Kecepatan aliran (m/s)

2.2.2 Gaya Akibat *Vortex Shedding*

Aliran yang melalui dan mengenai suatu benda, dalam hal ini adalah silinder akan menghasilkan gaya resultan pada silinder tersebut. Terdapat dua gaya yang bekerja, satu gaya terbentuk dari tekanan, dan gaya lainnya terbentuk dari adanya gesekan. Gaya-gaya yang bekerja searah dengan datangnya aliran antara lain gaya tekanan dan gaya gesek, dimana ketika kedua gaya tersebut dijumlah akan menghasilkan *mean drag*. Sedangkan untuk gaya yang tegak lurus dengan arah datangnya aliran, disebut sebagai gaya angkat atau *lift force*.

Akibat dari adanya fenomena *vortex shedding*, maka terjadi perubahan pola aliran secara periodik. Perubahan ini meliputi perubahan pada distribusi tekanan di sekitar silinder mengalami perubahan periodik saat proses pelepasan berlangsung dan variasi nilai gaya yang dihasilkan. Ketika *vortex shedding* terjadi, nilai C_D dan C_L berubah secara periodik pada nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) tertentu dan *mean lift* ($\overline{C_L}$) sama dengan nol. *Coefficient drag* (C_D) berosilasi pada suatu nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) tertentu dimana nilai *mean drag* merupakan komponen dari garis gaya friksi dan osilasi (\dot{C}_D) merupakan komponen gaya akibat perubahan tekanan. (**Sumer&Fredsoe, 2006**) Koefisien *drag* dan *lift* dapat didapatkan melalui persamaan:

$$\overline{C_D} = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho LDU^2} \quad (2.3)$$

$$\overline{C_L} = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho LDU^2} \quad (2.4)$$

Keterangan:

- $\overline{C_D}$ = *Mean drag coefficient*
- $\overline{C_L}$ = *Mean lift coefficient*
- F_D = Gaya *drag* (Newton)
- ρ = Massa jenis fluida (kg/m³)
- L = Panjang karakteristik (m)
- D = Diameter silinder (m)
- U = Kecepatan aliran (m/s)

Gaya yang bekerja dalam arah sejajar (*drag force*) berubah secara berkala dan berosilasi di sekitar *mean drag*. Serta meskipun aliran masuk sepenuhnya simetris terhadap sumbu silinder, terdapat komponen yang bekerja pada arah tegak lurus (*lift force*) yang berubah secara periodik terhadap waktu.

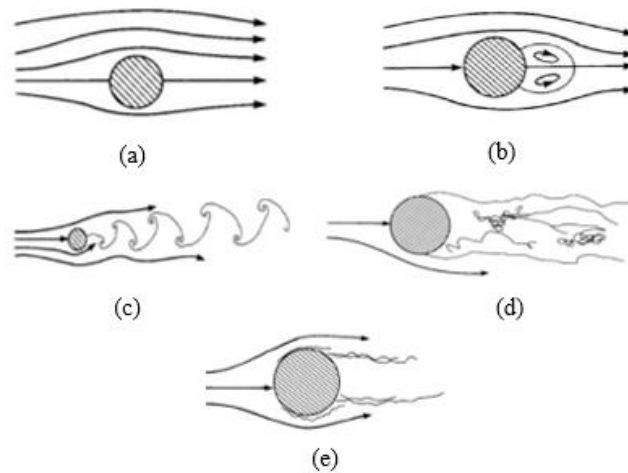
2.3 Aliran Melalui Silinder

Ketika fluida mengalir melintasi sebuah benda diam, daerah *disturbed flow* selalu terbentuk di sekitar benda. Besarnya daerah *disturbed flow* bergantung pada bentuk, orientasi, dan ukuran dari benda. Separasi aliran yang parah dan *unsteady* umumnya dihasilkan oleh *bluff-body*. *Bluff body* adalah benda yang tidak diberikan *streamlining*. Beberapa contoh dari *bluff-body* yaitu silinder melingkar, eliptikal, *rectangular*, *triangular*, *flat plate* dan sebagainya. (Zdravkovich, 1997). Aliran pada silinder melingkar sangat dipengaruhi oleh bilangan Reynolds. Peristiwa transisi dan separasi yang terjadi pada aliran dapat diketahui karakteristiknya melalui bilangan Reynolds. Apabila aliran yang melintasi silinder melingkar tidak mengalami transisi, dengan kata lain bilangan Reynolds berada pada nilai yang tetap, maka dapat terlihat perbedaan titik separasi yang terjadi. Aliran turbulen memiliki titik separasi yang tertunda akibat aliran memiliki momentum yang lebih besar sehingga lebih mampu mengatasi *adverse pressure gradient* yang menghambat aliran. Sehingga dengan adanya peningkatan bilangan Reynolds aliran yang melintasi silinder melingkar akan memperkecil daerah *wake* yang terbentuk karena separasi, dan menurunkan *pressure drag* pada sisi *downstream* silinder melingkar. (Pritchard, 2011)

Beberapa fenomena yang lebih rinci seperti pada gambar 2.4 terjadi saat bilangan Reynolds pada aliran yang melintasi silinder melingkar tunggal divariasikan. Pada bilangan Reynolds yang sangat rendah ($0 < Re < 4$), silinder melingkar memiliki *streamline* yang hampir simetris dan aliran yang melekat pada silinder melingkar seperti pada gambar 2.4(a). Rentang bilangan Reynolds ini disebut dengan aliran *Stokes* dimana gaya tekan dan gaya gesek aliran mendekati kondisi setimbang pada aliran *Stokes*. Kesetimbangan gaya ini disebabkan oleh kecepatan aliran yang sangat rendah sehingga pengaruh inersia pada aliran juga rendah, pada rentang ini separasi tidak terjadi. Separasi aliran pada belakang silinder melingkar mulai timbul apabila bilangan Reynolds ditingkatkan pada rentang ($4 < Re < 40$). Separasi ini menghasilkan dua *vortex* yang stabil pada sisi belakang silinder diperlihatkan pada gambar 2.4(b). *Vortex* yang terbentuk berubah menjadi tidak stabil saat bilangan Reynolds ditingkatkan menuju ($Re > 40$). Ketidakstabilan *vortex* pada aliran menghasilkan *vortex shedding* beraturan pada *downstream* seperti pada gambar 2.4(c). *Vortex shedding* yang terjadi pada *downstream* umumnya disebut sebagai *Karman vortex street*.

Seperti terlihat pada gambar 2.4(d) peningkatan bilangan Reynolds pada rentang ($10^3 < Re < 10^5$) menyebabkan *Karman vortex street* menjadi turbulen dan berubah menjadi *wake* yang memiliki bentuk berbeda. Separasi *boundary layer* laminar mulai terjadi pada rentang bilangan Reynolds ini yaitu terjadi pada titik sekitar 80° dari titik stagnasi. Pada rentang bilangan Reynolds yang lebih tinggi ($3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$) *free shear layer* yang terdapat di atas daerah terseparasi mengalami transisi menuju aliran turbulen. Dapat dilihat pada Gambar 2.4(e)

aliran ini akan melekat kembali pada belakang silinder, namun terseparasi kembali pada titik 120° dari titik stagnasi (Anderson, 2011).



Gambar 2. 4 Karakteristik aliran pada silinder sirkular pada bilangan Reynolds berbeda (Anderson, 2011).

2.4 Reynolds Number

Reynolds number atau bilangan Reynolds merupakan parameter kunci untuk pendefinisian dan penyelesaian segala macam kasus pada aliran, baik aliran internal maupun eksternal. Dengan demikian, secara umum bilangan Reynolds memiliki persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu} \quad (2.5)$$

Bilangan Reynolds adalah perbandingan gaya inersia dengan gaya viskos. Dimana variabel L (m) adalah panjang karakteristik dari geometri aliran, ρ (kg/m^3) merupakan massa jenis fluida yang mengalir dengan kecepatan V (m/s) dan μ merupakan viskositas dinamis fluida, serta ν merupakan viskositas kinematik fluida. Aliran dengan bilangan Reynolds tinggi umumnya memiliki jenis aliran turbulen, sedangkan kondisi dimana gaya inersia lebih kecil dibandingkan dengan gaya viskosnya memiliki jenis aliran laminar. (Pritchard, 2011)

Bilangan Reynolds dalam pipa dapat diubah paling mudah dengan memvariasikan kecepatan aliran rata-rata. Jika aliran dalam pipa awalnya laminar, peningkatan kecepatan hingga bilangan Reynolds mencapai titik kritis menyebabkan terjadinya transisi, dimana aliran laminar berubah menjadi aliran turbulen. Pengaruh transisi pada profil kecepatan menunjukkan bahwa gradien kecepatan pada dinding saluran jauh lebih besar pada saat turbulen dibanding saat aliran laminar. Perubahan kecepatan ini menyebabkan tegangan geser dinding meningkat secara signifikan, dengan efek yang sama pada faktor gesekan. (Pritchard, 2011)

2.5 Strouhal Number

Strouhal number atau bilangan Strouhal merupakan bilangan tak berdimensi yang mencirikan fenomena menarik yaitu terjadinya *vortex shedding* atau pelepasan pusaran. Fenomena ini terjadi ketika aliran *uniform* atau seragam menghasilkan *vortex* atau pusaran ketika bertemu dan berinteraksi dengan *bluff body*, dalam hal ini adalah silinder yang tegak lurus terhadap aliran. *Vortex street* adalah serangkaian *vortex* bolak-balik yang keluar dari sisi belakang *body* silinder, *vortex* bolak-balik ini akan menghasilkan gaya yang dapat menyebabkan silinder berosilasi. (Pritchard, 2011)

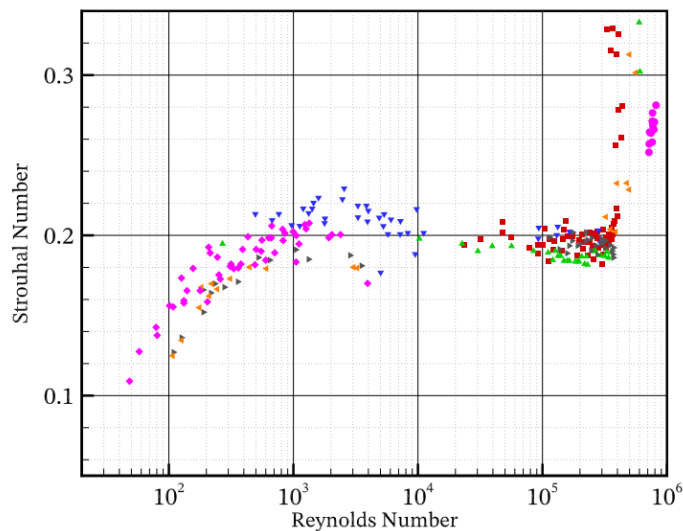
Bilangan Strouhal menunjukkan nilai dari rasio atau perbandingan gaya inersia akibat percepatan lokal aliran terhadap gaya inersia akibat percepatan konvektif, yaitu kecepatan dari suatu titik ke titik lain dalam suatu aliran fluida. Dalam aliran yang dicirikan oleh gerakan periodik, definisi alternatif dari bilangan Strouhal dapat diekspresikan oleh persamaan berikut:

$$St = \frac{fL}{U} \quad (2.6)$$

dimana f (Hz) adalah frekuensi osilasi yang ditimbulkan oleh *vortex shedding*, L (m) adalah panjang karakteristik, seperti diameter struktur, dan U (m/s) merupakan kecepatan aliran fluida. (Katopodes, 2019)

Pada bilangan Strouhal yang tinggi, osilasi mendominasi aliran sedangkan pada bilangan Strouhal rendah osilasi disapu oleh fluida yang bergerak cepat. Pada bilangan Strouhal menengah, yaitu sekitar 0,2 - 0,3, pelepasan *vortex* terjadi. Nilai ini adalah hasil pendekatan yang tepat untuk rentang bilangan Reynolds yang luas pada silinder.

Diameter silinder (D), digunakan sebagai panjang karakteristik dalam plot pada grafik yang ditunjukkan pada gambar 2.5 dan simbol warna yang berbeda menunjukkan besar diameter silinder yang bervariasi. Terdapat distribusi data dengan perbedaan yang tidak signifikan dengan menunjukkan nilai konstan $St = 0,2$ dalam rentang *Reynolds number* $5 \times 10^2 < Re < 5 \times 10^5$. Untuk bilangan Reynolds (Re) < 200 , aliran di belakang silinder adalah laminar serta pusaran yang terbentuk jelas bahkan pada jarak yang jauh dari silinder. Vortisitas periodik menghilang pada nilai bilangan Reynolds yang sangat tinggi dan terbentuk aliran turbulen di belakang silinder. (Katopodes, 2019)



Gambar 2. 5 Grafik hubungan *Strouhal number* dengan *Reynolds number* untuk *vortex shedding* (Katopodes, 2019).

2.6 Perhitungan Daya

Daya merupakan laju energi yang dihantarkan selama melakukan usaha dalam periode waktu tertentu. Satuan SI (Satuan Internasional) untuk daya yaitu Joule / Sekon (J/s) = Watt (W). Satuan Watt dipakai untuk penghormatan kepada seorang ilmuwan penemu mesin uap yang bernama James Watt. Satuan daya lainnya yang sering dipakai yaitu *horse power* (hp), 1 hp = 746 Watt. Daya adalah besaran skalar, karena daya hanya mempunyai nilai, namun tidak memiliki arah. Daya merupakan pendefinisian lebih nyata dari energi yang dapat dihasilkan

dari suatu sistem. Persamaan untuk daya sendiri dihasilkan dari penurunan persamaan 2.7 berikut (Stinson, dkk., 2011).

$$A(t) = \frac{F_L x \sin(\omega_n t + \frac{\pi}{2})}{k \sqrt{\left(1 - \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2}} \quad (2.7)$$

Dengan:

- F_L = gaya lift pada silinder sirkular (N)
- ζ = konstanta redaman fluida (non dimensional)
- ω_n = frekuensi natural silinder sirkular (Hz)
- f_s = frekuensi vortex shedding (Hz)
- f_n = frekuensi natural (Hz)

Kecepatan silinder sirkular ditentukan dengan menurunkan persamaan 2.8 terhadap waktu menjadi (Stinson, dkk., 2011):

$$v(t) = \frac{d}{dt} A(t) \quad (2.8)$$

Dengan:

- $v(t)$ = Kecepatan silinder sirkular (m/s)

Kemudian daya ditentukan dari hasil perhitungan kecepatan dan gaya lift pada silinder sirkular akibat vortex shedding ditunjukkan pada persamaan 2.9 (Stinson, dkk., 2011):

$$P(t) = v(t) x F_L x \sin(\omega_n t) \quad (2.9)$$

Rata-rata daya yang dihasilkan dapat ditentukan dengan persamaan 2.10 sebagai berikut (Stinson, dkk., 2011).

$$P_{avr} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

Dengan:

- P_{avr} = daya rata-rata (W)
- P_{max} = daya maksimum dari sistem (W)

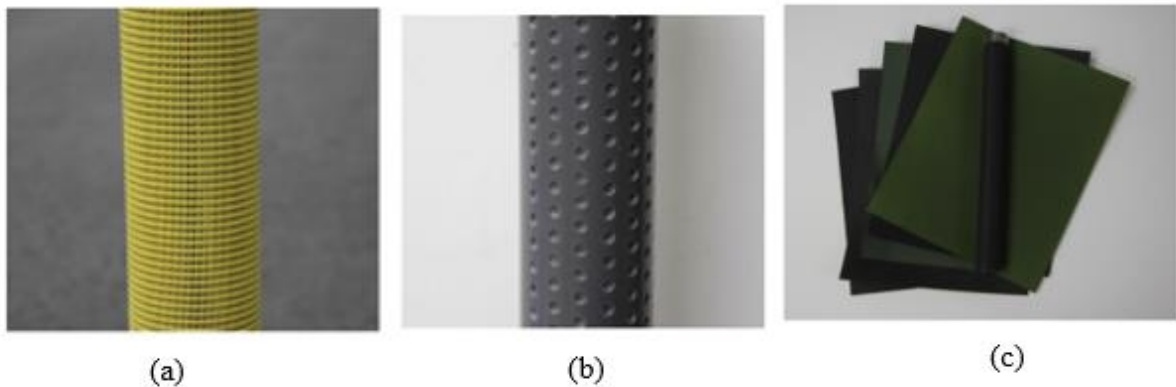
Berdasarkan persamaan yang telah diberikan, dapat diketahui bahwa daya memiliki hubungan linear dengan amplitudo dan terbalik dengan frekuensi vortex shedding sehingga hipotesa yang diberikan pada penelitian ini adalah semakin tinggi amplitudo dan rendah frekuensi, maka daya yang dihasilkan pada suatu sistem akan semakin besar, begitu pula jika keadaannya berupa frekuensi yang nilainya konstan. Peningkatan amplitudo memiliki peranan penting untuk mencapai tujuan peningkatan performa sistem.

2.7 Penelitian Terdahulu

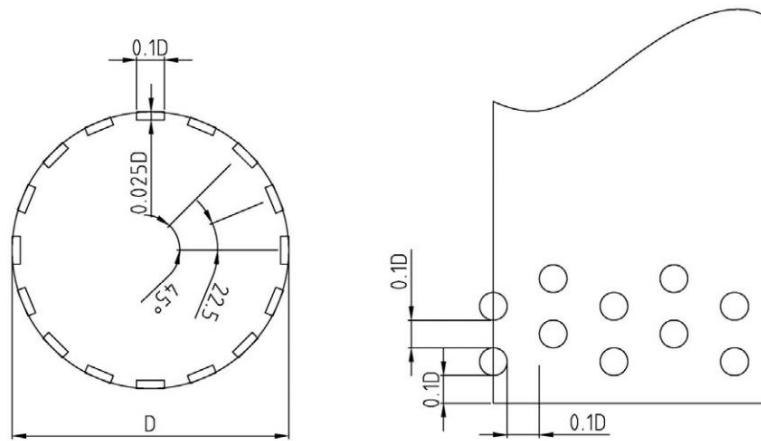
2.7.1 Force and Flow Characteristics of a Circular Cylinder with Uniform Surface Roughness at Subcritical Reynolds Number

Bo Zhou (2014) melakukan eksperimen dengan tujuan untuk membangun pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antara pengurangan koefisien drag dan kekasaran permukaan. Eksperimen dilakukan untuk mengukur gaya dan aliran karakteristik silinder melingkar dengan memberikan variasi berbagai jenis kekasaran permukaan buatan pada rentang Reynolds number sebagai berikut $6 \times 10^3 < Re < 8 \times 10^4$. Kekasaran pada silinder dibentuk oleh berbagai macam kekasaran buatan seperti ampas, netting atau jaring, dan dimples

yang menutupi seluruh permukaan silinder. Eksperimen dilakukan dengan kekasaran (k/D) yang berkisar 0,0028 hingga 0,025. Variasi diameter silinder yang digunakan pada ketiga variasi kekasaran yaitu 100 mm dan 29 mm.

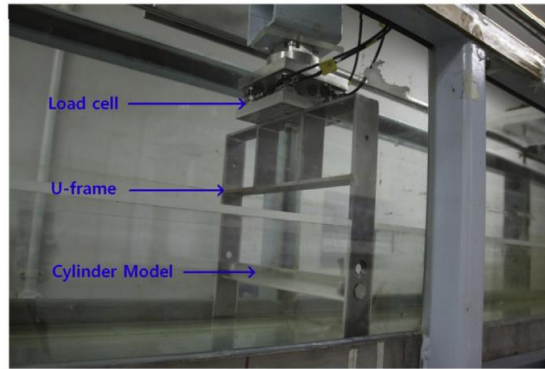


Gambar 2. 6 Variasi kekasaran permukaan silinder; (a) *Netting* atau jaring; (b) *Dimples*; (c) Amplas (**Bo Zhou, 2014**).

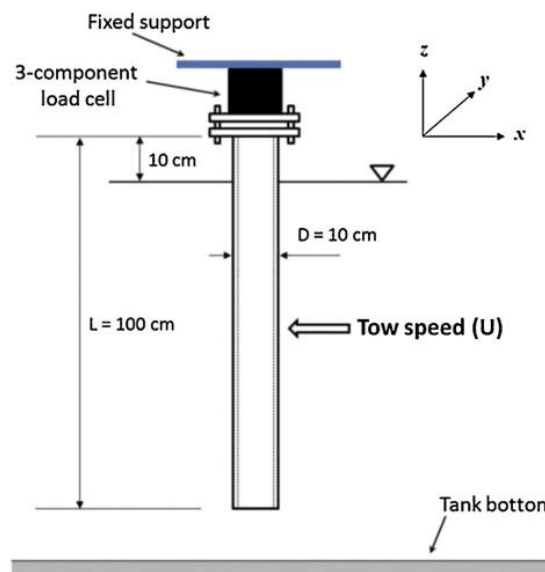


Gambar 2. 7 Sketsa yang menunjukkan bentuk detail dari *dimples* (**Bo Zhou, 2014**).

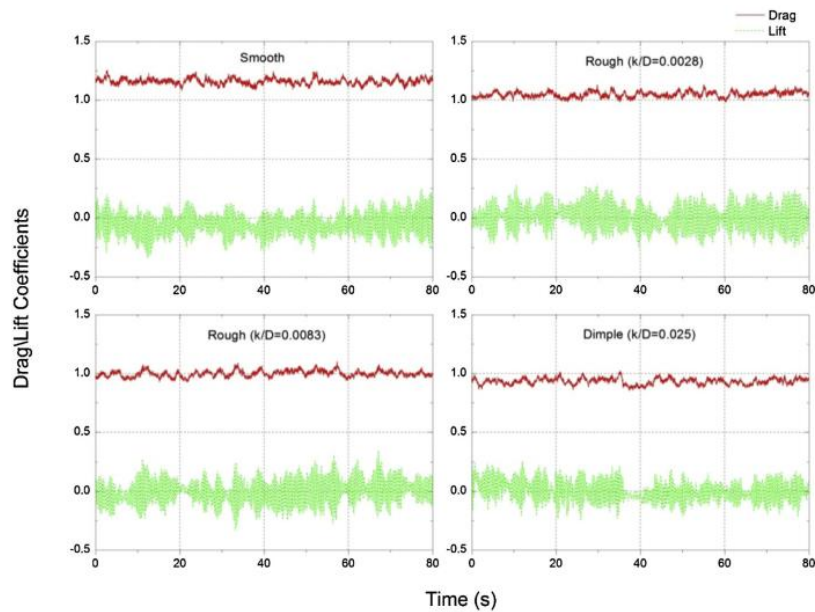
Pengujian dilakukan pada dua media pengujian yang berbeda. Untuk dimensi silinder dengan diameter 100 mm dan panjang 1000 mm dilakukan pada *towing tank* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 dengan ukuran 4000 mm x 1500 mm (lebar x kedalaman). Sebuah kereta bermotor menarik model silinder pada kecepatan yang diinginkan hingga 1,0 m/s. *Dimple* yang digunakan sebagai salah satu variasi bentuk silinder memiliki dimensi diameter 5 mm ($0,05D$) dan kedalaman 2,5 mm ($0,025D$) serta berjumlah enam belas dengan jarak yang sama pada seluruh permukaan silinder. Kecepatan aliran pada *towing tank* diatur pada 0,2; 0,4; 0,6; dan 0,8 m/s dengan bilangan Reynolds yang berkisar pada $20.000 \leq Re \leq 80.000$. Hal ini bertujuan agar pengamatan pola aliran kompleks pada silinder lebih akurat. Untuk media pengujian kedua menggunakan *re-circulating open water channel* sepanjang 6 m dengan dimensi bagian uji sebesar 0,3 m x 0,4 m (lebar x tinggi). Dimensi silinder yang digunakan pada pengujian kedua ini memiliki diameter sebesar 29 mm dengan variasi kekasaran berupa amplas dan *dimples* yang berdiameter 2,9 mm ($0,1D$).



Gambar 2. 8 Towing tank (Bo Zhou, 2014).

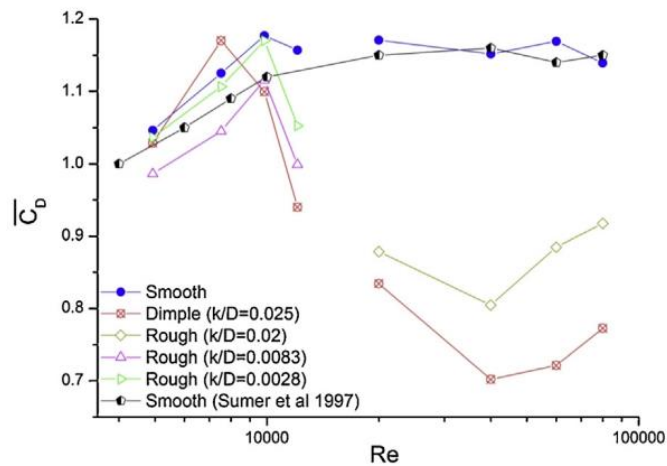


Gambar 2. 10 Skema gaya (Bo Zhou, 2014).



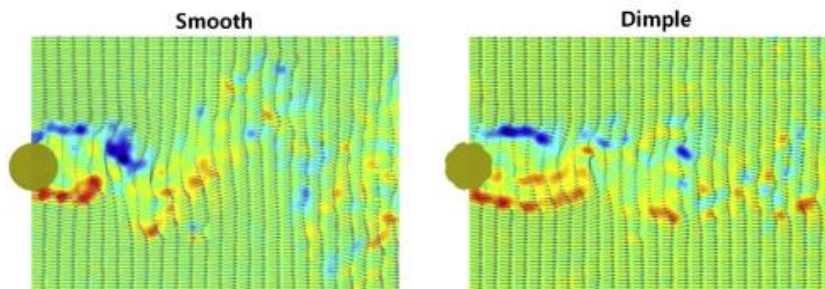
Gambar 2. 9 Time history of the instantaneous lift and drag coefficients at $Re = 12,080$ (Bo Zhou, 2014).

Ditunjukkan pada gambar 2.10 merupakan fluktuasi nilai C_D dan C_L terhadap waktu untuk nilai $Re = 12.080$ dari masing-masing variasi silinder. Untuk nilai C_D pada *smooth* silinder berkisar 1,2; sedangkan pada *rough* silinder dalam hal ini menggunakan ampas dan jaring serta pada *dimples* silinder perbedaan nilai C_D keduanya tidak terlalu signifikan dan berada di bawah *smooth* silinder pada kisaran 0,8 hingga 1,0 bergantung pada tingkat kekasaran yang dibentuk pada permukaan silinder. Dengan bertambahnya kekasaran pada permukaan silinder, nilai C_D yang dihasilkan akan semakin menurun atau kecil. Di sisi lain, nilai dari C_L untuk setiap kasus yang ditunjukkan pada gambar 2.10 tetap konstan pada $C_L \approx 0$, jika diamati fluktuasi nilai C_L lebih tinggi dari fluktuasi nilai C_D di masing - masing variasi. Hal ini terjadi akibat adanya perubahan fluktuatif tekanan secara periodik oleh *vortex shedding* di kedua sisi silinder.



Gambar 2. 11 Mean drag coefficient vs. Reynolds number (Re) for smooth, rough, and dimple cylinders (Bo Zhou, 2014).

Jika dilihat pada gambar 2.11, nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) dari *smooth* silinder cenderung meningkat jika nilai *Reynolds number* juga meningkat, namun pada *rough* silinder nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) bervariasi pada rentang *Reynolds number* yang sama. Pada rentang $Re < 1.0 \times 10^4$ $\overline{C_D}$ dari *rough* silinder berada di dekat $\overline{C_D}$ milik *smooth* silinder, namun pada rentang $Re \geq 1.2 \times 10^4$ $\overline{C_D}$ dari *rough* silinder berada jauh di bawah *smooth* silinder atau dalam kata lain memiliki perbedaan yang sangat signifikan. *Dimple* silinder ($k/D = 0,025$) dan *rough* silinder ($k/D = 0,02$) menunjukkan 20-30 % penurunan *drag* jika dibandingkan dengan *smooth* silinder. Nilai minimum dari *mean drag* ($\overline{C_D}$) yang diobservasi pada rentang bilangan Reynolds (Re) = 4×10^4 yaitu 0,7 dan 0,8 untuk *dimple* dan *rough* silinder.

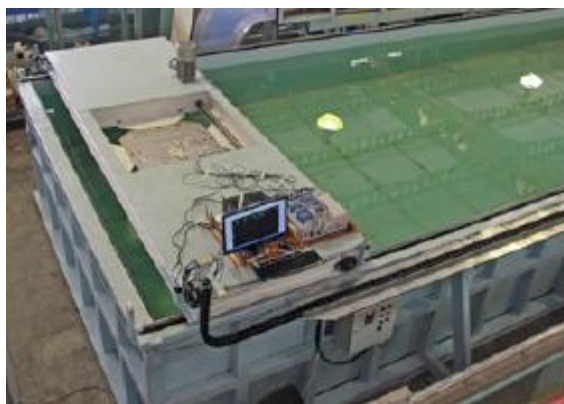


Gambar 2. 12 Typical snapshots of the instantaneous flow fields for smooth and dimple cylinders at $Re = 9850$ (superimposed with contours of spanwise vorticity; cold colour: negative; warm: positive) (Bo Zhou, 2014).

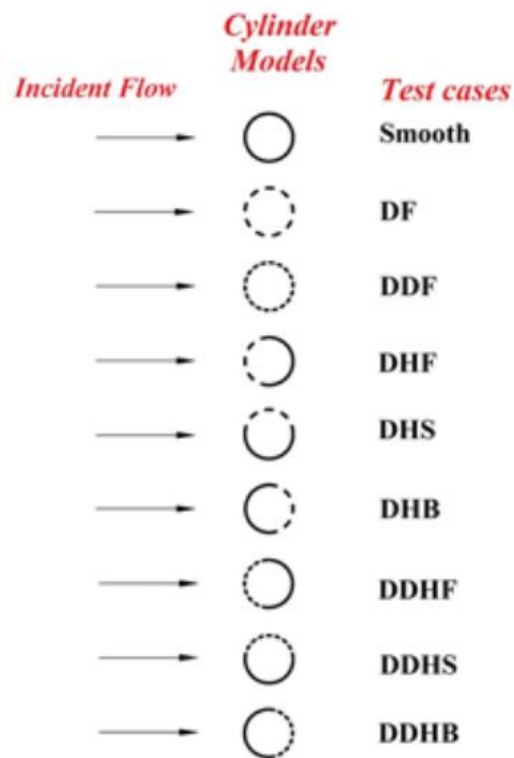
Kesimpulan dari penelitian ini bahwa makalah ini menyajikan temuan studi eksperimental pada gaya *drag* dan *lift* serta karakteristik aliran silinder melingkar dengan variasi kekasaran permukaan yang berbeda dalam rentang bilangan Reynolds $5 \times 10^3 \leq Re \leq 8 \times 10^4$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekasaran permukaan berperan penting dalam memengaruhi gaya hidrodinamik (*lift force* atau gaya angkat dan *drag force* atau gaya hambat) pada silinder. Untuk bilangan Reynolds sebesar $2 \times 10^4 \leq Re \leq 8 \times 10^4$, hasilnya adalah pengurangan sekitar 30% *drag coefficient* untuk *dimple* silinder ($r/D = 0,1$; $d/D = 0,025$) dan sekitar 20% untuk *rough* silinder ($k/D = 0,02$). r.m.s. *lift coefficient* (C_L) dari *dimple* dan *rough* silinder juga lebih rendah dari pada *smooth* silinder. Hasil *Particle Image Velocimetry* (PIV) menunjukkan bahwa *dimple* silinder mengurangi daerah resirkulasi (*wake*) di bagian belakang silinder, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.12.

2.7.2 Experimental Measurements of The Drag Force and The Near-Wake Flow Patterns of a Longitudinally Grooved Cylinder

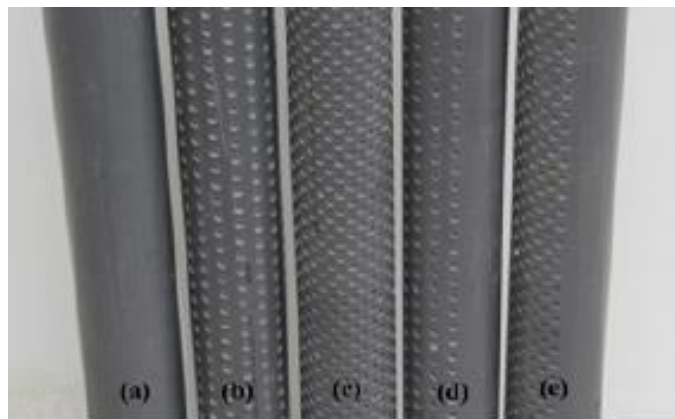
Bo Zhou (2016) melakukan eksperimen untuk memahami hubungan antara *drag reduction* pada silinder melingkar dengan kekasaran permukaan dalam bentuk *dimple*. Serangkaian percobaan dalam rentang bilangan Reynolds antara 2×10^4 dan 8×10^4 dilakukan untuk mengukur karakteristik gaya hidrodinamik pada *smooth* silinder, *full-dimpled* silinder, dan *half-dimpled* silinder. Eksperimen dilakukan dengan menguji sembilan tipe kekasaran permukaan silinder di *towing tank* yang berbentuk segi empat dengan dimensi 4000×1500 mm (lebar x kedalaman). Sebuah kereta bermotor yang dimiliki *towing tank* menarik model silinder pada kecepatan yang diinginkan hingga 1,0 m/s. Spesimen uji terbuat dari pipa *Polyvinyl Chloride* (PVC) dengan diameter 100 mm. Pola *dimple* dalam eksperimen ini dibedakan menjadi dua, yaitu jarang atau *sparse* dan padat atau *dense*. *Sparse* memiliki enam belas buah *dimples* pada permukaan selimut silinder yang terbagi lagi ke dalam dua tipe, yaitu penuh jarang atau *full-sparse* dan setengah jarang atau *half-sparse*. Sedangkan *dense* memiliki 32 *dimples* pada permukaan selimut silinder yang terbagi pula ke dalam dua tipe, yaitu penuh padat atau *full-dense* dan setengah padat atau *half-dense*. Diameter (d) dan kedalaman (k) *dimple* yang digunakan adalah 10 mm dan 2,5 mm. Untuk pengujian dengan *dimple* silinder, berbagai sudut datang aliran dipertimbangkan, sehingga rincian dan kode yang diberikan untuk keseluruhan tipe spesimen uji adalah *smooth*, DF (*full sparse dimpled*), DDF (*full dense dimpled*), DHF (*half sparse forward dimpled*), DHS (*half sparse side dimpled*), DHB (*half sparse backward dimpled*), DDHF (*half dense forward dimpled*), DDHS (*half dense side dimpled*), DDHB (*half dense backward dimpled*), seperti yang terlihat pada gambar 2.14.



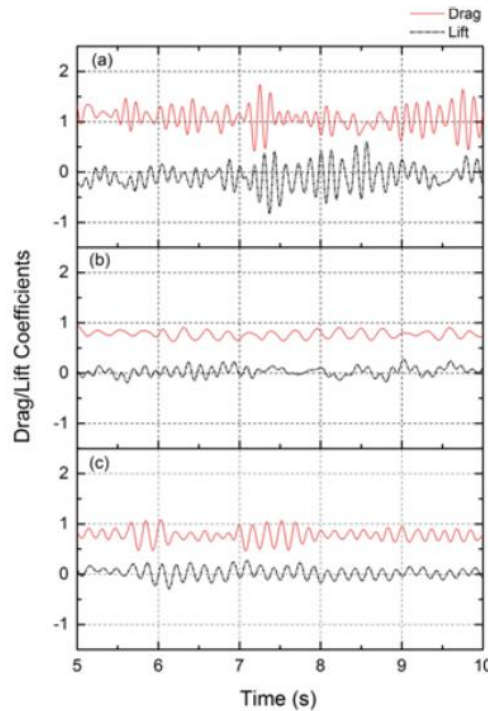
Gambar 2. 13 Towing tank (Bo Zhou, 2016).



Gambar 2. 15 Model silinder dan penjelasan kode kasus (Bo Zhou, 2016).

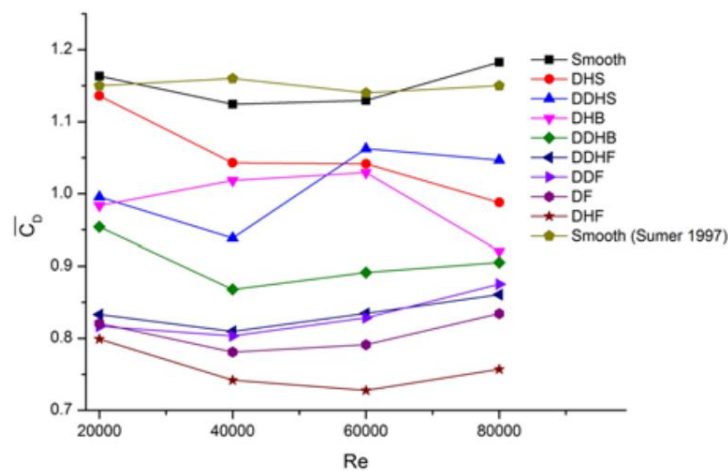


Gambar 2. 14 Silinder (a) Smooth, (b) Full-sparse dimpled, (c) Full-dense dimpled, (d) Half-sparse dimpled, (e) Half-dense dimpled surfaces (Bo Zhou, 2016).



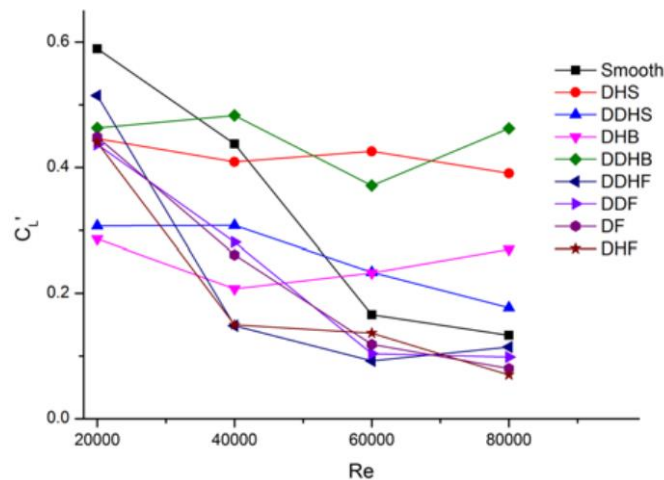
Gambar 2. 16 Drag dan lift coefficient untuk (a) Smooth cylinder, (b) Full-sparse dimpled cylinder, (c) Full-dense dimpled cylinder pada $Re = 8 \times 10^4$ (Bo Zhou, 2016).

Gambar 2.16 menunjukkan perbandingan drag dan lift coefficient dalam rentang waktu tertentu. Pada $Re = 8 \times 10^4$ untuk tipe smooth, full-sparse dimpled dan full-dense dimpled didapatkan nilai hambat rata-rata atau mean drag value untuk silinder smooth berkisar 1,1, namun untuk full-sparse dimpled dan full-dense dimpled memiliki kisaran nilai yang sama yaitu 0,8. Dapat dilihat juga bahwa fluktuasi dari masing-masing silinder bervariasi. Fluktuasi ini terjadi akibat adanya perbandingan antara drag atau lift coefficient dalam rentang waktu tertentu. Silinder smooth memiliki pola fluktuasi yang tinggi jika dibanding full-sparse dan full-dense. Hal ini menyimpulkan bahwa amplitudo dan percepatan getaran yang akan dihasilkan oleh silinder smooth lebih tinggi jika dibandingkan dengan full-sparse dan full-dense silinder.



Gambar 2. 17 Grafik variasi mean drag coefficient untuk smooth silinder dan dimple pada rentang Reynolds number tertentu (Bo Zhou, 2016).

Gambar 2.17 menunjukkan grafik fluktuasi dari $\overline{C_D}$ pada rentang *Reynolds number* tertentu. Peneliti melakukan validasi hasil eksperimen dengan membandingkan data *smooth* silinder yang didapatkan dengan penelitian sebelumnya. (Sumer&Fredsoe, 2006) Selisih dari fluktuasi data keduanya tidak signifikan yang dimana hal ini membuktikan bahwa hasil yang didapatkan dari eksperimen adalah valid. Nilai $\overline{C_D}$ pada setiap tipe silinder berbeda-beda dan dipengaruhi oleh *Reynolds number*. Terjadi penurunan nilai $\overline{C_D}$ yang signifikan untuk beberapa tipe silinder, yaitu DHS, DDHS, DDHB terutama pada rentang $20000 \leq Re \leq 40000$ dan terjadi peningkatan nilai $\overline{C_D}$ yang signifikan pada silinder tipe DDHS untuk rentang $40000 \leq Re \leq 60000$. Nilai $\overline{C_D}$ terendah dihasilkan oleh silinder tipe DHF dan yang tertinggi dihasilkan oleh silinder *smooth*.



Gambar 2. 18 Grafik variasi RMS lift coefficient (C_L') untuk *smooth* silinder dan *dimple* pada rentang *Reynolds number* tertentu (Bo Zhou, 2016).

Gambar 2.18 merupakan grafik fluktuasi dari nilai C_L' (*RMS value of the lift coefficient*) pada rentang *Reynolds number* tertentu. Berdasarkan grafik nilai C_L' dari silinder tipe DF, DHF, DDF dan DDHF lebih rendah jika dibanding *smooth* silinder. Pada rentang $20000 \leq Re \leq 40000$ hanya dua tipe silinder yang mengalami peningkatan nilai C_L' yaitu tipe DDHB dan DDHS. Nilai C_L' terendah dihasilkan oleh silinder tipe DHF.

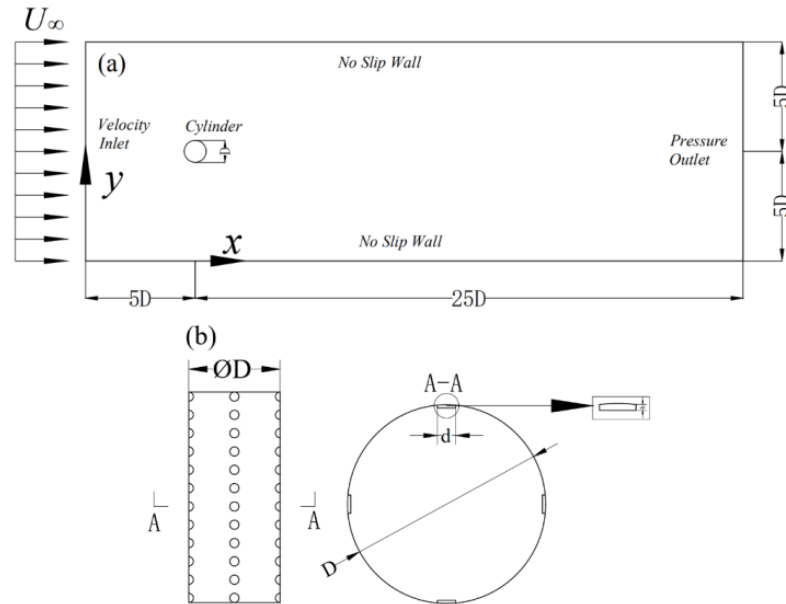
Kesimpulan dari studi eksperimental ini adalah bertujuan untuk mengetahui efek dari *dimpled surface* terhadap dinamika gaya hambat atau *drag force* dan gaya angkat atau *lift force* pada silinder tunggal. Hasil percobaan jelas menunjukkan bahwa kekasaran permukaan berupa *dimple* efektif dalam menurunkan *mean drag* $\overline{C_D}$ pada rentang $20000 \leq Re \leq 80000$. Untuk *half-dimpled*, orientasi permukaan kasar terhadap arah datangnya aliran adalah signifikan. Sehingga silinder menghasilkan nilai $\overline{C_D}$ dan C_L' yang bervariasi. Nilai $\overline{C_D}$ terendah dihasilkan oleh silinder dengan variasi *half-dimpled* dengan orientasi kekasaran permukaan menghadap ke arah datangnya aliran.

2.7.3 Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface

Fei Yan (2021) melakukan penelitian berupa simulasi numerik dan eksperimen untuk mengetahui cara mengurangi gaya hambat atau *drag force* pada silinder. Kedua jenis penelitian ini dilakukan menggunakan dua jenis silinder, yaitu *smooth* silinder dan *dimple* silinder. Simulasi numerik berfokus pada variasi koefisien tekanan, *skin friction coefficient*, dan

kekuatan *vortex shedding* dari *smooth* silinder dan *dimple* silinder. Selain itu penelitian juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh pola *dimple surface* silinder sirkular terhadap karakteristik penurunan *drag* jika dibandingkan dengan *smooth* silinder.

Simulasi numerik yang dilakukan adalah simulasi dua dimensi (2D) dengan ukuran domain simulasi $30D \times 10D$ (dengan D merupakan diameter silinder). Jarak dari titik pusat silinder hingga *outlet* sebesar $25D$. Hal ini mengacu pada studi yang dilakukan oleh Sarker (1998). Menurut **Sarker (1998)**, jarak dari titik pusat silinder hingga ke *outlet* harus $\geq 12D$ agar memastikan aliran sudah tidak dipengaruhi lagi oleh silinder. Sedangkan jarak antara titik pusat dengan *inlet* dan *wall* sebesar $5D$.



Gambar 2. 19 The schematic diagrams of the computational domain and the cylinder: (a) Computational domain; (b) The distribution of four columns of dimples on the surface of the cylinder (**Fei Yan, 2021**).

Kondisi batas domain komputasi juga diketahui dari gambar 2.19(a). Untuk semua simulasi, *inlet* dan *outlet* medan aliran adalah *velocity inlet boundary* dan *pressure outlet boundary*. Bagian depan dan belakang adalah *no slip wall* dan silinder diasumsikan sebagai *fixed wall boundary*. Model geometri di atas menggunakan sistem koordinat persegi panjang dua dimensi untuk domain komputasi ini. Dalam sistem koordinat ini, x dan y menunjukkan arah aliran dan transversal dari medan aliran. Gambar 2.19(b) adalah diagram skematis dari struktur *dimple* silinder. D ($D = 20$ mm), h , dan d secara berurutan adalah diameter silinder, kedalaman *dimple*, dan diameter *dimple* ($d = 2$ mm, $d/D = 0,1$). *Dimple* didistribusikan secara merata di permukaan selimut silinder dengan variasi penambahan jumlah *dimple*. Variasi kecepatan yang digunakan ada dua yaitu $0,2$ m/s dan $0,4$ m/s dan jika dikonversi dalam *Reynolds number* secara berturut-turut adalah $Re_1 = 1 \times 10^5$ dan $Re_2 = 2 \times 10^5$.

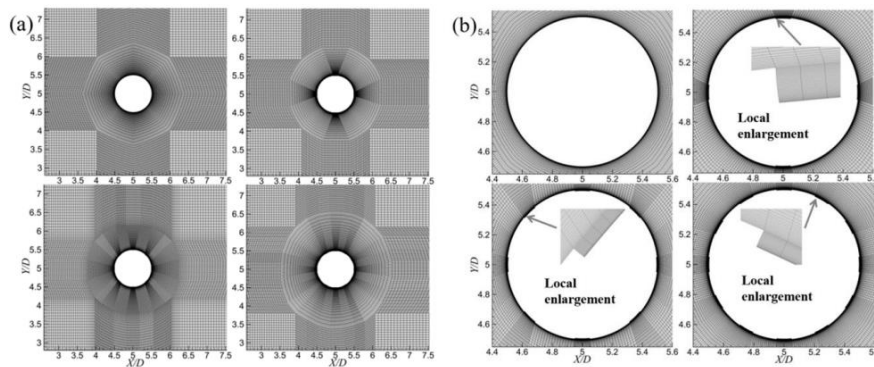
Mesh	Description	Number of Cells	Time-Averaged Drag Coefficient ($\overline{C_D}$)	Root Mean Square of Lift Coefficient ($C_{l_{rms}}$)	Strouhal Number (St)
M1	The first layer height 0.00005D	Mesh expansion ratio of 1.3	72,936	1.4001	0.7492
M2		Mesh expansion ratio of 1.2	89,476	1.3129	0.6391
M3		Mesh expansion ratio of 1.1	107,116	1.2424	0.6217
M4		Mesh expansion ratio of 1.05	125,856	1.2418	0.6214

Gambar 2. 21 Grid independence verification for the smooth cylinder at $Re = 1 \times 10^5$ (Fei Yan, 2021).

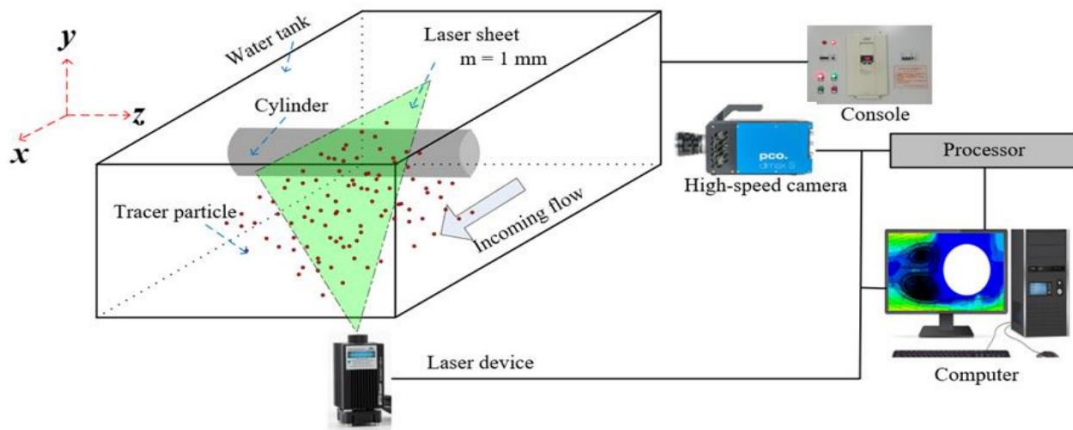
Mesh	Description	Number of Cells	Time-Averaged Drag Coefficient ($\overline{C_D}$)	Root Mean Square of Lift Coefficient ($C_{l_{rms}}$)	Strouhal Number (St)
M1'	the first layer height 0.00005D densify 40 layers mesh for the location with dimples	Mesh expansion ratio of 1.3	96,988	1.3412	0.7115
M2'		Mesh expansion ratio of 1.2	105,462	1.2584	0.7073
M3'		Mesh expansion ratio of 1.1	110,302	1.0060	0.6131
M4'		Mesh expansion ratio of 1.05	131,214	1.0052	0.6114

Gambar 2. 22 Grid independence verification for the dimple cylinder at $Re = 1 \times 10^5$ (Fei Yan, 2021).

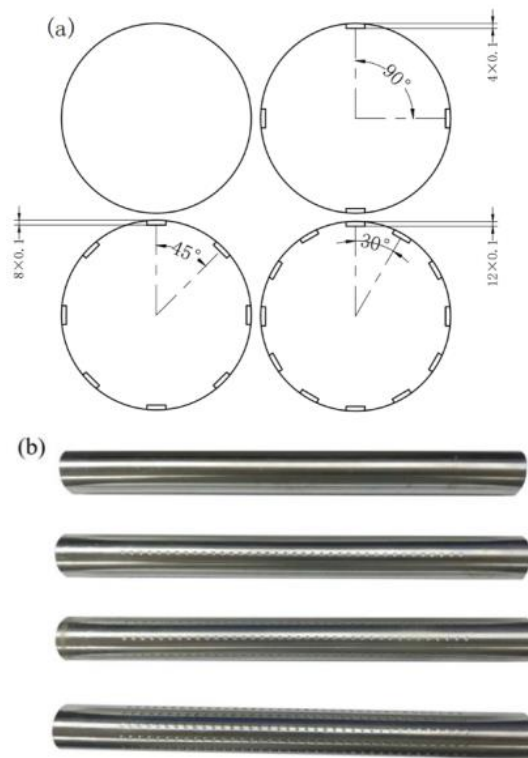
Untuk hasil simulasi yang akurat, Fei Yan (2021) mempertimbangkan ketinggian dari *first layer mesh* dimana daerah tersebut adalah daerah kritis yang sangat dekat dengan permukaan. Dengan nilai $y^+ \approx 1$ ditentukan ketinggian *mesh* pada *first layer* sebesar 0,001 mm. Selanjutnya dilakukan uji *grid independence* untuk masing masing variasi (*smooth* dan *dimple*). Hal ini bertujuan untuk memastikan hasil simulasi tersebut tidak dipengaruhi oleh banyaknya jumlah *mesh*. Jika dilihat pada gambar 2.21, terdapat empat model *mesh* berdasarkan banyaknya jumlah sel (M1, M2, M3, M4). Untuk *smooth* silinder, selisih nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) antara M3 dan M4 tidak terlalu signifikan, hal ini berarti tidak ada pengaruh signifikan antara M3 dan M4 terhadap hasil simulasi. Sama halnya dengan *dimple* silinder yang terdapat pada gambar 2.21 selisih nilai *mean drag* ($\overline{C_D}$) antara M3' dan M4' tidak berbeda jauh. Maka dalam simulasi ini model *mesh* yang digunakan adalah M3 untuk *smooth* dan M3' untuk *dimple*. Pengaturan *grid expansion ratio* diatur di bawah 1,1 dan *time step size* diatur di bawah 4×10^{-4} s.



Gambar 2. 20 Schematic diagrams of the mesh: (a) Computational grid; (b) Close-up of the grid around the cylinder (Fei Yan, 2021).



Gambar 2. 23 *Experimental setup in the water tank (Fei Yan, 2021).*



Gambar 2. 24 *Covered experimental conditions (Fei Yan, 2021).*

Pada studi eksperimental, **Fei Yan (2021)** menggunakan metode *Particle Image Velocimetry (PIV)*, yang bertujuan untuk melihat aliran di sekitar silinder dengan atau tanpa *dimple* pada area *backflow* silinder. Bentuk *circulating water tank* yang digunakan adalah persegi panjang dengan panjang 4 m, lebar 0,3 m, dan tinggi 0,25 m. Silinder yang digunakan dalam eksperimen ini memiliki dimensi diameter 20 mm dan panjang 302 mm. Sedangkan untuk ukuran *dimple* sendiri memiliki diameter (d) 2 mm, kedalaman (h) 0,1 mm, dan jarak antar *dimple* 4 mm. Perbandingan antara panjang *circulating water tank* dan diameter silinder adalah 15,1 dimana hal ini sesuai dengan acuan studi **Sarker (1998)**.

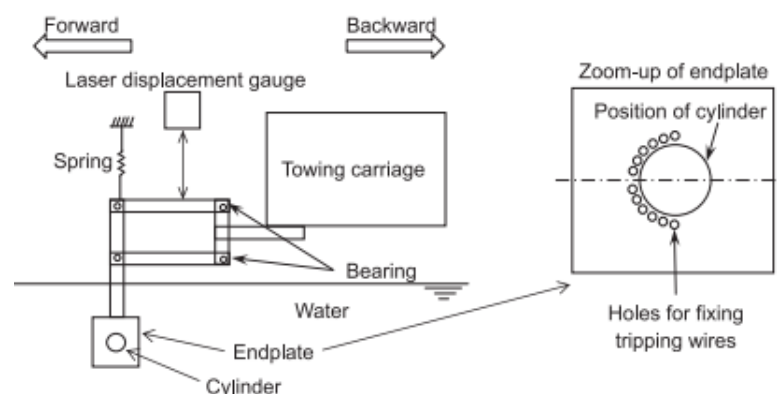
Kesimpulan dari penelitian oleh **Fei Yan (2021)** adalah *dimple surface* dapat secara efektif menurunkan *drag* dari silinder sirkular namun pada rentang *Reynolds number* tertentu. Tingkat pengurangan *drag* maksimum mencapai 19 % dan minimum mencapai 12,16 % seiring

bertambahnya jumlah *dimple* pada permukaan silinder. Pada *Reynolds number* yang sama, saat *drag* menurun maka kekuatan *vortex shedding* pun ikut menurun. Di sisi lain, *drag* yang dihasilkan pada *dimple* silinder akan meningkat ketika kecepatan aliran melebihi nilai kritis tertentu dan kekuatan *vortex shedding* akan lebih kuat dibanding *smooth* silinder. Pemulihan kecepatan silinder melingkar dengan *dimple surface* lebih cepat dibandingkan dengan *smooth surface*, pada kondisi yang sama, peningkatan bilangan Reynolds akan melemahkan efek *dimple* pada pemulihan kecepatan. Dalam hal lainnya *drag* pada silinder sirkular dapat meningkat saat melewati nilai kritis kecepatan aliran. Saat *drag* menurun sedangkan parameter *recirculation zone* meningkat. Hal ini mengindikasikan fenomena pembentukan *vortex* yang terhambat.

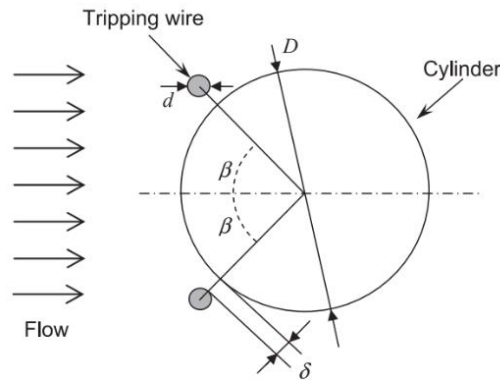
2.7.4 Amplification/Suppression of Flow-Induced Motions of an Elastically Mounted Circular Cylinder by Attaching Tripping Wires

Nishi (2014) melakukan penelitian berupa eksperimen untuk mengetahui efek *circular cylinder* dengan *tripping wire* pada zona *subcritical regime* (khususnya untuk aliran dengan rentang bilangan Reynolds $1,3 \times 10^3$ ke 9.6×10^4) terhadap vibrasi atau getaran yang diakibatkan oleh fluida yang mengalir melalui silinder. Penelitian ini mempelajari pengaruh *wire* pada permukaan silinder yang dilewati oleh aliran. Pada eksperimen yang dilakukan silinder terbagi atas *stationary cylinder* dan *moving cylinder*, kemudian ditempatkan *wire* secara simetris pada permukaan silinder sirkular. Penempatan *wire* dilakukan secara variatif mulai dari posisi 15° hingga 165° untuk menemukan posisi yang paling optimal untuk menurunkan gaya hidrodinamik yang bekerja pada silinder. Variasi yang digunakan dalam simulasi ini berupa variasi posisi, yaitu pada sudut 60° , 75° , 105° , dan 120° dari arah datangnya aliran untuk mengetahui bagaimana *tripping wire* menekan vibrasi atau getaran yang diinduksi oleh silinder sirkular.

Eksperimen dilakukan di dalam tangki penarik atau *towing tank* dengan dimensi panjang 100 m, lebar 8 m, dan kedalaman 3,5 m. Peralatan eksperimen yang dapat dilihat pada gambar 2.29 mencakup sistem bergerak yang terdiri dari silinder aluminium melingkar. Silinder sirkular yang digunakan memiliki diameter luar 25 mm dan panjang 454 mm yang ditopang oleh pegas untuk memberikan elastisitas pada sistem. Dua sel beban bi-aksial dilengkapi di kedua ujung silinder untuk mengukur gaya hambat atau *drag force* dan gaya angkat atau *lift force* yang bekerja. Sensor pengukuran jarak laser digunakan untuk mengukur perpindahan vertikal silinder. Pelat ujung akrilik dipasang pada ekstremitas silinder untuk menghindari efek akhir, untuk memperbaiki kabel yang tersandung pada posisi sudut yang telah ditentukan, dan untuk menjaga agar kabel yang tersandung tidak bersentuhan dengan silinder.

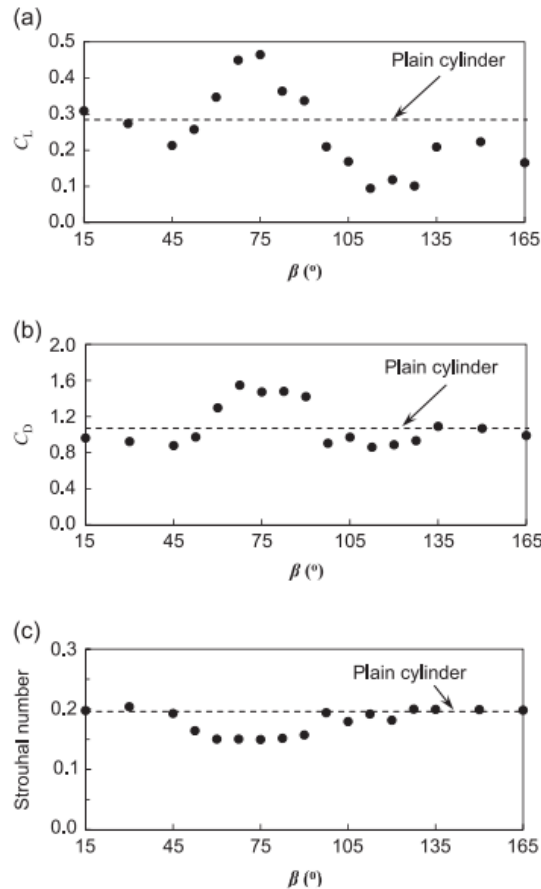


Gambar 2. 25 Skema penelitian (Nishi, 2014).



Gambar 2. 26 Konfigurasi silinder sirkular dengan *tripping wires* (Nishi, 2014).

Pengaruh dari *tripping wire* terhadap koefisien gaya hidrodinamik sangat bergantung pada posisi sudut peletakkannya. Koefisien gaya angkat dan gaya hambat diukur terhadap berbagai posisi *tripping wire*. Daerah pertama pada sudut antara 30° dan $52,5^\circ$ memiliki pengurangan koefisien gaya hidrodinamik lebih rendah dibanding pada *smooth cylinder*. Daerah kedua yang mencakup posisi sudut 60° hingga 90° ditandai dengan peningkatan yang nyata dalam koefisien di atas silinder polos, pada daerah ini pengurangan jumlah Strouhal juga diamati. Daerah ketiga pada sudut yang lebih besar dari $97,5^\circ$ menunjukkan penurunan koefisien yang lebih besar daripada yang diamati di daerah pertama. Di daerah ketiga, angka Strouhal sebagian besar sama dengan angka untuk *smooth cylinder*.



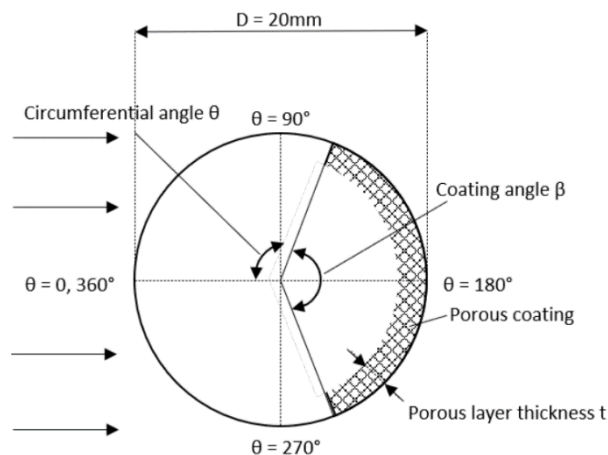
Gambar 2. 27 Data terukur dari tes pada *stationary cylinder*; (a) lift coefficient; (b) drag coefficient; (c) Strouhal number (Nishi, 2014).

Menempatkan *tripping wire* di belakang silinder pada sudut 105° dan 120° dapat memengaruhi penurunan amplitudo. Namun, kedua kasus tersebut berbeda dalam besaran penurunannya. Untuk 105° amplitudo di sekitar kecepatan tereduksi 6 lebih rendah daripada *smooth cylinder* dan lebih besar ketika $4 < V_R < 5$. Aspek terakhir berasal dari pergeseran ke kiri dari wilayah *lock-in*. *Drag* dan *lift coefficient* yang dihasilkan pada variasi *wire* yang ditempatkan di daerah belakang silinder adalah lebih rendah daripada yang dihasilkan oleh *smooth cylinder*, kecuali di daerah dimana amplitudonya lebih tinggi. Untuk 120° FIV hampir sepenuhnya ditekan di seluruh rentang kecepatan yang dikurangi diuji. *Lift coefficient* hampir mendekati nol. Sedangkan *drag coefficient* hampir konstan di sekitar 0.87 yang bahkan lebih rendah dibanding silinder stasioner. Penjelasan mengenai penurunan amplitudo dan gaya adalah bahwa mereka merupakan hasil dari penambahan *tripping wire* di belakang silinder yang mengakibatkan terhambatnya pembentukan *vortex shedding*.

Kesimpulan dari penelitian yang dilakukan oleh Nishi (2014) didapatkan hasil bahwa untuk mengetahui pengaruh penambahan *tripping wire* pada tiga wilayah posisi, yaitu $20^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ dan $97,5^\circ \leq \theta \leq 165^\circ$ yang merupakan posisi dimana *tripping wire* dapat mengurangi gaya hidrodinamik serta $67,5^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ yang merupakan posisi dimana *tripping wire* dapat meningkatkan gaya hidrodinamik. Eksperimen yang dilakukan pada silinder yang bergerak menunjukkan bahwa keberadaan *tripping wire* sangat mengubah respon FIV. Dengan *tripping wire* ditempatkan di 60° dan 75° rentang *lock-in* melebar. Dalam rentang *lock-in*, amplitudo meningkat secara monoton dan mencapai nilai 52% lebih besar dari respon maksimum pada *smooth cylinder*. Dengan *tripping wire* yang ditempatkan pada 105° dan 120° , FIV jelas meluruh. Khususnya pada 120° , FIV sepenuhnya ditekan sepanjang rentang kecepatan tereduksi yang diuji.

2.7.5 Passive Flow Control for Drag Reduction on a Cylinder in Cross-Flow Using Leeward Partial Porous Coatings

Guinnes dan Persoons (2021) melakukan penelitian tentang pengaruh *leeward porous coatings* terhadap gaya *drag* di silinder sirkular. Penelitian ini dilakukan secara numerikal dua dimensi dengan menggunakan *software ANSYS fluent*. Kondisi simulasi dilakukan pada silinder sirkular berdiameter 20 mm dengan variasi sudut yang terdapat *porous coatings* (β) adalah sebesar ($0^\circ, 40^\circ, 70^\circ, 100^\circ, 130^\circ, 160^\circ, 360^\circ$). Bilangan Reynolds yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 4.2×10^4 . Berikut gambar 2.25 menunjukkan geometri sirkular silinder serta sudut *porous coatings*.



Gambar 2. 28 Gambar skematik dimensi dan sudut *porous coatings* pada sirkular silinder (Guinnes dan Persoons, 2021).

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

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

Gambar 2. 29 Perbandingan hasil nilai C_D dan C_L' setiap variasi sudut *coatings* (Guinnes dan Persoons, 2021).

Pada gambar 2.26 menunjukkan perbandingan hasil nilai koefisien *drag* (C_D) dan C_L' (*Root Mean Square Lift Coefficient*) pada setiap variasi. Pada $\beta = 0^\circ$ (*smooth* silinder sirkular) terlihat nilai koefisien *drag* sebesar 1.065 dan C_L' sebesar 0.846. Sedangkan pada $\beta = 360^\circ$ (*Full Coatings* silinder sirkular) mendapatkan kenaikan nilai koefisien *drag* 42% dari *smooth* silinder sirkular sebesar 1.511 dan C_L' yang lebih rendah sebesar 0.322. Pada lapisan *coating* dengan $\beta = 160^\circ$ terlihat terjadi peningkatan nilai C_L' yang cukup besar dengan nilai 1.187 namun nilai C_D juga mengalami kenaikan sebesar 1.528. Pada gambar 2.26 terlihat ketika $\beta > 100^\circ$ terjadi peningkatan *shedding frequency*. Selain itu terlihat ketika *separation angle* (θ_{sep}) meningkat maka nilai koefisien *drag* yang juga meningkat. Dari penelitian ini kita mendapatkan informasi bahwa kekasaran permukaan di daerah *leeward* akibat *coatings* pada $\beta = 160^\circ$ terjadi peningkatan C_L' yang cukup besar walaupun diiringi dengan peningkatan C_D .

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

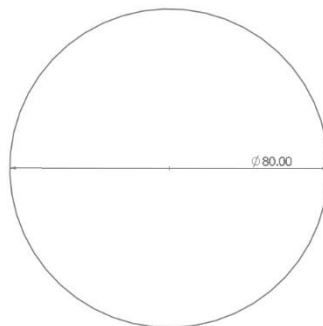
Penelitian desain silinder sirkular dengan pemanfaatan fenomena *Flow Induced Vibration* (FIV) ini dilakukan dengan menggunakan metode komputasi numerik. Tahapan dalam metode komputasi numerik ini ada tiga, pertama adalah tahapan *pre-processing*, *solver/processing*, dan *post processing*. *Pre-processing* merupakan tahap untuk mempersiapkan *domain* simulasi. *Processing* merupakan tahap inti dalam sebuah simulasi yang merupakan tahap dilakukannya iterasi untuk mendapatkan hasil akhir simulasi. Hasil akhir simulasi kemudian akan diproses dalam tahap *post-processing* untuk diambil data kualitatif dan kuantitatifnya yang kemudian diinterpretasikan. *Software* yang digunakan dalam metode komputasi numerik ini antara lain SOLIDWORKS 2020 SP0 X64, ANSYS ICEM 2021 R2 X64, dan ANSYS FLUENT 2021 R2 X64.

Pada tahapan *pre-processing* proses menyiapkan *domain* ini dilakukan dalam beberapa langkah, pertama adalah membuat geometri silinder sirkular beserta domain dengan menggunakan *software* SOLIDWORKS 2020 SP0 X64. Hasil pembuatan domain dibuat dalam format (.STEP). Selanjutnya dilakukan *meshing* dan penetapan *boundary condition* pada domain simulasi yang telah dibuat menggunakan *software* ANSYS ICEM 2021 R2 X64 dengan format (.uns). Hasil *mesh* kemudian diolah pada tahap *solver* menggunakan *software* ANSYS FLUENT 2021 R2 X64, di tahap ini ditentukan pula beberapa kondisi simulasi yang akan dijalankan, seperti fenomena fisis, properti fluida, *solution method* dan monitor residual. Hasil simulasi kemudian diolah pada tahap *post-processing* untuk diambil data kuantitatif seperti *drag coefficient*, *lift coefficient*, *lift coefficient RMS*, *pressure coefficient*, dan *Strouhal number* serta data kualitatif, yaitu kontur kecepatan dan *pressure coefficient*.

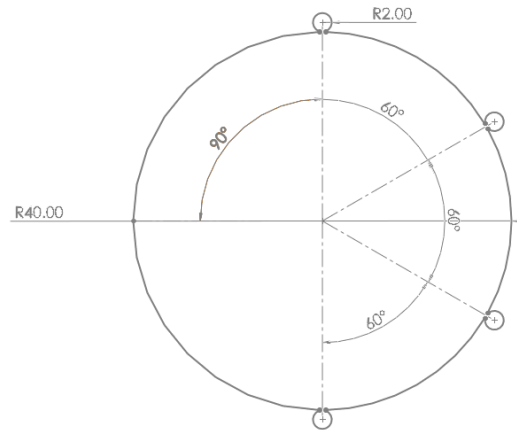
3.2 Pre-Processing

3.2.1 Pembuatan Variasi Penelitian dan Domain Simulasi

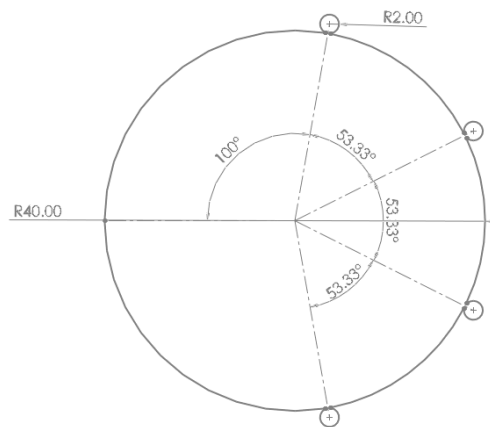
Dalam langkah ini dilakukan pembuatan geometri silinder sirkular serta domain yang akan disimulasikan. Desain geometri dibuat dengan menggunakan *software* SOLIDWORKS 2020 SP0 X64 dan disimpan dalam format (.STEP). Desain geometri silinder sirkular yang terbentuk terlihat pada gambar 3.1. Geometri silinder sirkular merupakan geometri yang berbentuk dua dimensi (2D) dengan variasi *smooth* dan *wire surface* dengan diameter sebesar 80 mm. Variasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah posisi *wire* pada sekeliling permukaan silinder, yaitu 90°, 100°, dan 110° dari arah datangnya aliran. Untuk diameter *wire* yang digunakan adalah sebesar 4 mm dan merupakan salah satu variabel tetap yang digunakan. Untuk geometri silinder dengan penambahan *wire* dapat dilihat pada gambar 3.2 hingga 3.4. Dilakukan pula variasi dengan rentang *Reynolds number* 6000 hingga 40000.



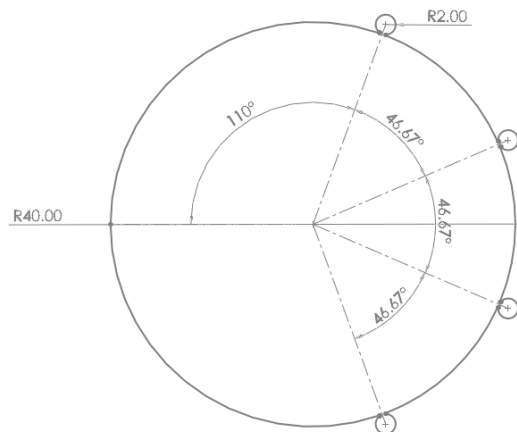
Gambar 3. 1 Dimensi *smooth* silinder sirkular dalam mm.



Gambar 3. 4 Dimensi *wire* sirkular silinder 90°.



Gambar 3. 3 Dimensi *wire* sirkular silinder 100°.



Gambar 3. 2 Dimensi *wire* silinder sirkular 110°.

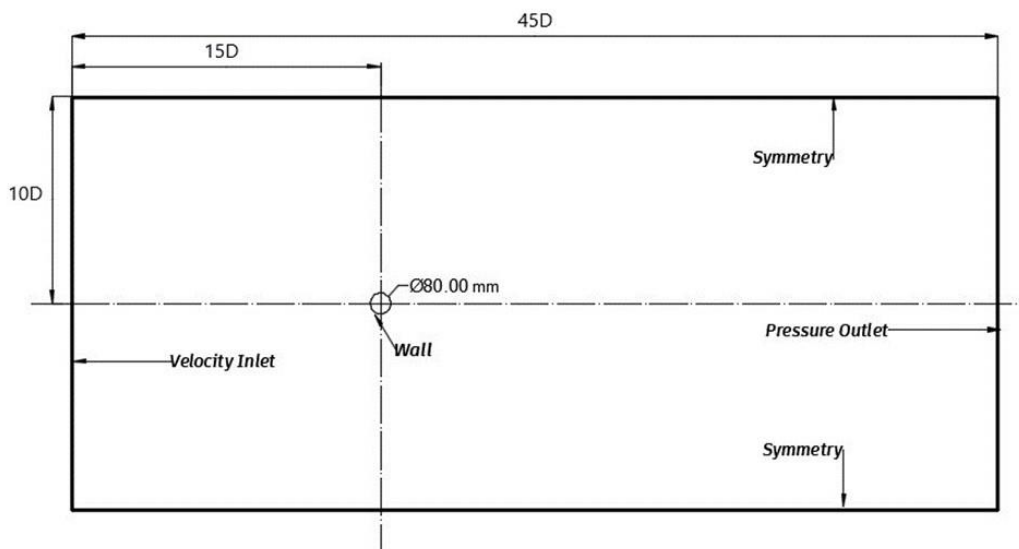
Variasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Variasi Penelitian

Parameter	Keterangan
Silinder	
Tipe silinder	Silinder sirkular
Diameter	80 mm

Wire	
Tipe wire	Silinder sirkular
Diameter	4 mm ($d/D = 0,05$)
Posisi	90°
	100°
	110°
Jumlah di setiap silinder utama	4 buah
Bilangan Reynolds	
Bilangan Reynolds	6000
	20000
	40000

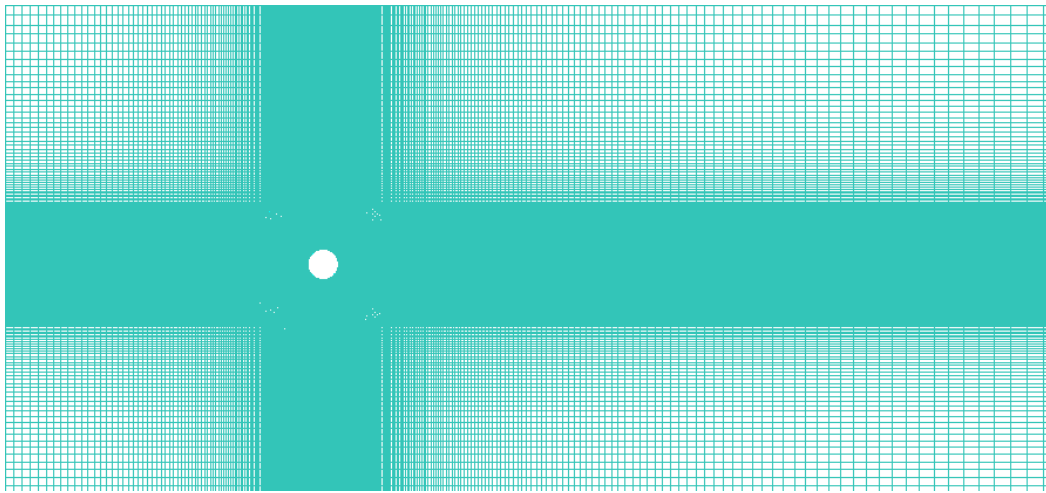
Domain yang digunakan pada simulasi ini memiliki dimensi panjang dan lebar masing-masing yaitu 45D dan 20D. Sedangkan untuk jarak antara *inlet* hingga pusat silinder adalah sebesar 15D dan jarak antara *outlet* sampai pusat silinder adalah 30D. Dimensi dan geometri domain simulasi dapat dilihat pada gambar 3.5. Dimensi yang terbentuk diukur dari titik pusat silinder sirkular. *Boundary condition* diberikan pada domain aliran agar *software* mampu mengenali elemen yang berkaitan dengan *boundary condition* tertentu. Penetapan ini dilakukan menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64 pada saat akan melakukan *meshing* pada domain.



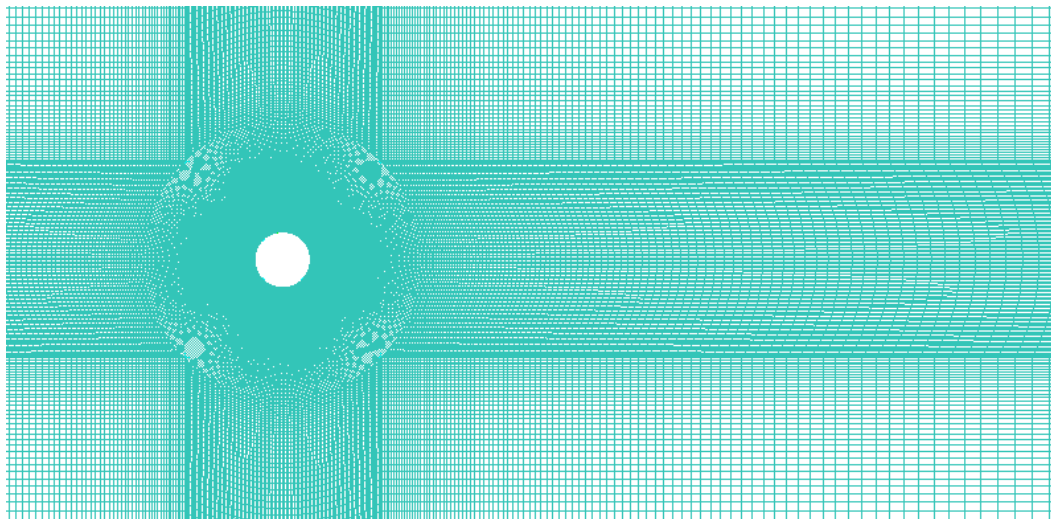
Gambar 3. 5 Domain simulasi.

3.2.2 Meshing dan Penentuan Kondisi Batas Simulasi

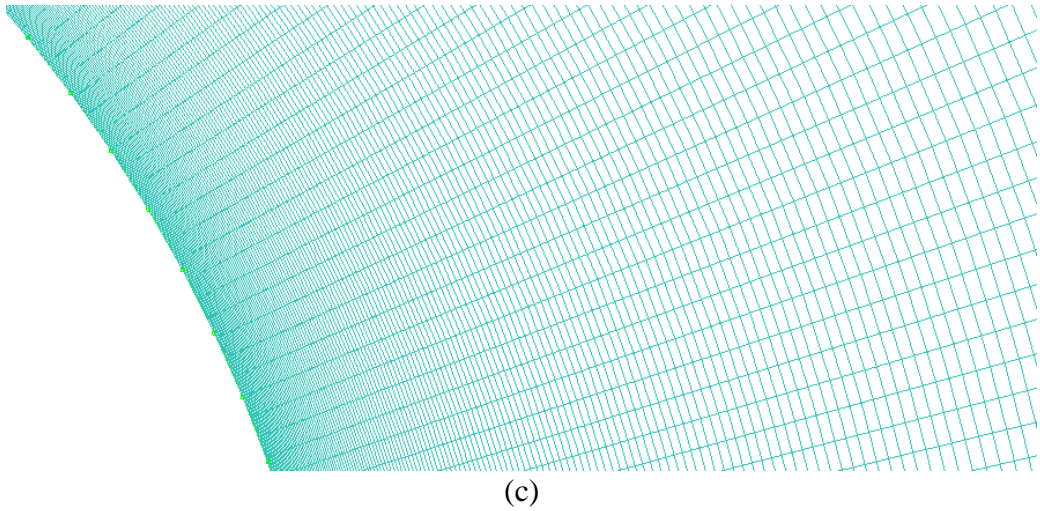
Domain aliran yang telah dibuat diekspor ke dalam bentuk data geometri domain dalam format (.STEP) ke ANSYS ICEM 2021 R2 X64 untuk proses *meshing*. *Meshing* adalah proses diskritisasi domain fluida yang kontinu menjadi domain komputasi yang diskrit sehingga dapat diselesaikan persamaan-persamaan aliran fluida di dalamnya dan menghasilkan solusi. Semakin kecil proses pencacahan, maka hasil luas permukaan yang diperoleh akan semakin akurat. Namun, jika pencacahan terlalu banyak, maka persamaan yang dihasilkan akan semakin banyak dan membutuhkan proses komputasi yang terlalu lama. Jenis *mesh* yang digunakan adalah *structured mesh* untuk kedua jenis variasi silinder, yaitu silinder *smooth surface* dan *wire surface*. *File meshing* kemudian disimpan dalam format (.uns).



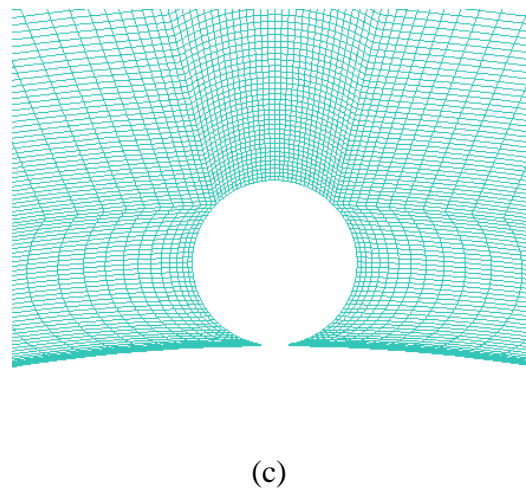
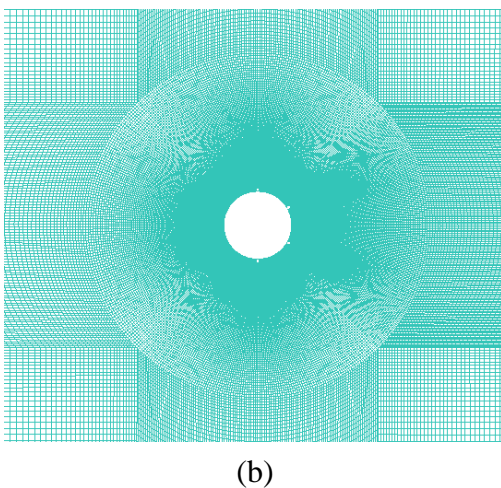
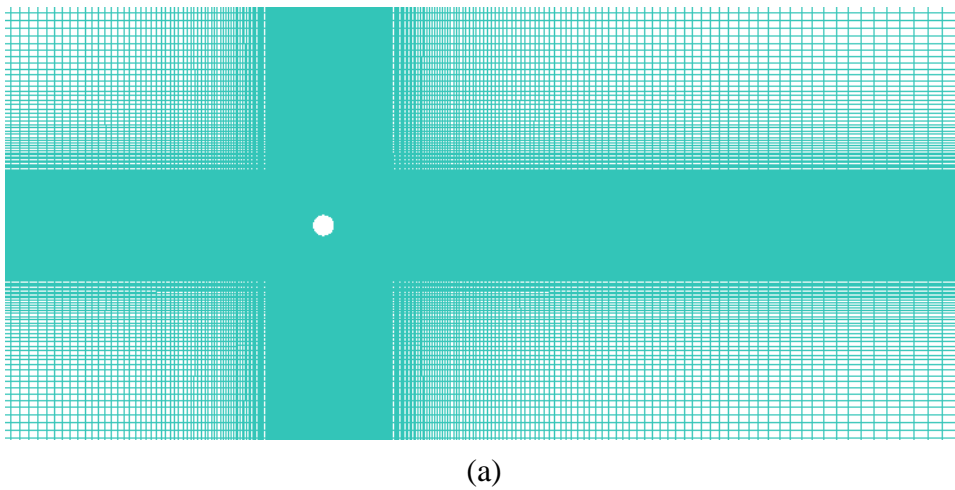
(a)



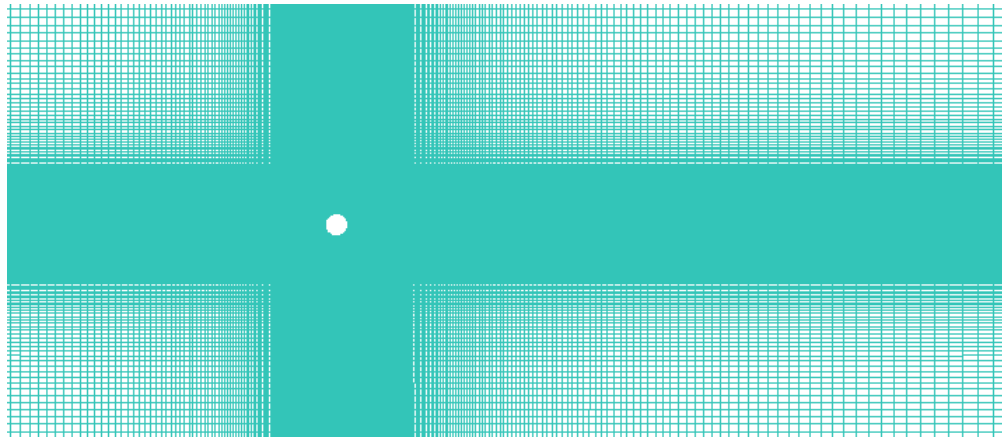
(b)



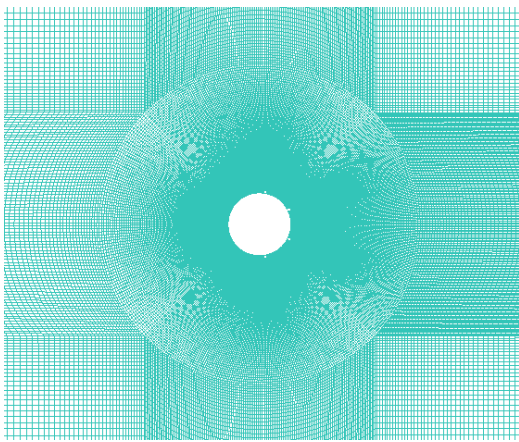
Gambar 3. 6 *Meshing* simulasi untuk *smooth cylinder* menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64; (a) keseluruhan domain simulasi; (b) perbesaran; (c) dekat silinder.



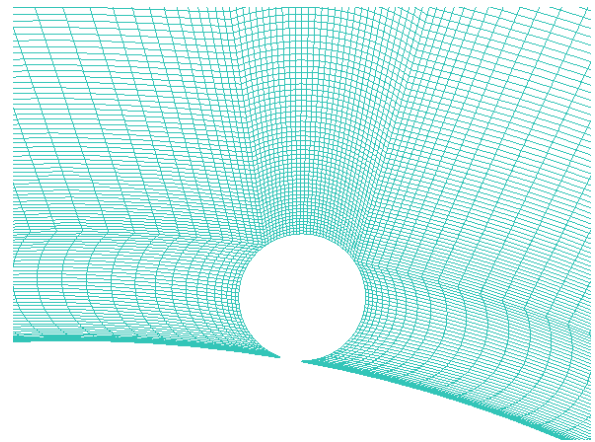
Gambar 3. 7 *Meshing* simulasi untuk *wire 90°* menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64; (a) keseluruhan domain simulasi; (b) perbesaran; (c) dekat *wire*.



(a)

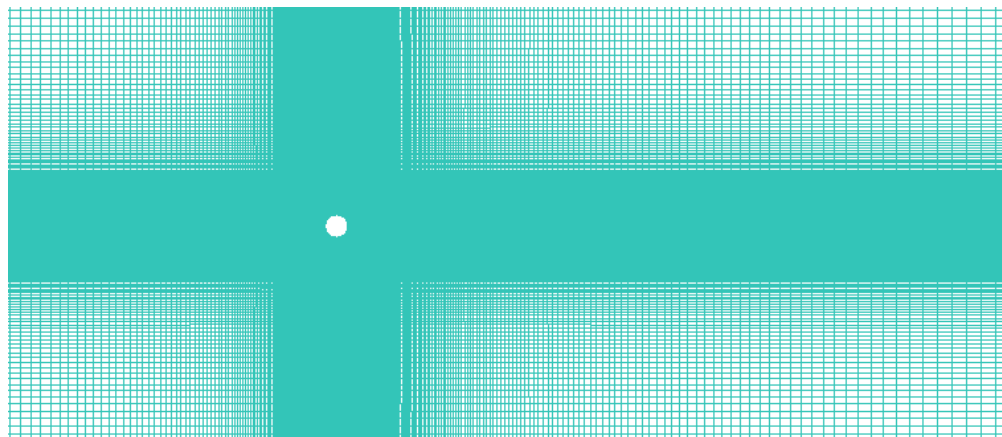


(b)

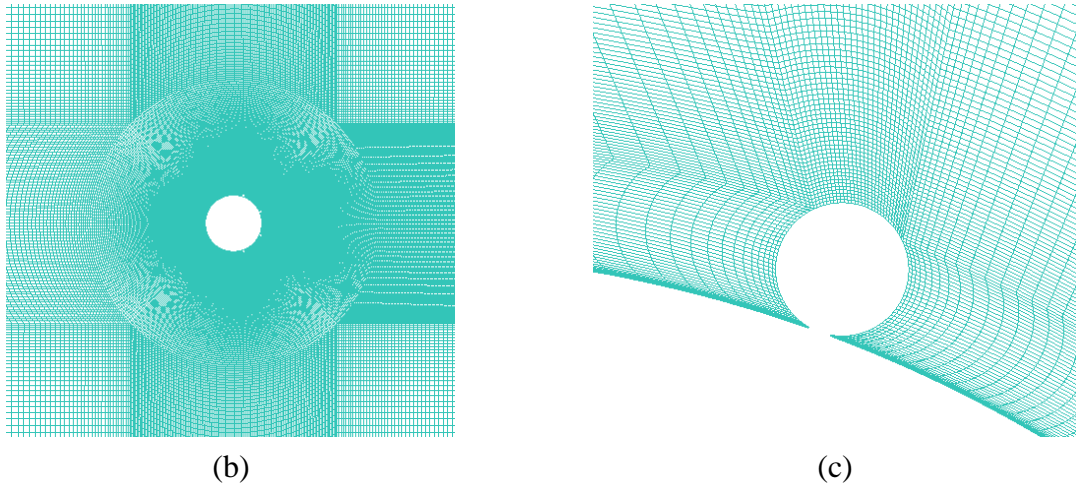


(c)

Gambar 3. 8 Meshing simulasi untuk *wire* 100° menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64; (a) keseluruhan domain simulasi; (b) perbesaran; (c) dekat *wire*.



(a)



Gambar 3. 9 Meshing simulasi untuk *wire* 110° menggunakan ANSYS ICEM 2021 R2 X64; (a) keseluruhan domain simulasi; (b) perbesaran; (c) dekat *wire*.

Selain untuk mendiskritkan domain simulasi, *meshing* juga berfungsi sebagai penentuan *control volume* domain simulasi yang akan diproses lebih lanjut pada *software* ANSYS FLUENT 2021 R2 X64. *Boundary condition* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. *Inlet* : *Velocity inlet*
- b. *Outlet* : *Pressure outlet*
- c. *Wall* : *Symmetry*
- d. *Silinder* : *Wall*

3.3 Solver / Processing

3.3.1 Penentuan Kondisi Fisis dan Properti Fluida

Setelah penentuan kondisi batas simulasi selesai dilakukan, domain simulasi dibuka pada ANSYS FLUENT 2021 R2 X64 untuk ditentukan kondisi fisis dan properti fluida. Pemodelan yang digunakan pada penelitian ini yaitu *pressure-based solver*, *transient* dan *viscous model K-Kl-Omega Input* Parameter pemodelan dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 *Input Parameter*

<i>Input Parameter</i>	
<i>Solver</i>	<i>Pressure based, K-ω SST</i>
Jenis fluida	Udara
<i>Pressure-velocity coupling scheme</i>	<i>Simple</i>
<i>Spatial discretization</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Residual Monitor</i>	10 ⁻⁵
<i>Initialization</i>	<i>Hybrid initialization</i>

Sedangkan untuk properti fluida yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut dalam tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Properties Fluida

Udara	
Tekanan	1 atm
Massa Jenis	1,184 kg/m ³
Temperatur	298,16 K
Viskositas Dinamik	1,849 kg/m-s

3.3.2 Timestep Size

Pada simulasi *unsteady* diperlukan nilai *timestep size* dalam melakukan proses iterasi dimana semakin kecil nilai *timestep size* maka semakin bagus dan teliti dalam menangkap fenomena *vortex shedding*. Nilai *timestep size* diperoleh dari perhitungan *Strouhal number*. Berdasarkan perhitungan dari persamaan 2.7 diperoleh nilai *Strouhal number* sebesar 0,189. Untuk penelitian ini silinder sirkular memiliki diameter (D) 80 mm dan kecepatan aliran udara bervariasi bergantung *Reynolds number*. Jika mengambil salah satu variasi dengan *Reynolds number* tertinggi, yaitu sebesar 40000 maka dapat diperoleh kecepatan (U) sebesar 7,80827703 m/s sehingga besaran nilai frekuensi dapat ditentukan.

Persamaan waktu siklus (t)

$$t = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

Dari persamaan 2.2 didapatkan frekuensi aliran yaitu sebesar 18,43404 Hz dan persamaan 3.1 digunakan untuk mendapatkan waktu siklus untuk kemudian mendapatkan nilai *timestep size*. Direkomendasikan bahwa untuk mendapatkan fenomena *vortex shedding* dapat menggunakan paling sedikit 20-25 *timestep* dalam satu siklus *shedding* atau dengan nilai *timestep size* ≈ 0 , yaitu pada penelitian ini digunakan *timestep size* sebesar 4×10^{-4} s.

Untuk *timestep size* yang digunakan pada variasi geometri dengan penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Timestep Size pada Variasi Wire

<i>Reynolds Number</i>	<i>Timestep Size</i>
6000	8×10^{-4}
20000	$4,8 \times 10^{-3}$
40000	7×10^{-4}

Perbedaan *timestep size* yang digunakan pada seluruh variasi *wire* bertujuan untuk mendapatkan nilai koefisien *drag* dan *lift* yang sesuai berdasarkan validasi yang dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi pada penelitian ini dengan eksperimen pada penelitian terdahulu.

3.4 Post Processing

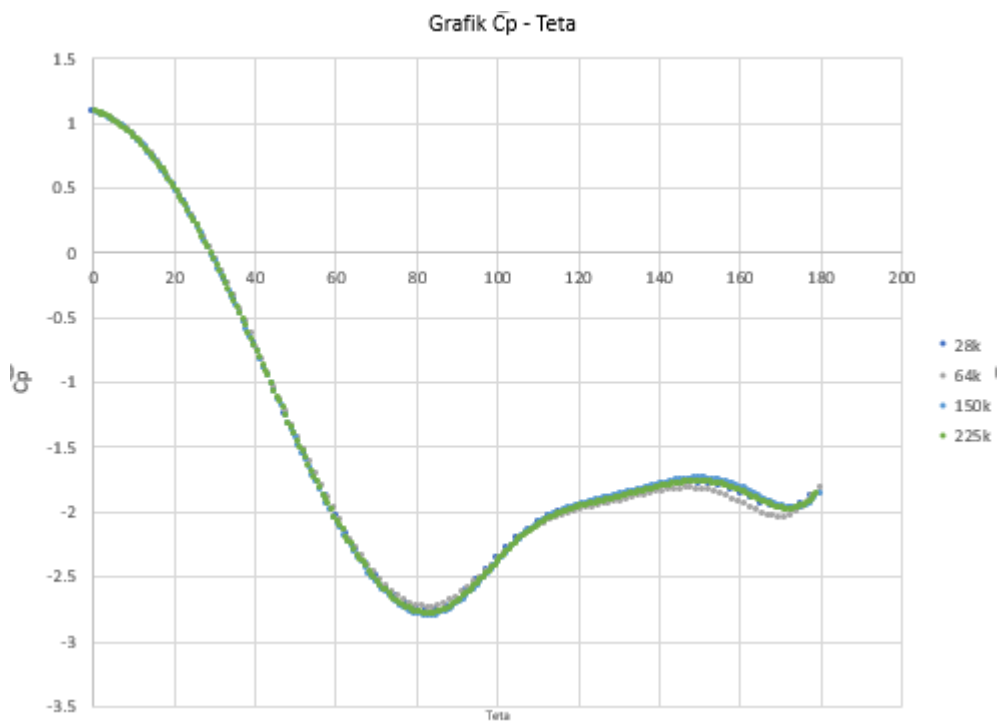
Pada tahap ini dilakukan analisis untuk data yang diperoleh pada tahap sebelumnya. Data yang akan dianalisis berupa *drag coefficient* dan *lift coefficient* yang terjadi berdasarkan kontur tekanan yang terbentuk.

3.4.1 Grid Independency Test

Grid independency test merupakan tahap yang dilakukan dengan cara membuat *mesh* dengan jumlah elemen yang berbeda mulai dari elemen yang sedikit hingga banyak dan akan menghasilkan kerapatan *grid* yang berbeda. *Grid independency test* bertujuan untuk menentukan *grid* paling optimal agar diperoleh hasil simulasi yang akurat dengan salah satu parameter sebagai acuannya. Data hasil simulasi dibandingkan dengan hasil simulasi konfigurasi acuan sehingga diperoleh hasil yang dinyatakan dalam presentase *error*. Presentase *error* ini merupakan *error* relatif dimana nilai *error* yang baru didapat dibandingkan terhadap nilai *error* yang didapat sebelumnya. Nilai yang dibandingkan pada *grid independency test* silinder adalah *mean drag coefficient* dan Y^+ maksimum. *Grid independency* dilakukan dalam kondisi *steady* dengan benda uji *smooth cylinder*. Hasil *grid independency test* pada silinder ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3. 5 *Grid Independency Test* pada *Smooth Cylinder*

<i>Mesh</i>	Jumlah Elemen <i>Mesh</i>	$\overline{C_D}$	$\overline{Y^+}$	<i>Error (%)</i>
M1	28956	1.2041	1.0463	-
M2	65854	1.2097	1.0247	1.0642
M3	155168	1.1945	1.0684	0.1924
M4	226126	1.1937	1.0869	0.0670



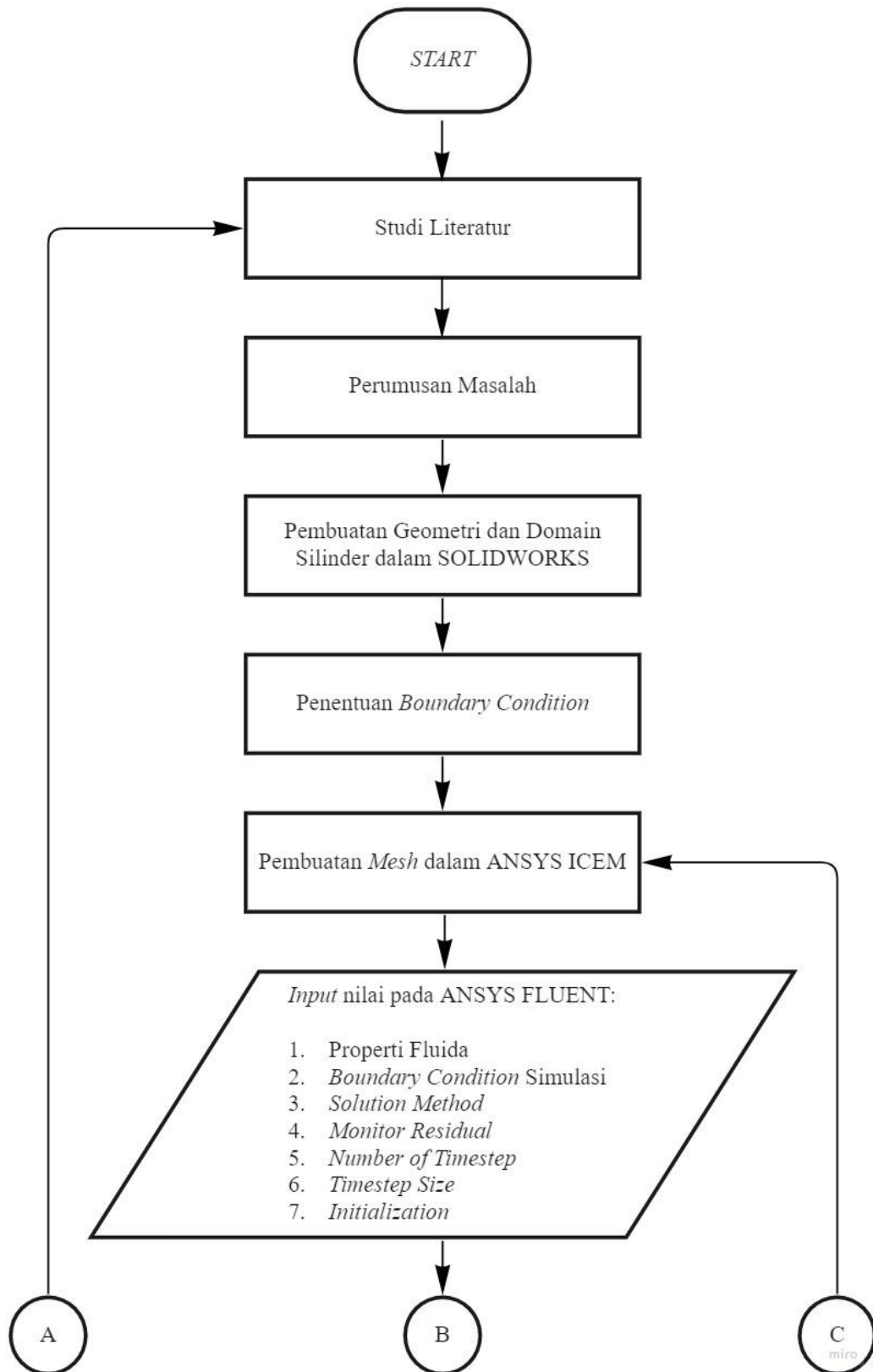
Gambar 3. 10 Grafik perbandingan *pressure coefficient* terhadap teta.

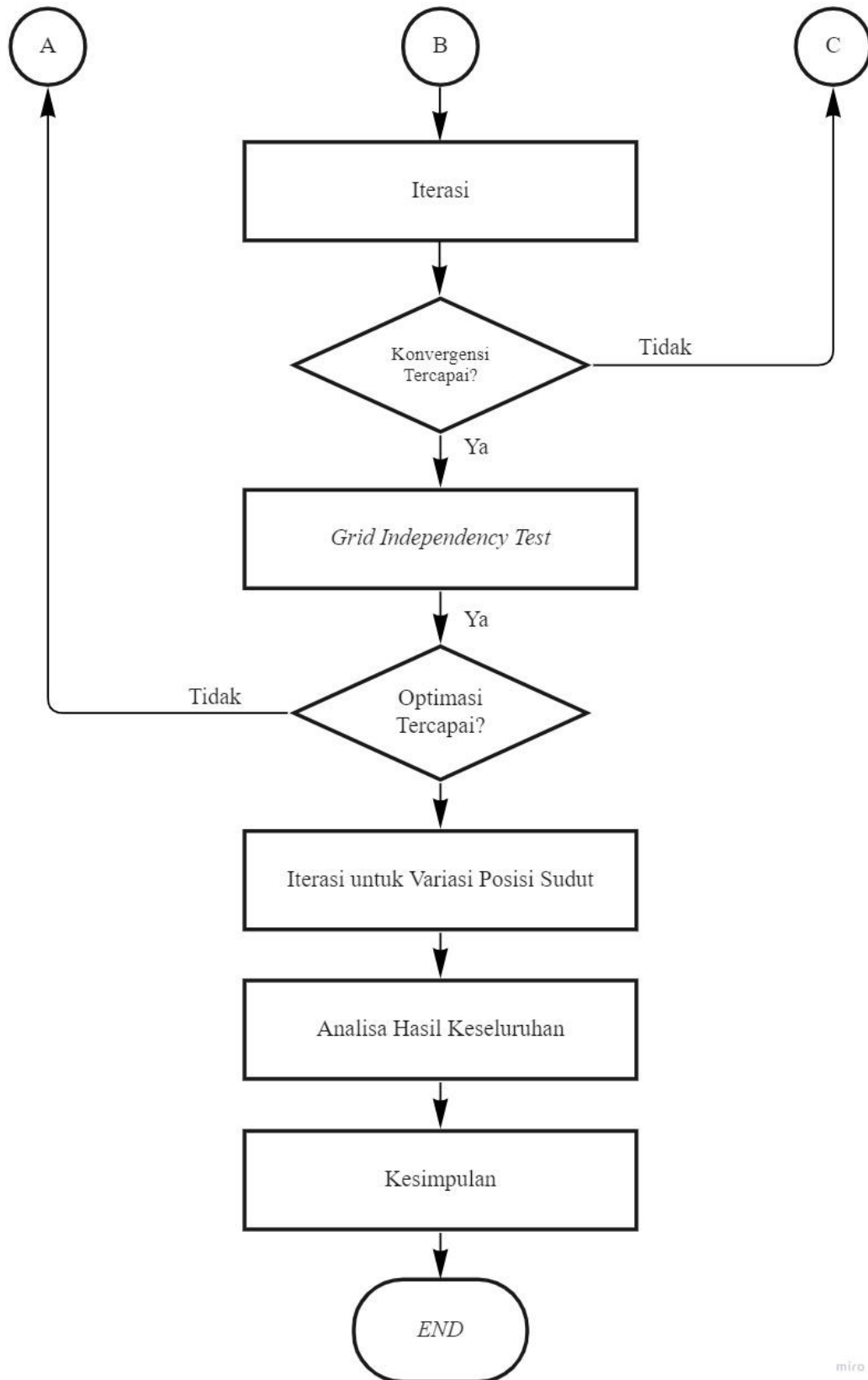
Berdasarkan grafik pada gambar 3.7 dan tabel 3.4, *mesh* yang digunakan pada simulasi ini adalah *mesh* dengan jumlah elemen sebesar 155168, karena *drag coefficient* yang dihasilkan sudah stabil dimana ketika jumlah *mesh* ditambah tidak menghasilkan perbedaan *coefficient of moment* yang besar dilihat dengan jumlah *error* yang kecil dan garis grafik *pressure coefficient*

(C_p) yang berhimpitan. Dan jika menggunakan *mesh* dengan jumlah elemen yang lebih banyak maka akan membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama untuk menjalankan simulasi. Oleh karena itu dipilih *mesh* yang efektif dan akurat, yaitu dengan jumlah elemen sebesar 155168.

3.5 Diagram Alir Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian yang dilakukan.





Gambar 3. 11 Diagram alir penelitian.

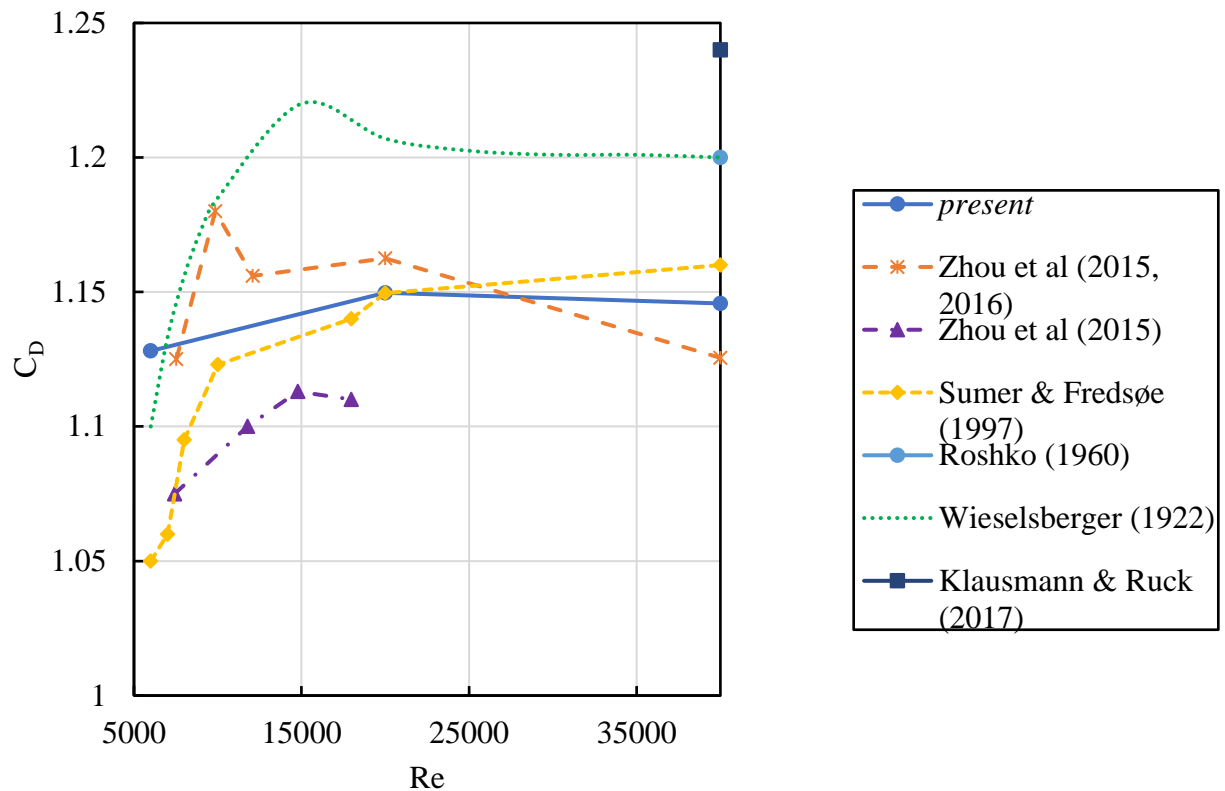
miro

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Analisa dan pembahasan dilakukan untuk menganalisis karakteristik aliran yang melintasi silinder sirkular dengan adanya pengaruh penambahan *wire* secara detail berdasarkan kajian simulasi numerik, yang meliputi data kuantitatif dan data kualitatif. Data simulasi numerik yang ditampilkan merupakan hasil *post processing*, yaitu distribusi koefisien *drag* (C_D), koefisien *lift* (C_L), koefisien *pressure* (C_P), dan *Strouhal number* (St), nilai fluktuasi koefisien *lift* (C_L'), kontur tekanan statis, dan kontur kecepatan yang dipadu dengan *streamline*. Data penelitian dilakukan pada bilangan Reynolds $6000 < Re < 40000$ dengan diameter silinder sirkular utama 80 mm dan diameter *wire* sebesar 4 mm. Penelitian ini fokus pada fenomena aliran yang terjadi pada silinder sirkular utama yang diberikan masing-masing empat buah *wire* pada bagian belakang silinder dengan variasi sudut lokasi penempatan *wire* pertama, yaitu 90° , 100° , dan 110° yang akan dibandingkan dengan silinder sirkular tanpa penambahan *wire*. Data yang diperoleh menggunakan *2D unsteady model turbulence viscous k- ω SST*.

4.1 Validasi

Model numerik yang telah dibuat dan disimulasikan perlu divalidasi. Validasi dilakukan untuk mengetahui apakah metode dan *set-up* simulasi yang digunakan sesuai dalam menggambarkan fenomena aliran dalam keadaan yang sebenarnya dan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh dari simulasi numerik yang didapatkan cukup akurat. Validasi dilakukan dengan membandingkan nilai $\overline{C_D}$ *cylinder* antara simulasi dengan beberapa eksperimen yang juga pernah melakukan penelitian pada *Reynolds number* yang sama atau mendekati nilai yang digunakan pada penelitian ini. Validasi dilakukan terhadap data yang diperoleh dari beberapa hasil penelitian eksperimen dengan geometri *smooth circular cylinder* dari penelitian yang dilakukan oleh Zhou *et al* (2015), Zhou *et al* (2016), Sumer & Fredsoe (1997), Roshko (1960), Wieselsberger (1922), Klaussman & Ruck (2017) dan penelitian simulasi dengan geometri *smooth circular cylinder* dari penelitian yang dilakukan oleh Guinness *et al* (2021). Hasil pengukuran yang didapatkan berupa nilai rata-rata koefisien *drag* pada beberapa nilai *Reynolds Number*.



Gambar 4. 1 Grafik perbandingan koefisien drag (C_D) terhadap *Reynolds number*.

Gambar 4.1 memperlihatkan grafik perbandingan nilai 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 C_D sekitar 1,15 pada Reynolds Number 20.000 dan 40.000 yang menandakan bahwa C_D *present* mampu menduplikasi tren grafik Wieselsberger (1922) pada bilangan Reynolds 20000 dan 40000. Adapun pada $Re = 6.000$, nilai 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 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. Hal ini disebabkan salah satunya karena ukuran diameter *smooth circular cylinder* yang digunakan berbeda pada setiap penelitian.

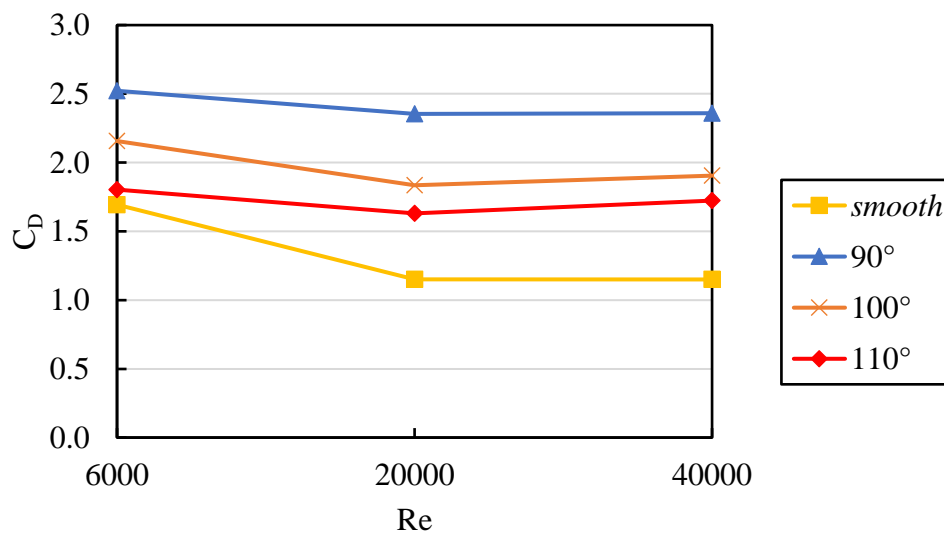
4.2 Analisis Perbandingan Koefisien Drag (C_D) pada *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap *Reynolds Number*

Pada penelitian ini dilakukan analisis aliran melewati silinder sirkular dengan variasi penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular yang terdiri atas beberapa variasi lokasi penempatan *wire* pertama, yaitu pada 90° , 100° , dan 110° . Untuk membandingkan hasil dari penelitian ini sebagai bahan validasi maka perlu dianalisis terlebih dahulu aliran melewati silinder sirkular, salah satunya adalah mengetahui nilai kuantitatif dari koefisien drag. Koefisien drag (C_D) sendiri merupakan bilangan yang menunjukkan besar kecilnya tahanan fluida yang diterima oleh suatu benda. Harga koefisien drag yang kecil menunjukkan hambatan fluida yang diterima benda saat berjalan adalah kecil dan begitu juga sebaliknya. Nilai C_D

sangat bergantung pada bentuk dari suatu geometri. Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif rata-rata berupa koefisien *drag* (C_D) yang diperoleh dari simulasi numerik yang telah dilakukan pada bilangan Reynolds sebesar 6000, 20000, dan 40000.

Tabel 4. 1 Perbandingan Koefisien *Drag* (C_D) pada *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap *Reynolds Number*

<i>Reynolds Number</i>	C_D			
	<i>Smooth</i>	<i>Wire 90°</i>	<i>Wire 100°</i>	<i>Wire 110°</i>
6000	1,694	2,522	2,157	1,803
20000	1,151	2,354	1,835	1,631
40000	1,150	2,359	1,904	1,722



Gambar 4. 2 Grafik perbandingan C_D pada *smooth cylinder* dengan *wire cylinder* terhadap *Reynolds number*.

Tabel 4.1 yang didukung dengan grafik yang tercantum dalam gambar 4.2 menunjukkan perbandingan koefisien *drag* yang yang dihasilkan dari *smooth cylinder* dan *wire cylinder* bahwa terjadi kenaikan koefisien *drag* pada masing-masing variasi geometri jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Pada bilangan Reynolds 6000 didapat nilai koefisien *drag* pada *smooth cylinder* adalah sebesar 1,694, pada *wire 90°* sebesar 2,522, *wire 100°* sebesar 2,157, dan pada *wire 110°* sebesar 1,803. Dengan data tersebut dapat diketahui bahwa grafik perbandingan C_D pada bilangan Reynolds 6000 telah terjadi kenaikan pada seluruh variasi dengan penambahan *wire*nya, yaitu pada lokasi penempatan *wire 90°* terjadi kenaikan sebesar 48,87%, pada 100° terjadi kenaikan sebesar 27,33%, dan pada 110° terjadi kenaikan sebesar 6,43%. Sedangkan pada bilangan Reynolds 20000 silinder sirkular tanpa variasi atau *smooth cylinder* memiliki nilai koefisien *drag* sebesar 1,151 dengan kenaikan yang juga terjadi pada variasi geometri lainnya, yaitu pada silinder sirkular dengan penambahan *wire 90°* memiliki nilai koefisien *drag* sebesar 2,354 yang mengartikan bahwa telah terjadi kenaikan sebesar 104,5%, pada *wire 100°* nilai koefisien *drag* berada pada rata-rata 1,835 yang apabila dibandingkan dengan *smooth cylinder* maka dapat dijelaskan bahwa telah terjadi kenaikan sebesar 68,4%, dan pada *wire 110°* koefisien *drag* mencapai nilai 1,631 dengan kenaikan sebesar 48% jika dibandingkan dengan

smooth cylinder. Serta pada bilangan Reynolds 40000 nilai koefisien *drag* pada *smooth cylinder* mencapai 1,150 dengan kenaikan yang terjadi pada variasi penambahan *wire* di 90° sebesar 105,13% dengan nilai koefisien *drag* 2,359, sedangkan pada *wire* 100° nilai koefisien *drag* mencapai 1,904 yang mengindikasikan bahwa telah terjadi kenaikan sebesar 75,4% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, serta pada penambahan *wire* dengan peletakan pertamanya di sudut 110° memiliki nilai koefisien *drag* sebesar 1,722 dan nilai tersebut menandakan bahwa telah terjadi kenaikan sebesar 57,2% dari koefisien *drag* pada *smooth cylinder*.

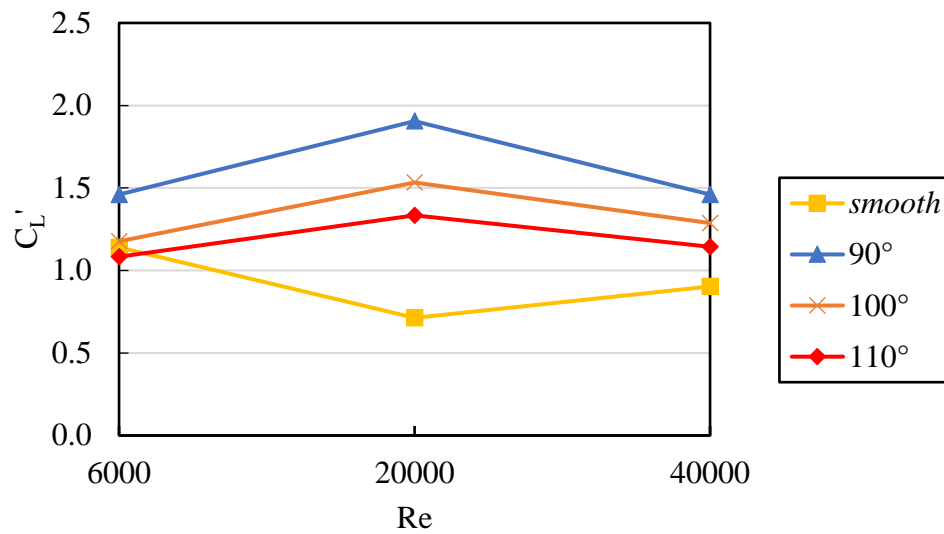
Kenaikan nilai koefisien *drag* maksimum terjadi pada variasi geometri penambahan *wire* dengan peletakan *wire* pertama di sudut 90° yaitu pada bilangan Reynolds 20000. Sedangkan kenaikan nilai koefisien *drag* minimum terjadi pada variasi geometri dengan *wire* pertama pada sudut 110° dengan bilangan Reynolds 6000. Kenaikan koefisien *drag* dapat terjadi akibat dari luas permukaan silinder yang diberi tambahan *wire* bertambah sekitar 8,8% jika dibandingkan dengan silinder sirkular tanpa *wire* atau *smooth cylinder*. Penambahan *wire* pada sudut 90° menyebabkan aliran di bagian belakang silinder menjadi sangat kacau dan memiliki intensitas turbulensi yang sangat tinggi, hal ini juga menjadi salah satu penyebab nilai koefisien *drag* pada *wire* dengan posisi sudut 90° mengalami kenaikan yang sangat signifikan jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Sedangkan pada variasi geometri dengan peletakan *wire* pertama di sudut 110° tidak memiliki pengaruh yang cukup signifikan pada aliran di belakang silinder.

4.3 Analisis Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') pada *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap Reynolds Number

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa nilai rata-rata koefisien lift RMS (C_L') yang diperoleh dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan. Nilai koefisien lift RMS (C_L') didapatkan dari perhitungan akar kuadrat dari total seluruh nilai koefisien lift (C_L) yang dihasilkan oleh simulasi numerik pada *software* ANSYS FLUENT 2021 R2 X64. Perhitungan akar kuadrat digunakan untuk menghindari perhitungan nilai negatif pada koefisien lift sesungguhnya. Koefisien lift (C_L) sendiri merupakan koefisien tak berdimensi yang menghubungkan gaya angkat yang dihasilkan oleh benda pengangkat dengan densitas fluida di sekitar benda, kecepatan fluida, dan area referensi terkait.

Tabel 4. 2 Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') pada *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap Reynolds Number

<i>Reynolds Number</i>	C_L' (RMS)			
	<i>Smooth</i>	<i>Wire 90°</i>	<i>Wire 100°</i>	<i>Wire 110°</i>
6000	1,140	1,460	1,177	1,083
20000	0,713	1,905	1,553	1,334
40000	0,903	1,460	1,287	1,143



Gambar 4. 3 Grafik perbandingan C_L' pada *smooth cylinder* dengan *wire cylinder* terhadap *Reynolds number*.

Pada tabel 4.2 yang kemudian didukung dengan grafik pada gambar 4.3 dapat diketahui bahwa rata-rata telah terjadi kenaikan pada koefisien *lift* RMS (C_L') di setiap variasi geometri dan bilangan Reynolds jika dibandingkan dengan nilai C_L' pada *smooth cylinder*. Pada bilangan Reynolds 6000 nilai koefisien *lift* RMS pada *smooth cylinder* adalah sebesar 1,140 kemudian mengalami kenaikan sebesar 32% ketika diberikan variasi penambahan *wire* dengan sudut peletakan *wire* pertama di 90° dengan nilai C_L' sebesar 1,460, sedangkan pada *wire* 100° nilai koefisien *lift* RMS (C_L') mencapai 1,177 atau telah mengalami kenaikan sebesar 3,7% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, serta pada *wire* 110° nilai koefisien *lift* RMS (C_L') mencapai 1,083 yang mengindikasikan bahwa telah terjadi penurunan gaya angkat jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Sedangkan pada bilangan Reynolds 20000, peningkatan maksimum terjadi pada variasi geometri dengan penambahan *wire* pada sudut 90° yaitu dengan nilai C_L' sebesar 1,905 atau telah terjadi kenaikan sebesar 167,18%, kemudian untuk *wire* 100° mengalami peningkatan sebesar 117,8% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* yaitu dengan nilai C_L' sebesar 1,553, sedangkan pada *wire* 110° peningkatan terjadi sebesar 87,09% dengan nilai C_L' mencapai 1,334. Nilai koefisien *lift* RMS (C_L') pada bilangan Reynolds 40000 juga mengalami peningkatan di setiap variasi geometri dengan penambahan *wire* jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* yang memiliki nilai C_L' sebesar 0,903, seperti yang terjadi pada *wire* dengan sudut peletakan *wire* pertamanya di 90° yang mengalami peningkatan sebesar 61,68% dengan nilai C_L' sebesar 1,460, sedangkan pada *wire* 100° memiliki nilai koefisien *lift* RMS (C_L') sebesar 1,143 dengan peningkatan sebesar 26,57% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*.

Peningkatan nilai koefisien *lift* RMS (C_L') maksimum terjadi pada variasi geometri dengan penambahan *wire* pertamanya di sudut 90° pada bilangan Reynolds 20000. Sedangkan juga terjadi penurunan C_L' pada variasi *wire* 110° pada bilangan Reynolds 6000. Peningkatan C_L' terjadi akibat silinder sirkular yang bergetar hebat setelah diberi penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular. Penambahan *wire* mengacaukan aliran di bagian belakang silinder sehingga terbentuk *vortex shedding* yang semakin asimetris dan menimbulkan intensitas turbulensi yang tinggi di bagian belakang silinder. Hal tersebut memicu kenaikan pada gaya *lift* sehingga frekuensi yang dimiliki oleh silinder sirkular yang bergetar juga semakin tinggi. Penurunan yang terjadi pada variasi geometri dengan *wire* pada sudut 110° mengindikasikan

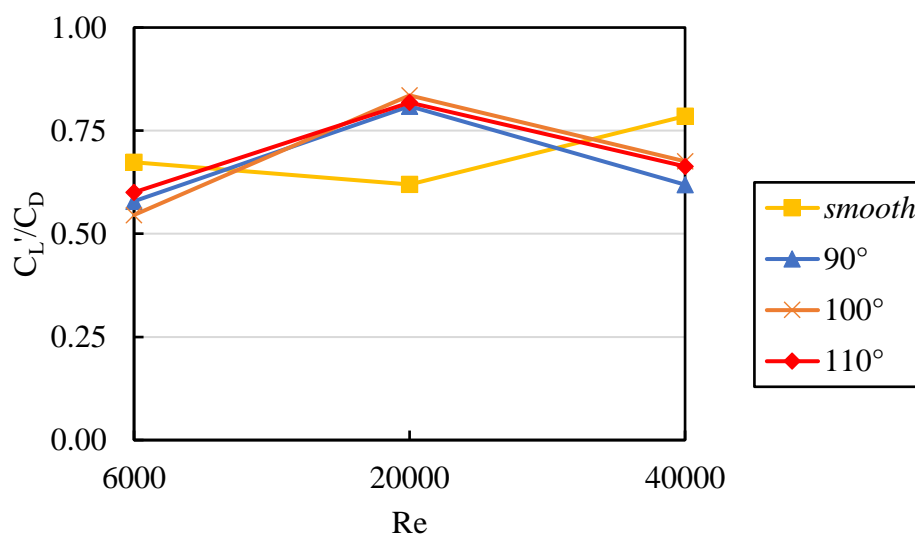
bahwa penempatan *wire* pertama yang terlalu ke belakang silinder yaitu sejauh 110° kurang dapat memberikan dampak kepada fenomena aliran di bagian belakang silinder.

4.4 Analisis Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') dan Koefisien Drag (C_D) antara *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap Reynolds Number

Penambahan *wire* pada penelitian ini memiliki pengaruh terhadap distribusi nilai koefisien gaya aerodinamis yaitu *drag coefficient* dan juga *lift coefficient* yang selanjutnya dihitung dan didefinisikan sebagai *lift coefficient* RMS (C_L'), hal ini dikarenakan penambahan *wire* dapat meningkatkan terjadinya transisi *boundary layer* dari laminar ke turbulen, hal ini juga menyebabkan pembentukan separasi menjadi lebih lambat dibandingkan pada *smooth cylinder*. Penempatan posisi *wire* juga memiliki pengaruh terhadap hasil dari penelitian, dimana ketika *wire* diletakkan di bagian belakang silinder akan menyebabkan peningkatan signifikan terhadap *lift coefficient* dimana *lift coefficient* sendiri memiliki peranan penting terhadap besar kecilnya amplitudo yang berdampak pada jumlah energi yang terbentuk dari pemanfaatan fenomena aliran ini. Peningkatan *lift* pada kenyataannya diikuti pula dengan peningkatan pada *drag coefficient* (C_D) seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1 dan gambar 4.2. Pada subbab ini menampilkan perbandingan antara koefisien lift RMS (C_L') dan koefisien drag (C_D) untuk mengetahui efektifitas penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular.

Tabel 4. 3 Perbandingan Koefisien Lift RMS (C_L') dan Koefisien Drag (C_D) antara *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap Reynolds Number

Reynolds Number	C_L' / C_D			
	Smooth	Wire 90°	Wire 100°	Wire 110°
6000	0,6371	0,5789	0,5456	0,6005
20000	0,6195	0,8093	0,8354	0,8181
40000	0,7852	0,6190	0,6759	0,6636



Gambar 4. 4 Grafik perbandingan koefisien lift RMS (C_L') dan koefisien drag (C_D) antara *smooth cylinder* dengan *wire cylinder* terhadap Reynolds number.

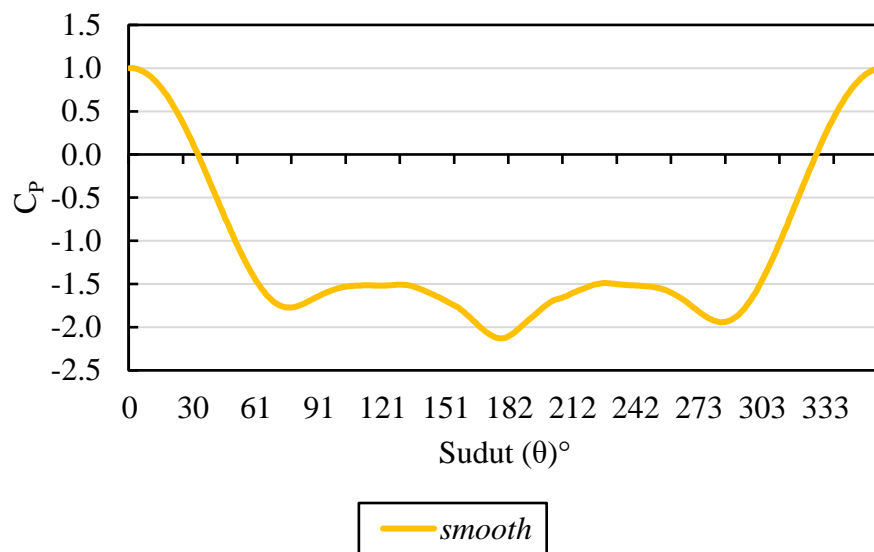
Perbandingan koefisien *lift* RMS (C_L') dan koefisien *drag* (C_D) pada tabel 4.3 dan gambar 4.4 menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan rasio pada variasi geometri dengan penambahan *wire* ketika dibandingkan dengan *smooth cylinder* pada bilangan Reynolds 6000 dan 40000. Hal tersebut diakibatkan oleh terjadinya kenaikan koefisien *drag* yang lebih tinggi daripada kenaikan koefisien *lift*. Pada bilangan Reynolds 6000 perbandingan dari nilai C_L' dan C_D adalah 0,6371 mengalami penurunan pada setiap variasi penambahan *wire*, baik pada *wire* 90°, 100°, dan 110°. Dimana pada variasi *wire* 90° nilai C_L' / C_D mengalami penurunan sebesar 9,1% dengan besar rasio 0,5789, sedangkan pada *wire* 100° mengalami penurunan sebesar 14,36% dengan besar rasio 0,5456, dan pada *wire* 110° juga mengalami penurunan sebesar 5,7% dengan besar rasio 0,6005. Hal berbeda ditunjukkan pada rasio C_L' / C_D pada bilangan Reynolds 20000, dimana telah terjadi kenaikan untuk setiap penambahan variasi *wire* di belakang silinder jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* yang memiliki besar rasio C_L' / C_D 0,6195. Pada *wire* 90° telah terjadi kenaikan sebesar 30,6% dengan besar rasio 0,8093, sedangkan pada *wire* 100° memiliki besar rasio C_L' / C_D 0,8354 yang mengindikasikan bahwa telah terjadi kenaikan rasio sebesar 34,85%, serta pada *wire* 110° yang memiliki besar rasio C_L' / C_D 0,8181 juga telah mengalami kenaikan sebesar 31,05% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* pada bilangan Reynolds yang sama. Sama seperti halnya pada bilangan Reynolds 6000, pada bilangan Reynolds 40000 rasio C_L' / C_D juga mengalami penurunan yakni berkisar antara 13,92% hingga 21,16% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* yang memiliki nilai rasio C_L' / C_D sebesar 0,7852. Besar rasio atau perbandingan C_L' / C_D pada *wire* 90° mencapai 0,6190, sedangkan pada *wire* 100° mencapai 0,6759, dan pada *wire* 110° mencapai 0,6636.

Gaya *lift* dan *drag* merupakan dua gaya aerodinamis yang tumbuh secara resultan, sehingga pada kondisi umumnya, ketika terjadi kenaikan koefisien *drag* maka akan diiringi pula dengan kenaikan koefisien *lift*, begitu juga sebaliknya. Gaya *drag* merupakan gaya yang bersifat cenderung negatif pada sebuah struktur, karena semakin besar gaya *drag* menandakan bahwa gaya hambat aliran yang melewati suatu benda juga semakin besar, hal tersebut akan berdampak buruk bagi efisiensi dan performa suatu struktur pembangkit. Rasio C_L' / C_D yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *smooth cylinder* mengindikasikan bahwa pertumbuhan kenaikan dari nilai C_D pada beberapa variasi tertentu, seperti pada bilangan Reynolds 6000 dan 40000 jauh lebih besar dibandingkan dengan kenaikan yang dialami oleh koefisien *lift*. Dari grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.4 terlihat bahwa telah terjadi kenaikan rasio C_L' / C_D pada bilangan Reynolds 20000 sedangkan pada bilangan Reynolds 6000 dan 40000 justru mengalami penurunan jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal ini menandakan bahwa secara sekilas pemberian variasi geometri dengan menambahkan *wire* di bagian belakang silinder dapat berfungsi secara efektif pada bilangan Reynolds 20000 tersebut, karena nilai koefisien *drag* yang diiringi dengan kenaikan nilai koefisien *lift* RMS (C_L') yang besar sangat berdampak lebih baik untuk menghasilkan energi yang diharapkan.

4.5 Analisis Perbandingan Distribusi Koefisien *Pressure* (C_p) pada *Smooth Cylinder* dengan *Wire Cylinder* terhadap *Reynolds Number*

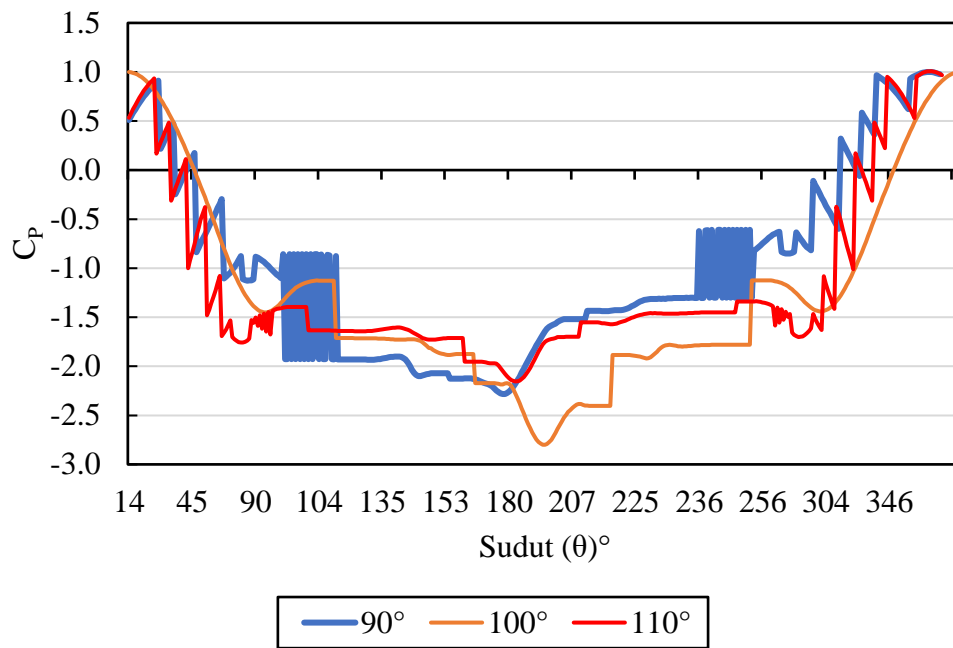
4.5.1 Perbandingan Koefisien *Pressure* (C_p) antara *Smooth Cylinder* dan *Wire Cylinder* pada $Re = 6000$

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien *pressure* (C_p) pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder* pada bilangan Reynolds 6000. Nilai koefisien *pressure* didapat dengan mengambil dua belas titik pada masing-masing satu gelombang di seluruh variasi silinder sirkular. Distribusi koefisien *pressure* menggambarkan fluktuasi atau perubahan tekanan di sepanjang sudut azimuth pada silinder sirkular.



Gambar 4. 5 Grafik distribusi koefisien *pressure* (C_p) *smooth cylinder* pada $Re = 6000$.

Gambar 4.5 menunjukkan distribusi koefisien *pressure* (C_p) *smooth cylinder* yang diuji pada bilangan Reynolds 6000, dimana koefisien *pressure* dilihat terhadap sudut azimuth pada silinder sirkular. Dari gambar 4.4 diketahui bahwa pada titik 0° nilai C_p mencapai 1 yang mana merupakan nilai maksimum dari seluruh distribusi koefisien *pressure* yang ditampilkan pada grafik. Titik tersebut kemudian disebut sebagai titik stagnasi dimana aliran memiliki kecepatan sama dengan nol atau minimum dengan tekanan maksimum. Setelah berada pada titik stagnasi, aliran fluida yang melintasi permukaan silinder sirkular mengalami akselerasi atau percepatan secara signifikan hingga mencapai kecepatan maksimumnya pada sudut 78° . Pada keadaan tersebut aliran mengalami percepatan maksimal karena melintasi area *favourable pressure gradient* dimana aliran tersebut serupa dengan bentuk dan sifat dari *nozzle*, hal tersebut ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanannya mencapai nilai terendah sebesar -1,67 pada posisi *upper side*, sedangkan pada posisi *lower side* kecepatan maksimum terjadi ketika mencapai posisi sudut 283° . Setelah itu aliran yang melintasi permukaan silinder sirkular mengalami perlambatan akibat pengaruh *adverse pressure gradient* yang ditandai dengan adanya peningkatan tekanan. Ketika aliran tidak lagi mampu melawan *adverse pressure gradient* maka terjadilah separasi, dimana aliran akan lepas dari permukaan silinder sirkular dan membentuk daerah *wake* pada sudut $92,60^\circ$ untuk *upper side* dan $269,13^\circ$ untuk *lower side*.



Gambar 4. 6 Grafik perbandingan distribusi koefisien *pressure* (C_p) *wire cylinder* pada $Re = 6000$.

Sebagai pembandingan dengan *smooth cylinder* telah ditampilkan pada gambar 4.6 grafik distribusi koefisien *pressure* (C_p) untuk variasi silinder sirkular dengan penambahan *wire* di bagian belakang. Jika dilihat secara sekilas, maka nampak perbedaan yang sangat signifikan dengan *smooth cylinder* dimana terjadi fluktuasi yang tinggi pada distribusi koefisien *pressure* pada *wire cylinder*. Hal tersebut diakibatkan oleh perubahan titik stagnasi yang terus-menerus sepanjang fluida mengalir dan melewati silinder sirkular. Perubahan titik stagnasi diakibatkan karena munculnya *vortex* saat aliran mencapai puncak maupun lembah *lift*. *Vortex* yang dihasilkan sangat asimetris sehingga aliran di belakang silinder menjadi sangat tidak stabil atau kacau dan mengakibatkan aliran yang mengenai silinder sirkular menjadi tidak stabil atau bergetar. Hal tersebutlah yang kemudian ditampilkan pada grafik koefisien *pressure* pada gambar 4.6.

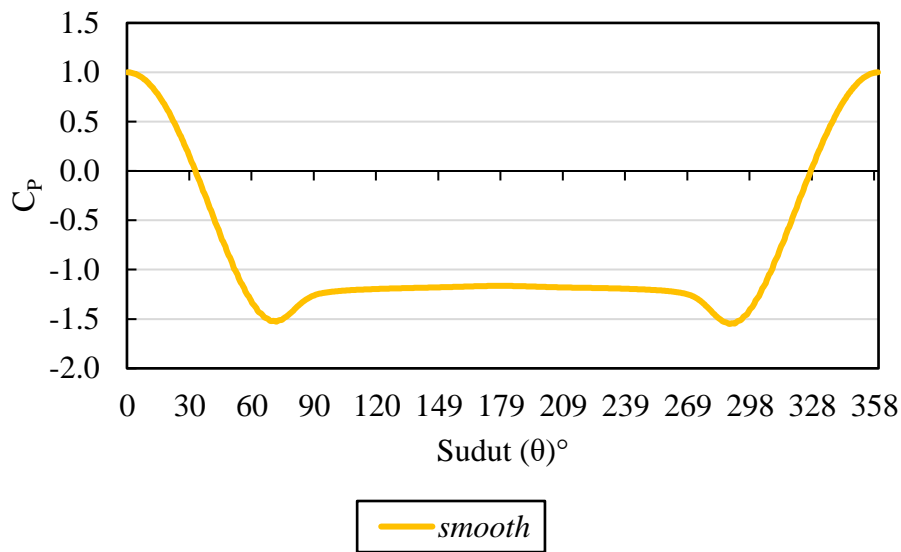
Pada grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.6 dapat diketahui bahwa telah terjadi perbedaan dimulainya titik stagnasi dan juga separasi aliran fluida. Hal tersebut diakibatkan oleh peletakan *wire* pada masing-masing variasi geometri silinder sirkular yang berbeda. Secara sekilas, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan grafik nilai koefisien *pressure* yang signifikan pada peletakan *wire* di sudut 90° dengan sudut lainnya, hal ini disebabkan peletakan *wire* pada sudut 90° menimbulkan terjadinya *bubble separation*. *Bubble separation* sendiri merupakan separasi atau pemisahan yang secara langsung yang terjadi akibat adanya perubahan kelengkungan yang tiba-tiba pada suatu permukaan benda yang dilewati oleh suatu aliran, kondisi tersebut menyebabkan aliran terseparasi sekaligus membentuk *bubble* di sekitar daerah separasi. Untuk silinder sirkular dengan variasi penambahan *wire* yang dimulai pada sudut 90° , diketahui bahwa telah terjadi titik stagnasi atau saat kecepatan aliran mencapai batas minimumnya dan tekanan mencapai batas maksimumnya pada posisi sudut azimuth 360° , yaitu pada *lower side* silinder sirkular dengan nilai koefisien *pressure* mencapai nilai maksimum 1. Sedangkan pada variasi *wire* 100° titik stagnasi berada pada posisi sudut azimuth $359,70^\circ$ dengan nilai koefisien *pressure* maksimum sebesar 1. Serta pada silinder sirkular dengan variasi *wire* 110° , aliran mengalami stagnasi atau mencapai kecepatan minimumnya pada posisi sudut 360°

dengan nilai koefisien *pressure* 1. Setelah melewati titik stagnasi aliran mengalami percepatan akibat adanya efek *nozzle* hingga mencapai kondisi minimum koefisien *pressure* sebesar -0,939 untuk variasi *wire* 90°, kondisi tersebut terjadi tepat pada saat aliran berada pada posisi sudut azimuth 75,96° dan 284,04° untuk sisi bawah silinder sirkular dengan nilai koefisien *pressure* sebesar -0,663. Sedangkan pada variasi penambahan *wire* di sudut 100°, percepatan terjadi hingga mencapai nilai koefisien *pressure* sebesar -1,319 dengan posisi sudut 71,96° pada *upper side* dan -1,312 dengan posisi sudut 289,58° pada *lower side*. Dan untuk percepatan aliran fluida yang dialami oleh silinder dengan variasi penambahan *wire* 110° terjadi hingga aliran mencapai posisi sudut 75,96° dengan nilai koefisien *pressure* sebesar -1,655 pada sisi atas silinder, serta -1,598 dengan posisi sudut 284,04° pada sisi bawah silinder sirkular.

Setelah itu aliran fluida bertemu dengan *adverse pressure gradient* sehingga mengalami perlambatan dan pada waktu tertentu kehilangan momentumnya sehingga terjadi separasi. Pada kasus variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire*, baik yang terjadi pada 90°, 100°, dan 110° titik separasi terjadi pada lokasi yang berbeda akibat pengaruh dari penambahan *wire* dengan lokasi yang berbeda pula. Seperti pada variasi dengan *wire* 90° untuk bilangan Reynolds 6000, separasi terjadi pada sudut 90,497° pada *upper side* dan 269,503° pada *lower side* atau berada pada daerah peletakan *wire* pertama pada variasi tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran fluida yang menabrak *wire* dengan ukuran yang cukup besar mengalami kehilangan momentum secara langsung dan perubahan kelengkungan secara spontan, hal inilah yang kemudian memicu timbulnya *bubble separation* seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pada kondisi ini, koefisien *pressure* pada aliran juga mengalami fluktuasi yang relatif kecil, yaitu berkisar pada -0,734 hingga -1,801. Sedangkan pada variasi *wire* 100° mengalami separasi pada posisi sudut 100,509° pada sisi atas silinder sirkular dan 259,491° pada sisi bawah silinder sirkular. Separasi tersebut terjadi akibat aliran fluida sudah tidak mampu lagi menahan *adverse pressure gradient* sehingga aliran lepas tepat di atas *wire*. Sebelum terjadinya separasi aliran fluida menciptakan *vortex* terlebih dahulu di bagian depan *wire* pada peletakan *wire* 100°, *vortex* tersebut yang menyebabkan terjadinya percepatan pada aliran fluida yang ditandai dengan adanya penurunan grafik pada nilai koefisien *pressure*. Sedangkan untuk silinder sirkular dengan penambahan *wire* pada sudut 110° telah terjadi separasi pada sudut 110,472° pada sisi *upper side* dan 249,528° pada sisi *lower side*. Perbedaan sudut separasi diakibatkan oleh perbedaan peletakan *wire*.

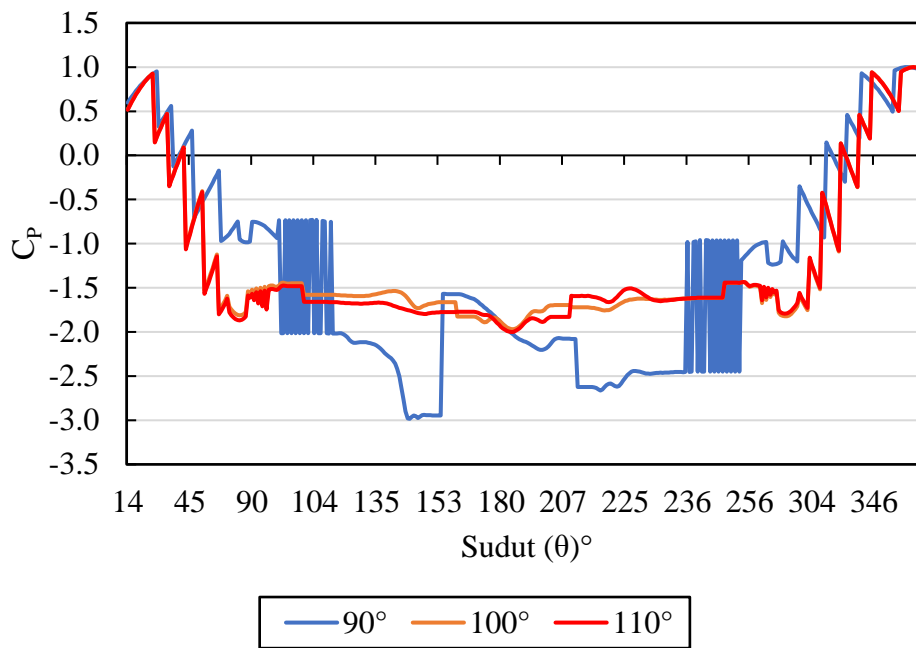
4.5.2 Perbandingan Koefisien Pressure (C_p) antara Smooth Cylinder dan Wire Cylinder pada $Re = 20000$

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien *pressure* (C_p) pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder* pada bilangan Reynolds 20000. Nilai koefisien *pressure* didapat dengan mengambil dua belas titik pada masing-masing satu gelombang di seluruh variasi silinder sirkular. Distribusi koefisien *pressure* menggambarkan fluktuasi atau perubahan tekanan di sepanjang sudut azimuth pada silinder sirkular.



Gambar 4. 7 Grafik distribusi koefisien *pressure* (C_p) *smooth cylinder* pada $Re = 20000$.

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien *pressure* (C_p) pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder* pada bilangan Reynolds 20000. Dapat dilihat pada gambar 4.6 bahwa titik stagnasi pada *smooth cylinder* berada pada $0,27^{\circ}$ dengan nilai koefisien *pressure* (C_p) mencapai 1. Setelah berada di titik stagnasi, aliran fluida yang melintasi permukaan silinder sirkular mengalami percepatan secara signifikan yang ditandai dengan adanya penurunan tekanan secara signifikan pula hingga mencapai titik minimum *pressure* sebesar -1,46 pada posisi *upper side* yaitu pada sudut azimuth $69,50^{\circ}$ dan *lower side* yaitu pada sudut azimuth $287,31^{\circ}$. Pada keadaan tersebut aliran mengalami efek *nozzle* sama seperti halnya yang terjadi pada *smooth cylinder* pada bilangan Reynolds 6000. Setelah itu terlihat pada grafik pada gambar 4.7 bahwa terjadi kenaikan koefisien *pressure*, hal ini mengindikasikan bahwa aliran yang melintasi permukaan silinder sirkular mengalami perlambatan akibat pengaruh adanya *adverse pressure gradient*. Ketika aliran tidak lagi mampu melawan *adverse pressure gradient* dan gesekan maka aliran fluida terlepas dari permukaan silinder sirkular, kejadian ini kemudian disebut sebagai separasi. Separasi ditandai dengan nilai koefisien tekanan yang berangsur *steady* dimulai pada sudut 94° pada *upper side* dan 270° pada *lower side*.



Gambar 4. 8 Grafik perbandingan distribusi koefisien pressure (C_p) *wire cylinder* pada $Re = 20000$.

Sebagai pembandingan dengan *smooth cylinder* telah ditampilkan pada gambar 4.8 grafik distribusi koefisien *pressure* (C_p) untuk variasi silinder sirkular dengan penambahan *wire* di bagian belakang. Jika dilihat secara sekilas, sama seperti halnya pada bilangan Reynolds 6000 bahwa nampak perbedaan yang sangat signifikan dengan *smooth cylinder* dimana terjadi fluktuasi yang tinggi pada distribusi koefisien *pressure* pada *wire cylinder* baik pada penempatan 90° , 100° , dan 110° . Hal tersebut dapat disebabkan oleh perubahan titik stagnasi yang terjadi secara terus-menerus sepanjang fluida mengalir dan melewati silinder sirkular. Perubahan titik stagnasi diakibatkan karena munculnya *vortex* saat aliran mencapai puncak maupun lembah *lift*. Akibat diberikannya variasi geometri berupa penambahan *wire* pada sudut-sudut tertentu menyebabkan *vortex* yang dihasilkan di bagian belakang silinder sangat asimetris dan cukup besar, hal ini menjadi penyebab aliran di bagian belakang silinder menjadi sangat tidak stabil hingga memengaruhi aliran di bagian depan silinder.

Pada grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.8 dapat diketahui bahwa telah terjadi perbedaan dimulainya titik stagnasi dan juga separasi aliran fluida. Diketahui bahwa aliran telah mencapai kecepatan minimum pada posisi sudut azimuth 360° , hal ini menandakan bahwa aliran telah mencapai titik stagnasi dengan nilai koefisien *pressure* sebesar 1. Posisi stagnasi aliran pada posisi sudut tersebut mengindikasikan bahwa aliran mengalami stagnasi di sisi bawah silinder sirkular atau biasa disebut *lower side*. Sedangkan pada variasi *wire* dengan penempatan pertamanya di sudut 100° titik stagnasi aliran berada pada posisi sudut $0,74^\circ$ atau pada *upper side* silinder sirkular dengan nilai koefisien *pressure* sebesar 1. Serta pada silinder sirkular dengan variasi *wire* 110° , aliran mencapai titik stagnasi dengan nilai koefisien *pressure* sebesar 1,0475 pada posisi sudut azimuth 360° . Setelah mengalami kecepatan minimum atau titik stagnasi, aliran mengalami akselerasi atau percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik koefisien *pressure* hingga mencapai -0,842 untuk variasi *wire* 90° pada posisi sudut $75,96^\circ$ di *upper side* dan -1,069 pada posisi sudut $284,04^\circ$ di *lower side*. Kemudian untuk variasi penambahan *wire* di sudut 100° , percepatan aliran terjadi hingga posisi sudut $75,96^\circ$ untuk *upper side* dan $284,04^\circ$ untuk *lower side* yang secara berturut-turut mencapai nilai koefisien

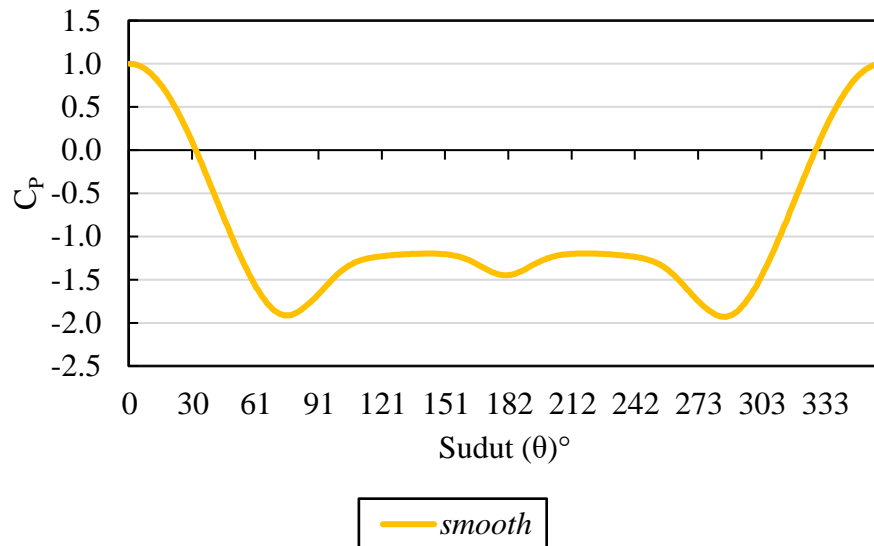
pressure sebesar -1,676 dan -1,688. Sedangkan untuk silinder sirkular dengan variasi geometri terakhir, yaitu dengan *wire* 110° mengalami percepatan aliran fluida hingga mencapai nilai koefisien *pressure* sebesar -1,763 dengan sudut 75,96° di *upper side* dan -1,698 dengan sudut 284,04° di bagian sisi bawah silinder sirkular.

Adverse pressure gradient yang pada umumnya terletak di bagian atas hingga belakang silinder sirkular kemudian memengaruhi aliran fluida yang sebelumnya telah mengalami efek *nozzle* atau percepatan hingga menyebabkan terjadinya pelepasan aliran dari permukaan silinder sirkular. Seperti halnya pada bilangan Reynolds 6000, pada bilangan Reynolds 20000 titik separasi pada variasi *wire* 90°, 100°, dan 110° ditemukan pada lokasi yang berbeda akibat pengaruh dari penambahan *wire* dengan lokasi penempatan pertamanya yang berbeda pula. Untuk variasi dengan *wire* pada sudut 90°, separasi terjadi pada sudut 90° untuk *upper side* dan 270° untuk *lower side*. Hal ini menandakan bahwa separasi terjadi pada peletakan *wire* pertama pada variasi tersebut, dimana aliran fluida menabrak *wire* sehingga secara spontan kehilangan momentum alirannya, ketika aliran sudah tidak memiliki cukup momentum untuk melawan *adverse pressure gradient* yang cukup tinggi, maka aliran terlepas dari permukaan silinder sirkular atau mengalami separasi. Pada titik separasi tersebut, aliran tidak hanya mengalami separasi biasa, namun juga *bubble separation* yang sudah dijelaskan sebelumnya pada subbab 4.4.1 dimana aliran mengalami fluktuasi yang relatif kecil, yaitu berkisar pada -0,638 hingga -1,924. Sedangkan pada variasi *wire* 100° dan 110° mengalami dua kali separasi dimana separasi pertama terjadi pada saat aliran belum mengenai *wire* dan separasi kedua ketika aliran telah menabrak *wire* pada masing-masing sudut variasi. Untuk separasi pertama pada variasi penambahan *wire* 100° dan 110° terjadi pada sudut 94° dan 270° untuk sisi atas dan bawah silinder sirkular, namun dikarenakan separasi yang terjadi tersebut bertabrakan dengan dinding *wire* di depannya mengakibatkan aliran yang terseparasi mengalami *backflow* dan membentuk *vortex* kecil yang kemudian disebut sebagai *bubble separation*. Aliran yang telah mengalami separasi tersebut menabrak *wire* yang cukup besar sehingga membuatnya kehilangan momentumnya sekali lagi dan terseparasi kembali hingga membentuk *wake* yang jauh lebih besar dari sebelumnya yaitu pada sudut 100,734° dan separasi bawah terjadi pada sudut 259,28° untuk variasi *wire* 100° serta pada sudut 109,432° dan 255,373° untuk sisi atas dan bawah silinder sirkular.

Dari pembahasan mengenai grafik pada gambar 4.7 dan 4.8 dapat diartikan bahwa penambahan *wire* sangat memengaruhi lokasi terjadinya separasi atau pelepasan aliran. Aliran yang terseparasi membentuk *wake region*, dimana semakin besar *wake region* yang dihasilkan maka akan semakin besar *drag coefficient* yang dimiliki pula. Selain memperbesar *drag coefficient* pertumbuhannya juga memengaruhi pertumbuhan fluktuasi dari koefisien *lift*, karena semakin besar *wake region* dan semakin asimetris *vortex* yang terbentuk di belakang silinder, maka semakin tinggi amplitudo dan frekuensi gelombang *lift* yang dihasilkan. Hal ini memberikan pengaruh baik bagi peningkatan performa dari silinder sirkular untuk menghasilkan energi listrik.

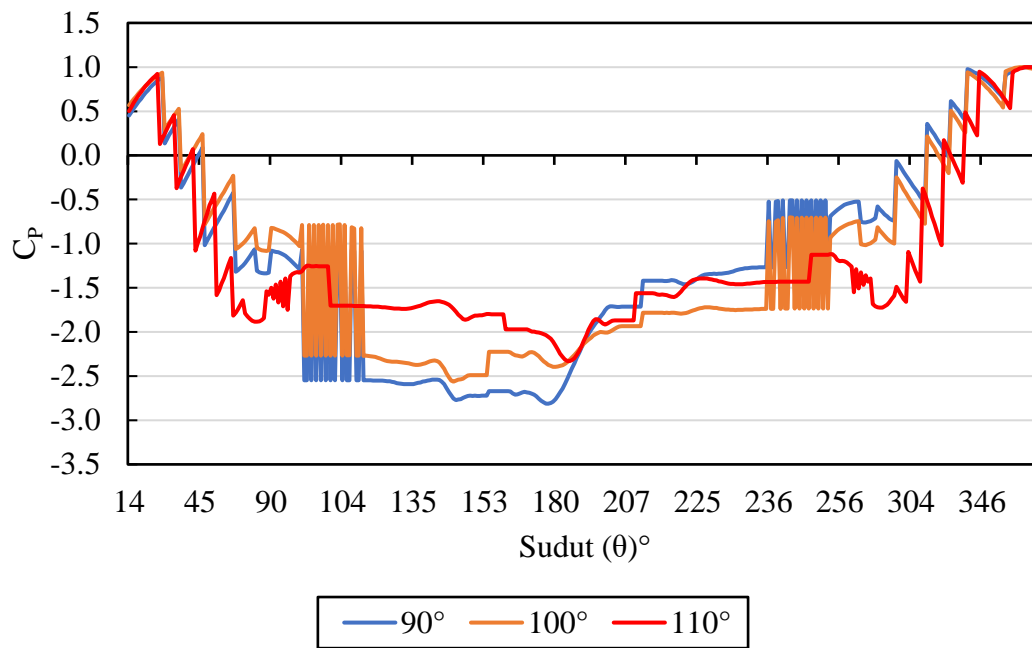
4.5.3 Perbandingan Koefisien *Pressure* (C_p) antara *Smooth Cylinder* dan *Wire Cylinder* pada $Re = 40000$

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien *pressure* (C_p) pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder* pada bilangan Reynolds 40000. Nilai koefisien *pressure* didapat dengan mengambil dua belas titik pada masing-masing satu gelombang di seluruh variasi silinder sirkular. Distribusi koefisien *pressure* menggambarkan fluktuasi atau perubahan tekanan di sepanjang sudut azimuth pada silinder sirkular.



Gambar 4. 9 Grafik distribusi koefisien *pressure* (C_p) *smooth cylinder* pada $Re = 40000$.

Pada subbab ini menampilkan data kuantitatif berupa distribusi koefisien *pressure* (C_p) pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder* pada bilangan Reynolds 20000. Gambar 4.9 memperlihatkan persebaran distribusi nilai koefisien *pressure* untuk *smooth cylinder* pada bilangan Reynolds 40000. Dapat diketahui bahwa, mula-mula aliran mengalami stagnasi, yaitu dengan nilai kecepatan minimum dan *pressure* maksimum dengan nilai sama dengan 1 pada posisi sudut azimuth 0° . Setelah melewati titik stagnasi, aliran fluida yang melewati silinder sirkular mengalami akselerasi atau percepatan akibat efek *nozzle* atau penyempitan *streamline* dengan ditandai penurunan nilai koefisien *pressure* yang signifikan hingga mencapai -1,85 pada posisi sudut azimuth $74,42^\circ$, sedangkan pada *lower side* kecepatan maksimum dan tekanan minimum terjadi pada posisi sudut $285,88^\circ$. Setelah itu aliran fluida mengalami perlambatan akibat pengaruh adanya *adverse pressure gradient* yang pada umumnya terletak di bagian puncak silinder sirkular hingga ke daerah belakang. Kejadian perlambatan tersebut ditandai dengan adanya peningkatan nilai koefisien *pressure* (C_p). Ketika aliran tidak lagi mampu melawan *adverse pressure gradient* dan gesekan terhadap permukaan silinder sirkular, maka terjadilah pelepasan aliran atau biasa disebut sebagai separasi, yang pada grafik ditunjukkan dengan nilai koefisien *pressure* yang berangsur stabil atau mendatar. Titik separasi pada *smooth cylinder* dengan bilangan Reynolds 40000 terjadi pada sudut azimuth $103,85^\circ$ pada *upper side* dan $258,75^\circ$ pada *lower side*.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan distribusi koefisien *pressure* (C_p) *wire cylinder* pada $Re = 40000$.

Gambar 4.10 menampilkan grafik perbandingan distribusi nilai koefisien *pressure* (C_p) untuk variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular. Grafik tersebut sekaligus menjadi perbandingan dengan *smooth cylinder* yang telah ditampilkan pada gambar 4.9. Sama halnya seperti kasus pada bilangan Reynolds 6000 dan 20000, telah terjadi fluktuasi yang cukup tinggi sehingga menyebabkan perbedaan secara visual yang cukup signifikan antara grafik koefisien *pressure* pada *smooth cylinder* dan *wire cylinder*. Perubahan titik stagnasi juga terjadi pada seluruh variasi geometri dengan penambahan *wire* di bagian belakang silinder, karena munculnya *vortex shedding* pada saat puncak dan lembah *lift*. Akibat diberikannya variasi geometri berupa penambahan *wire* pada sudut-sudut tertentu menyebabkan *vortex* yang dihasilkan di bagian belakang silinder sangat asimetris dan cukup besar, hal ini menjadi penyebab aliran di bagian belakang silinder menjadi sangat tidak stabil hingga memengaruhi aliran di bagian depan silinder.

Dari grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dapat diketahui bahwa telah terjadi perbedaan dimulainya titik stagnasi dan juga separasi aliran fluida. Pada variasi penempatan *wire* di belakang silinder sirkular baik dengan sudut 90° , 100° , dan 110° titik stagnasi aliran terjadi di bagian sisi bawah silinder sirkular atau *lower side* dengan posisi sudut azimuth 360° . Untuk variasi *wire* 90° mencapai nilai koefisien *pressure* paling tinggi di antara variasi lainnya, yaitu sebesar 1, sedangkan untuk variasi *wire* 100° dan 110° memiliki nilai koefisien *pressure* sebesar 1,1075. Setelah mencapai titik stagnasi, aliran mengalami akselerasi atau percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik koefisien *pressure*, hal ini terjadi di seluruh variasi penempatan *wire* di bagian belakang silinder sirkular, untuk seluruh variasi baik pada *wire* 90° , 100° , dan 110° terjadi pada posisi sudut azimuth $75,96^\circ$ untuk bagian atas silinder sirkular dan $284,04^\circ$ untuk bagian bawah silinder sirkular yang secara berturut-turut memiliki nilai koefisien *pressure* untuk 90° sebesar -1,144 dan -0,521, untuk 100° sebesar -0,903 dan -0,78, sedangkan untuk -1,786 dan -1,627.

Setelah mengalami akselerasi atau percepatan, aliran mengalami perlambatan akibat pertemuannya dengan *adverse pressure gradient*, pada saat aliran sudah tidak mampu lagi

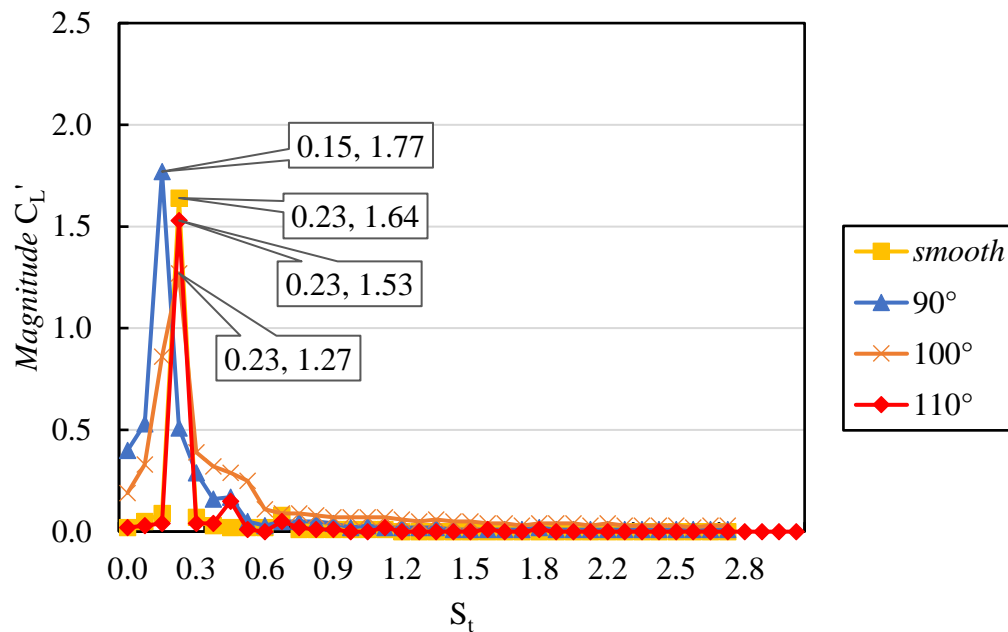
untuk melawan *adverse pressure gradient* dan gesekan, maka aliran terlepas dari permukaan silinder sirkular dan kejadian tersebut disebut sebagai separasi. Separasi ini sendiri terjadi pada titik atau lokasi yang berbeda dari setiap variasi geometri dan bilangan Reynolds yang ada. Untuk bilangan Reynolds 40000 pada variasi *wire* 90°, separasi terjadi pada posisi sudut 90,497° pada sisi atas dan 269,503° pada sisi bawah silinder sirkular. Hal ini menandakan bahwa separasi terjadi pada peletakan *wire* pertama pada variasi tersebut, dimana aliran fluida menabrak *wire* sehingga secara spontan kehilangan momentum alirannya, ketika aliran sudah tidak memiliki cukup momentum untuk melawan *adverse pressure gradient* yang cukup tinggi, maka aliran terlepas dari permukaan silinder sirkular atau mengalami separasi. Pada titik separasi tersebut, aliran tidak hanya mengalami separasi biasa, namun juga *bubble separation* yang sudah dijelaskan sebelumnya pada subbab sebelumnya, dimana aliran mengalami fluktuasi yang relatif kecil, yaitu berkisar pada -0,925 hingga -2,402. Kemudian pada variasi *wire* 100° separasi terjadi pada sudut 99,764° untuk *upper side* dan 262,420° untuk *lower side*. Sedangkan untuk variasi geometri silinder sirkular dengan penempatan *wire* 110° mengalami dua kali separasi dimana separasi pertama terjadi pada saat aliran belum mengenai *wire* dan separasi kedua ketika aliran telah menabrak *wire*. Untuk separasi pertama terjadi pada sudut 103,85° dan 258,75° untuk sisi atas dan bawah silinder sirkular, namun dikarenakan separasi yang terjadi tersebut bertabrakan dengan dinding *wire* di depannya mengakibatkan aliran yang terseparasi mengalami *backflow* dan membentuk *vortex* kecil yang kemudian disebut sebagai *bubble separation*. Aliran yang telah mengalami separasi tersebut menabrak *wire* yang cukup besar sehingga membuatnya kehilangan momentumnya sekali lagi dan terseparasi kembali hingga membentuk *wake* yang jauh lebih besar dari sebelumnya yaitu pada sudut 110,472° dan separasi bawah terjadi pada sudut 249,528° untuk sisi atas dan bawah silinder sirkular.

Dari pembahasan mengenai grafik pada gambar 4.9 dan 4.10 dapat diartikan bahwa penambahan *wire* sangat memengaruhi lokasi terjadinya separasi atau pelepasan aliran. Aliran yang terseparasi membentuk *wake region*, dimana semakin besar *wake region* yang dihasilkan maka akan semakin besar *drag coefficient* yang dimiliki pula. Selain memperbesar *drag coefficient* pertumbuhannya juga memengaruhi pertumbuhan fluktuasi dari koefisien *lift*, karena semakin besar *wake region* dan semakin asimetris *vortex* yang terbentuk di belakang silinder, maka semakin tinggi amplitudo dan frekuensi gelombang *lift* yang dihasilkan. Hal ini memberikan pengaruh baik bagi peningkatan performa dari silinder sirkular untuk menghasilkan energi listrik.

4.6 Perbandingan Distribusi Strouhal Number (S_t) pada Smooth Cylinder dengan Wire Cylinder terhadap Reynolds Number

4.6.1 Perbandingan Distribusi Strouhal Number (S_t) pada $Re = 6000$

Pada subbab ini menjelaskan mengenai perbandingan distribusi *Strouhal number* terhadap *magnitude* pada setiap variasi geometri silinder sirkular baik pada *smooth cylinder* maupun *wire cylinder* untuk bilangan Reynolds 6000. *Strouhal number* didapat dari data koefisien *lift* yang kemudian dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT), data tersebut dapat diinterpretasikan dalam bentuk nilai *Strouhal number* terhadap *magnitude*. Dimana semakin besar amplitudo suatu gelombang *lift* maka getaran yang dihasilkan juga semakin besar. Pada grafik yang terdapat pada gambar 4.10, terdapat *peak* terbesar di antara *peak* lainnya, *peak* tersebut menandakan telah terjadi pembentukan awal dari *vortex shedding*, pada *peak* terbesar inilah nilai dari *Strouhal number* diambil. *Magnitude* sendiri merupakan hasil dari superposisi dari beberapa gelombang *lift* dari masing-masing geometri dengan bilangan Reynolds yang sama.



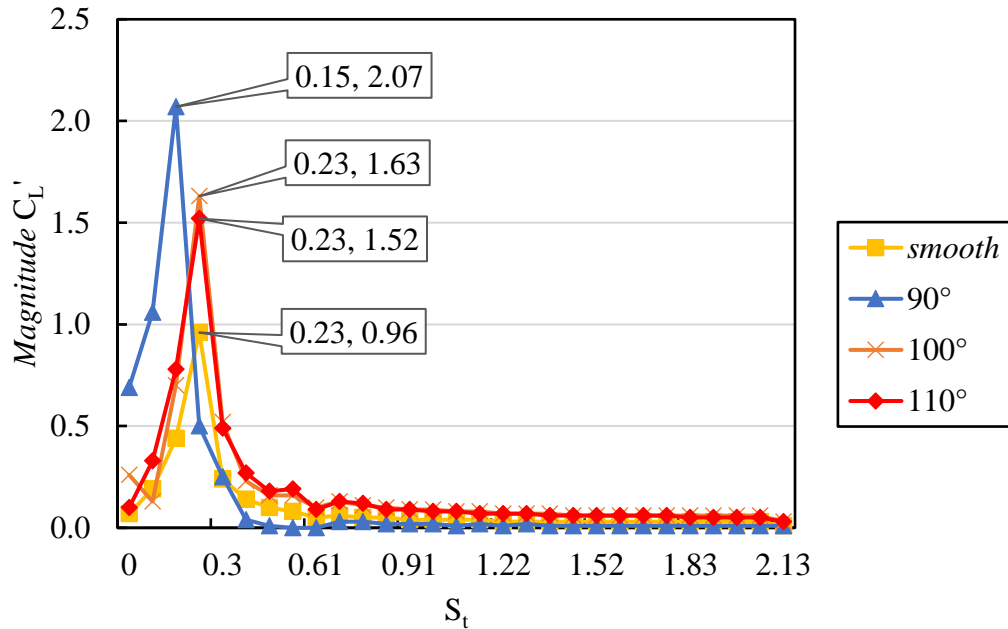
Gambar 4.11 Grafik distribusi *Strouhal number* (S_t) pada $Re = 6000$.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.11 dapat diketahui bahwa nilai *Strouhal number* untuk variasi geometri *smooth cylinder* dan *wire* dengan penempatan pada sudut 100° dan 110° adalah sama yaitu sebesar 0,23, sedangkan untuk variasi geometri dengan *wire* pada sudut 90° memiliki nilai *Strouhal number* lebih rendah, yaitu 0,15. *Strouhal number* pada gambar 4.11 dibandingkan terhadap nilai *magnitude* yang merupakan superposisi dari setiap gelombang yang ada. Untuk variasi *smooth cylinder*, diketahui memiliki besar *magnitude* 1,27, kemudian untuk *wire* 90° memiliki besar *magnitude* paling tinggi yaitu 1,77, sedangkan pada *wire* 100° memiliki besar *magnitude* 1,53, serta pada *wire* 110° besar *magnitudenya* mencapai 1,64. Besar *magnitude* yang berbeda mengindikasikan bahwa panjang gelombang dan amplitudo yang dimiliki oleh gelombang pada masing-masing variasi geometri berbeda, sehingga nilai superposisi yang dihasilkan berbeda juga. Besar *magnitude* mewakili besaran amplitudo suatu gelombang, sedangkan *Strouhal number* mewakili nilai frekuensi dari gelombang *vortex shedding* yang terjadi pada masing-masing variasi geometri. Semakin besar nilai *Strouhal number*, maka semakin besar pula frekuensi yang dimiliki oleh gelombang. Dari grafik pada gambar 4.11 dapat diartikan bahwa frekuensi gelombang yang terjadi pada variasi *wire* 90° merupakan frekuensi paling kecil untuk aliran pada bilangan Reynolds 6000, namun memiliki rata-rata tinggi amplitudo *lift* yang dapat didefinisikan sebagai koefisien *lift* RMS (C_L') yang cukup tinggi dibandingkan variasi geometri silinder sirkular lainnya. Sedangkan pada variasi *smooth cylinder* dan *wire* 100° dan 110° frekuensi gelombangnya lebih tinggi ditandai dengan lebih besarnya nilai *Strouhal number*.

4.6.2 Perbandingan Distribusi *Strouhal Number* (S_t) pada $Re = 20000$

Pada subbab ini menjelaskan mengenai perbandingan distribusi *Strouhal number* terhadap *magnitude* pada setiap variasi geometri silinder sirkular baik pada *smooth cylinder* maupun *wire cylinder* untuk bilangan Reynolds 20000. Seperti halnya pada subbab 4.5.1, *Strouhal number* didapat dari data koefisien *lift* yang kemudian dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT), data tersebut dapat diinterpretasikan dalam bentuk nilai *Strouhal number* terhadap *magnitude*. Dimana semakin besar amplitudo suatu gelombang *lift* maka getaran yang dihasilkan juga semakin besar. *Peak* terbesar atau tertinggi yang terdapat

pada grafik di gambar 4.12 menandakan telah terjadi pembentukan awal dari *vortex shedding*, kemudian *peak* tertinggi inilah nilai *Strouhal number* diambil. *Magnitude* sendiri merupakan hasil dari superposisi dari beberapa gelombang *lift* dari masing-masing geometri dengan bilangan Reynolds yang sama.

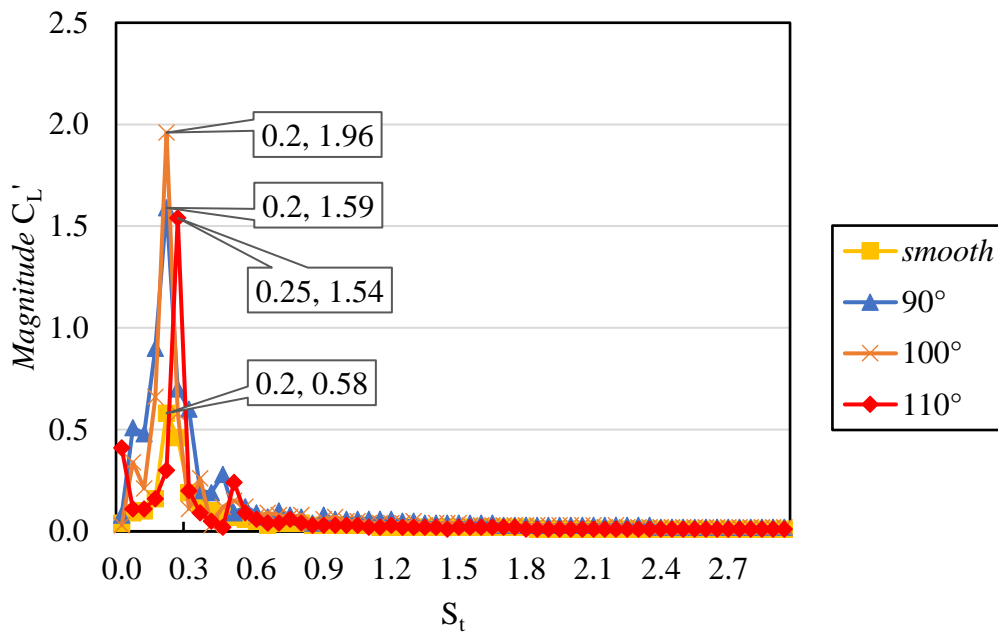


Gambar 4. 12 Grafik distribusi *Strouhal number* (S_t) pada $Re = 20000$.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.12 dapat diketahui bahwa nilai *Strouhal number* untuk variasi geometri *smooth cylinder* dan *wire* dengan penempatan pada sudut 100° dan 110° adalah sama yaitu sebesar 0,23, sedangkan untuk variasi geometri dengan *wire* pada sudut 90° memiliki nilai *Strouhal number* lebih rendah, yaitu 0,15. *Strouhal number* pada gambar 4.12 dibandingkan terhadap nilai *magnitude* yang merupakan superposisi dari setiap gelombang yang ada., dimana untuk variasi *smooth cylinder*, diketahui memiliki besar *magnitude* 0,96, kemudian untuk *wire* 90° memiliki besar *magnitude* paling tinggi yaitu 2,07, sedangkan pada *wire* 100° memiliki besar *magnitude* 1,63, serta pada *wire* 110° besar *magnitudenya* mencapai 1,52. Besar *magnitude* yang berbeda mengindikasikan bahwa panjang gelombang dan amplitudo yang dimiliki oleh gelombang pada masing-masing variasi geometri berbeda, sehingga menyebabkan simpangan resultan dan nilai superposisi yang dihasilkan berbeda juga. Besar *magnitude* mewakili besaran amplitudo suatu gelombang, sedangkan *Strouhal number* mewakili nilai frekuensi dari gelombang *vortex shedding* yang terjadi pada masing-masing variasi geometri. Semakin besar nilai *Strouhal number*, maka semakin besar pula frekuensi yang dimiliki oleh gelombang. Dari grafik pada gambar 4.12 dapat diartikan bahwa frekuensi gelombang yang terjadi pada variasi *wire* 90° merupakan frekuensi paling kecil untuk aliran pada bilangan Reynolds 20000, namun memiliki rata-rata tinggi amplitudo *lift* yang dapat didefinisikan sebagai koefisien *lift* RMS (C_L') yang cukup tinggi dibandingkan variasi geometri silinder sirkular lainnya. Dan pada variasi *smooth cylinder* dan *wire* 100° dan 110° frekuensi gelombangnya lebih tinggi ditandai dengan lebih besarnya nilai *Strouhal number*.

4.6.3 Perbandingan Distribusi *Strouhal Number* (St) pada $Re = 40000$

Pada subbab ini menjelaskan mengenai perbandingan distribusi *Strouhal number* terhadap *magnitude* pada setiap variasi geometri silinder sirkular baik pada *smooth cylinder* maupun *wire cylinder* untuk bilangan Reynolds 40000. Seperti halnya pada subbab 4.5.1 dan 4.5.2, *Strouhal number* didapat dari data koefisien *lift* yang kemudian dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT), data tersebut dapat diinterpretasikan dalam bentuk nilai *Strouhal number* terhadap *magnitude*. Dimana semakin besar amplitudo suatu gelombang *lift* maka getaran yang dihasilkan juga semakin besar. Pada grafik yang terdapat pada gambar 4.13, terdapat *peak* terbesar atau tertinggi di antara *peak* lainnya, pada *peak* tertinggi inilah nilai dari *Strouhal number* diambil, dimana *peak* tersebut menandakan telah terjadi pembentukan awal dari *vortex shedding*. *Magnitude* sendiri merupakan hasil dari superposisi dari beberapa gelombang *lift* dari masing-masing geometri dengan bilangan Reynolds yang sama.



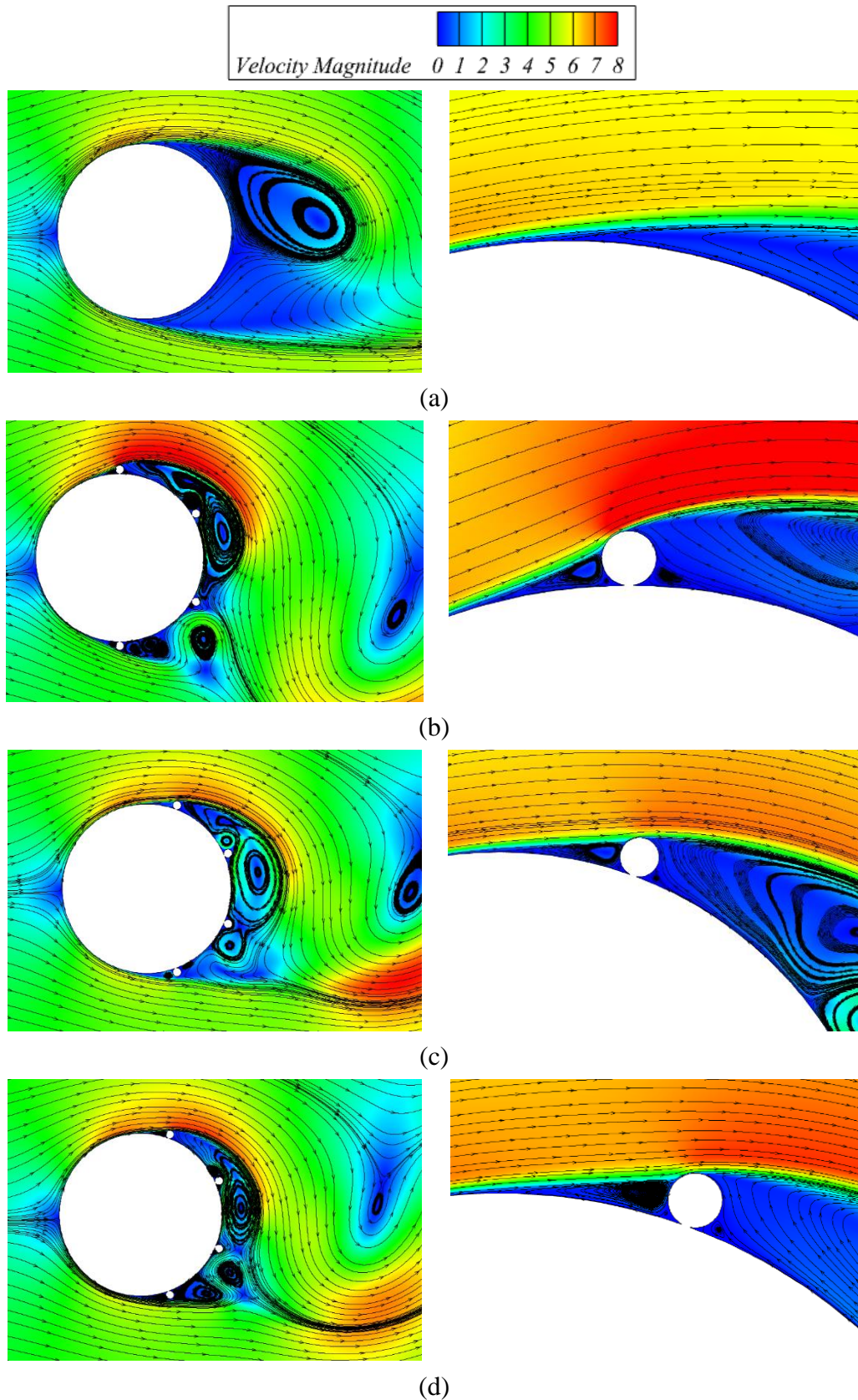
Gambar 4. 13 Grafik distribusi *Strouhal number* (St) pada $Re = 40000$.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.13 dapat diketahui bahwa nilai *Strouhal number* untuk variasi geometri *smooth cylinder* dan *wire* dengan penempatan pada sudut 100° dan 110° adalah sama yaitu sebesar 0,23, sedangkan untuk variasi geometri dengan *wire* pada sudut 90° memiliki nilai *Strouhal number* lebih rendah, yaitu 0,15. *Strouhal number* pada gambar 4.10 dibandingkan terhadap nilai *magnitude* yang merupakan superposisi dari setiap gelombang yang ada., dimana untuk variasi *smooth cylinder*, diketahui memiliki besar *magnitude* 0,96, kemudian untuk *wire* 90° memiliki besar *magnitude* paling tinggi yaitu 2,07, sedangkan pada *wire* 100° memiliki besar *magnitude* 1,63, serta pada *wire* 110° besar *magnitudenya* mencapai 1,52. Besar *magnitude* yang berbeda mengindikasikan bahwa panjang gelombang dan amplitudo yang dimiliki oleh gelombang pada masing-masing variasi geometri berbeda, sehingga menyebabkan simpangan resultan dan nilai superposisi yang dihasilkan berbeda juga. Besar *magnitude* mewakili besaran amplitudo suatu gelombang, sedangkan *Strouhal number* mewakili nilai frekuensi dari gelombang *vortex shedding* yang terjadi pada masing-masing variasi geometri. Semakin besar nilai *Strouhal number*, maka semakin besar pula frekuensi yang dimiliki oleh gelombang. Dari grafik pada gambar 4.13 dapat diartikan bahwa frekuensi gelombang yang terjadi pada variasi *wire* 90° merupakan frekuensi paling

kecil untuk aliran pada bilangan Reynolds 20000, namun memiliki rata-rata tinggi amplitudo *lift* yang dapat didefinisikan sebagai koefisien *lift* RMS (C_L') yang cukup tinggi dibandingkan variasi geometri silinder sirkular lainnya. Dan pada variasi *smooth cylinder* dan *wire* 100° dan 110° frekuensi gelombangnya lebih tinggi ditandai dengan lebih besarnya nilai *Strouhal number*.

4.7 Analisis Kontur Kecepatan Aliran Melintasi Sirkular Silinder

Berdasarkan pembahasan dan analisis pada subbab sebelumnya yang menjelaskan mengenai hasil pengambilan data kuantitatif berupa koefisien *drag* dan *lift* RMS, diketahui bahwa pada bilangan Reynolds 20000 hasil data kuantitatifnya menunjukkan hal yang menarik dimana perbandingan keduanya meningkat jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa variasi geometri berupa penambahan *wire* di bagian belakang silinder efektif dapat menjawab hipotesa penelitian ini, yakni meningkatkan koefisien *lift* RMS untuk dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar. Agar lebih memahami alasan hal tersebut dapat terjadi, maka diperlukan pemahaman mengenai fenomena dan karakteristik aliran yang terjadi pada silinder sirkular, maka pada subbab ini ditampilkan dan dijelaskan mengenai kontur kecepatan aliran yang melintasi silinder sirkular untuk melihat dan memahami perbedaan signifikan yang terjadi pada semua variasi geometri silinder sirkular untuk bilangan Reynolds 20000.



Gambar 4. 14 Kontur kecepatan aliran untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 20000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; dan (d) *wire 110°*.

Kontur kecepatan diambil secara *instantaneous* pada satu waktu tertentu, yaitu pada aliran gelombang *lift* yang telah stabil dan tepat berada pada *peak* positif atau atas gelombang koefisien *lift*. Alasan pengambilan kontur pada titik *peak* positif tersebut, salah satunya adalah untuk mendapatkan tangkapan fenomena pada saat *vortex* terbentuk dari bagian atas silinder sirkular. Untuk silinder sirkular dengan variasi *smooth cylinder* yang ditunjukkan pada gambar 4.14 terlihat bahwa telah terbentuk pusaran aliran atau *vortex* di bagian atas silinder sirkular akibat adanya separasi aliran. Aliran mengalami stagnasi atau penurunan kecepatan hingga kondisi minimum pada sisi depan silinder sirkular, yaitu pada 0° . *Vortex* yang terbentuk mengakibatkan aliran di bagian belakang silinder sebagian kembali menuju bagian atas silinder sirkular, hal ini yang menjadi salah satu penyebab aliran fluida yang datang menuju bagian atas silinder kehilangan momentumnya, yaitu akibat mengenai *adverse pressure gradient* yang tinggi. Aliran tersebut menimbulkan *backflow* di bagian titik separasi. *Vortex* atau pusaran aliran hanya terbentuk di bagian atas silinder, karena kontur kecepatan yang ditampilkan pada gambar 4.14 bersifat *instantaneous*, dimana nantinya *vortex* tersebut akan memecah aliran yang melewati silinder sirkular pada sisi bawah, sehingga terjadi pelepasan *vortex* baru pada bagian bawah silinder sirkular, dan begitu seterusnya hingga aliran mendekati *outlet*.

Sedangkan pada silinder sirkular dengan penambahan *wire* dengan sudut variasi penempatan *wire* pertama di 90° setelah mengalami stagnasi di bagian tengah depan silinder sirkular, kemudian mengalami efek *nozzle* akibat penyempitan *streamline* atau biasa disebut sebagai fenomena *streamtube*. Setelah mencapai kecepatan tertingginya, aliran bertemu dengan *adverse pressure gradient* yang menyebabkan perlambatan dan terjadinya separasi apabila aliran sudah tidak mampu lagi menahan *adverse pressure*, sehingga terbentuk *wake region* yang diisi oleh beberapa pusaran aliran atau *vortex* tepat pada posisi peletakan *wire*. *Vortex* yang terbentuk di bagian belakang silinder memiliki bentuk lebih asimetris jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, hal ini disebabkan peletakan *wire* berhasil mengacaukan aliran di bagian belakang silinder dan membuat aliran semakin tidak stabil. *Wake region* yang dibentuk oleh silinder sirkular dengan penambahan *wire* lebih besar dibanding *smooth cylinder*, namun di saat yang bersamaan pula, golkakan gelombang yang terjadi di bagian belakang silinder jauh lebih besar, hal ini menjadi indikasi positif dimana koefisien *lift* yang dihasilkan juga semakin besar, akibat amplitudo dan frekuensi yang meningkat. Pada gambar 4.14 dapat dilihat pula secara lebih dekat pada bagian *wire* pada silinder sirkular dengan variasi sudut 90° , dimana telah terbentuk *vortex* atau pusaran aliran kecil tepat di sekitar *wire*, *vortex* tersebut terbentuk akibat adanya fenomena *bubble separation*. *Vortex* tersebut terbentuk akibat aliran yang sebelumnya mengalami penyempitan *streamline* menabrak *wire* dan menyebabkan aliran terseparasi serta sebagian mengalami *backflow*. *Backflow* tersebut memiliki tekanan yang tinggi sehingga ia berputar untuk mendapatkan momentumnya kembali untuk akhirnya melepaskan diri dari sisi silinder bertekanan tinggi menuju tekanan rendah. Pada hasil kuantitatif menunjukkan bahwa telah terjadi peningkatan sebesar 30,64% untuk rasio C_L'/C_D akibat diberikannya penambahan *wire* di sudut 90° .

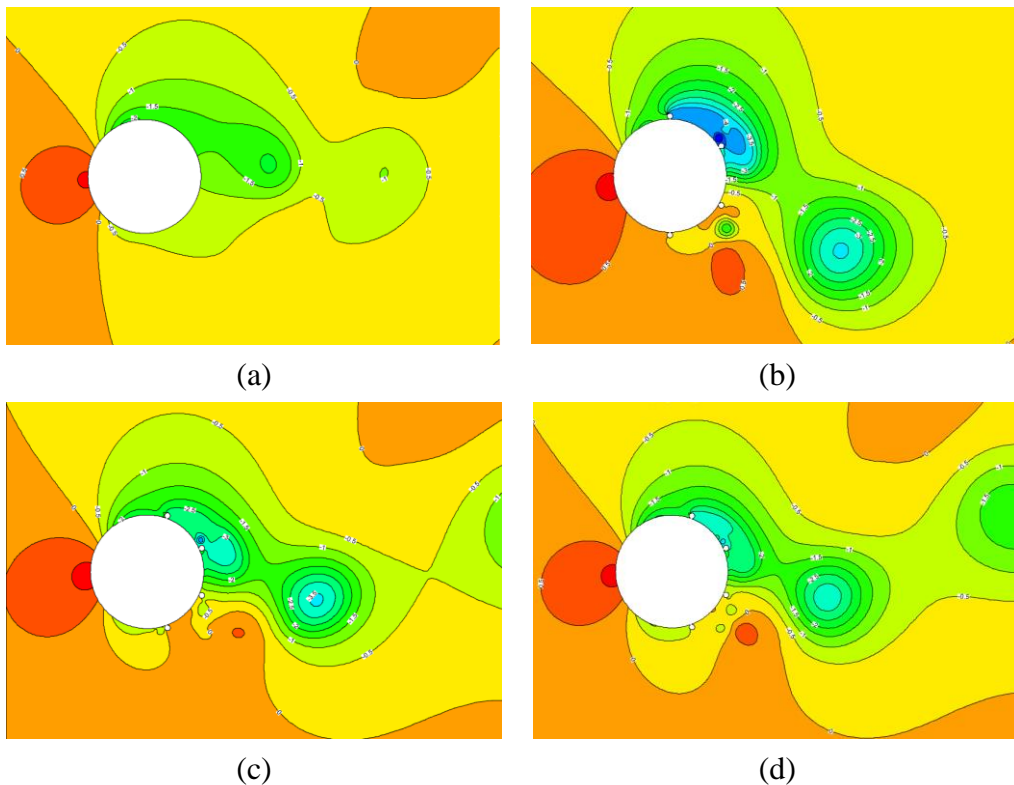
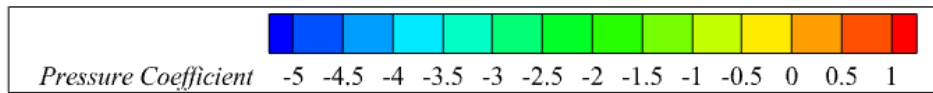
Sedangkan pada variasi geometri silinder sirkular dengan penempatan *wire* pada sudut 100° dan 110° tidak terlihat perbedaan yang signifikan jika dilihat secara keseluruhan *streamline* yang ditunjukkan pada gambar 4.14. Aliran mengalami stagnasi terlebih dahulu, kemudian mengalami penyempitan *streamline* akibat efek *nozzle* hingga ke bagian atas silinder sirkular. Ketika mencapai bagian atas silinder sirkular, aliran bertemu dengan *adverse pressure* hingga pada suatu waktu tertentu tidak mampu lagi menahan *adverse pressure*, aliran mengalami separasi. Separasi aliran pada variasi geometri *wire* 100° dan 110° untuk bilangan Reynolds 20000 terjadi sebanyak dua kali, separasi pertama terjadi sebelum bertemu dengan *wire* dan separasi kedua tepat saat mengenai *wire*. Hal tersebut menyebabkan *wake region* yang terbentuk menjadi semakin besar dibandingkan dengan *smooth cylinder* dan pembentukan *wake*

pada separasi pertamanya, sehingga nilai koefisien *drag* pada variasi geometri ini meningkat tajam jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Jika dilihat pada gambar 4.14, aliran yang sebelumnya telah mengalami separasi pertama sebelum bertemu *wire* kemudian menabrak *wire*, pada saat tersebut terjadi perubahan kelengkungan dan arah secara spontan, sehingga menyebabkan aliran mengalami *bubble separation* dan membentuk pusaran aliran atau *vortex* di sekitar *wire*. Jika dilihat secara keseluruhan, golakan yang diakibatkan oleh *wire* pada variasi penempatan 100° lebih kecil bila dibandingkan dengan yang terjadi pada *wire* 90° , begitupun juga dengan *wire* 110° , hal ini dikarenakan separasi pada variasi *wire* 100° dan 110° terjadi sebanyak dua kali dengan lokasi titik separasi kedua lebih mundur bila dibandingkan dengan *smooth cylinder* dan *wire* 90° . Hal ini mengakibatkan hasil dari perbandingan C_L'/C_D yang dimiliki oleh variasi *wire* 100° lebih besar 3,23% jika dibandingkan dengan *wire* 90° dan 34,85% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, serta untuk *wire* 110° diketahui bahwa terjadi penurunan sebesar 2,07% jika dibandingkan dengan *wire* 100° dan peningkatan sebesar 32,58% jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Penurunan rasio C_L'/C_D terjadi akibat persentase penurunan C_D yang terjadi pada *wire* 110° saat dibandingkan dengan *wire* 100° diiringi pula dengan penurunan C_L' , hal tersebut menyebabkan rasio C_L'/C_D tidak lebih optimal dibanding variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire* di sudut 100° .

Setelah dianalisis berdasarkan kondisi kontur, *streamline*, serta fenomena yang terjadi di bagian belakang silinder yang juga telah dibandingkan dengan hasil data kuantitatif yang dimiliki bahwa tidak semua variasi geometri dengan penambahan *wire* di bagian belakang silinder efektif untuk meningkatkan performa dari silinder. Pada penelitian ini, didapat bahwa variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire* pada sudut 100° dalam bilangan Reynolds 20000 terbukti efektif untuk meningkatkan koefisien *lift* RMS (C_L') atau amplitudo gelombang yang dihasilkan, hal ini akan dapat berdampak baik untuk menghasilkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan pada variasi *smooth cylinder*.

4.8 Analisis Kontur Koefisien *Pressure* Aliran Melintasi Silinder Sirkular

Berdasarkan pembahasan dan analisis pada subbab sebelumnya yang menjelaskan mengenai hasil pengambilan data kuantitatif berupa koefisien *drag* dan *lift* RMS, diketahui bahwa pada bilangan Reynolds 20000 hasil data kuantitatifnya menunjukkan hal yang menarik dimana perbandingan keduanya meningkat jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal tersebut mengindikasikan bahwa variasi geometri berupa penambahan *wire* di bagian belakang silinder efektif dapat menjawab hipotesa penelitian ini, yakni meningkatkan koefisien *lift* RMS untuk dapat menghasilkan energi yang jauh lebih besar. Agar lebih memahami alasan hal tersebut dapat terjadi, maka diperlukan pemahaman mengenai fenomena dan karakteristik aliran yang terjadi pada silinder sirkular, maka pada subbab ini ditampilkan dan dijelaskan mengenai kontur tekanan pada aliran yang melintasi silinder sirkular untuk melihat dan memahami perbedaan signifikan yang terjadi pada semua variasi geometri silinder sirkular untuk bilangan Reynolds 20000. Koefisien tekanan merupakan nilai yang menunjukkan seberapa besar penurunan maupun peningkatan tekanan yang terjadi sepanjang aliran fluida yang melintasi silinder sirkular. Sesuai prinsip fluida dimana fluida mengalir dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah, maka aliran yang melintasi silinder sirkular juga lebih mudah memecah *vortex* dan menimbulkan *vortex* baru, hal ini berdampak pada getaran yang dihasilkan oleh silinder sirkular akan lebih tinggi.



Gambar 4. 15 Kontur koefisien *pressure* untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 20000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; (d) *wire 110°*.

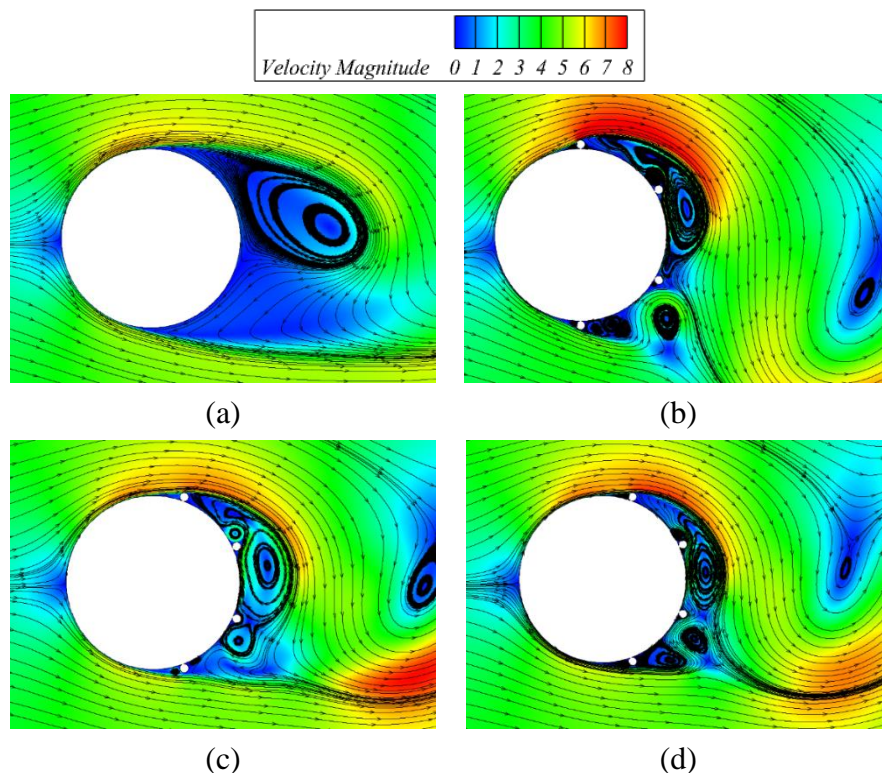
Sama seperti halnya kontur kecepatan, kontur tekanan juga diambil secara *instantaneous* pada satu waktu tertentu, yaitu pada aliran gelombang *lift* yang telah stabil dan tepat berada pada *peak* positif atau atas gelombang koefisien *lift*. Alasan pengambilan kontur pada titik *peak* positif tersebut, salah satunya adalah untuk mendapatkan tangkapan fenomena pada saat *vortex* terbentuk dari bagian atas silinder sirkular. Pada posisi stagnasi aliran untuk seluruh variasi geometri silinder sirkular yang ditunjukkan pada gambar 4.15 terlihat bahwa terdapat perbedaan antara *smooth cylinder* dengan *wire cylinder*, dimana stagnasi dengan tekanan tinggi pada *smooth cylinder* berada tepat di tengah depan, sedangkan pada *wire cylinder* aliran mengalami stagnasi atau mencapai tekanan tertingginya lebih turun sedikit jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, yaitu pada bagian tengah ke bawah silinder sirkular. Pada *smooth cylinder*, ketika aliran mencapai bagian atas silinder sirkular dan mulai terseparasi, tekanan masih cukup tinggi jika dibandingkan dengan yang terjadi pada *wire cylinder*.

Jika dilihat pada gambar 4.15, terlihat bahwa pada variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire*, pada saat aliran mencapai sisi atas dari silinder sirkular dan mengalami separasi, tekanan yang dimiliki jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan yang terjadi pada *smooth cylinder*. Dan apabila diamati lebih seksama lagi, tekanan pada variasi *wire 90°* lebih rendah jika dibandingkan dengan variasi *wire cylinder* lainnya. Penurunan tekanan yang terjadi menyebabkan aliran di belakang silinder sirkular, yaitu yang bertekanan lebih tinggi mengalir lebih cepat ke daerah yang lebih rendah tekanannya, sehingga *vortex* yang dihasilkan jauh lebih asimetris jika dibandingkan dengan *vortex* yang dihasilkan oleh *smooth cylinder*. *Vortex* yang asimetris tersebut menyebabkan aliran di bagian belakang silinder semakin kacau dan menimbulkan golan yang tinggi, yang dapat dibuktikan dengan nilai

koefisien *lift* RMS (C_L') yang meningkat pada tiap variasi geometri silinder sirkular dengan penambahan *wire*. Pada gambar 4.15 juga terlihat bahwa daerah bertekanan rendah akibat pembentukan *vortex* lebih banyak jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*, hal ini juga disebabkan oleh penurunan tekanan yang terjadi, sehingga aliran lebih cepat melepaskan pusaran atau *vortex*. *Vortex* atau pusaran aliran hanya terbentuk di bagian atas silinder, karena kontur tekanan yang ditampilkan pada gambar 4.15 bersifat *instantaneous*, dimana nantinya *vortex* tersebut akan memecah aliran yang melewati silinder sirkular pada sisi bawah, sehingga terjadi pelepasan *vortex* baru pada bagian bawah silinder sirkular, dan begitu seterusnya hingga aliran mendekati *outlet*.

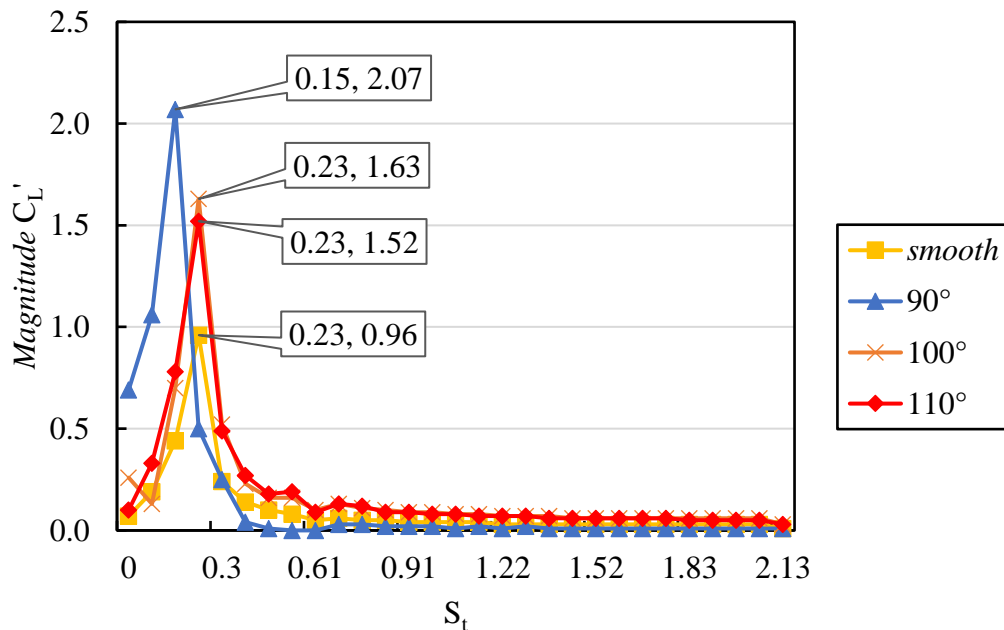
4.9 Diskusi

Pada subbab ini dilakukan diskusi mengenai beberapa hal menarik yang telah diperoleh dari simulasi dan penelitian yang telah dilakukan, yaitu perbedaan dampak yang diberikan oleh *wire* berdasarkan variasi posisi yang diberikan serta perbedaan pengaruh yang diberikan oleh *wire* pada variasi posisi yang diberikan untuk menghasilkan energi yang lebih optimal. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, diketahui bahwa *wire* memberikan dampak yang sangat signifikan bagi karakteristik aliran di bagian belakang silinder sirkular. Hal tersebut dapat dilihat pada kontur aliran secara keseluruhan, baik kontur kecepatan maupun tekanan. Aliran mengalami percepatan atau akselerasi pada bagian setelah dikenai *wire*, hal tersebut diakibatkan oleh adanya kenaikan tekanan. Aliran yang mengalami perbedaan tekanan yang signifikan tersebut mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran. Kecepatan aliran memiliki hubungan yang linear dengan momentum, semakin tinggi kecepatan maka momentum yang dimiliki oleh aliran juga semakin tinggi, hal ini menyebabkan bentuk *vortex* pada *wake region* yang dihasilkan jauh lebih melengkung ke bawah seperti terlihat pada gambar 4.16 pada variasi *wire* 90°, kemudian 100°, dan 110° jika dibandingkan satu sama lain dan juga pada *smooth cylinder*.



Gambar 4. 16 Kontur kecepatan aliran untuk setiap variasi geometri silinder sirkular; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire* 90°; (c) *wire* 100°; dan (d) *wire* 110°.

Vortex yang memiliki bentuk lebih melengkung ke bawah atau curam menuju bawah pada saat *peak* atas *lift* dan curam menuju ke atas pada saat *peak* bawah *lift* tersebut yang dapat menghasilkan amplitudo yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Seperti yang telah dipaparkan pada subbab *Strouhal number*, dimana didapat bahwa semakin ke depan lokasi penempatan *wire* pada silinder sirkular, maka semakin besar pula amplitudo yang dihasilkan. Amplitudo dapat dilihat sebagai *magnitude* C_L' pada grafik *Strouhal number*, seperti pada gambar 4.17 berikut.



Gambar 4. 17 Grafik distribusi *Strouhal number* (S_t).

Untuk seluruh variasi bilangan Reynolds, penggunaan variasi *wire* pada lokasi 90° selalu jauh lebih menghasilkan *magnitude* C_L' yang besar, hal ini menandakan bahwa amplitudo getaran yang terjadi pada variasi geometri dengan *wire* 90° lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Sedangkan untuk frekuensi sendiri didapat dari perhitungan menggunakan persamaan dan hubungannya dengan *Strouhal number* pada 2.6. Secara sekilas, jika dilihat dari grafik dan data *Strouhal number* yang telah didapatkan, diketahui bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan dan cenderung konstan untuk besar *Strouhal number* yang dihasilkan pada masing-masing pengujian yang dilakukan pada bilangan Reynolds tertentu. Hal tersebut menandakan bahwa tidak terjadi perubahan yang signifikan pula pada frekuensi yang dihasilkan oleh *vortex shedding*. Namun, jika dilihat pada grafik pada gambar 4.17 terlihat bahwa terjadi penurunan yang cukup tinggi, yaitu sekitar 34,78% pada nilai *Strouhal number* *wire* 90° jika dibandingkan dengan variasi geometri lainnya, hal ini mengindikasikan bahwa terjadi penurunan frekuensi pada *vortex shedding* yang dibentuk oleh variasi geometri *wire* 90°. Penurunan tersebut dapat diakibatkan oleh separasi yang terjadi lebih awal akibat pemberian *wire* pada titik sebelum separasi dan hal tersebut mengakibatkan terbentuknya *wake region* yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan variasi geometri lainnya, kemudian terbentuk aliran yang sangat asimetris dan menyebabkan kenaikan amplitudo pada *vortex shedding* yang dihasilkan. Kenaikan amplitudo tersebut yang pada akhirnya mengakibatkan getaran atau *vortex shedding* membutuhkan waktu yang lebih lama untuk membentuk satu gelombang utuh, sehingga frekuensi menurun.

Penurunan frekuensi dan peningkatan amplitudo yang terjadi pada *vortex shedding* yang dihasilkan oleh silinder sirkular dengan variasi *wire* memberikan dampak positif bagi performa silinder sirkular untuk menghasilkan energi. Seperti pada persamaan 2.10 diketahui bahwa daya memiliki hubungan linear dengan amplitudo dan terbalik dengan frekuensi, sehingga ketika amplitudo suatu *vortex shedding* tinggi dan frekuensinya rendah, maka akan menghasilkan energi yang kemudian didefinisikan sebagai daya dengan nilai yang tinggi pula. Begitupun sebaliknya, ketika amplitudo suatu *vortex shedding* maka akan menghasilkan daya yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena serta data yang didapat pada penelitian ini dapat bermanfaat untuk meningkatkan performa silinder sirkular.

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, adapun beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut :

1. Penambahan *wire* di bagian belakang silinder memberikan dampak berupa peningkatan koefisien *drag* (C_D) dan *lift* (C_L) pada silinder sirkular jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Dengan peningkatan *drag* tertinggi dialami oleh variasi *wire* 90° yaitu sebesar 105,13% dan mencapai 2,359 serta peningkatan *lift* oleh variasi *wire* 100° pada bilangan Reynolds 20000 sebesar 115% dengan nilai 1,5333. Sedangkan peningkatan *drag* terendah dialami oleh variasi *wire* 110° pada bilangan Reynolds 6000 dimana terjadi peningkatan sebesar 6,43% dengan nilai koefisien *drag* sebesar 1,803. Dari hal tersebut, maka variasi *wire* 100° dinyatakan dapat membantu meningkatkan performa silinder sirkular dengan menaikkan frekuensi dan amplitudo getaran sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular dapat memberikan pengaruh terhadap performa silinder sirkular, dimana pada variasi bilangan Reynolds 20000 untuk seluruh variasi geometri dengan penambahan *wire* menghasilkan rasio C_L'/C_D yang lebih besar jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal tersebut menandakan bahwa telah terjadi peningkatan koefisien *lift* RMS (C_L') pada variasi *wire cylinder* yang mengakibatkan silinder memiliki frekuensi dan amplitudo yang tinggi sehingga dapat menghasilkan energi lebih besar. Untuk variasi penambahan *wire* paling optimum adalah variasi penempatan pada sudut 100° , hal ini dikarenakan telah terjadi peningkatan sebesar 34,85% untuk rasio C_L'/C_D dengan nilai rasio sebesar 0,8354.
2. Penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular tidak memberikan dampak yang signifikan pada nilai *Strouhal number* (S_t) pada silinder sirkular, hal ini dikarenakan tinjauan *area* yang diinginkan adalah silinder utama itu sendiri, sehingga frekuensi yang dimiliki oleh masing-masing variasi geometri cenderung konstan pada bilangan Reynolds yang sama. Semakin besar nilai S_t , maka semakin tinggi frekuensi yang dimiliki oleh silinder sirkular. Diketahui bahwa variasi *wire* 90° memiliki frekuensi paling rendah jika dibandingkan variasi geometri lainnya, karena memiliki nilai S_t sebesar 0,15 pada seluruh bilangan Reynolds, namun nilai S_t ini dihubungkan terhadap *magnitude* C_L yang merupakan besaran hasil superposisi dari semua gelombang koefisien *lift* (C_L) yang terbentuk pada masing-masing variasi geometri, dimana variasi *wire* 90° memiliki *magnitude* C_L terbesar yaitu sebesar 2,07 pada bilangan Reynolds 20000. Hal tersebut mengindikasikan bahwa penambahan variasi geometri berupa *wire* pada sudut 90° meningkatkan amplitudo gelombang atau getaran pada silinder sirkular jika dibandingkan dengan seluruh variasi geometri lainnya termasuk *smooth cylinder*. Peningkatan amplitudo tersebut menandakan bahwa daya yang dihasilkan dari silinder dengan variasi *wire* 90° adalah paling besar jika dibandingkan dengan variasi geometri lainnya.
3. Penambahan *wire* pada *wake region* efektif dalam menurunkan nilai koefisien *pressure* (C_P), terutama pada daerah di belakang *wire*. Semakin di depan penempatan lokasi *wire*, maka reduksi tekanan juga semakin besar, seperti yang terjadi pada variasi *wire* 90° . Penurunan distribusi tekanan diiringi oleh peningkatan *vorticity* pada sisi *downstream*. Penambahan *wire* pada variasi geometri silinder sirkular memiliki pengaruh terhadap pemunduran titik separasi pada aliran yang melintasi

silinder sirkular. Mundurnya titik separasi tepat di atas *wire* menyebabkan terjadinya peningkatan pada koefisien *drag* (C_D) dan koefisien *lift* RMS (C_L') dikarenakan kemunduran titik separasi juga diiringi dengan peningkatan ketinggian letak titik separasi, yaitu kurang lebih di sisi bagian atas *wire*.

4. Berdasarkan visualisasi aliran menggunakan kontur kecepatan dan tekanan, diketahui bahwa dengan adanya penambahan *wire* di bagian belakang silinder sirkular mengakibatkan terjadinya peningkatan koefisien *lift* RMS (C_L') yang disebabkan oleh peningkatan momentum akibat agitasi yang dilakukan oleh *wire*, sehingga terjadi peningkatan momentum *boundary layer*. Peningkatan momentum sesaat tersebut menyebabkan *vortex* yang terbentuk lebih dekat dengan permukaan silinder, sehingga fluktuasi gaya *lift* semakin meningkat. Selain itu, *vortex* yang dihasilkan oleh *wire cylinder* cenderung lebih asimetris jika dibandingkan dengan *smooth cylinder*. Hal tersebut menyebabkan amplitudo gaya *lift* semakin meningkat.

5.2 Saran

Adapun saran yang diberikan untuk kebaikan dan kemajuan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut :

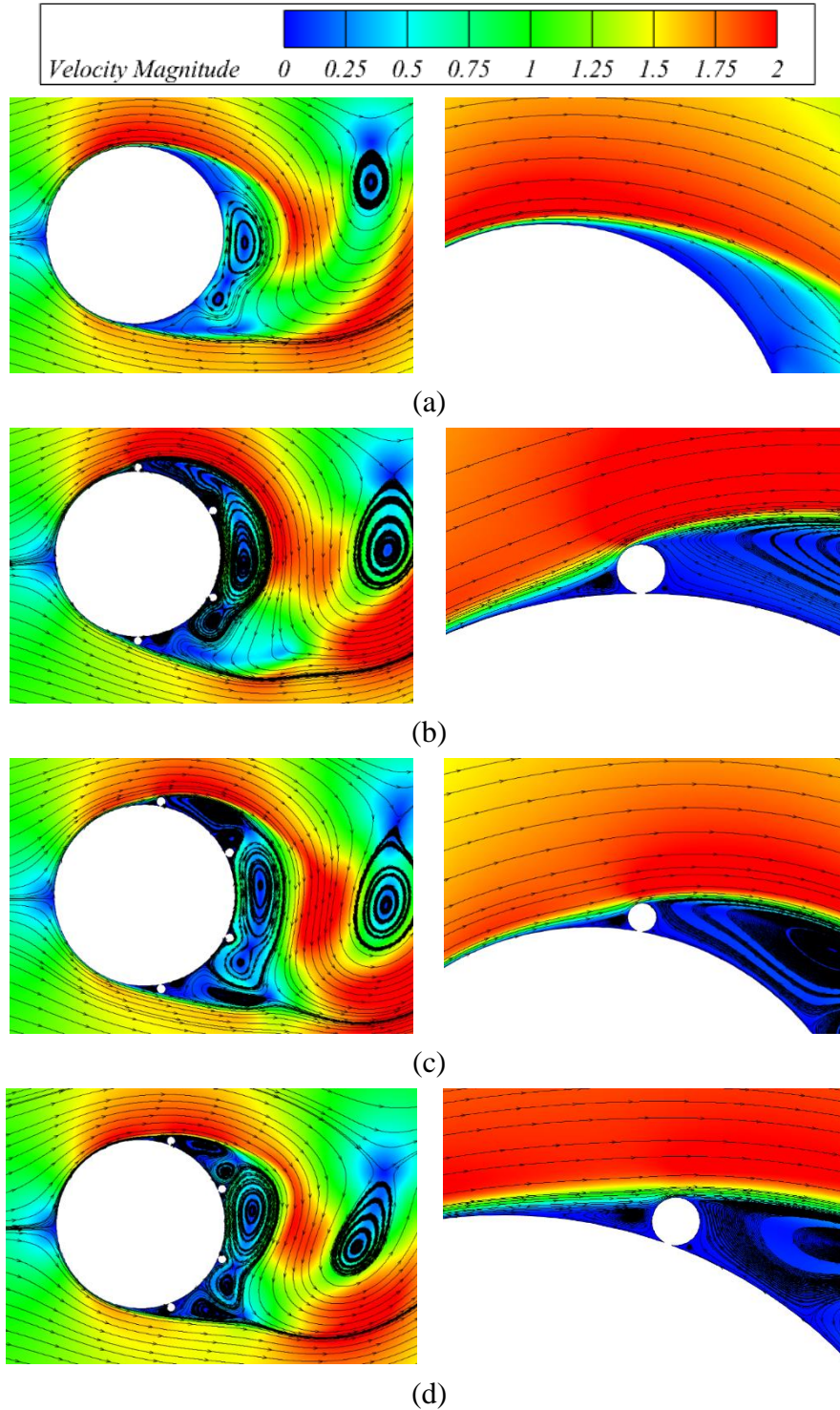
1. Penelitian lebih lanjut menggunakan diameter *wire* yang lebih kecil agar tidak menghasilkan koefisien *drag* yang relatif begitu besar akibat luas permukaan yang terkena aliran fluida juga besar.
2. Penelitian lebih lanjut dengan silinder sirkular yang bergerak dibutuhkan untuk mengetahui desain sistem yang lebih baik dalam meningkatkan getaran.
3. Simulasi dengan model benda uji tiga dimensi (3D) diperlukan untuk mengetahui fenomena aliran yang terjadi secara detail.

DAFTAR PUSTAKA

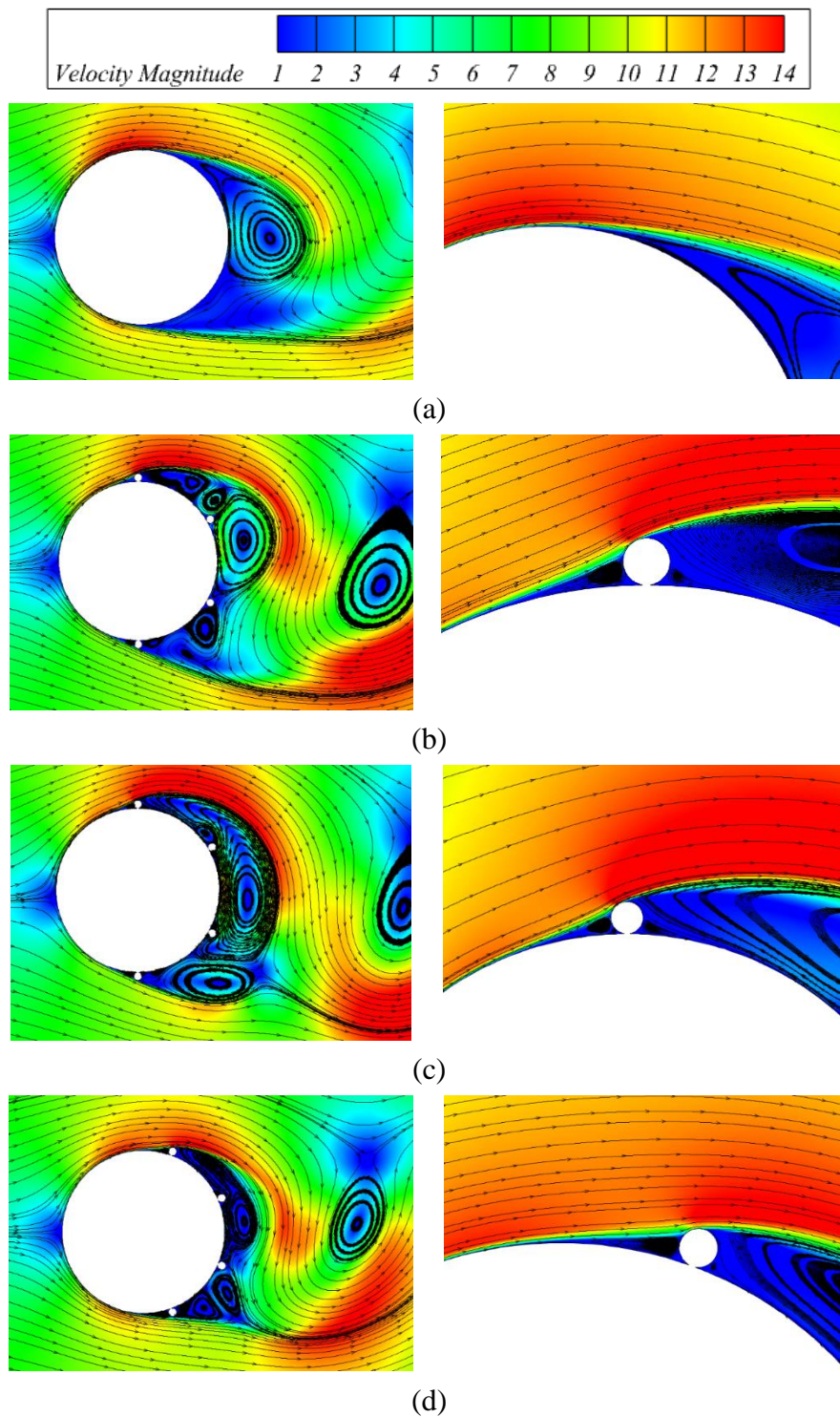
- (IEA), I. E. (2021). Net-Zero Emissions by 2050 Scenario. pp. 13-27. Retrieved from iea.li/nzeroadmap; iea.li/nzeroadmap
- (IEA), I. E. (2021). Renewables 2021: Analysis and Forecast to 2026. 14-20. Retrieved from www.iea.org
- BR, M., Theodore H, O., Wade W, H., & Alric P, R. (2013). Fundamental of Fluid Mechanics 7th Edition.
- Drescher, H. (1956). Messung der auf querangeströmte Zylinder ausgeübten zeitlich veränderten Drucke. 17-21.
- Fernandes, A. C., Mirzaeisefat, S., & Cascao, L. V. (2014). Fundamental Behavior of Vortex Self Induced Vibration (VSIV). 183-191.
- Govardhan, R., & Williamson, C. (2002). Resonance Forever: Existence of a Critical Mass and an Infinite Regime of Resonance in Vortex-Induced Vibration. 473, 147-166.
- Guinnes, I., & Persoons, T. (2021). Passive Flow Control for Drag Reduction on a Cylinder in Cross-Flow Using Leeward Partial Porous Coatings. *Fluids*, 1-17.
- J D, A. (2011). *Fundamental of Aerodynamics Fifth Edition*. USA: McGraw-Hill.
- Katopodes, N. D. (2019). Free-Surface Flow. *Environmental Fluid Mechanics*, 324-426. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815489-2.00005-8>
- Khalak, A., H.K, C., & Williamson. (1997). Investigation of Relative Effects of Mass and Damping in Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder. 69-71, 341-350.
- M, S., & J, F. (2006). Hydrodynamics Around Cylindrical Structure.
- Nishi, Y., & Quadrante, L. A. (2014). Amplification/Suppression of Flow-Induced Motions of an Elastically Mounted Circular Cylinder by Attaching Tripping Wires. *Journal of Luids and Structures*.
- Pritchard, P. J., & Leylegian, J. C. (2011). *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*. United States of America: Copyright Clearance Center, Inc., 222.
- Sarker, M. (1998). Flow measurement around scoured bridge piers using Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV). *Flow Meas*, 9, 217-227.
- Schewe, G. (1983). On The Force Fluctuations Acting on A Circular Cylinder in Crossflow from Subcritical Up To Transcritical Reynolds Numbers. *J. Fluid Mech*, 133, 265-285.
- Stinson, A. H., & Lehrman, C. (2011). Energy Generation From Vortex Induced Vibration. 12-17.
- Yan, F., Yang, H., & Wang, L. (2021). Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface. *Water*, 13, 1-20.
- Zdravkovich, M. (1981). Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means For Suppressing Vortex Shedding. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 7, 145-189.
- Zhou, B., Li, Y., Wang, Z., Guo, W., & Tan, S.-K. (2016). Experimental Study of Dynamic Drag and Lift Characteristic of Dimpled Cylinders. *Marine Technology Society Journal*, 50, 56-61.
- Zhou, B., Wang, X., Gho, W. M., & Tan, S. K. (2014). Force and Flow Characteristics of a Circular Cylinder with Uniform Surface Roughness at Subcritical Reynolds Numbers. *Applied Ocean Research* 49, 20-26.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A : Kontur Kecepatan untuk Setiap Variasi Geometri Silinder Sirkular pada $Re = 6000$ dan $Re = 40000$

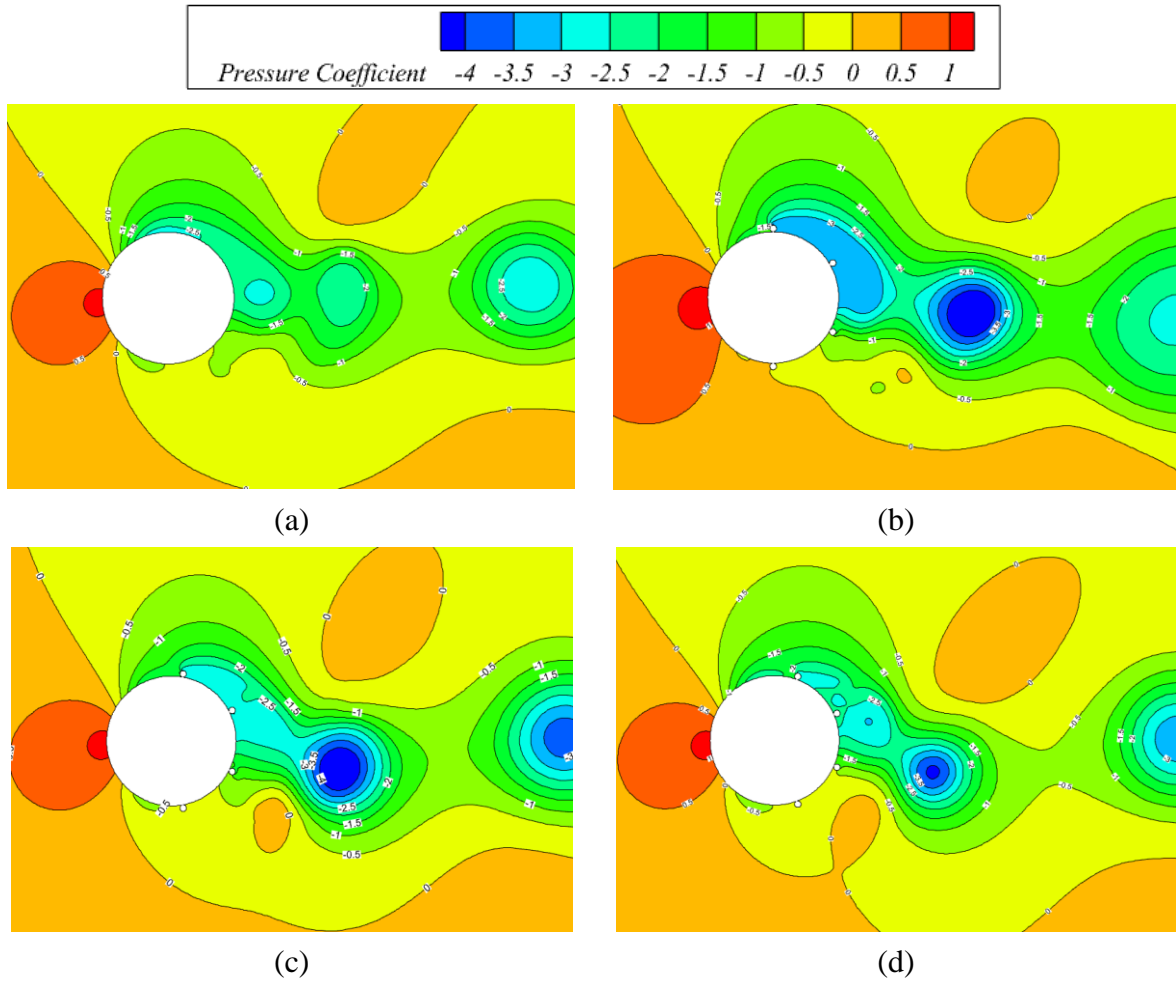


Gambar A-1 Kontur kecepatan aliran untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 6000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; (d) *wire 110°*.

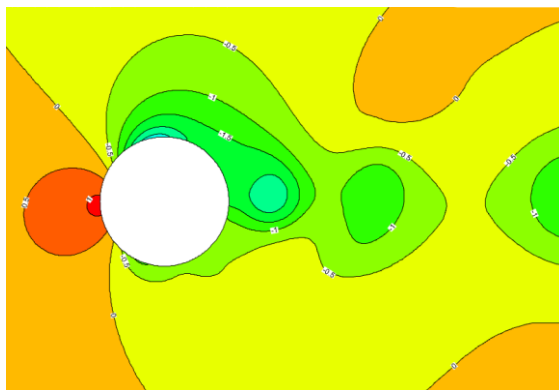
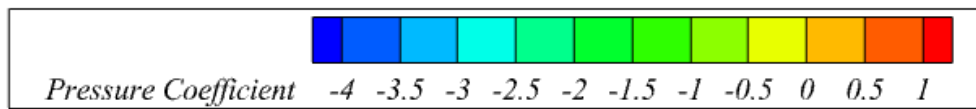


Gambar A-2 Kontur kecepatan aliran untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 40000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; (d) *wire 110°*.

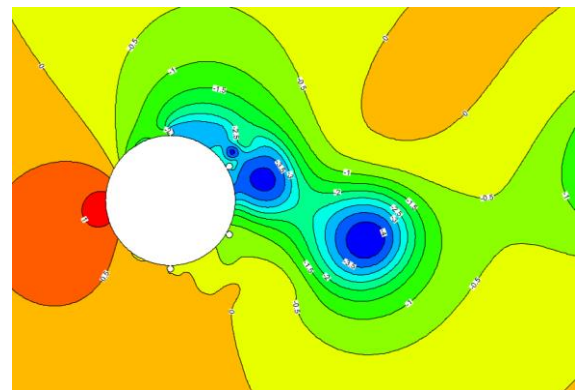
LAMPIRAN B : Kontur Koefisien *Pressure* untuk Setiap Variasi Geometri Silinder Sirkular pada $Re = 6000$ dan $Re = 40000$



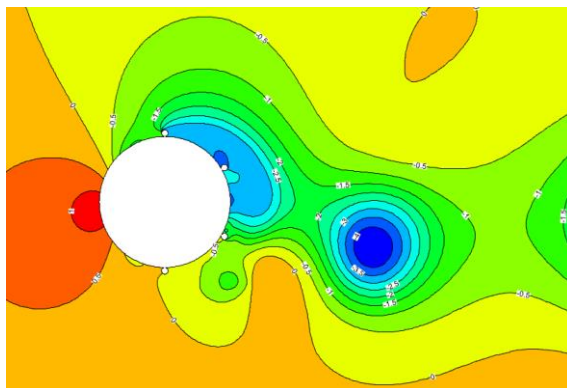
Gambar B-1 Kontur koefisien *pressure* untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 6000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; (d) *wire 110°*.



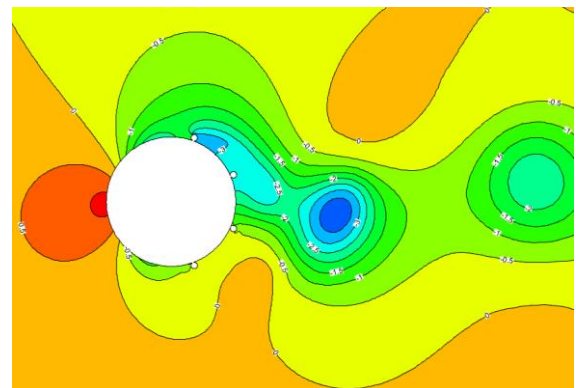
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar B-2 Kontur koefisien *pressure* untuk setiap variasi geometri silinder sirkular pada $Re = 40000$; (a) *smooth cylinder*; (b) *wire 90°*; (c) *wire 100°*; (d) *wire 110°*.

BIODATA PENULIS



Sandrina Nurdiana lahir di Denpasar, 12 Desember 1999, merupakan anak sulung dari tiga bersaudara dari pasangan Mukhlis Prasetya dan Wahyu Sulistyowulan. Penulis telah menempuh pendidikan formal tingkat dasar di SD Negeri Model Banyuwangi hingga tahun 2012. Kemudian melanjutkan pendidikan menengah pertamanya di SMP Negeri 1 Banyuwangi hingga 2015 dan lulus pendidikan menengah atasnya di SMA Negeri 1 Glagah Banyuwangi pada tahun 2018. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya sejak tahun 2018 hingga 2022. Penulis mengambil bidang Konversi Energi dalam studinya di Teknik Mesin FT-IRS ITS.

Pada masa perkuliahan, selain bidang akademik, penulis aktif dalam bidang non akademik. Pada tahun 2019-2020 penulis menjadi *Organizing Comitte* (OC) acara kaderisasi PISTON 2020 dan pada tahun yang sama, penulis juga menjadi Staf Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Mesin ITS. Kemudian pada tahun 2020-2021, penulis menjabat sebagai Sekretaris Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Mesin ITS. Selain aktif dalam organisasi, adapun pelatihan yang penulis ikuti seperti Pelatihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Dasar (LKMM TD) 2019, *Advanced Leadership Training* (ALT) 2020, Pelatihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa Tingkat Menengah Nasional dengan tema Pengembangan Wawasan 2020, dan Sekolah Kaderisasi ITS (SEKAI) 2021. Pada tahun 2021, penulis mendapat kesempatan untuk melaksanakan Kerja Praktik di PT Pelopor Teknologi Industri (PTI) Mojokerto dan ditempatkan pada Divisi Produksi selama satu bulan. Pada akhirnya, pada tahun 2022 penulis menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Penggunaan dan Lokasi Penempatan *Wire* terhadap Performa *Circular Cylinder* Dengan $D = 80$ mm dan Variasi *Reynolds Number* untuk *Energy Harvesting* pada *Ducting System*” dengan harapan dapat memberikan sedikit manfaat bagi khalayak luas. Untuk informasi, saran, maupun pertanyaan terkait Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui surat elektronik : sandrinan12@gmail.com.