



Tesis - SM142501

SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA DI SEKITAR SILINDER SIRKULAR DAN TIGA KENDALI PASIF

AMIRUL HAKAM
06111650010017

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Chairul Imron, M.I. Komp.

PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN MATEMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA KOMPUTASI DAN SAINS DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



Thesis - SM142501

***NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW AROUND
THE CIRCULAR CYLINDER AND THREE PASSIVE
CONTROLS***

AMIRUL HAKAM
06111650010017

SUPERVISOR
Dr. Chairul Imron, M.I. Komp.

MASTER DEGREE
MATHEMATICS DEPARTMENT
FACULTY OF MATHEMATICS COMPUTATION AND DATA SCIENCE
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Sains (M.Si.)

di
Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Amirul Hakam
NRP. 0611 1650 010 017

Tanggal Ujian : 30 Juli 2018
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh:

Dr. Chairul Imron, M.I. Komp.
NIP. 19611115 198703 1 003

(Pembimbing)

Dr. Mahmud Yunus, M.Si.
NIP. 19620407 198703 1 005

(Pengaji)

Dr. Dra. Mardlijah, MT.
NIP. 19670114 199102 2 001

(Pengaji)

Dekan FMKSD,
Prof. Dr. Basuki Widodo, M.Sc.
NIP. 19650605 198903 1 002

SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA DI SEKITAR SILINDER SIRKULAR DAN TIGA KENDALI PASIF

Nama : Amirul Hakam

NRP : 06111650010017

Pembimbing : Dr. Chairul Imron, M.I. Komp.

ABSTRAK

Perencanaan dan analisis dibidang infrastruktur seperti tiang penyangga jembatan dan sistem perpipaan laut lepas pantai sangat diperlukan mengingat bahwa keselamatan pengguna adalah hal yang utama. Fluida yang melintas akan menimbulkan gaya hambat dan mempengaruhi ketahanan bangunan tersebut. Persamaan Navier-Stokes digunakan sebagai persamaan aliran fluida yang melintasi objek, dengan asumsi fluida bersifat *continue, incompressible* dan *unsteady*. Pada penelitian ini, aliran fluida melintasi objek berbentuk silinder sirkular dan tiga kendali pasif dengan tujuan memperkecil koefisien hambat yang diterima silinder sirkular. Persamaan Navier-Stokes diselesaikan secara numerik menggunakan metode beda hingga dan algoritma SIMPLE. Berdasarkan hasil simulasi numerik, profil kecepatan di sekitar silinder sirkular dengan menggunakan tiga kendali pasif dapat terbentuk *wake* yang lebih sempit dari pada silinder sirkular tanpa kendali pasif. Konfigurasi tiga kendali pasif yang tepat yaitu kendali pasif pertama diletakkan di depan silinder sirkular dari arah masuk aliran fluida pada jarak $S = 2.4D$ dari pusat silinder sirkular dan dua kendali pasif lainnya diletakkan di belakang silinder sirkular pada jarak $T = 1.6D$ dan besar sudut antara dua kendali pasif tersebut adalah 60° untuk aliran fluida pada bilangan Reynolds 500 sehingga dapat memperkecil koefisien hambat hingga 21.2109%. Sedangkan pada aliran fluida dengan bilangan Reynolds 5000, konfigurasi tiga kendali pasif yang paling optimal yaitu dengan meletakkan satu kendali pasif di depan silinder sirkular dari arah masuk aliran fluida pada jarak $S = 2.4D$ dari pusat silinder sirkular dan dua kendali pasif diletakkan dibelakang pada jarak $T = 1.8D$ dengan besar sudut antara dua kendali pasif terbut adalah 60° dapat memperkecil koefisien hambat hingga 19.3358 %.

Kata kunci: Kendali Pasif, Silinder Sirkular, Koefisien Hambat, Titik Separasi, *Wake*

NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW AROUND THE CIRCULAR CYLINDER AND THREE PASSIVE CONTROLS

Name : Amirul Hakam
NRP : 06111650010017
Supervisor : Dr. Chairul Imron, M.I. Komp.

ABSTRACT

Planning and analysis in the field of infrastructure such as bridge supports and offshore piping systems is needed that user safety is the main thing. Fluid passing through will cause drag and affect the resistance of the building. The Navier-Stokes equation is used as an equation for fluid flow across an object, with assumption the fluid is continuous, incompressible and unsteady. In this study, fluid flow across circular cylinders and three passive controls. The aim is reducing the drag coefficient received by a circular cylinder. The Navier-Stokes equation is solved numerically using finite difference methods and SIMPLE algorithms. Based on the results of numerical simulations, the velocity profile around a circular cylinder using three passive controls can be formed a wake that is narrower than a circular cylinder without passive control. The best configuration of three passive controls is the first passive control placed in front of the circular cylinder from the direction of fluid flow at the distance $S=2.4D$ from the center of the circular cylinder and the other two passive controls are placed behind the circular cylinder at a distance $T=1.6D$ and the angle between the two passive controls is 60° for fluid flow at Reynolds number 500. So, the drag coefficient can be reduced to 21,210%. Whereas in the fluid flow with Reynolds number 5000, the optimal three passive controls configuration is by placing a passive control in front of the circular cylinder from the inlet direction of fluid flow at a distance $S=2.4D$ from the center of the circular cylinder and two passive controls are placed behind at a distance $T=1.8D$ with a large angle between the two passive controls is 60° . It can reduce the drag coefficient up to 19,3358%.

Keywords: *Passive Control, Circular Cylinder, Drag Coefficient, Separation Point, Wake*

X

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, Maha Kuasa atas segala sesuatu, yang telah mengizinkan penulis untuk dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “*Simulasi Numerik Aliran Fluida Di Sekitar Silinder Sirkular Dan Tiga Kendali Pasif*”. Tidak lupa, sholawat serta salam penulis haturkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, atas cahaya lurus yang senantiasa Beliau sebarkan.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada pihak-pihak yang membantu dalam menyelesaikan Tesis ini, khususnya kepada:

1. Bapak Dr. Chairul Imron, MI. Komp. selaku dosen pembimbing atas segala bimbingan, saran, dukungan, kesabaran dan waktu yang diberikan kepada penulis hingga Tesis ini selesai.
2. Bapak Dr. Mahmud Yunus, M. Si. dan Ibu Dr. Dra. Mardlijah, MT. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran demi perbaikan Tesis ini.
3. Seluruh dosen Departemen Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember, atas ilmu yang telah diberikan selama penulis menempuh masa perkuliahan.
4. Orang tua tercinta, Bapak Suwarno dan Ibu Sri Wahyuning Tyas atas segenap cinta, kasih sayang, doa, serta perhatian yang tidak pernah henti diberikan untuk penulis.
5. Saudara-saudara tercinta, Mbak Swasti Nur Ayni, Adik Nurul Fatonah dan seluruh keluarga yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
6. Liyana Wulandhari, S. Si. yang selalu memberikan dukungan dan semangat kepada penulis.
7. Teman-teman pejuang wisuda 118 yang telah berbagi suka dan duka dalam mengerjakan Tesis ini.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu dalam pengerjaan Tesis ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan baik dari segi teknik penulisan maupun materi, oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tesis ini. Semoga Tesis ini dapat memberikan banyak manfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Agustus 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
TITLE PAGE	iii
PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
<i>ABSTRACT</i>	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Aliran Melintasi Suatu Benda	5
2.2 Aliran Melintasi Silinder Sirkular Tunggal	6
2.3 Aliran Melintasi Silinder Sirkular Dengan Kendali Pasif	8
2.4 Titik Separasi Dan <i>Wake</i>	10
2.5 Koefisien Hambat.....	11
2.6 Aturan Simpson	12
2.7 Model Matematika Aliran Fluida	13
2.8 Algoritma SIMPLE	17
2.9 Metode SOR	18
BAB III METODE PENELITIAN	19
3.1 Studi Literatur.....	20
3.2 Penyelesaian Numerik	20

3.3 Pembuatan Simulasi	22
3.4 Analisis Hasil	22
BAB IV PEMBAHASAN	23
4.1 Perancangan Skema Simulasi	23
4.2 Penyelesaian Numerik	23
4.2.1 Pembentukan Grid dan Diskritisasi	25
4.2.2 Simulasi	30
4.3 Analisis Hasil Simulasi	31
4.3.1 Validasi <i>Code Program</i>	31
4.3.2 Profil Aliran Fluida, <i>Streamline</i> dan <i>Wake</i>	32
4.3.3 Distribusi Koefisien Tekanan dan Koefisien Hambat	40
4.3.4 Profil Kecepatan Aliran Fluida didaerah Wake.....	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	47
DAFTAR PUSTAKA.....	49
LAMPIRAN	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Streamline</i> di sekeliling <i>bluff body</i>	5
Gambar 2.2	<i>Streamline</i> di sekeliling <i>streamline body</i>	5
Gambar 2.3	Profil <i>streamline</i> aliran fluida yang melintasi silinder tunggal pada Re=100	7
Gambar 2.4	Profil kecepatan aliran di daerah <i>wake</i> dengan bilangan Reynolds 100	7
Gambar 2.5	Profil <i>streamline</i> aliran fluida yang melintasi silinder tunggal dan kendali pasif tunggal pada jarak (a)S/D=1.2 (b)S/D=2.4	8
Gambar 2.6	Skema silinder sirkular dengan dua kendali pasif	9
Gambar 2.7	Profil aliran fluida di lapisan batas silinder sirkular.....	10
Gambar 2.8	Pendekatan dengan Aturan Simpson	12
Gambar 2.9	(a) Elemen fluida, (b) Aliran massa jenis masuk dan keluar.....	13
Gambar 2.10	<i>Staggered Grid</i>	17
Gambar 2.11	Algoritma SIMPLE	18
Gambar 3.1	Skema silinder sirkular dengan tiga kendali pasif	19
Gambar 3.2	Tahapan penyelesaian numerik sampai simulasi.....	21
Gambar 4.1	Algoritma metode SOR	29
Gambar 4.2	<i>Main code program</i> simulasi.....	31
Gambar 4.3	Profil kontur <i>velocity</i> dan <i>streamline</i> aliran fluida pada (a) Re=500 dan (b) Re=5000	32
Gambar 4.4	Profil aliran fluida pada Re=500 dan kendali pasif di belakang silinder pada jarak T=1.6D dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°	30
Gambar 4.5	Profil aliran fluida pada Re=500 dan kendali pasif di belakang silinder pada jarak T=1.8D dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°	35
Gambar 4.6	Profil kecepatan aliran fluida pada Re=500 di sekitar silinder sirkular	36
Gambar 4.7	Profil aliran fluida pada Re=5000 dan kendali pasif di belakang	

silinder sirkular pada jarak $T=1.6D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°	37
Gambar 4.8 Profil aliran fluida pada $Re=5000$ dan kendali pasif di belakang silinder sirkular pada jarak $T=1.8D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°	39
Gambar 4.9 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=5000$ di sekitar silinder sirkular	40
Gambar 4.10 Distribusi koefisien tekanan di sekitar silinder sirkular $Re=500$	41
Gambar 4.11 Distribusi koefisien tekanan di sekitar silinder sirkular $Re=5000$..	42
Gambar 4.12 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=500$ dengan jarak dua kendali pasif di belakang silinder (a) $T=1.6D$ dan (b) $T=1.8D$	44
Gambar 4.13 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=5000$ dengan jarak dua kendali pasif di belakang silinder (a) $T=1.6D$ dan (b) $T=1.8D$	45

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan koefisien hambat pada beberapa bilangan Reynolds dari beberapa peneliti	6
Tabel 2.2 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan kendali pasif tunggal dengan variasi rasio jarak S/D pada Re=100	8
Tabel 2.3 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan dua kendali pasif dengan variasi rasio jarak T/D pada Re=100	9
Tabel 4.1 Perbandingan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular pada Re=100 hasil peneliti dengan peneliti lain	32
Tabel 4.2 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan tiga kendali pasif pada Re=500	41
Tabel 4.3 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan tiga kendali pasif pada Re=5000	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	<i>Source Code</i> dari <i>main program</i> simulasi	53
Lampiran B	<i>Source Code</i> dari fungsi-fungsi dalam <i>main program</i>	55

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring berkembangnya teknologi komputer, peristiwa atau fenomena-fenomena yang terjadi dalam kehidupan sehari-hari menjadi lebih mudah diselesaikan. Salah satu bidang ilmu yang memanfaatkan teknologi komputer yaitu CFD (*Computational Fluid Dynamics*). CFD adalah salah satu bidang ilmu yang mempelajari cara untuk mengetahui karakteristik dan fenomena-fenomena dalam fluida dinamik melalui model matematika dan berdasarkan hukum-hukum fisis yang berlaku (Versteeg & Malalasekera, 2007). Dengan CFD, dapat dilakukan suatu analisis, evaluasi dan optimasi pada *prototype* seperti blok mesin, pesawat terbang, system perpipaan dan lain sebagainya.

Penerapan CFD dalam kehidupan sehari-hari semakin berkembang dan konsep-konsep mengenai fluida berhasil diperoleh. Salah satu konsep penting dalam fluida dinamik adalah konsep lapisan batas. Setelah konsep lapisan batas ditemukan, penelitian tentang fenomena aliran fluida yang melintasi permukaan luar objek berkembang pesat. Konsep lapisan batas memiliki peranan penting terhadap karakteristik aliran fluida di sekitar objek seperti jenis aliran fluida setelah melewati objek, koefisien hambat dan distribusi tekanan yang diterima oleh objek. Fluida yang mengalir pada suatu permukaan luar objek, baik fluida laminar atau turbulen, maka partikel-partikel di sekitar permukaan bergerak lambat akibat gaya viskos. Partikel-partikel fluida yang dekat dengan permukaan objek akan menempel pada permukaan tersebut dan kecepatannya relatif nol terhadap batas. Sementara partikel-partikel fluida lainnya yang berada diatas partikel yang diam akan bergerak lambat akibat interaksi antar partikel fluida.

Adanya fasilitas teknologi komputer saat ini yang semakin canggih, mendorong peneliti untuk melakukan berbagai macam penelitian. Hasil penelitian diharapkan dapat digunakan untuk mengembangkan atau menemukan cara baru yang lebih bermanfaat. Salah satu penelitian di bidang fluida dinamik yaitu aliran fluida yang mengalir melalui suatu objek tunggal. Tujuan penelitian tersebut yaitu

untuk mengetahui karakteristik aliran fluida yang melalui suatu objek. Bentuk geometri objek tersebut sangat berpengaruh terhadap karakteristik aliran fluida. Beberapa penelitian aliran fluida yang melalui objek tunggal telah dilakukan yaitu objek tunggal berbentuk persegi (Song&Park, 2009), berbentuk sirkular (A.O. Ladjedel & Imine, 2011), berbentuk elips (M. Sudharsan & Tiwari, 2010). Modifikasi bentuk objek juga dilakukan, seperti bentuk silinder tipe-D (Yuwono & Widodo, 2010), bentuk silinder tipe-I (Igarashi & Shiba, 2006), silinder tidak beraturan (Shen-Wei Su & Lin, 2007). Aliran fluida yang melalui lebih dari satu objek berbentuk silinder dengan ukuran yang sama dengan cara tandem atau *side-by-side* (Lavasani & Bayat, 2012; Ming-Jyh Chern & Chang, 2010; Shams & Ahmad, 2009; Zulhidayat & Horng, 2009), dengan ukuran yang berbeda dan tersusun tandem (Tsutsui & Igarashi, 2002; Bouak & Lemay, 1998).

Koefisien hambat yang diterima objek merupakan salah satu hal penting yang perlu diamati. Koefisien hambat yang diterima oleh objek harus diperkecil, salah satu metode yang dapat dilakukan yaitu menggunakan kendali aktif atau kendali pasif (Yazig, dkk., 2012). Metode kendali aktif dilakukan dengan memberikan energi dari luar sehingga memerlukan peralatan yang kompleks seperti memberikan hembusan jet. Sedangkan metode kendali pasif dapat dilakukan dengan cara meletakkan suatu objek disekitar *bluff body*. Penggunaan kendali pasif secara umum lebih mudah diinvestigasi dan diterapkan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu kendali pasif tunggal berbentuk silinder tipe-I diletakkan di depan silinder sirkular (Y. Triyogi dkk., 2009), dua kendali pasif berbentuk silinder kecil diletakkan di belakang silinder sirkular (C.-H. Kuo, C.-C. Chen, 2009), dua kendali pasif berbentuk plat yang disusun secara parallel diletakkan di belakang silinder (Y. Bao, J. Tao, 2012), enam kendali pasif berbentuk silinder kecil diletakkan di sekitar silinder sirkular (Lin Lu dkk, 2014), dua kendali pasif yaitu kendali pasif pertama diletakkan didepan silinder sirkular berbentuk silinder tipe-I posisi vertikal dan kendali pasif kedua diletakkan dibelakang silinder berbentuk silinder tipe-I posisi horizontal (Widodo, B., dkk 2017), penelitian serupa dengan kendali kedua berbentuk elips diletakkan di belakang silinder sirkular (Imron, C., 2018). Selain bentuk geometri kendali pasif, besar kecilnya koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular tergantung

pada perbandingan jarak antara pusat kedua silinder dengan diameter silinder dan tergantung juga pada bilangan Reynolds yang digunakan (Imron, C. & Yuwono, 2014).

Berdasarkan penelitian-penelitian diatas, pada penelitian ini akan dikaji aliran fluida melewati silinder sirkular menggunakan tiga kendali pasif untuk menurunkan koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana konfigurasi tiga kendali pasif yang paling efektif untuk menurunkan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular ?
2. Bagaimana karakteristik aliran fluida yaitu *wake*, distribusi tekanan dan koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular dengan tiga kendali pasif ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menggunakan persamaan Navier-Stokes sebagai persamaan matematika aliran fluida *unsteady* dan *incompressible*.
2. Aliran fluida melalui silinder dengan bilangan Reynolds 500 dan 5000.
3. Arah masuk aliran fluida sejajar dengan garis pusat silinder sirkular sudut 0° .
4. Kendali pasif pertama berbentuk silinder tipe-I dengan sudut potong 53° diletakkan di depan silinder sirkular dari arah masuk aliran fluida dengan posisi tetap yaitu pada jarak $S = 2.4D$. S adalah jarak kendali pasif pertama dengan silinder sirkular, D adalah diameter silinder sirkular.
5. Dua kedali pasif lainnya berbentuk silinder sirkular kecil diletakkan di belakang silinder sirkular dari arah masuk aliran fluida dengan jarak yang bervariasi yaitu $T = 1.6 D$ dan $1.8 D$. T adalah jarak antara silinder sirkular dengan kedua kendali pasif lainnya. Sedangkan sudut antara dua kendali

pasif tersebut yaitu 30° , 60° , 90° dan 120° , dimana sumbu simetri sudut antara kendali pasif yaitu garis pusat silinder sirkular pada sudut 0° .

6. Diameter kendali pasif (d) adalah sama. Perbandingan diameter kendali pasif dengan diameter silinder sirkular yaitu $d / D = 0.125$.
7. Material silinder sirkular dan kendali pasif diabaikan.

1.4 Tujuan

Tujuan dari pengerjaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mencari koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dari berbagai konfigurasi kendali pasif.
2. Mencari posisi titik separasi pada silinder sirkular sehingga dapat mengetahui daerah *wake* yang terbentuk.
3. Mencari distribusi tekanan pada silinder sirkular.
4. Mengkaji perbedaan karakteristik aliran fluida yang melalui silinder sirkular dengan tiga kendali pasif akibat pengaruh variasi jarak dan sudut kendali pasif yang diletakkan di belakang silinder sirkular.

1.5 Manfaat

Manfaat yang bisa diperoleh dari pengerjaan penelitian ini adalah

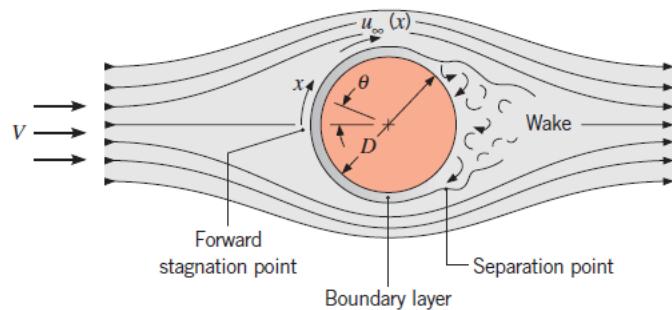
1. Adanya kajian baru tentang simulasi numerik aliran fluida yang melintasi silinder sirkular dengan tiga kendali pasif.
2. Mengetahui konfigurasi tiga kendali pasif yang efektif untuk menurunkan koefisien hambat pada silinder sirkular sebagai representasi tiang pancang bangunan lepas pantai atau infrastruktur lainnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

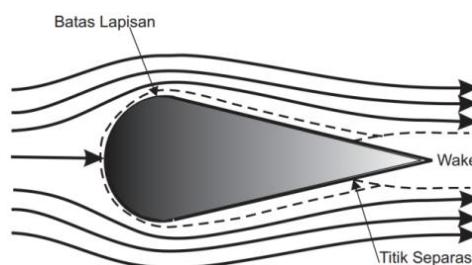
2.1. Aliran Melintasi Suatu Benda

Aliran yang melintasi suatu permukaan benda digolongkan sebagai aliran luar (*external flow*). Sebuah objek yang dilewati aliran dapat diklasifikasikan sebagai *bluff body* seperti pada Gambar 2.1, *streamlined body* seperti pada Gambar 2.2 dan tergantung pada karakteristik aerodinamika di sekeliling objek aliran tersebut.



Gambar 2.1 : Streamline disekeliling *bluff body*

Aliran yang melewati di sekeliling *bluff body* akan terjadi separasi karena geometri objek *bluff body* memiliki hambatan fluida yang tinggi, sedangkan aliran yang melewati di sekeliling *streamlined body* dengan geometri objek yang memiliki hambatan fluida rendah akan menyebabkan alirannya seperti berlapis-lapis kecuali pada bagian belakang objek. Pada objek yang sama dapat juga dikatakan sebagai *streamlined body* maupun *bluff body*, tergantung pada orientasi aliran yang melalui benda tersebut.



Gambar 2.2 : Streamline disekitar *streamlined body*

Gaya hambat pada *bluff body* umumnya didominasi oleh *pressure drag*, sedangkan pada *streamlined body* umumnya didominasi oleh *skin friction drag*. Meskipun demikian, *pressure drag* memberikan kontribusi juga terhadap adanya gaya hambat yang diakibatkan oleh separasi dan *wake* di belakang objek. Perbedaan *pressure drag* diantara kedua objek tersebut menyebabkan perbedaan gaya hambat yang besar.

2.2. Aliran Melintasi Silinder Sirkular Tunggal

Silinder sirkular adalah salah satu contoh dari geometri *bluff body* dua dimensi. Meskipun geometrinya sederhana, aliran eksternal yang terjadi menjadi kompleks dan berubah seiring berubahnya bilangan Reynolds. Besarnya bilangan Reynolds yaitu

$$R_e = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}$$

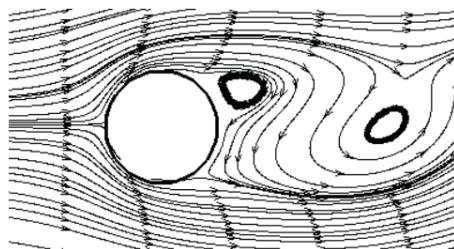
dengan ρ adalah massa jenis fluida (kg/m^3) , μ adalah viskositas fluida $(kg/(m.s))$, D adalah diameter objek (m) dan U_∞ adalah kecepatan aliran bebas (m/s) . Sehingga, bilangan Reynolds merupakan bilangan tanpa skalar. Bilangan Reynolds dapat digunakan untuk menunjukkan jenis aliran yaitu $R_e < 2300$ adalah aliran laminar, $2300 < R_e < 4000$ aliran transisi dan $R_e > 4000$ aliran turbulen (Holman, J. P., 2002).

Chairul Imron dan Yuwono pada tahun 2014 telah melakukan penelitian mengenai aliran yang melintasi silinder sirkular tunggal untuk menghitung koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular dengan variasi bilangan Reynolds. Hasil perhitungan koefisien hambat dibandingkan dengan penelitian yang lain dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1: Perbandingan koefisien hambat pada beberapa bilangan Reynolds dari beberapa peneliti

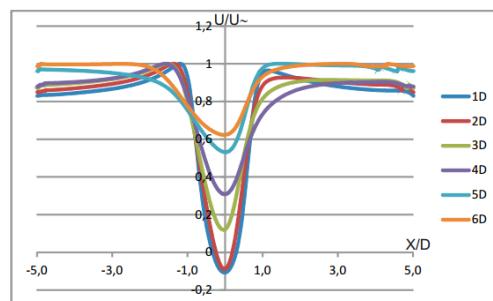
Bilangan Reynolds	Imron	Dias	Pan	Zulh	Lima
40	1.46986	1.54	1.51	1.56	1.54
100	1.35837	1.395	1.32	1.4	1.39

Selain memperoleh hasil perhitungan koefisien hambat, diperoleh juga data distribusi tekanan di sekitar silinder sirkular. Berdasarkan data distribusi tekanan yang diterima silinder sirkular pada bilangan Reynolds 100, tekanan terbesar terjadi pada sudut 0° atau tepat pada titik stagnasi sebesar 1 dan tekanan terkecil terjadi pada sudut 90° yaitu -0.82674 . Hal ini menunjukkan bahwa pada sudut $0^\circ - 90^\circ$ terjadi kenaikan kecepatan aliran, berlaku juga pada sudut $0^\circ - 270^\circ$ dengan menurunnya tekanan yang diterima silinder yaitu -0.89179 . Profil *streamline* pada bilangan Reynolds 100 dapat dilihat dari Gambar 2.3. Dari profil *streamline* dapat dicari titik balik disekitar silinder sirkular (titik separasi).



Gambar 2.3: Profil *streamline* aliran fluida yang melintasi silinder tunggal pada bilangan Reynolds 100

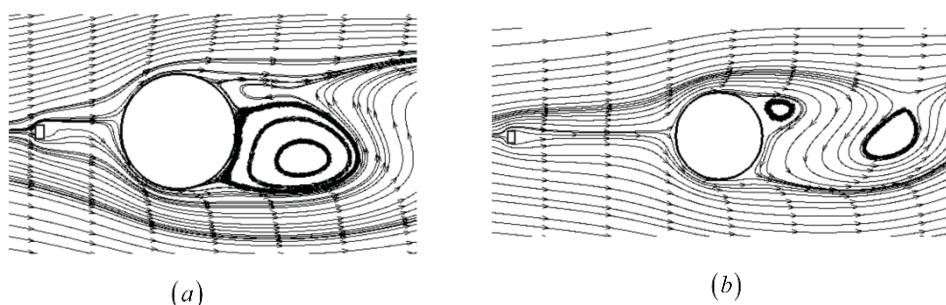
Titik separasi terjadi setelah tekanan minimum atau kecepatan aliran tinggi. Titik separasi pada bagian atas silinder sirkular terjadi pada sudut 128° , sedangkan titik separasi pada bagian bawah silinder sirkular terjadi pada 233° . Sehingga lebar antara titik separasi bagian atas dan titik separasi bagian bawah adalah 105° . Sedangkan profil data wake yang terjadi di sekitar silinder sirkular disajikan pada Gambar 2.4. *Wake* terendah terjadi pada jarak $1D$ dibelakang silinder, sedangkan *wake* tertinggi terjadi pada jarak $6D$ dibelakang silinder.



Gambar 2. 4: Profil kecepatan aliran di daerah *wake* pada $Re=100$.

2.3. Aliran Melintasi Silinder Sirkular Dengan Kendali Pasif

Salah satu metode untuk mengurangi gaya hambat yang diterima oleh silinder sirkular yaitu dengan kendali pasif. Kendali pasif dapat berupa objek tambahan yang diletakkan di sekitar silinder sirkular. Kendali pasif yang digunakan bisa berupa kendali pasif tunggal atau lebih dari satu. Kendali pasif tunggal diletakkan di depan silinder sirkular dengan bentuk silinder kecil yang dimodifikasi menjadi bentuk silinder tipe-I dengan sudut potong 53° . (C. Imron, 2014). Dengan skema seperti pada gambar 1.1. telah diinvestigasi pengaruh variasi jarak S/D dimulai dari 0.6 – 3.0 pada bilangan Reynolds 100. Dengan simulasi numerik diperoleh hasil visualisasi profil streamline seperti pada Gambar 2.5.



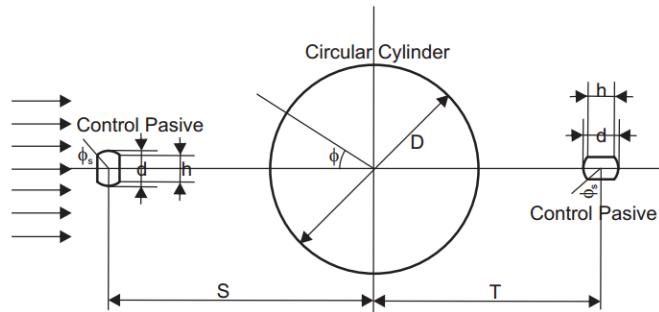
Gambar 2.5: Profil *streamline* aliran fluida yang melintasi silinder sirkular dan kendali pasif tunggal pada jarak: (a) S/D=1.2 (b)S/D=2.4

Pada jarak yang berbeda dihasilkan profil streamline yang berbeda. Sedangkan distribusi tekanan yang diterima silinder sirkular dengan kendali pasif tidak ada yang melebihi distribusi tekanan yang diterima silinder sirkular tanpa kendali. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular dengan kendali pasif lebih kecil daripada koefisien hambat yang diterima silinder sirkular tanpa kendali. Data koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan kendali pasif dapat dilihat pada Tabel 2.2 dibawah ini.

Tabel 2.2: Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan kendali pasif tunggal dengan variasi rasio jarak S/D pada Re=100

Susunan silinder sirkular	Silinder tunggal	Silinder dengan kendali pasif pada jarak (S/D)			
		0.6	1.2	2.4	3.0
Koefisien hambat	1.35387	1.2195	1.0349	0.988	1.0066

Koefisien hambat terkecil terjadi pada jarak $S/D=2.4$ yaitu 0.988. Dengan demikian koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan kendali pasif tunggal di depan silinder dapat diperkecil mencapai 27.02%. Sedangkan silinder sirkular dengan dua kendali pasif seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6, kendali pasif pertama berbentuk silinder kecil tipe-I dengan sudut potong 53° posisi vertical diletakkan di depan silinder sirkular dan kendali pasif kedua dengan bentuk yang sama namun dalam posisi horizontal diletakkan di belakang silinder sirkular telah dikaji oleh Basuki Widodo pada tahun 2017.



Gambar 2.6: Skema silinder sirkular dengan dua kendali pasif

Penelitian tersebut dilakukan masih dengan tujuan yang sama yaitu untuk meminimalkan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular. Pada bilangan Reynolds 100 serta jarak yang bervariasi yaitu $S/D = 2.4$ dan $T/D = 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1$ diperoleh koefisien hambat yang diterima silinder disajikan pada Tabel 2.3 :

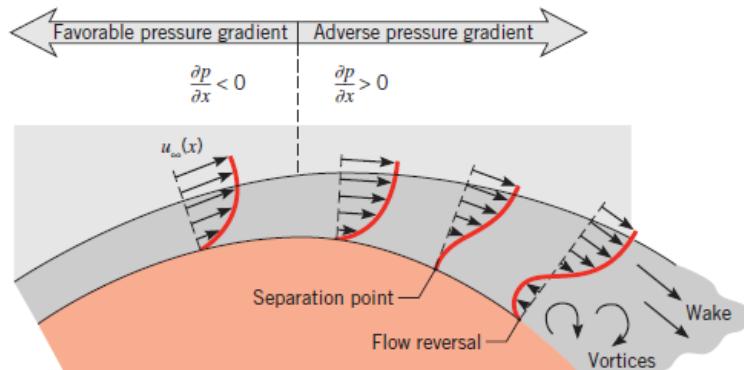
Tabel 2.3: Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan dua kendali pasif dengan variasi rasio jarak T/D pada $Re=100$

	T/D					
	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
S/D	0.994	0.965	0.965	0.956	0.949	0.949

Berdasarkan data koefisien hambat yang diterima oleh silinder sirkular, tanpa kendali, dengan kendali tunggal dan kendali ganda dapat disimpulkan bahwa silinder sirkular dengan kendali pasif ganda paling efektif meminimalkan koefisien hambat. Namun demikian, dengan skema yang berbeda masih memungkinkan untuk memperoleh nilai koefisien hambat yang lebih kecil.

2.4. Titik Separasi Dan Wake

Pada Gambar 2.1, aliran fluida melalui silinder sejajar dengan titik stagnasi. Pada titik stagnasi, silinder menerima tekanan paling besar dan kecepatan bebas $u_\infty = 0$. Searah dengan jalannya x , kecepatan (u) akan semakin naik karena pengaruh tekanan yang menurun $\left(\frac{du_\infty}{dx} > 0 \text{ & } \frac{dp}{dx} < 0 \right)$. Kecepatan paling besar terjadi ketika $\frac{dp}{dx} = 0$. Setelah mencapai kecepatan maksimum, kecepatan akan turun kembali dengan kenaikan tekanan $\left(\frac{du_\infty}{dx} < 0 \text{ & } \frac{dp}{dx} > 0 \right)$ dan kecepatan akan turun sampai bernilai nol. Pada titik tersebut dinamakan dengan titik separasi, dimana selanjutnya fluida tidak dapat bergerak sesuai dengan arah x seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7: Profil aliran fluida di lapisan batas silinder sirkular

Kejadian titik separasi terjadi pada silinder bagian bawah dan bagian atas. Daerah di belakang silinder yang berada diantara titik separasi disebut dengan *wake*. Aliran yang berada di daerah *wake* akan terbentuk *vortex* yang tidak teratur. Bilangan Reynolds atau jenis aliran di sekitar silinder sirkular mempengaruhi posisi titik separasi dan besar atau kecilnya daerah *wake* yang terbentuk. Pada aliran laminar, titik separasi terjadi pada $\theta = 80^\circ$, sedangkan aliran transisi atau turbulensi titik separasi menjadi lebih tertunda (ke bagian belakang silinder) $\theta = 140^\circ$ (Incropera dkk., 2011).

2.5. Koefisien Hambat

Koefisien hambat adalah sebuah besaran tak berdimensi yang menunjukkan besarnya hambatan yang diterima objek. Pada objek berjenis *bluff body*, koefisien hambat yang diterima benda cenderung besar. Koefisien hambat dapat dihitung melalui distribusi tekanan yang diterima di sekitar benda.

Pada permukaan benda silinder sirkular, panjang satu elemen yang diambil dari keliling permukaan silinder dapat dinyatakan sebagai berikut $ds = rd\theta$. Sedangkan gaya hambat yang bekerja pada permukaan tiap elemen yaitu $df_d = pds$. Gaya hambat bekerja berlawanan arah dengan kecepatan aliran fluida.

Sehingga,

$$df_d = -prd\theta \cos \theta$$

$$f_d = - \int_0^{2\pi} (pr \cos \theta) d\theta \quad (2.1)$$

Bentuk besaran non-dimensional koefisien hambat dan koefisien tekanan diberikan sebagai berikut :

$$c_d = \frac{f_d}{\rho U_\infty^2 LD / 2} \quad (2.2a)$$

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho U_\infty^2} \quad (2.2b)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2a) dan (2.2b) ke dalam persamaan (2.1), sehingga diperoleh formula koefisien hambat berdasarkan distribusi tekanan.

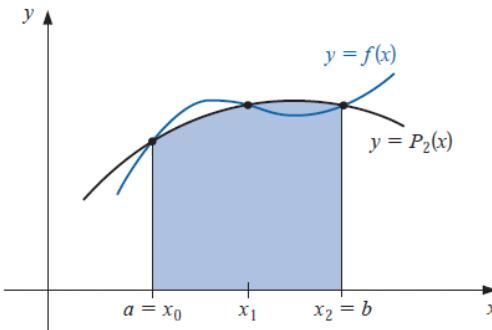
$$c_d = - \int_0^{2\pi} \frac{pr \cos \theta}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 D} d\theta$$

$$c_d = - \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (c_p \cos \theta) d\theta \quad (2.3)$$

Selanjutnya, koefisien hambat dapat diselesaikan dengan pendekatan secara numerik menggunakan aturan integrasi numerik.

2.6. Aturan Simpson

Beberapa metode numerik untuk mendekati penyelesaian integrasi, salah satunya yaitu aturan simpson. Aturan simpson menggunakan pendekatan tiga titik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Pendekatan dengan Aturan Simpson

Dengan menggunakan polynomial lagrange :

$$P_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} f(x_2) \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 digunakan untuk mendekati fungsi $f(x)$ Sehingga,

$$\begin{aligned} \int_a^b f(x) dx &= \int_{x_0}^{x_2} \left[\frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} f(x_1) \right] dx \\ &+ \int_{x_0}^{x_2} \left[\frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} f(x_2) \right] dx + \int_{x_0}^{x_2} \frac{(x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)}{6} f'''(\xi(x)) dx \end{aligned} \quad (2.9)$$

Persamaan 2.9 menunjukkan bahwa kesalahan pendekatan metode simpson yaitu $O(h^4)$. Jika dibandingkan dengan metode trapezoidal metode simpson memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi(Burden L. & Faires D., 2010). Bentuk pendekatan integrasi dengan aturan simpson sebagai berikut :

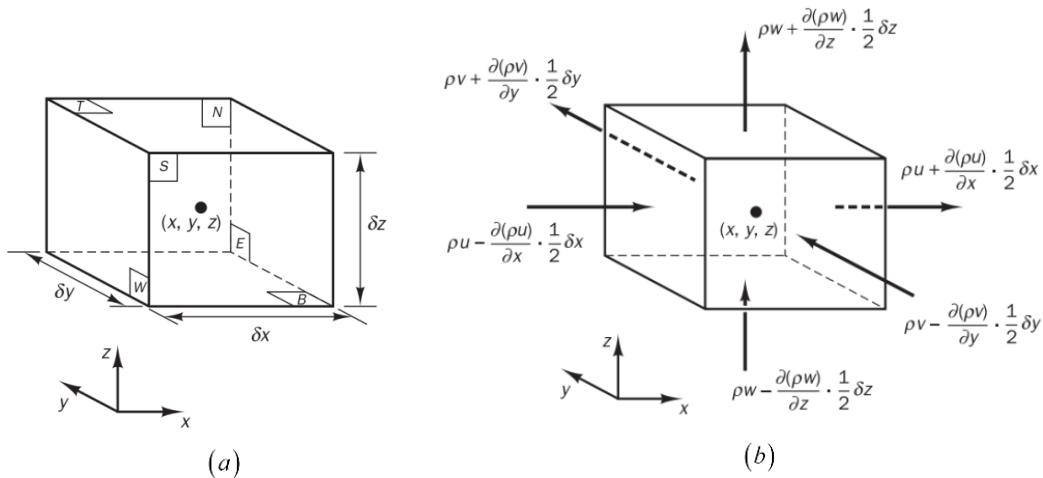
$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] - \frac{h}{90} f^{(4)}(\xi) \quad (2.10)$$

Dimana $h = x_2 - x_1 = x_1 - x_0$. Sedangkan, aturan simpson untuk luasan keseluruhan partisi yaitu

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-2}) + 4f(x_{n-1}) + f(x_n)] - \frac{h}{90} f^{(4)}(\xi)$$

2.7. Model Matematika Aliran Fluida

Persamaan matematika yang mengatur aliran fluida berasal dari persamaan-persamaan hukum konservasi fisika yaitu persamaan massa, persamaan momentum dan persamaan energy(Versteeg & Malalasekera, 2007). Fluida yang mengalir dianggap sebagai pergerakan yang kontinu. Fluida yang mengalir dapat diamati dari sebuah partikel dari fluida tersebut yang memiliki sifat-sifat fluida secara umum yaitu kecepatan, temperatur, tekanan dan densitas. Sebuah partikel fluida digambarkan pada Gambar 2.9. Komponen fluida seperti tekanan (P), kecepatan (u) dan densitas (ρ) terletak pada pusat dari partikel yaitu pada posisi (x, y, z) dan bergantung terhadap waktu (t). Sehingga, komponen-komponen tersebut dapat ditulis dalam fungsi $P(x, y, z, t)$, $u(x, y, z, t)$ dan $\rho(x, y, z, t)$.



Gambar 2.9: (a) Elemen fluida, (b) Aliran massa jenis masuk dan keluar

1. Konservasi Massa

Kesetimbangan massa dalam fluida yaitu tingkat kenaikan massa dalam elemen fluida sama dengan jumlah aliran massa dalam elemen fluida. Tingkat kenaikan massa dalam fluida dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} (\delta x \delta y \delta z) \quad (2.12)$$

Selanjutnya, berdasarkan Gambar 2.9(b) jumlah aliran fluida dalam elemen dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \delta x \delta y \delta z) = & \\ & \left(\rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left(\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z \\ & + \left(\rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z - \left(\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \\ & \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \quad (2.13) \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.12) dengan (2.13), diperoleh

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2.14)$$

Pada fluida *incompressible* (massa fluida konstan), maka diperoleh

$$\nabla u = 0 \quad (2.15)$$

Persamaan (2.15) disebut dengan persamaan kontinuitas untuk aliran unsteady dan incompressible.

2. Konservasi Momentum

Berdasarkan hukum newton yang menyatakan bahwa $\vec{F} = m\vec{a}$, dimana \vec{F} adalah gaya yang bekerja pada benda dan m adalah massa, dapat dibuat suatu persamaan yang mirip dengan memisalkan bahwa $\vec{F} = \vec{b}$ dan mensubstitusikan massa dengan massa jenis karena dalam hal ini dihitung berdasarkan volume partikel fluida. Sehingga diperoleh

$$\vec{b} = \rho \frac{d}{dt} \vec{u}(x, y, z, t) \quad (2.16)$$

Selanjutnya komponen kecepatan diturunkan dengan aturan rantai diperoleh

$$\begin{aligned} \vec{b} &= \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \right) \\ \vec{b} &= \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \vec{u} \quad (2.17) \end{aligned}$$

Persamaan (2.17) disebut sebagai persamaan momentum.

3. Pembentukan Persamaan Navier-Stokes

Diasumsikan bahwa gaya \vec{b} yang bekerja pada objek dipengaruhi dua komponen yaitu tekanan fluida dan gaya eksternal.

$$\vec{b} = \nabla \sigma + \vec{f} \quad (2.18)$$

Dimana σ adalah tensor tekanan fluida dan \vec{f} adalah gaya eksternal fluida. Tekanan fluida direpresentasikan sebagai divergensi tensor tekanan bekerja, yang menghasilkan *sink* atau *source*.

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \\ &= - \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p + \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & p + \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & p + \sigma_{zz} \end{pmatrix} \\ &= -pI + T \end{aligned} \quad (2.19)$$

Sehingga gaya \vec{b} dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \vec{b} &= \nabla(-pI + T) + \vec{f} \\ &= -\nabla p + \nabla T + \vec{f} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Pada kasus fluida Newtonian, ∇T adalah divergensi dari tensor tekanan fluida tersebut. Maka divergensi tekanan fluida dapat dinyatakan sebagai

$$\begin{aligned} \nabla \sigma &= \mu \nabla \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \\ &= \mu \begin{pmatrix} 2 \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & 2 \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & 2 \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Untuk sumbu-x, diperoleh divergensi tekanan sebagai berikut

$$(\nabla \sigma)_x = \mu \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) \\
&= \mu \nabla^2 u + \mu \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot u) \\
&= \mu \nabla^2 u
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Pada sumbu-y dan sumbu-z berlaku hal yang sama, sehingga pada elemen fluida tersebut diperoleh divergensi tekanan yaitu

$$\nabla T = \mu \nabla^2 u \tag{2.23}$$

Selanjutnya Persamaan (2.23) disubstitusikan ke persamaan (2.20) diperoleh :

$$\begin{aligned}
\vec{b} &= -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \vec{f} \\
\rho \left(\frac{Dv}{Dt} \right) &= -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \vec{f}
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Dengan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal yang bekerja pada objek maka $\vec{f} = 0$. Sehingga persamaan (2.24) menjadi

$$\rho \left(\frac{Dv}{Dt} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \tag{2.25}$$

Persamaan kontinuitas dan persamaan momentum yang telah terbentuk disebut dengan persamaan navier stokes untuk fluida unsteady- incompressible. Selanjutnya persamaan Navier-Stokes diubah dalam bentuk dimensionless dengan cara mentransformasi beberapa variable supaya tidak berdimensi. Variable-variabel yang akan ditransformasi adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
t &= \vec{f} \cdot t & \vec{x} &= \frac{\vec{x}}{L} & \vec{v} &= \frac{\vec{v}}{V} \\
p &= \frac{p - p_\infty}{p_0 - p_\infty} & \vec{\nabla} &= L \vec{\nabla}
\end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan variable diatas ke persamaan (2.25), diperoleh persamaan Navier-Stokes tak berdimensi sebagai berikut :

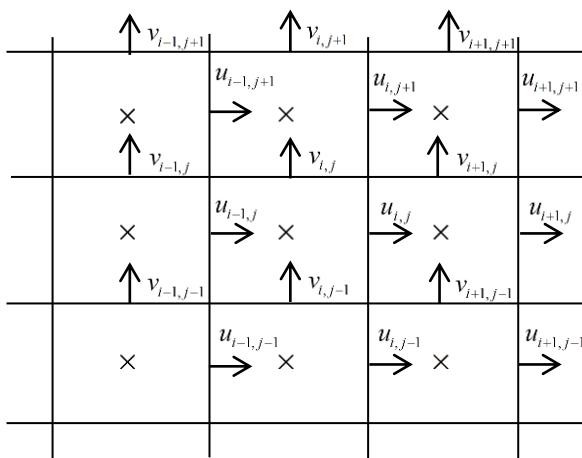
$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u) u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \tag{2.26}$$

$$\nabla u = 0$$

Persamaan (2.26) selanjutnya digunakan dalam penelitian ini untuk menyelesaikan aliran fluida yang melintasi objek.

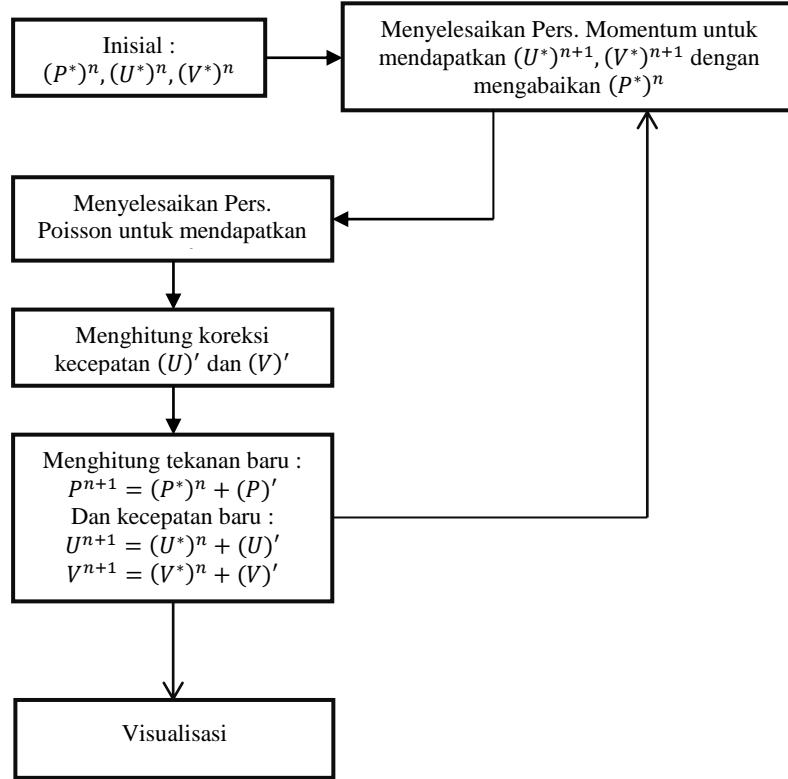
2.8. Algoritma SIMPLE

Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations atau disingkat SIMPLE adalah salah satu algoritma yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes berdasarkan diskritisasi metode volume hingga atau metode beda hingga(Mc. Donough, 2007). Grid yang dibentuk untuk diskritisasi dapat berupa grid seragam atau tidak seragam. Grid seragam lebih mudah diterapkan, walaupun pada kasus khusus penggunaan grid tidak seragam lebih bagus.



Gambar 2.10: *Staggered grid*

Sedangkan berdasarkan posisi komponen, terdapat beberapa jenis grid salah satunya adalah jenis staggered grid dimana setiap komponen yaitu komponen kecepatan-x, komponen kecepatan-y dan tekanan diletakkan pada posisi yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10(Mc. Donough, 2007). Setelah membuat grid yang digunakan untuk diskritisasi, selanjutnya mengikuti alur algoritma SIMPLE untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Algoritma SIMPLE ditunjukkan pada Gambar 2.11



Gambar 2.11: Algoritma SIMPLE

2.9. Metode SOR

SOR (*Successive Over Relaxation*) merupakan modifikasi dari metode gauss-seidel dengan tujuan untuk memperoleh konvergensi lebih cepat. Prosedur gauss-seidel dimodifikasi dengan memberikan nilai ω sebagai berikut :

$$x_i^{(k)} = x_i^{(k-1)} + \frac{r_{ii}^{(k)}}{a_{ii}} \quad \rightarrow \quad x_i^{(k)} = x_i^{(k-1)} + \omega \frac{r_{ii}^{(k)}}{a_{ii}}$$

Dimana $r_{ii} = b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j^{(k-1)} - a_{ii}x_i^{(k-1)}$, sehingga diperoleh

$$x_i^{(k)} = (1 - \omega)x_i^{(k-1)} + \frac{\omega}{a_{ii}} \left(b_i - \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij}x_j^{(k)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}x_j^{(k-1)} \right) \quad (2.27)$$

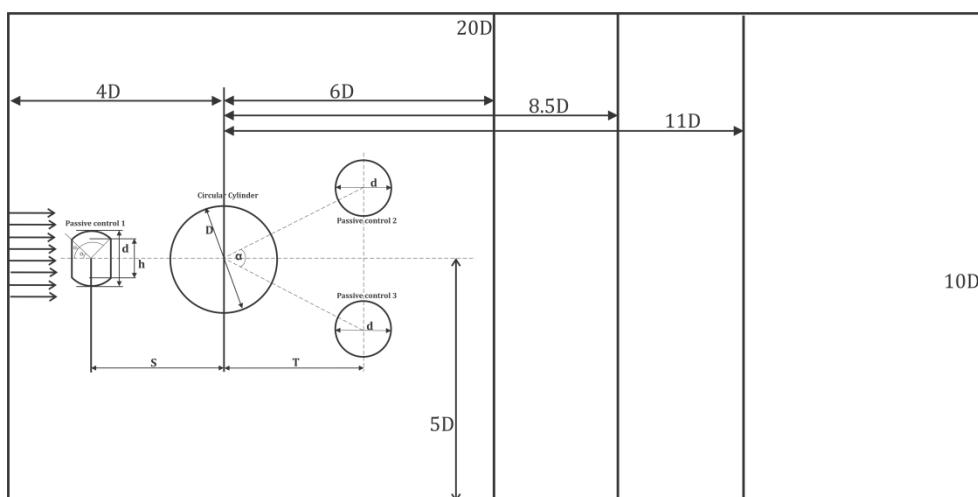
Nilai ω disebut sebagai parameter relaksasi, jika nilai ω adalah $0 < \omega < 1$ maka disebut sebagai metode under-relaxation, sedangkan untuk $\omega > 1$ disebut sebagai *over-relaxation*.

BAB III

METODE PENELITIAN

Skema aliran fluida yang melintasi silinder sirkular dan tiga kendali pasif ditunjukkan pada Gambar 3.1. Kendali pasif pertama berbentuk silinder tipe I yang diletakkan didepan silinder sirkular pada jarak yang tetap yaitu $2.4D$ dari pusat silinder sirkular. D adalah diameter silinder sirkular utama. Pada penelitian sebelumnya, jarak tersebut menghasilkan koefisien hambat yang paling kecil dari rentang jarak $1.2 < S/D < 3.2$. Sedangkan dua kendali pasif lainnya berbentuk silinder sirkular yang diletakkan dibelakang silinder utama pada jarak dan sudut yang berbeda. Variasi jarak dari kendali pasif dan silinder utama yaitu $1.6D$, $1.8D$ dan besar sudut antara dua kendali pasif di belakang silinder sirkular 30° , 60° , 90° dan 120° yang diukur dari pusat silinder sirkular.

Pada bab ini menjelaskan tahapan penelitian untuk melakukan simulasi numerik aliran fluida yang melintasi silinder sirkular dan tiga kendali pasif sehingga dapat diketahui karakteristik aliran fluida yaitu profil kecepatan, streamline, titik separasi, daerah wake dan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular utama. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi studi literatur, menyelesaikan persamaan Navier-Stokes secara numerik, simulasi dan analisis hasil.



Gambar 3.1: Skema silinder sirkular dengan tiga kendali pasif

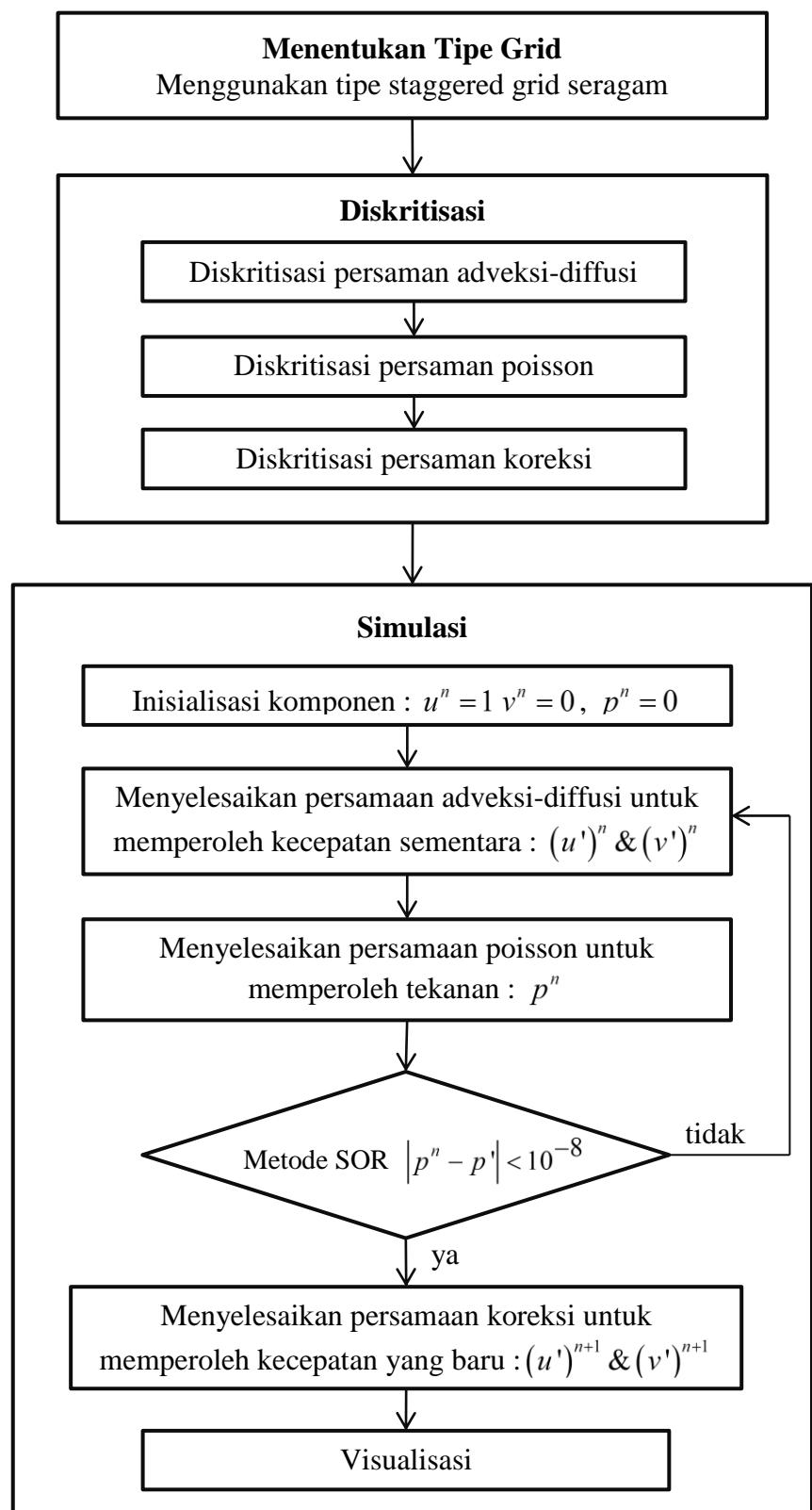
3.1 Studi Literatur

Dilakukan studi literatur untuk mendukung pengerjaan penelitian ini dan pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik aliran fluida yang melintasi objek seperti titik stagnasi, titik separasi, *wake*, distribusi tekanan dan koefisien hambat serta algoritma SIMPLE untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes untuk aliran *unsteady incompressible*. Literatur yang dipelajari dapat bersumber dari jurnal, buku, internet, maupun bimbingan dengan dosen pembimbing.

3.2 Penyelesaian Numerik

Persamaan Navier-Stokes untuk aliran unsteady incompressible diselesaikan secara numerik sesuai dengan algoritma SIMPLE dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Membuat grid yang sesuai dengan skema aliran fluida yang melintasi silinder sirkular dengan tiga kendali pasif. Grid yang digunakan tipe seragam, *staggered grid*.
2. Membagi persamaan momentum menjadi dua persamaan yaitu persamaan adveksi-diffusi dan persamaan poisson.
3. Menyelesaikan persamaan adveksi-diffusi tanpa komponen tekanan menggunakan skema beda hingga order satu dengan galat order tiga untuk memperoleh nilai kecepatan sementara.
4. Menyelesaikan persamaan poisson menggunakan skema beda hingga order satu dengan galat order tiga dan skema beda hingga order dua dengan galat order dua untuk memperoleh nilai tekanan.
5. Menggunakan metode sor (*successive over relaxation*) untuk memperoleh konvergensi nilai tekanan yang lebih cepat dengan kondisi selisih tekanan sementara dengan tekanan yang baru kurang dari 10^{-8} .
6. Setelah unsur kecepatan dan tekanan ditemukan, kemudian melakukan koreksi kecepatan sementara sehingga diperoleh nilai kecepatan baru.



Gambar 3.2: Tahapan penyelesaian numerik sampai simulasi

3.3 Pembuatan Simulasi

Langkah-langkah penyelesaian numerik persamaan Navier-Stokes sesuai dengan algoritma SIMPLE telah dirumuskan. Selanjutnya, membuat code program sesuai dengan perumusan penyelesaian numerik tersebut. Hasil simulasi berupa visualisasi nilai komponen kecepatan aliran fluida, streamline aliran fluida, profil kecepatan aliran fluida di daerah *wake* pada jarak yang telah ditentukan, distribusi tekanan dan nilai koefisien hambat yang diterima silinder sirkular.

3.4 Analisis Hasil

Analisis hasil menjelaskan hasil-hasil simulasi yang telah diperoleh yaitu

1. Melakukan validasi hasil simulasi secara numerik dengan cara mengambil hasil perhitungan koefisien hambat pada bilangan Reynolds 100 yang diterima silinder sirkular tunggal tanpa kendali pasif selanjutnya dibandingkan dengan hasil penelitian koefisien hambat peneliti lainnya. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa code program yang telah dibuat dapat digunakan untuk simulasi dengan benar.
2. Melakukan analisis pengaruh variasi rasio jarak dan variasi sudut antar kendali pasif yang terletak dibelakang silinder sirkular terhadap karakteristik aliran fluida yang dihasilkan seperti titik separasi, daerah *wake*, distribusi tekanan dan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular.
3. Akan dicari koefisien hambat terkecil yang diterima silinder sirkular dan profil kecepatan aliran fluida di daerah *wake* berdasarkan konfigurasi silinder sirkular dengan tiga kendali pasif. Selanjutnya koefisien hambat yang diperoleh dibandingkan dengan koefisien hambat yang diperoleh dari konfigurasi silinder sirkular dengan beberapa bentuk dan jumlah kendali pasif.

BAB IV

PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan lebih detail jalannya metodologi yang telah disusun. Mulai dari perancangan skema simulasi, penyelesaian numerik persamaan navier-stokes, algoritma simulasi dan analisis hasil simulasi.

4.1 Perancangan Skema Simulasi

Perancangan skema simulasi ditunjukkan pada gambar 3.1. Ukuran area yang digunakan adalah $20D \times 10D$, D adalah diameter silinder sirkular. Titik pusat silinder sirkular diletakkan pada posisi $(4D, 5D)$. Kendali pasif pertama berbentuk silinder tipe I, dimana tipe I merupakan modifikasi silinder sirkular yang dipotong horizontal bagian depan silinder pada sudut $\theta_f = 53^\circ$ dan bagian belakang silinder pada sudut $\theta_r = 53^\circ$. Jarak pusat kendali pasif pertama dengan pusat silinder sirkular adalah $S = 2.4D$. Kendali pasif kedua dan ketiga berbentuk silinder sirkular dengan ukuran lebih kecil. Posisi kedua kendali pasif tersebut berada di belakang silinder sirkular dengan jarak yang bervariasi yaitu $T = 1.6D$ dan $1.8D$, dan besar sudut antara dua kendali pasif tersebut yaitu 30° , 60° , 90° dan 120° , dimana sumbu simetri sudut antara kendali pasif yaitu garis pusat silinder sirkular pada sudut 0° . Profil aliran kecepatan diamati di belakang silinder sirkular pada jarak $6D$, $8.5D$ dan $11D$ dari pusat silinder sirkular.

4.2 Penyelesaian Numerik

Persamaan Navier-Stokes untuk fluida *incompressible unsteady* menggunakan persamaan 2.26 (Versteeg & Malalasekera, 2007) sebagai berikut :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\nabla u)u = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (4.2)$$

Strategi penyelesaian persamaan navier-stokes secara numerik yaitu dengan cara memisah Persamaan 4.1 menjadi Persamaan Adveksi-Diffusi dan Persamaan Poisson.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(\nabla u)u - \nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \quad (4.3)$$

Misalkan $-(\nabla u)u = A$ dan $\frac{1}{Re} \nabla^2 u = B$ maka Persamaan 4.3 dapat ditulis

$$\frac{\partial u}{\partial t} = A - \nabla p + B \quad (4.4)$$

Dengan menerapkan skema beda maju untuk ruang waktu Persamaan 4.4 menjadi

$$\frac{u^{n+1} - u^n}{\Delta t} = A - \nabla p + B \quad (4.5)$$

Selanjutnya, membuat variable baru yaitu komponen kecepatan sementara u' diperoleh dua persamaan sebagai berikut

$$\frac{u' - u^n}{\Delta t} = A + B \quad (4.6.1)$$

dan

$$\frac{u^{n+1} - u'}{\Delta t} = -\nabla p \quad (4.6.2)$$

Persamaan 4.6.1 disebut sebagai persamaan adveksi-diffusi karena dalam persamaan tersebut dibangun dari persamaan adveksi pada ruas kiri dan persamaan diffusi pada ruas kanan.

$$\frac{u' - u^n}{\Delta t} + (\nabla u)u = \frac{1}{Re} \nabla^2 u \quad (4.7)$$

Selanjutnya, dengan mengambil divergensi dari persamaan 4.6.2 diperoleh

$$\nabla \left(\frac{u^{n+1} - u'}{\Delta t} \right) = -\nabla^2 p$$

$$\frac{1}{\Delta t} (\nabla u^{n+1} - \nabla u') = -\nabla^2 p$$

Sesuai dengan skema numerik, bahwa untuk komponen pada waktu $n+1$ dianggap nol, $\nabla u^{n+1} = 0$, sedangkan pada waktu ke-n yaitu $\nabla u \neq 0$. Sehingga diperoleh persamaan poisson sebagai berikut

$$\frac{1}{\Delta t} \nabla u' = \nabla^2 p \quad (4.8)$$

Dengan menerapkan algoritma SIMPLE, langkah-langkah penyelesaian persamaan navier stokes adalah sebagai berikut :

1. Menyelesaikan persamaan adveksi-diffusi untuk memperoleh kecepatan sementara

$$u' = u^n + \Delta t \left(-(\nabla u)u + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \right)$$

2. Menyelesaikan persamaan poisson untuk memperoleh tekanan

$$\frac{1}{\Delta t} \nabla u' = \nabla^2 p$$

3. Menyelesaikan persamaan koreksi kecepatan

$$\nabla u = -\nabla p$$

4. Langkah 1 sampai langkah 3 akan selalu diulang sehingga dapat memenuhi kondisi yang diinginkan.

4.2.1 Pembentukan Grid Dan Diskritisasi

Diskritisasi dilakukan sesuai dengan pola atau tipe grid yang digunakan. Pada penelitian ini menggunakan tipe staggered grid dan seragam, dimana pada tipe grid ini komponen tekanan, kecepatan-x dan kecepatan-y tidak ada yang berada pada satu titik sehingga memungkinkan untuk melakukan diskritisasi lebih mudah. Selanjutnya, Persamaan navier-stokes didiskritikan menggunakan skema beda hingga pada beberapa order yang berbeda. Langkah pertama mendiskritikan persamaan adveksi-diffusi.

Persamaan adveksi-diffusi pada sumbu-x

$$\begin{aligned} u' &= u^n + \Delta t \left(-(\nabla u)u + \frac{1}{Re} \nabla^2 u \right) \\ &= u^n + \Delta t \left(-\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)u + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \\ &= u^n + \Delta t \left(-\left(\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \end{aligned}$$

$$u' = u^n + \Delta t \left(- \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right)$$

$$= u^n + \Delta t \left(- \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right)$$

Dengan memperhatikan persamaan kontinuitas yang berlaku yaitu

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \text{ maka}$$

$$u' = u^n + \Delta t \left(- \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \quad (4.9)$$

Kemudian persamaan didiskritkan menggunakan skema beda hingga pada dimensi ruang dan dimensi waktu sebagai berikut :

$$\text{Skema beda hingga maju orde satu untuk dimensi waktu } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t}$$

Skema beda hingga orde 2 dengan galat orde tiga untuk dimensi ruang

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+2,j}^n + 6u_{i+1,j}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \text{ pada sumbu-x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{i,j+2}^n + 6u_{i,j+1}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \text{ pada sumbu-y}$$

dan beda hingga orde 2

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} \text{ pada sumbu-x}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \text{ pada sumbu-y}$$

Dengan mensubstitusikan skema beda hingga diatas pada Persamaan (4.9) diperoleh bentuk diskrit persamaan adveksi-diffusi arah sumbu-x sebagai berikut:

$$\begin{aligned} u' &= u^n + \Delta t \left(-u_{i,j}^n \left(\frac{u_{i+2,j}^n + 6u_{i+1,j}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \right) - v_{i,j}^n \left(\frac{u_{i,j+2}^n + 6u_{i,j+1}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \right) \right) \\ &\quad + \Delta t \frac{1}{Re} \left(\frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right) \end{aligned}$$

$$u' = u^n - \frac{\Delta t u_{i,j}^n}{2\Delta x} (u_{i+2,j}^n + 6u_{i+1,j}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta t v_{i,j}^n}{2\Delta y} (u_{i,j+2}^n + 6u_{i,j+1}^n - 3u_{i,j}^n - u_{i,j-1}^n) \\ + \frac{\Delta t}{\text{Re}(\Delta x)^2} (u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n) + \frac{\Delta t}{\text{Re}(\Delta y)^2} (u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n)$$

Dengan langkah yang sama untuk persamaan adveksi-diffusi pada sumbu-y

$$v' = v^n + \Delta t \left(-(\nabla u)v + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \\ = v^n + \Delta t \left(-\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)v + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \\ = v^n + \Delta t \left(-\left(\frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \\ = v^n + \Delta t \left(-\left(v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \\ = v^n + \Delta t \left(-\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \\ = v^n + \Delta t \left(-\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 v \right) \quad (4.10)$$

Selanjutnya persamaan didiskritkan menggunakan skema beda hingga sebagai berikut

$$\text{Skema beda hingga maju pada dimensi waktu } \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^n}{\Delta t}$$

Skema beda hingga orde dua galat tiga pada dimensi ruang

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{i+2,j}^n + 6v_{i+1,j}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \text{ pada sumbu-x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{v_{i,j+2}^n + 6v_{i,j+1}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \text{ pada sumbu-y}$$

Dan beda hingga orde dua

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{v_{i+1,j}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} \text{ pada sumbu-x}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{v_{i,j+1}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \text{ pada sumbu-y}$$

Skema beda hingga diatas disubstitusikan ke Persamaan 4.10. Sehingga, diperoleh bentuk diskrit Persamaan adveksi-diffusi pada arah sumbu-y sebagai berikut :

$$\begin{aligned} v' &= v^n + \Delta t \left(-u_{i,j}^n \left(\frac{v_{i+2,j}^n + 6v_{i+1,j}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i-1,j}^n}{2\Delta x} \right) - v_{i,j}^n \left(\frac{v_{i,j+2}^n + 6v_{i,j+1}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \right) \right. \\ &\quad \left. + \Delta t \frac{1}{Re} \left(\frac{v_{i+1,j}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i-1,j}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{v_{i,j+1}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i,j-1}^n}{(\Delta y)^2} \right) \right) \\ v' &= v^n - \frac{\Delta t u_{i,j}^n}{2\Delta x} \left(v_{i+2,j}^n + 6v_{i+1,j}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i-1,j}^n \right) - \frac{\Delta t v_{i,j}^n}{2\Delta y} \left(v_{i,j+2}^n + 6v_{i,j+1}^n - 3v_{i,j}^n - v_{i,j-1}^n \right) \\ &\quad + \frac{\Delta t}{Re(\Delta x)^2} \left(v_{i+1,j}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i-1,j}^n \right) + \frac{\Delta t}{Re(\Delta y)^2} \left(v_{i,j+1}^n - 2v_{i,j}^n + v_{i,j-1}^n \right) \end{aligned}$$

Langkah kedua yaitu mendiskritkan persamaan poisson dengan skema beda hingga sebagai berikut :

Skema beda hingga pusat pada dimensi ruang komponen kecepatan

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} \text{ dan } \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2\Delta x} \text{ pada sumbu-x}$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2\Delta y} \text{ dan } \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y} \text{ pada sumbu-y}$$

Diskritisasi ruas kiri Persamaan Poisson yaitu

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \nabla u' &= \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial u'}{\partial y} \right) \\ &= \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{(u')_{i+1,j} - (u')_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{(u')_{i,j+1} - (u')_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) \end{aligned}$$

Selanjutnya, diskritisasi ruas kanan operator laplace dapat ditulis sebagai berikut

$$\nabla^2 p = \frac{p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j+1} + p_{i,j-1} - 4p_{i,j}}{(\Delta x)^2}$$

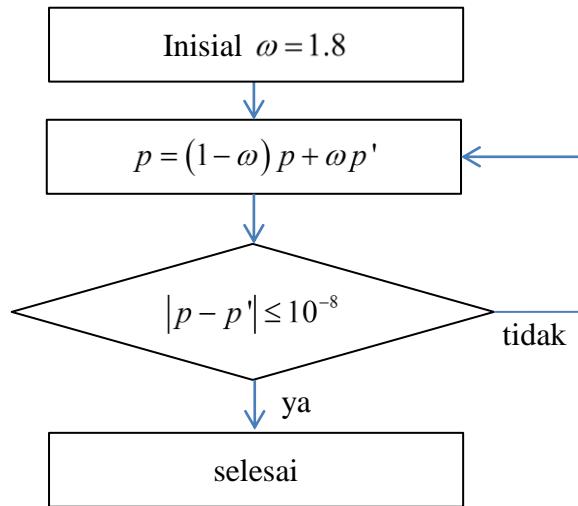
Sehingga diskritisasi persamaan poisson dapat ditulis sebagai berikut

$$\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{(u')_{i+1,j} - (u')_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{(u')_{i,j+1} - (u')_{i,j-1}}{2\Delta y} \right) = \frac{p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j+1} + p_{i,j-1} - 4p_{i,j}}{(\Delta x)^2}$$

$$p_{i,j} = \left(\frac{1}{4} \right) (p_{i+1,j} + p_{i-1,j} + p_{i,j+1} + p_{i,j-1})$$

$$- \frac{(\Delta x)^2}{4\Delta t} \left(\frac{(u')_{i+1,j} - (u')_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{(u')_{i,j+1} - (u')_{i,j-1}}{2\Delta y} \right)$$

Nilai tekanan diatas merupakan tekanan sementara p' . Selanjutnya, menerapkan metode SOR untuk mempercepat konvergensi nilai tekanan. Langkah-langkah menerapkan metode SOR ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1: Algoritma Metode SOR

Langkah ketiga mendiskritkan persamaan koreksi kecepatan menggunakan skema beda hingga maju untuk dimensi waktu dan beda hingga pusat untuk dimensi ruang sebagai berikut

$$\nabla u = -\nabla p$$

Koreksi nilai kecepatan sumbu-x

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{u^{n+1} - u'}{\Delta t} = -\frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x}$$

$$u^{n+1} = u' - \Delta t \left(\frac{p_{i+1,j} - p_{i-1,j}}{2\Delta x} \right)$$

Koreksi nilai kecepatan sumbu-y

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{v^{n+1} - v'}{\Delta t} = - \frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta y}$$

$$v^{n+1} = v' - \Delta t \left(\frac{p_{i,j+1} - p_{i,j-1}}{2\Delta y} \right)$$

4.2.2 Simulasi

Aliran fluida yang melewati silinder sirkular dan tiga kendali pasif disimulasikan menggunakan matlab 2013. Area yang telah dirumuskan pada skema simulasi dipartisi menjadi $nx \times ny = 800 \times 400$ grid. Langkah pertama simulasi sesuai dengan gambar 3.2 yaitu memberikan nilai awal parameter kecepatan (u, v) dan tekanan (p). Dengan mengasumsikan bahwa aliran fluida yang melintasi silinder adalah seragam searah sumbu-x, sedangkan aliran fluida searah sumbu-y sangat kecil maka diberikan kondisi awal kecepatan sumbu-x $u = 1$, dan kecepatan pada sumbu-y $v = 0$, sehingga nilai awal untuk parameter tekanan (p) yang diturunkan dari nilai kecepatan awal adalah 0. Dengan mengasumsikan tidak ada pengaruh gesekan pada dinding area maka syarat batas persamaan (4.1) dan (4.2) sebagai berikut

$$u_{i,1} = u_{i,2} = 1$$

$$u_{i,ny-1} = u_{i,ny}$$

$$u_{1,j} = u_{2,j} = 1$$

$$u_{nx-1,j} = u_{nx,j} = 1$$

Langkah selanjutnya yaitu menyelesaikan persamaan Navier-Stokes dengan memperhatikan kondisi awal dan kondisi batas yang telah ditetapkan. *Main program* yang digunakan untuk simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.2.

```

Inisial kondisi (u,v,p)
Pengaturan objek (silinder sirkular dan tiga kendali pasif)
    If  $(nx-nx/5)^2 + (nx-nx/2)^2 < r^2$ 
         $(u,v,p)=0$ 
Pengaturan syarat batas
Menyelesaikan Persamaan Navier-Stokes
    While ( $it < 149999 \text{ & } t < 200$ )
         $(u',v')=f(adveksi\_diffusi)$ 
         $(p')=f(poission)$ 
        If  $abs(p-p') < 10^{-7}$ 
            Break;
        Else
             $p=(1-\omega)p+\omega p'$ 
            end
         $(u,v)^{n+1}=f(koreksi)$ 
    end
visualisasi nilai u

```

Gambar 4.2 *Main code program* simulasi

4.3 Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi aliran fluida yang melewati silinder sirkular dan tiga kendali pasif dianalisis mengenai karakteristik aliran fluida yaitu streamline aliran fluida, titik separasi, daerah *wake*, profil kecepatan aliran fluida di daerah *wake* dan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular.

4.3.1 Validasi *Code Program*

Code program divalidasi untuk memastikan bahwa *program* yang telah dibuat dapat digunakan untuk simulasi selanjutnya dengan baik dan tepat. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil koefisien hambat yang diperoleh silinder sirkular tunggal pada bilangan Reynolds 100 dengan hasil yang sudah ada. Berdasarkan tabel 4.1, peneliti memperoleh koefisien hambat 1.3721. Hasil ini menunjukkan bahwa koefisien hambat yang diperoleh peneliti dengan peneliti

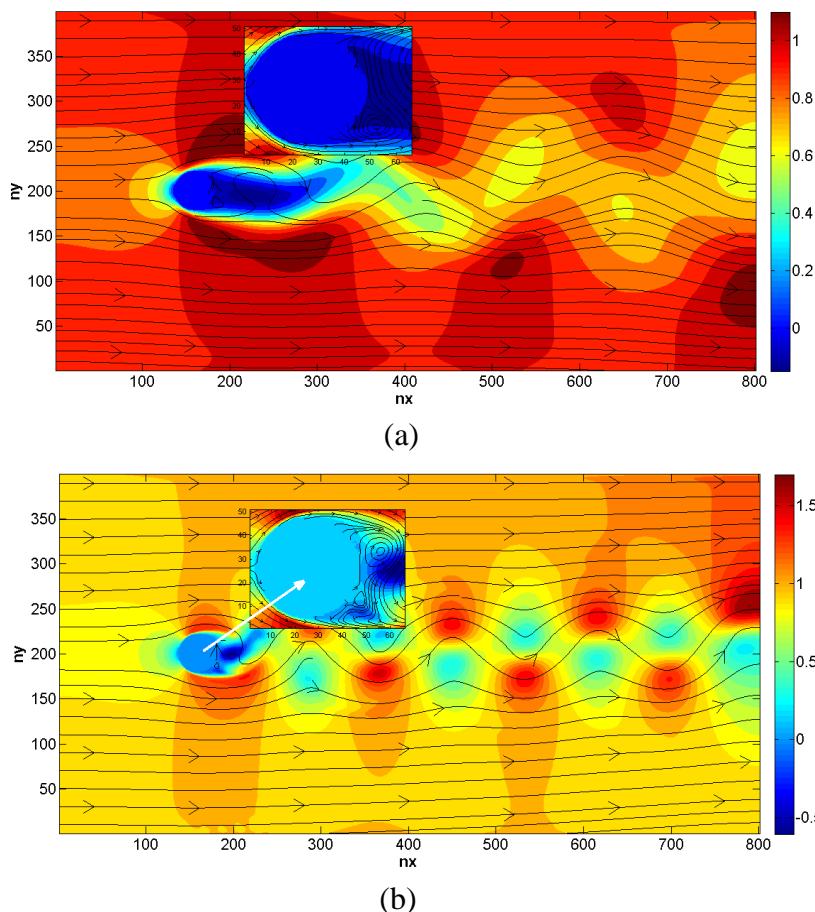
yang lain tidak jauh beda. Dengan demikian *code program* dapat digunakan untuk melakukan simulasi dengan konfigurasi tiga kendali pasif.

Tabel 4.1 Perbandingan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular pada $Re=100$ hasil peneliti dengan peneliti lain

peneliti	Imron dkk	Lin lu dkk	Lam dkk	Huy Cong dkk
1.3721	1.35837	1.35	1.36	1.366

4.3.2 Profil Aliran Fluida, *Streamline* dan *Wake*

Aliran fluida yang melalui silinder tunggal tanpa kendali pasif dianalisis terlebih dahulu agar dapat mengetahui bagaimana pengaruh adanya kendali pasif yang digunakan terhadap koefisien hambat yang diterima silinder sirkular. Berdasarkan hasil simulasi, profil *surface* dan *streamline* aliran fluida pada bilangan Reynolds 500 dan 5000 ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Profil kontur *velocity* dan *streamline* aliran fluida pada

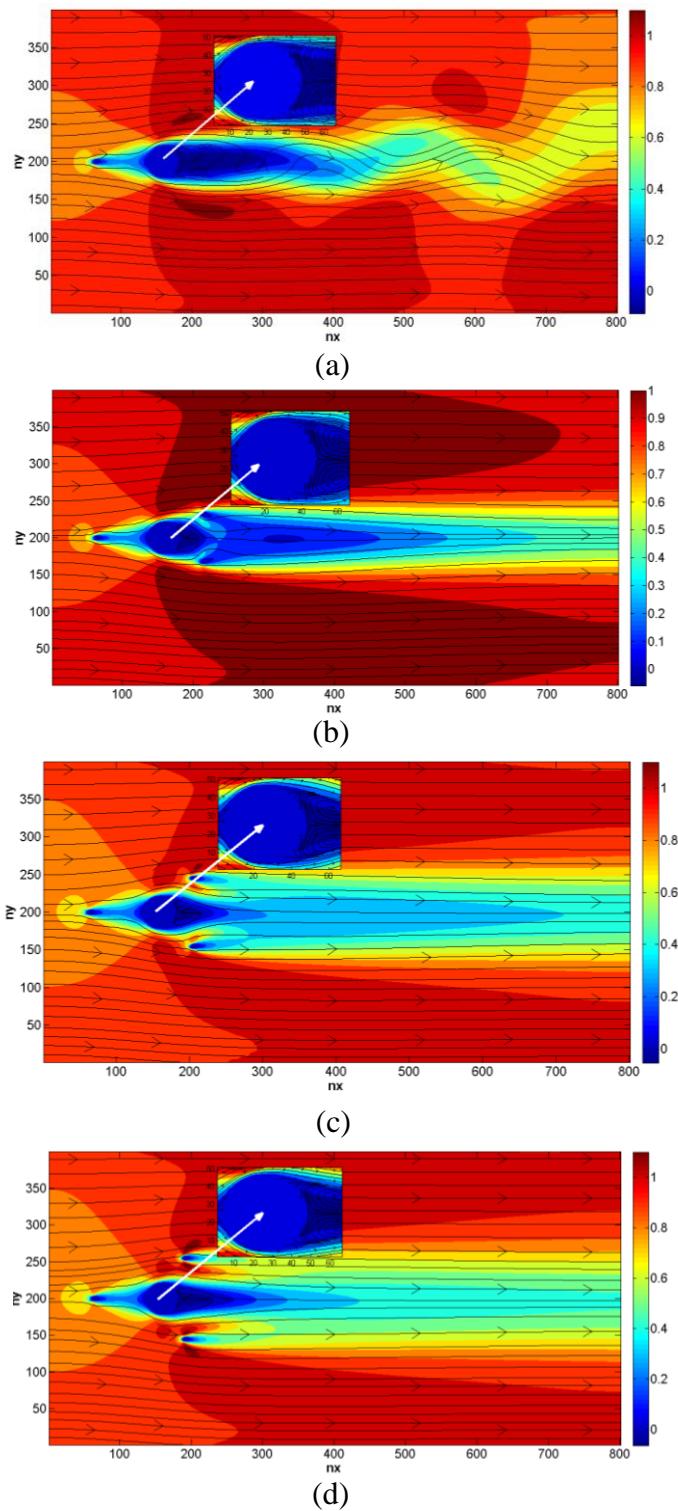
(a) $Re=500$ (b) $Re=5000$

Profile aliran fluida pada bilangan Reynolds 500 menunjukkan besar nilai kecepatan aliran fluida di belakang silinder sirkular lebih kecil dibandingkan dengan nilai kecepatan aliran fluida pada bilangan Reynolds 5000. Selain itu, aliran pada bilangan Reynolds 500 tampak lebih tenang dibandingkan dengan aliran pada bilangan Reynolds 5000.

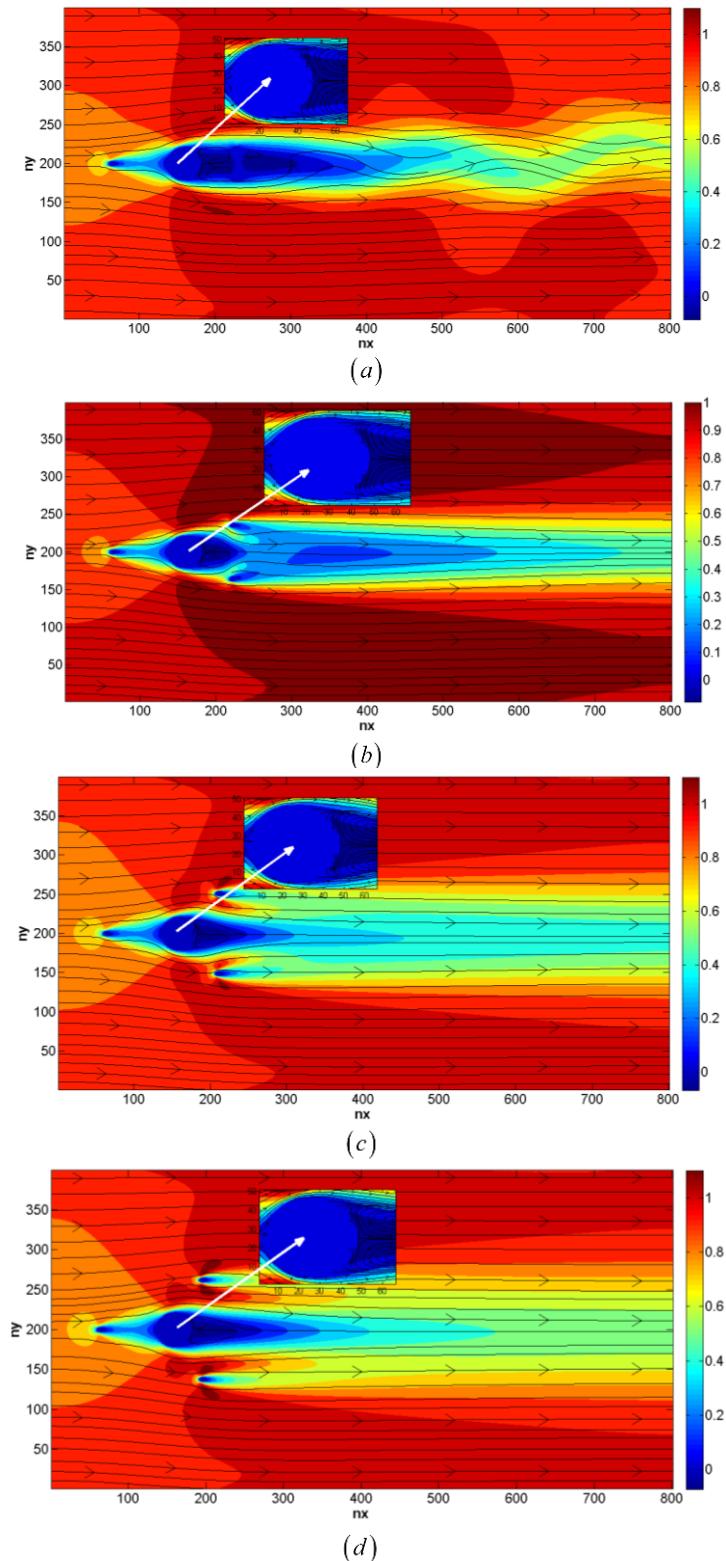
Pada profil *streamline*, titik separasi yang terjadi pada bilangan Reynolds 500 tampak simetri antara titik separasi bagian atas silinder dan bagian bawah silinder. Titik separasi terjadi pada 140° untuk silinder bagian bawah dan 220° untuk silinder bagian atas. Dengan demikian lebar daerah *wake* yang terbentuk yaitu 80° . Sedangkan titik separasi yang terjadi pada bilangan Reynolds 5000 tampak tidak simetri antara titik separasi pada bagian atas silinder dan bagian bawah silinder. Titik separasi bagian bawah silinder tampak terjadi lebih awal yaitu pada sudut 100° dibandingkan bagian atas silinder yaitu pada 240° . Sehingga, daerah *wake* yang terbentuk lebih lebar dibandingkan daerah *wake* yang terbentuk pada bilangan Reynolds 500.

Selanjutnya hasil simulasi profil aliran fluida melintasi silinder sirkular dengan tiga kendali pasif dimana jarak antara kendali pasif pertama dengan silinder sirkular adalah $S = 2.4D$, sedangkan jarak kendali pasif yang lain adalah $T = 1.6D$ dengan bermacam-macam besar sudut antara dua kendali pasif di belakang silinder sirkular ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Kendali pasif yang diletakkan dibelakang silinder sirkular menyebabkan perubahan profil aliran fluida dan streamline yang terbentuk. Dua kendali pasif yang diletakkan di belakang silinder sirkular dengan $\alpha=30^\circ$ mampu memperkecil timbulnya *vortex* yang terjadi di belakang silinder, namun tidak lebih baik saat kendali pasif diletakkan dengan besar sudut antara dua kendali pasif $\alpha=60^\circ$. Hasil daerah *wake* yang terbentuk juga menunjukkan bahwa kendali pasif saat $\alpha=60^\circ$ lebih kecil dibandingkan dengan posisi kendali pasif yang diletakkan pada besar sudut (α) yang lain.

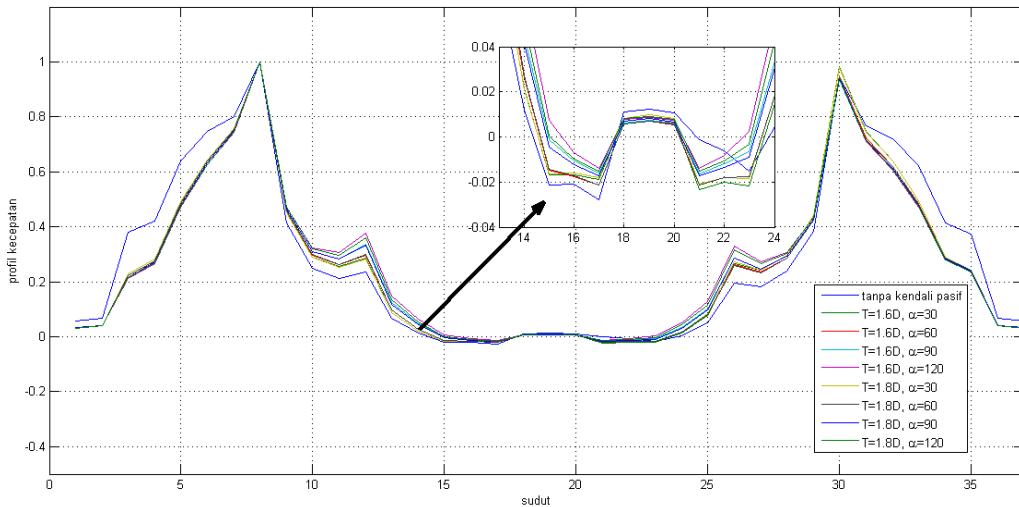


Gambar 4.4 Profil aliran fluida pada $Re=500$ dan kendali pasif di belakang pada jarak $T=1.6D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°



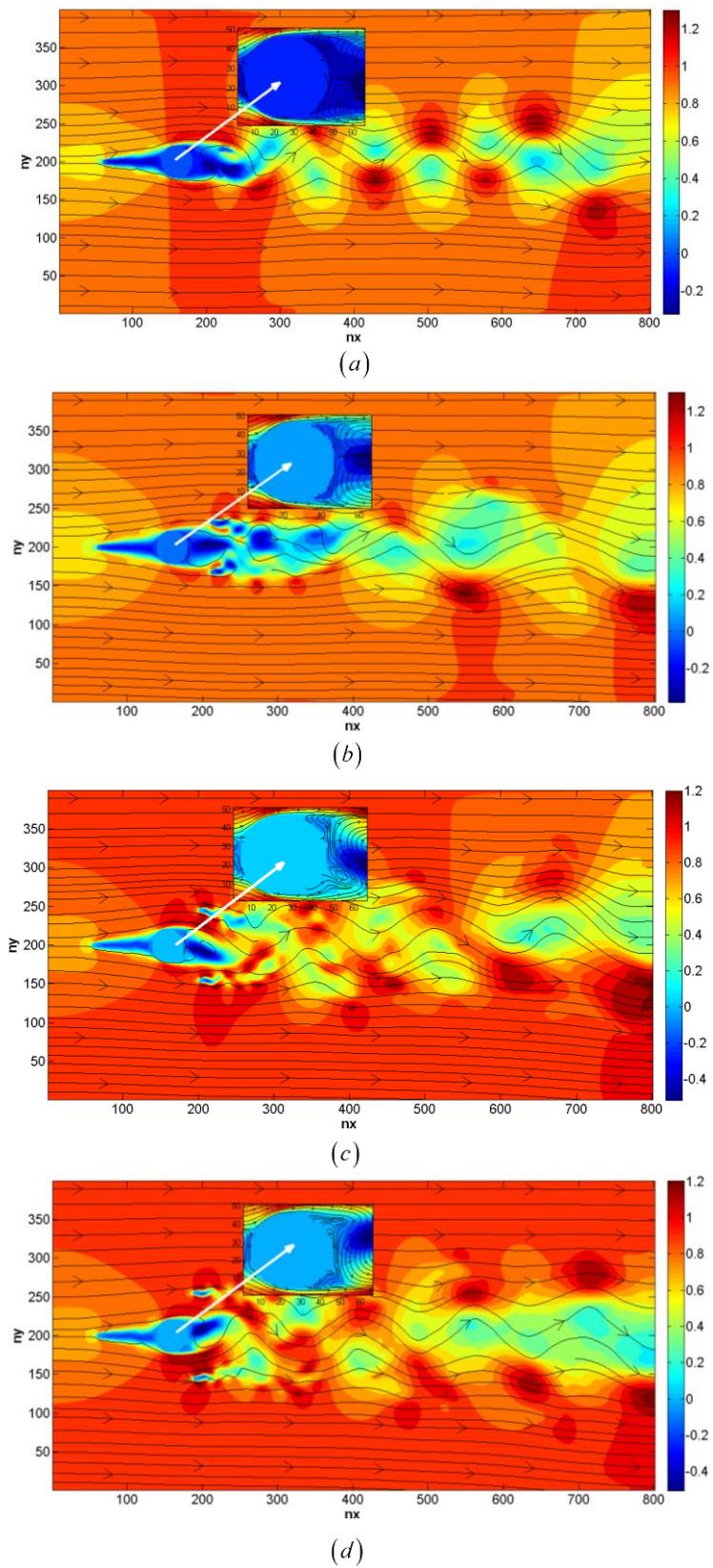
Gambar 4.5 Profil aliran fluida pada $Re=500$ dan kendali pasif di belakang pada jarak $T=1.8D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°

Berdasarkan Gambar 4.5, kendali pasif yang diletakkan di sekitar silinder sirkular memberikan pengaruh terhadap profil aliran fluida dan streamline yang terjadi. Pengaruh yang ditimbulkan hampir sama dengan kendali pasif yang diletakkan dibelakang silinder pada jarak $T=1.6D$ seperti pada Gambar 4.4. Dengan mengatur besar sudut 60° antara dua kendali pasif yang diletakkan di belakang silinder dapat memperkecil *vortex* yang terjadi di belakang silinder sirkular dan terlihat simetri. Daerah wake yang terbentuk juga paling kecil jika dibandingkan dengan daerah *wake* saat dua kendali pasif pada lainnya.



Gambar 4.6 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=500$ di sekitar silinder sirkular

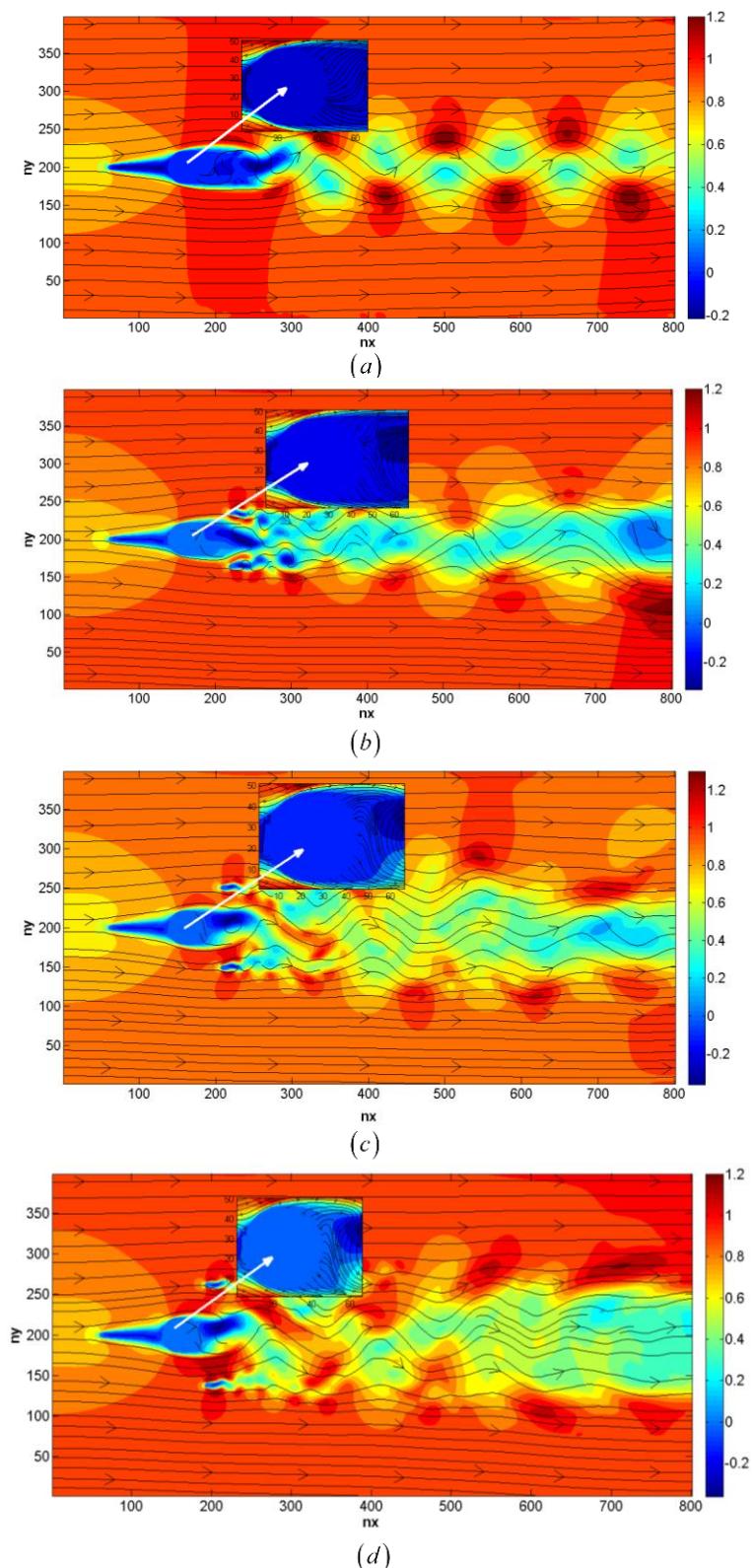
Tiga kendali pasif yang diletakkan disekitar silinder sirkular mempengaruhi perubahan terjadinya titik separasi. Titik separasi diketahui dengan profil kecepatan yang menuju nol atau bernilai negatif. Pada Gambar 4.6 ditunjukkan profil kecepatan di sekitar silinder untuk menunjukkan terjadinya titik separasi. Titik separasi yang terjadi pada silinder sirkular tanpa kendali pasif terlihat lebih awal dibandingkan dengan silinder sirkular dengan tiga kendali pasif. Profil aliran fluida dan streamline pada Reynolds 5000 ditunjukkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Profil aliran fluida pada $Re=5000$ dan kendali pasif di belakang pada jarak $T=1.6D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°

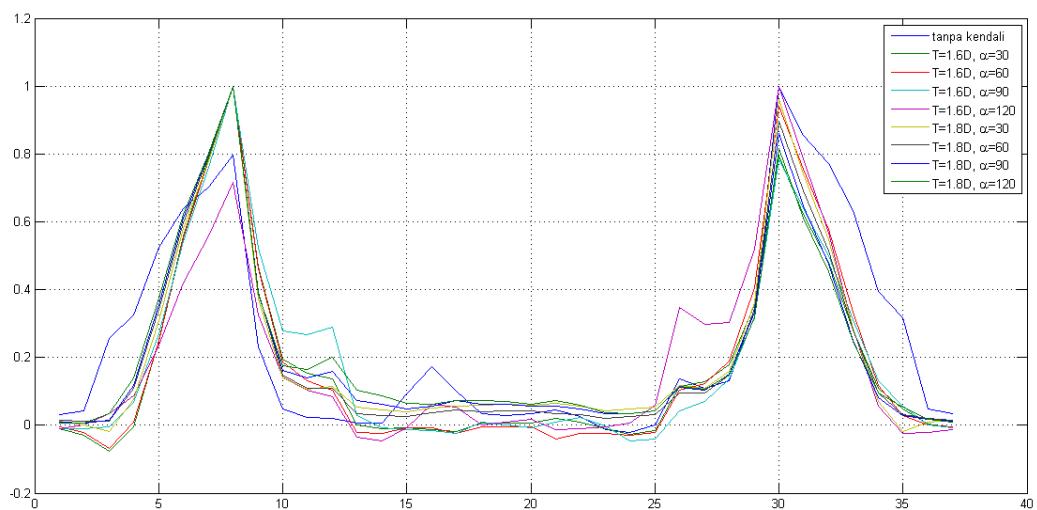
Berdasarkan variasi besar sudut (α) antara dua kendali pasif yang diletakkan di belakang silinder sirkular, $\alpha=60^\circ$ memberikan pengaruh yang cukup baik dimana mampu membuat *vortex* lebih stabil di belakang silinder sirkular. Pada sudut lainnya, terlihat bahwa *vortex* yang muncul tidak simetri. Hal ini hampir sama dengan kondisi silinder sirkular tanpa kendali pasif. Namun demikian, daerah *wake* yang terbentuk menjadi lebih simetri dengan adanya kendali pasif yang diletakkan di sekitar silinder sirkular. Berdasarkan letak terjadinya titik separasi, dengan diberikan kendali pasif titik separasi menjadi semakin ke belakang artinya daerah *wake* semakin kecil. Sehingga, dapat diidentifikasi bahwa koefisien hambat yang diperoleh juga dapat lebih kecil.

Profil *surface* dan *streamline* aliran fluida pada bilangan Reynolds 5000 ditunjukkan pada Gambar 4.8, dimana satu kendali pasif diletakkan di depan silinder sirkular, dan dua kendali pasif lainnya diletakkan setelah silinder sirkular pada jarak $T=1.8D$. Berdasarkan Gambar 4.8, profil aliran fluida pada setiap konfigurasi kendali pasif terjadi *vortex* yang tidak simetri di belakang silinder sirkular kecuali pada saat besar sudut antara dua kendali pasif yang di belakang silinder yaitu $\alpha=30^\circ$. Pada saat besar sudut antara dua kendali pasif $\alpha=30^\circ$, *vortex* yang terjadi di belakang silinder sirkular menjadi agak ke belakang karena adanya pengaruh kendali pasif. Hal ini berbeda pada konfigurasi lainnya, dimana *vortex* terjadi tepat di belakang silinder sirkular, sehingga lebih mudah mengamati terjadi titik separasi dari profil *streamline*.



Gambar 4.8 Profil aliran fluida pada $Re=5000$ dan kendali pasif di belakang pada jarak $T=1.8D$ dengan α : (a) 30° , (b) 60° , (c) 90° dan (d) 120°

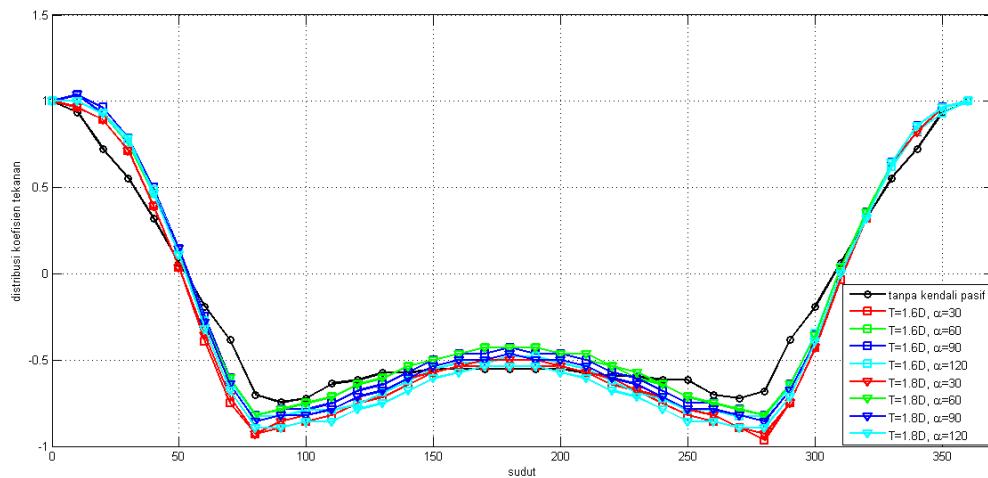
Titik separasi yang terjadi diamati dari profil kecepatan aliran fluida di sekitar silinder sirkular. Pada Gambar 4.9, titik separasi pada silinder sirkular dengan tiga kendali pasif terjadi pada sudut 130° untuk silinder bagian bawah dan sudut 240° . Jika dibandingkan dengan silinder sirkular tanpa kendali pasif, titik separasi yang muncul akibat adanya kendali pasif yang diletakkan disekitar silinder sirkular menyebabkan titik separasi tersebut agak mundur ke bagian belakang silinder sirkular. Sehingga, daerah wake yang terbentuk juga lebih kecil.



Gambar 4.9 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=5000$ di sekitar silinder sirkular

4.3.3 Distribusi Koefisien Tekanan Dan Koefisien Hambat

Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dapat diidentifikasi dengan melihat daerah wake yang terbentuk. Semakin kecil daerah wake yang terbentuk akan diperoleh koefisien hambat yang semakin kecil. Distribusi koefisien tekanan yang diterima silinder sirkular dapat digunakan untuk menghitung besar koefisien hambat yang diterima silinder sirkular. Cara menghitungnya yaitu dengan menyelesaikan Persamaan 2.3 dan menggunakan pendekatan integrasi dengan aturan simpson. Aturan simpson dipilih karena memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi.



Gambar 4.10 Distribusi koefisien tekanan di sekitar silinder sirkular $Re=500$

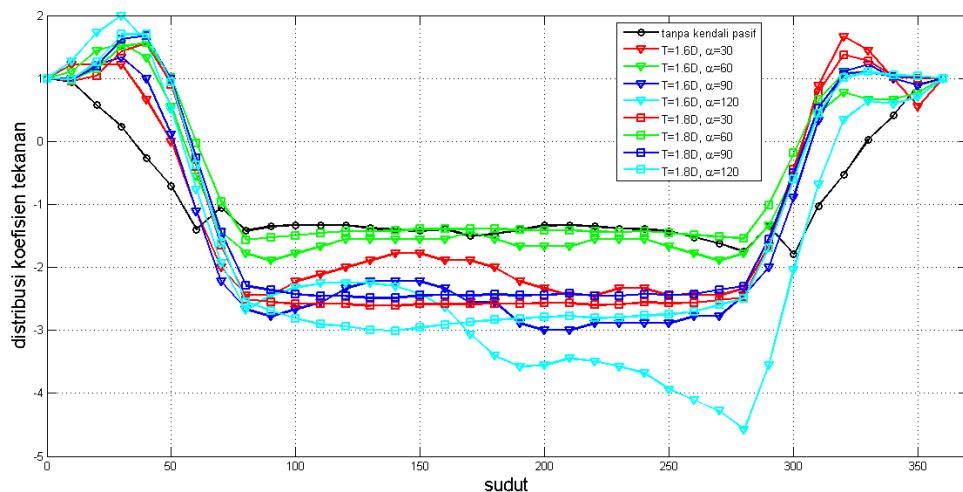
Distribusi koefisien tekanan yang diterima silinder sirkular pada bilangan Reynolds 500 ditunjukkan pada Gambar 4.10. Dua kendali pasif yang diletakkan dibelakang silinder sirkular pada jarak $1.6D$ dan $1.8D$ menunjukkan hasil yang hampir sama. Distribusi koefisien tekanan yang diterima silinder sirkular bagian atas terlihat simetri dengan distribusi koefisien tekanan yang diterima silinder sirkular bagian bawah. Berdasarkan data distribusi koefisien diatas diperoleh koefisien hambat yang diterima silinder sirkular yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan tiga kendali pasif pada $Re=500$

Bilangan Reynolds	Letak Kendali Pasif	Koefisien Hambat
500	Tanpa Kendali (peneliti)	1.2338
	Tanpa Kendali (Imron dkk)	1.2329
	Kendali Tunggal	0.9220
	$T=1.6D$, sudut= 30°	1.0281
	$T=1.6D$, sudut= 60°	0.9721
	$T=1.6D$, sudut= 90°	0.9882
	$T=1.6D$, sudut= 120°	1.0208
	$T=1.8D$, sudut= 30°	1.0128
	$T=1.8D$, sudut= 60°	0.9627
	$T=1.8D$, sudut= 90°	1.0087
	$T=1.8D$, sudut= 120°	1.0706

Koefisien hambat paling kecil terjadi saat dua kendali pasif diletakkan dibelakang silinder sirkular pada jarak $T=1.6D$ dan sudut antara dua kendali pasif tersebut adalah 30° . Dengan konfigurasi tersebut, koefisien hambat dapat diperkecil mencapai 21.2109%. Namun, penurunan koefisien hambat yang telah diperoleh tidak lebih kecil dari pada silinder sirkular dengan kendali pasif tunggal berbentuk silinder tipe-I yang mencapai 25.271%.

Distribusi koefisien tekanan yang diterima silinder sirkular saat aliran fluida pada bilangan Reynolds 5000 ditunjukkan pada Gambar 4.11. Koefisien tekanan terkecil yang diterima silinder sirkular terjadi pada sudut 80° pada bagian bawah silinder sirkular dan 290° pada bagian atas silinder.



Gambar 4.11 Distribusi koefisien tekanan pada $Re=5000$

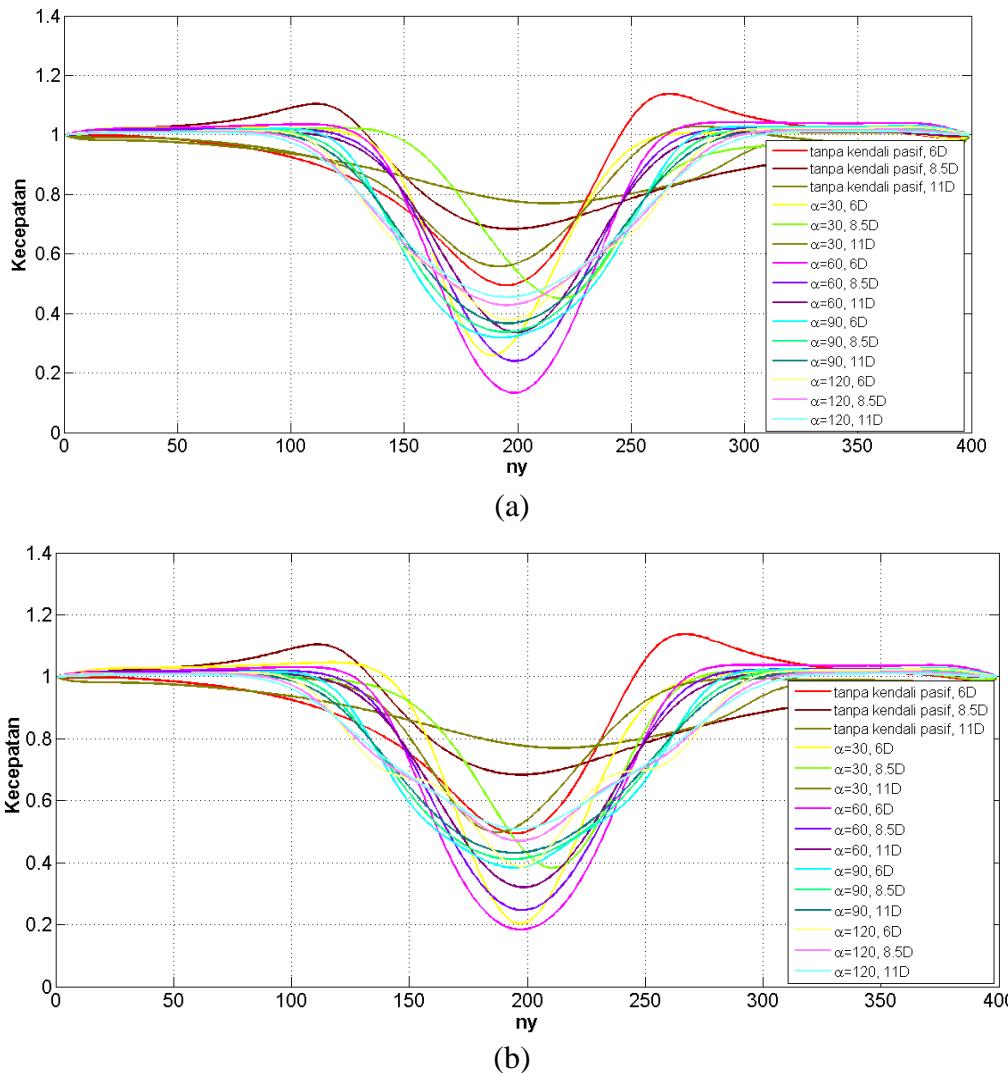
Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular ditunjukkan pada Tabel 4.3. Koefisien hambat paling kecil yang diterima silinder sirkular pada saat dua kendali pasif diletakkan pada jarak 1.8D di belakang silinder sirkular dan sudut antara kendali pasif tersebut adalah 60° . Dengan konfigurasi kendali pasif tersebut koefisien hambat dapat diperkecil mencapai 19.3358%. Hasil penurunan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular lebih baik dari pada penurunan koefisien hambat dengan kendali pasif tunggal yang diletakkan didepan silinder sirkular.

Tabel 4.3 Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dengan tiga kendali pasif pada $Re=5000$

Bilangan Reynolds	Letak Kendali Pasif	Koefisien Hambat
5000	Tanpa Kendali (peneliti)	1.5117
	Tanpa Kendali (Imron dkk)	1.5079
	Kendali Tunggal	1.2240
	$T=1.6D$, sudut=30°	1.0281
	$T=1.6D$, sudut=60°	1.2194
	$T=1.6D$, sudut=90°	1.5834
	$T=1.6D$, sudut=120°	1.6096
	$T=1.8D$, sudut=30°	1.0128
	$T=1.8D$, sudut=60°	1.2435
	$T=1.8D$, sudut=90°	1.7954
	$T=1.8D$, sudut=120°	2.0499

4.3.4 Profil Kecepatan Aliran Fluida Di Daerah Wake

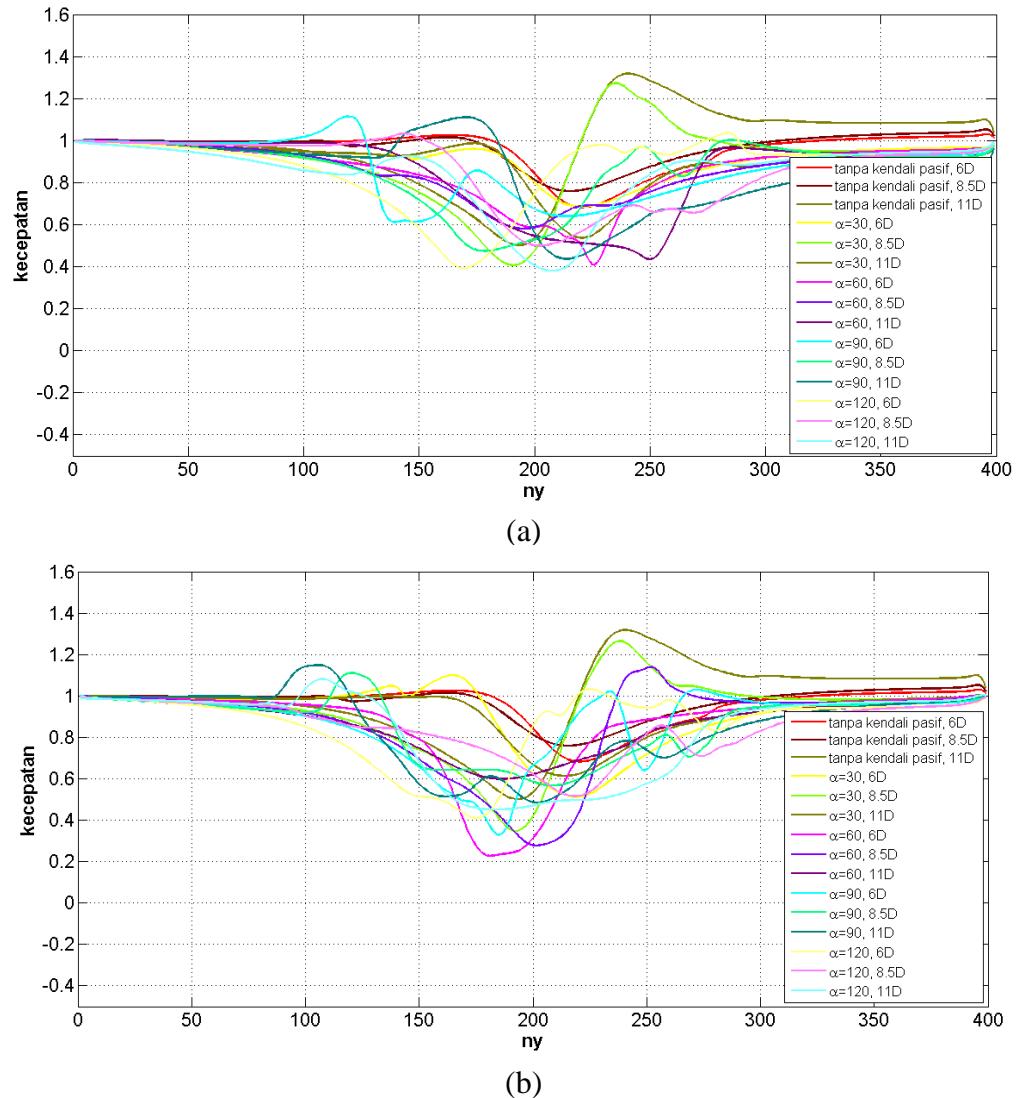
Profil kecepatan aliran fluida di daerah *wake* diambil pada jarak 6D, 8.5D dan 11D di belakang silinder sirkular. Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=500$ ditunjukkan pada Gambar 4.12. Pada jarak 6D dari pusat silinder, kecepatan aliran fluida terkecil terjadi pada saat $ny=200$, atau tepat dibelakang silinder sirkular. Semakin jauh dari pusat silinder sirkular kecepatan aliran fluida semakin tinggi. Profil aliran fluida di belakang silinder sirkular tanpa kendali pasif terlihat lebih tidak simetris antara aliran fluida yang melalui bagian atas silinder dan bagian bawah silinder. Dengan memberikan kendali pasif di sekitar silinder sirkular, profil kecepatan aliran fluida yang mengalir dari bagian bawah silinder terlihat simetris dengan aliran fluida yang mengalir dari bagian atas silinder. Penurunan kecepatan aliran fluida terjadi setelah diberikan kendali pasif di sekitar silinder sirkular. Kendali pasif yang diletakkan pada posisi atau besar sudut antara kendali pasif yang berbeda memberikan pengaruh yang berbeda. Penurunan kecepatan aliran fluida paling besar terjadi pada saat dua kendali pasif diletakkan pada jarak 1.6D di belakang silinder dan sudut antara dua kendali pasif tersebut adalah 60°. Hasil penurunan aliran kecepatan terbesar juga terjadi pada kondisi dua kendali pasif diletakkan dibelakang silinder pada jarak $T=1.8D$ dan besar sudut antara dua kendali pasif adalah 60°.



Gambar 4.12 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=500$ dengan jarak dua kendali pasif di belakang (a) $T=1.6D$ dan (b) $T=1.8D$

Aliran fluida pada bilangan Reynolds 5000 termasuk kedalam aliran turbulen dimana antar partikel fluida saling berbenturan sehingga aliran fluida yang melewati bagian bawah silinder sirkular tidak simetris dengan aliran fluida yang melewati bagian atas silinder sirkular. Profil kecepatan aliran fluida pada bilangan Reynolds 5000 ditunjukkan pada Gambar 4.13. Dua kendali pasif yang diletakkan di belakang silinder sirkular pada jarak yang berbeda memberikan pengaruh terhadap nilai kecepatan silinder sirkular. Pada jarak 1.8D kecepatan aliran fluida lebih kecil daripada saat dua kendali pasif diletakkan pada jarak

$T=1.6D$ di belakang silinder. Semakin jauh jarak dari silinder sirkular kecepatan aliran fluida semakin tinggi. Penurunan kecepatan aliran fluida paling kecil terjadi pada saat dua kendali pasif diletakkan dibelakang silinder sirkular pada jarak $T=1.8D$ dengan sudut antara kendali pasif tersebut adalah 60° .



Gambar 4.13 Profil kecepatan aliran fluida pada $Re=5000$ dengan jarak kendali pasif dan silinder sirkular (a) $T=1.6D$ dan (b) $T=1.8D$

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasar pembahasan analisis hasil yang telah dipaparkan, dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu:

1. *Vortex* yang terjadi dibelakang silinder sirkular dapat diperkecil dengan memberikan kendali pasif di sekitar silinder sirkular.
2. Aliran fluida pada bilangan Reynolds 500 dan bilangan Reynolds 5000 yang melintasi silinder sirkular dan meletakkan tiga kendali pasif, dapat menunda terjadinya titik separasi sehingga dapat terbentuk *wake* yang paling kecil.
3. Koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dapat diperkecil dengan meletakkan dua kendali pasif dibelakang silinder sirkular pada jarak $T=1.6D$ dan sudut antara dua kendali pasif tersebut adalah 60° . Pada Reynolds 500, koefisien hambat dapat diperkecil sampai 21.2109%. Sedangkan pada Reynolds 5000, dengan meletakkan dua kendali pasif di belakang silinder sirkular pada jarak $T=1.8D$ dan sudut diantara dua kendali pasif adalah 60° koefisien hambat dapat diperkecil sampai 19.3358%.
4. Hasil perbandingan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dan kendali pasif tunggal yang diletakkan didepan silinder sirkular lebih optimal dalam memperkecil koefisien hambat yang diterima silinder sirkular dan tiga kendali pasif pada aliran fluida dengan bilangan Reynolds 500. Namun pada bilangan Reynolds 5000, konfigurasi tiga kendali pasif lebih optimal dalam menurunkan koefisien hambat yang diterima silinder sirkular.

5.2 Saran

Saran yang diberikan oleh penulis untuk penelitian selanjutnya yaitu modifikasi dua kendali pasif yang diletakkan dibelakang silinder sirkular untuk memperkecil koefisien hambat yang diterima silinder.

DAFTAR PUSTAKA

- Bao, Y. and Tao, J., 2013. The passive control of wake flow behind a circular cylinder by parallel dual plates. *Journal of Fluids and Structures*, 37, pp.201-219.
- Bouak, F. and Lemay, J., 1998. Passive control of the aerodynamic forces acting on a circular cylinder. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 16(1-2), pp.112-121.
- Burden, R.L. and Faires J.D., 2010, Numerical Differentiation and Integration, *Numerical Analysis Ninth Edition*.
- Chern, M.J., Kanna, P.R., Lu, Y.J., Cheng, I.C. and Chang, S.C., 2010. A CFD study of the interaction of oscillatory flows with a pair of side-by-side cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 26(4), pp.626-643
- Holman, J. P. 2002. Heat Transfer. McGraw-Hill. p. 207.
- Igarashi, T. and Shiba, Y., 2006. Drag Reduction for D-Shape and I-Shape Cylinders. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 49(4), pp.1036-1042.
- Imron, C., Mardianto, L., Widodo, B. and Yuwono, T.Y., 2018. Mathematical Modeling of Drag Coefficient Reduction in Circular Cylinder Using Two Passive Controls at $Re= 1000$. *Mathematical and Computational Applications*, 23(1), p.2.
- Incropera, F.P., Dewitt D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2011, Eksternal Flow : The Cylinder in Cross Flow, Fundamental of Heat and Mass Transfer.
- Islam, S.U., Zhou, C.Y. and Ahmad, F., 2009. Numerikal simulations of cross-flow around four square cylinders in an in-line rectangular configuration. *World Academy of Sciences, Engineering Technology*, 33, pp.824-833.
- Kuo, C.H. and Chen, C.C., 2009. Passive control of wake flow by two small control cylinders at Reynolds number 80. *Journal of fluids and structures*, 25(6), pp.1021-1028.

- Ladjedel, A.O., Yahiaoui, B.T., Adjlout, C.L. and Imine, D.O., 2011. Experimental and numerical studies of drag reduction on a circular cylinder. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 77, pp.357-361.
- Lavasani, A.M.A. and Bayat, H., 2012. Flow around two cam shaped cylinders in tandem arrangement. *Heat Transfer*, 7, p.6350.
- Lu, L., Liu, M.M., Teng, B., Cui, Z.D., Tang, G.Q., Zhao, M. and Cheng, L., 2014. Numerical investigation of fluid flow past circular cylinder with multiple control rods at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*, 48, pp.235-259.
- McDonough, J.M., 2007. Lectures in computational fluid dynamics of incompressible flow: Mathematics, algorithms and implementations.
- Matyka, M., 2004. Solution to two-dimensional incompressible navier-stokes equations with simple, simpler and vorticity-stream function approaches. driven-lid cavity problem: Solution and visualization. *arXiv preprint physics/0407002*.
- Song, C.S. and Park, S.O., 2009. Numerical simulation of flow past a square cylinder using partially-averaged Navier–Stokes model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(1), pp.37-47.
- Su, S.W., Lai, M.C. and Lin, C.A., 2007. An immersed boundary technique for simulating complex flows with rigid boundary. *Computers & fluids*, 36(2), pp.313-324.
- Sudharsan, M., Prasath, S.G., Jayavel, S. and Tiwari, S., 2010. Flow and heat transfer for flow past elliptic tubes in fin-tube heat exchangers. In *the 37th National & 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power*.
- Triyogi, Y., Suprayogi, D. and Spirda, E., 2009. Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of an I-type bluff body as passive control. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(10), pp.2291-2296.
- Tsutsui, T. and Igarashi, T., 2002. Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(4-5), pp.527-541.

- Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 2007. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education.
- Widodo, B., Yuwono, T.Y. and Imron, C., 2017, September. The Influence of distance between passive control and circular cylinder on wake. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 890, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.
- Yagiz, B., Kandil, O. and Pehlivanoglu, Y.V., 2012. Drag minimization using active and passive flow control techniques. *Aerospace Science and Technology*, 17(1), pp.21-31.
- Yuwono, T. and Widodo, W.A., 2010, February. Flow characteristics around a D-type cylinder near a plane wall. In *Proceedings of the Regional Conferences on Mechanical and Aerospace Technology, Bali, Indonesia* (pp. 9-10).
- Zulhidayat, D.N., Chern, M.J. and Horng, T.L., 2009. An Immersed Boundary Method to Solve Fluid-Solid Interaction Problems. *Computational Mechanics*, 44, pp.447-453.

LAMPIRAN A
MAIN PROGRAM SIMULASI
(SILINDER SIRKULAR TANPA KENDALI PASIF)

```

clc; clear all;
NX=800;NY=400;
nx=NX+3;ny=NY+3;
Re=500;omega=1.8;eps=10e-8;
lx=2;ly=1; %berubah-ubah sesuai reynolds
dx=lx/NX;dy=ly/NY;
dt=0.01;D=40; R=20; d=0.125*D; r=0.5*d;
u=zeros(ny,nx);v=zeros(ny,nx);ut=zeros(ny,nx);vt=zeros(ny,nx);
un=zeros(ny,nx);vn=zeros(ny,nx);div=zeros(ny,nx);p=zeros(ny,nx);
for i=1:ny
    for j=1:nx
        if((j-5*D)*(j-5*D) + (j-4*D)*(j-4*D) < R*R
            iu(i,j) = 1;
        %bentuk benda yang lain
        %elseif (((j-5*D)*(j-5*D)+(i-((4-2.4)*D))*(i-((4-
        %2.4)*D))<r*r)&&(j<((2-2.4)*D)+
        %(r)*cos(53*3.14/180))&&j>((2-1.2)*D)-
        %(r)*cos(53*3.14/180)))
            iu(i,j)=1; //bentuk I
        %elseif ((j-(D*(5+1.6*sin(30*3.14/180))))*(j-
        (D*(5+1.6*sin(30*3.14/180))))+(i-D*(4+1.6*cos(30*3.14/180))))*(i-
        (D*(4+1.6*cos(30*3.14/180))))<r*r
            iu(i,j)=1;
        %elseif ((j-(D*(5+1.6*sin(-30*3.14/180))))*(j-
        (D*(5+1.6*sin(-30*3.14/180))))+(i-(D*(4+1.6*cos(-
        30*3.14/180))))*(jx-(D*(4+1.6*cos(-30*3.14/180))))<r*r
            iu(i,j)=1;
        else
            iu(i,j)=0;
        end
    end
end
[ u,v ]=initial( nx,ny,u,v,iu );
[ un,vn ]=initial( nx,ny,un,vn,iu );

for z=1:100
    ut=adveksi(ut,u,u,v,Re,dx,dy,nx,ny,iu);
    vt=adveksi(vt,v,u,v,Re,dx,dy,nx,ny,iu);
    un=update(u,un,ut,dt,nx,ny);

```

```

vn=update(v,vn,vt,dt,nx,ny);
[ u,un ] = swap( u,un );
[ v,vn ] = swap( v,vn );

div=divergensi(nx,ny,dx,dy,u,v,div);
p = poisson(nx,ny,dx,p,div,omega,eps,iu);
[u,v]=correction(nx,ny,dx,dy,u,v,p,iu);

end
[cd,cd1,dp] = dist_pressure(p,r);
contourf(u)
hold on
k=streamslice(u,v);
set(k,'Color','black')
hold off

```

LAMPIRAN B

FUNGSI – FUNGSI DALAM MAIN PROGRAM

B.1 FUNGSI INITIAL

```
function [ u,v,p ] = initial( nx,ny,u,v,iu )
for i=1:ny
    for j=1:nx
        if iu(i,j)>0
            u(i,j)=0;
            v(i,j)=0;
        else
            u(i,j)=1;
            v(i,j)=0;
        end
    end
end
end
```

B.2 FUNGSI BOUNDARY

```
function [ fn ] = boundary( fn,nx,ny )
fn(:,ny-2)=fn(:,ny-3);
fn(:,ny-1)=fn(:,ny-2);
end
```

B.3. FUNGSI ADVEKSI

```
function [ ft ] = adveksi( ft,f,u,v,Re,dx,dy,nx,ny,iu)
psilx=nx/4;
for i=1:ny
    for j=2:nx-1
        if iu(i,j)>0
            ft(i,j)=0;
        else
            fx(i,j)=(f(i,j+1)-f(i,j))/2*dx;
            fxx(i,j)=(f(i,j+1)-2*f(i,j)+f(i,j-1))/dx^2;
        end
    end
end
for i=2:ny-1
    for j=1:nx
        if iu(i,j)>0
            ft(i,j)=0;
        else
```

```

        fy(i,j)=(f(i+1,j)-f(i,j))/2*dy;
        fyy(i,j)=(f(i+1,j)-2*f(i,j)+f(i-1,j))/dy^2;
    end
end
for i=2:ny-1
    for j=2:nx-1
        ft(i,j)=-(u(i,j)*(fx(i,j))-
        ...v(i,j)*(fy(i,j)))+(1/Re)*(fxx(i,j)+fyy(i,j));
    end
end

```

B.4 FUNGSI UPDATE

```

function [ fn ] = update( f,fn,ft,dt,nx,ny)
fn=f+(ft.*dt);
fn=boundary( fn,nx,ny );
end

```

B.5 FUNGSI DIVERGENSI

```

function [ div ] = divergensi( nx,ny,dx,dy,u,v,div )
for i=2:ny-1
    for j=2:nx-1
        div(i,j)=0.5*(u(i,j+1)-u(i,j-1))/2*dx+...
        0.5*(v(i+1,j)-v(i-1,j))/2*dy;
    end
end
end

```

B.5 FUNGSI POISSON

```

function [ f ] = poisson( nx,ny,dx,f,s,omega,eps,iu)
imax=1000;
icnt=0;
while(icnt < imax)
    [err,f] = sor(nx,ny,dx,f,s,omega,iu);
    if(eps > err)
        break;
    end
    icnt=icnt+1;
end
function [err,f] = sor(nx,ny,dx,f,s,omega,iu)

err=0;
for i=2:ny-1
    for j=2:nx-1

```

```

        if iu(i,j)>0
            continue;
        end
        fn(i,j)=(f(i,j+1)+f(i,j-1)+f(i+1,j)+f(i-1,j)-
s(j)*dx*dx)*0.25;
        err = max(abs(fn(i,j)-f(i,j)),err);
        f(i,j) = (1.0 - omega)*f(i,j) + omega*fn(i,j);
    end
end

end
f=boundary( f,nx,ny );
end

```

B.6 FUNGSI SWAP

```

function [ f,fn ] = swap( f,fn )
tmp=f;
f=fn;
fn=tmp;
end

```

B.7 FUNGSI CORRECTION

```

function [ u,v ] = correction( nx,ny,dx,dy,u,v,p,iu )
for i=2:ny-1
    for j=2:nx-1
        if iu(i,j)>0
            continue;
        end
        u(i,j)= u(i,j)+(-0.5*(p(i,j+1)-p(i,j-1))/dx);
        v(i,j)= v(i,j)+(-0.5*(p(i+1,j)-p(i-1,j))/dy);
    end
end
u=boundary( u,nx,ny );
v=boundary( v,nx,ny );
end

```

B.8 FUNGSI DIST_PRESSURE

```

function [cd,cd1,dp] = dist_pressure( pressure,r )
D=40;r1=r+1;pusat=[4*D-1 5*D];teta=linspace(0,360,37);
posisi=zeros(37,2);
dp=[];
for i=1:37

```

```

if i<3 || i>8 && i<12 || i>17 && i<21 || i>26 && i<30 || i>35
    posisi(i,1)=pusat(1)-round(r*cosd(teta(i)));
    posisi(i,2)=pusat(2)+round(r*sind(teta(i)));
else
    posisi(i,1)=pusat(1)-round(r1*cosd(teta(i)));
    posisi(i,2)=pusat(2)+round(r1*sind(teta(i)));
end
end
for i=1:37
    dp=[dp;pressure(posisi(i,2),posisi(i,1))];
end
s=dp(1);
dp=(dp./s);
cd=0;
for i=37:-1:18
    if i==37
        cd=cd+dp(i)*cosd(teta(i));
    elseif i==18
        cd=cd+dp(i)*cosd(teta(i));
    else
        cd=cd+2*dp(i)*cosd(teta(i));
    end
end
cd=((deg2rad(10))/2)*cd;
cd1=0;
for i=1:20
    if i==1
        cd1=cd1+dp(i)*cosd(teta(i));
    elseif i==20
        cd1=cd1+dp(i)*cosd(teta(i));
    else
        cd1=cd1+2*dp(i)*cosd(teta(i));
    end
end
cd1=((deg2rad(10))/2)*cd1;
end

```

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Amirul Hakam. Penulis lahir di Blora, 22 Juli 1993. Penulis telah menempuh pendidikan di SD Negeri Jepon V, MTs Negeri Jepon, dan SMA Negeri 1 Blora.

Setelah lulus SMA, penulis melanjutkan sekolah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Departemen Matematika melalui jalur SNMPTN Tulis pada tahun 2011. Di Departemen Matematika, Penulis aktif dalam Himpunana Matematika ITS, BEM FMIPA ITS, Ibnu Muqlah, KSE ITS dan Organisasi asal daerah. Selama jenjang sarjana, penulis mengambil rumpun matematika terapan (model dan simulasi). Penulis juga aktif mengikuti pelatihan kepemimpinan dan bela negara. Penulis lulus jenjang sarjana pada tahun 2015. Kemudian melanjutkan jenjang magister di Departemen Matematika ITS pada tahun 2016.

Segala saran dan kritik yang membangun selalu penulis harapkan untuk kebaikan ke depan. Penulis dapat dihubungi melalui email amirulhakam072@gmail.com