

**TESIS**

**KARAKTERISTIK PEMISAHAN ALIRAN MELINTASI TIGA  
SILINDER BUNDAR VERTIKAL TERSUSUN TANDEM KOMBINASI  
SERI PARALEL**

**OLEH:**

**NUR IKHSANI**

**D 022 18 2004**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2021**

**TESIS**

**KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI TIGA SILINDER BUNDAR  
VERTIKAL TERSUSUN TANDEM KOMBINASI SERI PARALEL**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**NUR IKHSANI**

**D 022 18 2004**

**Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik  
pada Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2021**

# LEMBAR PENGESAHAN

## KARAKTERISTIK PEMISAHAN ALIRAN MELINTASI TIGA SILINDER BUNDAR VERTIKAL TERSUSUN TANDEM KOMBINASI SERI PARALLEL

Disusun dan diajukan oleh

**NUR IKHSANI**

**D022182004**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin


pada tanggal 19 November 2021


dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui  
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


  
**Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, MT**  
NIP. 195912201986011001

  
**Prof. Dr. Ir. Luther Sule, MT**  
NIP. 195608271985031001

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin

  
**Dr. Hairul Arsyad, ST., MT.**  
NIP. 197503222002121001

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin

  
**Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**  
NIP. 196012311986091001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nur Ikhsani  
Nim : D022182004  
Program Studi : Teknik Mesin / Konversi Energi  
Jenjang : S2

Menyatakan bahwa karya tulis berupa Tesis dengan judul

KARAKTERISTIK PEMISAHAN ALIRAN MELINTASI TIGA SILINDER BUNDAR  
VERTIKAL TERSUSUN TANDEM KOMBINASI SERI PARALEL

Merupakan karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan atau pemikiran orang lain, apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini merupakan hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 November 2021

Yang Menyatakan



Nur Ikhsani

## **DAFTAR RIWAYAT HIDUP**

Nama : Nur Ikhsani, S.T

Tempat Tanggal Lahir : Ujung Pandang, 24 Oktober 1995

Alamat : JL. Syekh yusuf lr. 1 No.16

Jenis Kelamin : Laki-laki

Agama : Islam

Telepon : 081342992098

E-mail : mr.nikhsani24@gmail.com

Riwayat Pendidikan : STT-PLN JAKARTA (2013 – 2017)  
SMK TELKOM SP2 MAKASSAR (2010 - 2013)  
SMPN 17 MAKASSAR (2007 - 2010)  
SD INP MANGASA 2 (2001 -.2007)

Riwayat Organisasi : HMM STT-PLN, SWAYANAKA JAKARTA, SIGI  
MAKASSAR.

Pengalaman Kerja/Magang :  
PLTA JATI LUHUR, PURWAKARTA  
(Oktober 2016 - April 2017)  
SIM THAILAND, SUKABUMI  
(Januari 2018 - JUNI 2018)

## ABSTRACT

*Nur Ikhsani. Flow Characteristics Through Three Circular Cylinders Arranged in Series Parallel Tandem Combination* (supervised by Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, M.T. and Prof. Dr. Ir. Luther Sule, M.T.)

This research was conducted in the fluid mechanics laboratory, Mechanical Departement, Faculty of Engineering, Hasanuddin University. The purpose of this study was to determine the characteristics of the fluid flow through three circular cylinders arranged in series parallel tandem combination (specimens) and determine the optimum drag and pressure coefficient value through the specimens. In achieving these goals, the research method in the form of experimental conducted in wind tunnel, to measure the drag force and head distribution of fluid flow and validated through a computational approach by utilizing the Computational Fluid Dynamics (CFD) Fluent 6.3.26 software. Three specimens were used in the form of a circular cylinder with a diameter of 5 cm and used acrylic material with a thickness of 2 mm. The three cylinders are arranged in tandem in a series parallel combination. Furthermore, each configuration is given 3 distance treatment models, namely model 1, the distance of cylinder 1 to cylinder 2 (M) remains 5 cm, while the distance of cylinder 2 to cylinder 3 (N) changes. For model 2 the distance between cylinder 1 and cylinder 2 (M) changes while the distance between cylinder 2 and cylinder 3 (N) remains 5 cm. M and N for model 3 change with the same distance. Ratio of the distance between the cylinders (M/D) and (N/D) was varied as 0; 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 and 1.1. Then given the treatment of 9 equal speed levels from 5 m/s to 21 m/s. Research took place at the Reynolds number (Re) from 34229 to 143763, or laminar flow for external flow. The results show that the greater the distance between the cylinders, the more delay of flow separation occurs so that the resulting flow is damped and results in a smaller boundary layer, however at the ratio  $M/D = 0.5$ , the drag coefficient and the smallest boundary layer thickness are obtained with a value of  $C_D = 0,7318$  and average value of the pressure coefficient of  $C_{Pmin} = -2.017$ .

**Keywords:** Drag coefficient, pressure coefficient, flow fluid characteristics, three circular cylinders arranged in tandem.

## ABSTRAK

**Nur Ikhsani.** *Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel* (dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, M.T. dan Prof. Dr. Ir. Luther Sule, M.T.)

Penelitian ini dilakukan Laboratorium Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem kombinasi seri paralel (benda uji) dan menentukan nilai optimum koefisien tahanan dan koefisien tekanan yang optimum melintasi benda uji tersebut. Dalam mencapai tujuan tersebut, maka metode penelitian berupa pendekatan eksperimental dilakukan pada *wind tunnel* untuk mengukur gaya tahanan dan distribusi tekanan aliran fluida serta divalidasi dengan pendekatan komputasi melalui *software Computational Fluid Dynamics (CFD) Fluent 6.3.26*. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder bundar dengan diameter 5 cm sebanyak tiga buah dan menggunakan material akrilik dengan ketebalan 2 mm. Ketiga silinder tersebut disusun tandem konfigurasi kombinasi seri paralel. Selanjutnya masing-masing konfigurasi diberikan 3 model perlakuan jarak, yaitu model 1 jarak silinder 1 dengan silinder 2 (M) tetap 5 cm sedangkan jarak silinder 2 dengan silinder 3 (N) berubah. Untuk model 2 jarak silinder 1 dengan silinder 2 (M) berubah sedangkan jarak silinder 2 dengan silinder 3 (N) tetap 5 cm. Untuk model 3, M dan N berubah dengan jarak yang sama. Rasio jarak antar silinder (M/D) dan (N/D) bervariasi antara 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 dan 1,1. Kemudian benda uji diberikan perlakuan 9 tingkat kecepatan yang sama dari 5 m/s sampai dengan 21 m/s. Penelitian berlangsung pada bilangan Reynolds (Re) dari 34229 sampai dengan 143763, atau aliran laminar untuk aliran eksternal. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar jarak antar silinder maka separasi aliran yang terjadi bisa lebih ditunda sehingga golakan aliran yang ditimbulkan teredam dan menghasilkan lapisan batas yang semakin kecil, namun pada rasio M/D dan N/D = 0,0 diperoleh nilai koefisien tahanan dan tebal lapisan batas terkecil dengan nilai  $C_D = 0,7318$  dan nilai rata-rata koefisien tekanan sebesar  $C_{Pmin} = -2,017$ .

**Kata kunci:** Koefisien tahanan, koefisien tekanan, karakteristik aliran fluida, tandem tiga silinder bundar.

## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrohmanirrohim*

Syukur Alhamdulillah kita panjatkan kehadiran Allah Subhanahu wata'ala, karena atas kehendak-Nya penulisan tugas akhir ini dapat terselesaikan. Tak lupa pula shalawat dan salam kita haturkan kepada Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wasallam, panutan kita semua dalam menjalani kehidupan di dunia ini. Dengan izin dan rahmat dari Allah semata penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dengan judul: **Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Bundar Vertikal Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel** untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan studi serta dalam rangka memperoleh gelar Master Teknik Strata Dua pada Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penghargaan dan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Prof. Dr. Ir. H. Nasaruddin Salam, S.T, M.T. selaku Pembimbing Utama dan Bapak Prof. Dr. Ir. Luther Sule S.T., M.T. selaku Pembimbing Pendamping yang telah banyak membantu baik dalam penulisan maupun pemikiran pada tesis ini.

Pada kesempatan ini penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak S. Dg.Tonang S.Pd dan Ibu Nurmi Badaruddin S.Pd., M.Si, beserta saudara saya Bangkit Brillian Fauzi yang telah menjadi sumber semangat dan motivasi penulis selama ini.
2. Yth. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
3. Yth Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Yth. Bapak Dr. Eng. Jalaluddin, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah menyetujui dan menerima tugas akhir penulis.
5. Seluruh dosen Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sudah dibagikan terhadap penulis. Ilmu dan pengetahuan yang membuat penulis semakin mengerti fenomena-fenomena dalam bidang teknik terutama bidang teknik mesin.
6. Staf Departemen Teknik Mesin, terkhusus Ibu Shita, Pak Irwan dan juga Pak Mansur yang telah banyak membantu.



7. Teman-teman Laboratorium Mekanika Fluida yang setia menemani selama masa pengambilan data dan penulisan tugas akhir.
8. Saudara-saudara seperjuangan mahasiswa Departemen Teknik Mesin yang telah memberi bantuan, dukungan, kerjasama yang sudah dijalani selama ini dan kiranya kesuksesan selalu menyertai teman-teman sekalian.
9. Rekan S2 serta S3 dan adik-adik tingkat yang telah memberi bantuan selama proses perkuliahan dan masukan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Terakhir, penulis hendak menyapa setiap nama yang tidak dapat penulis cantumkan satu per satu, terima kasih atas doa yang senantiasa mengalir tanpa sepengetahuan penulis. Terima kasih sebanyak-banyaknya kepada orang yang turut bersukacita atas keberhasilan penulis menyelesaikan tesis ini.

Tentunya dalam penyusunan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Semua kebaikan berasal dari Allah semata, segala kekurangan dan kekeliruan berasal dari penulis maka dari itu penulis memohon maaf atas segala kesalahan, kritik dan saran sangat dibutuhkan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Gowa, 2021

Penulis

## DAFTAR ISI

TESIS .....	ii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....	v
ABSTRACT.....	vi
ABSTRAK.....	vii
KATA PENGANTAR .....	viii
DAFTAR ISI .....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR GAMBAR .....	xv
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II.....	5
2.1. Penelitian Terdahulu .....	5
2.2. Aliran Laminar dan Turbulen.....	11
2.3. Bilangan Reynolds.....	11
2.4. Lapisan Batas .....	12
2.5. Separasi Aliran.....	13
2.6. Pola Aliran <i>Vortex</i> .....	14
2.7. <i>Streamline</i> .....	16
2.8. Koefisien <i>Drag</i> .....	18
2.9. Koefisien Tekanan.....	21
BAB III.....	23
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	23
3.2 Model uji .....	23
3.3 Pendekatan Komputasi.....	30
3.4 Pendekatan Eksperimental.....	32
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	51
BAB IV.....	52
4.1. Hasil.....	52
4.1.1. Data Hasil Penelitian .....	52
4.1.2. Analisis Data Penelitian.....	53
4.1.3. Hubungan Koefisien Tahanan ( $C_D$ ) terhadap Perbandingan Jarak Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	56

1. Hubungan $C_D$ Terhadap Perubahan $N/D$ .....	56
2. Hubungan $C_D$ Terhadap Perubahan $M/D$ .....	58
3. Hubungan $C_D$ Terhadap Perubahan $M/D$ dan $N/D$ .....	60
4.1.4. Hubungan Koefisien Tekanan ( $C_P$ ) terhadap Perbandingan Jarak Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	62
1. Hubungan $C_P$ Terhadap Perubahan $N/D$ .....	62
2. Hubungan $C_P$ Terhadap Perubahan $M/D$ .....	65
3. Hubungan $C_P$ Terhadap Perubahan $M/D$ dan $N/D$ .....	68
4.1.5. Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	71
1. Hasil Visualisasi dan Komputasi Aliran Pengujian Model 1.....	71
2. Hasil Visualisasi dan Komputasi Aliran Pengujian Model 2.....	72
3. Hasil Visualisasi dan Komputasi Aliran Pengujian Model 3.....	75
4.1.6. Perbandingan Hasil Penelitian Dengan Simulasi CFD.....	78
1. Pengujian Model 1.....	78
2. Pengujian Model 2.....	79
3. Pengujian Model 3.....	80
<b>4.2. Pembahasan.....</b>	<b>80</b>
4.2.1. Hubungan Koefisien Tahanan ( $C_D$ ) terhadap Perbandingan Jarak Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	80
4.2.2. Hubungan Koefisien Tekanan ( $C_P$ ) terhadap Perbandingan Jarak Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	82
4.2.3. Karakteristik Aliran Melintasi Tiga Silinder Bundar Tersusun Tandem Kombinasi Seri Paralel.....	83
4.2.4. Hubungan antara Koefisien Tahanan ( $C_D$ ), Koefisien Tekanan ( $C_P$ ) dan Karakteristik Aliran.....	85
<b>BAB V.....</b>	<b>87</b>
5.1. Kesimpulan.....	87
5.2. Saran.....	87
<b>REFERENSI.....</b>	<b>88</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>90</b>

## DAFTAR LAMPIRAN

### Lampiran A

- Tabel A1.** Rumus konversi celcius ( $^{\circ}\text{C}$ ) ke Kelvin (K)
- Tabel A2.** Konversi atm ke Pascal
- Tabel A3.** Kecepatan *Upstream* ( $U_0$ ) dan bilangan Reynolds (Re)
- Tabel A4.** Panjang benda uji eksperimen pada model 1, model 2 dan model 3
- Tabel A5.** Luas *frontal area* pada model 1, model 2 dan model 3
- Tabel A6.** Nilai gaya tahanan ( $F_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 1 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A7.** Nilai gaya tahanan ( $F_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 2 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A8.** Nilai gaya tahanan ( $F_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 3 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A9.** Nilai koefisien tahanan ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 1 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A10.** Nilai koefisien tahanan ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 2 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A11.** Nilai koefisien tahanan ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 3 untuk pendekatan eksperimental dan komputasi.
- Tabel A12.** Hasil pengamatan distribusi tekanan (*head*) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 1.
- Tabel A13.** Hasil pengamatan distribusi tekanan (*head*) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 2.
- Tabel A14.** Hasil pengamatan distribusi tekanan (*head*) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 3.
- Tabel A15.** Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 1.

**Tabel A16.** Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 2.

**Tabel A17.** Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada pengujian model 3.

## **Lampiran B**

**Gambar B1.** Pembuatan model benda uji

**Gambar B2.** Pengambilan data simulasi CFD

**Gambar B3.** Pengambilan data eksperimental pada *wind tunnel*

**Gambar B4.** Pengambilan data visualisasi aliran

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Skema posisi jarak antar silinder bundar pada pengujian model 1 .....	25
<b>Tabel 3.2</b> Skema posisi jarak antar silinder bundar pada pengujian model 2 .....	27
<b>Tabel 3.3</b> Skema posisi jarak antar silinder bundar pada pengujian model 3 .....	28
<b>Tabel 4.1</b> Hasil pengamatan gaya tahanan ( $F_D$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada $M/D = 2,5$ .....	52
<b>Tabel 4.2</b> Hasil pengamatan distribusi tekanan ( <i>head</i> ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel pada $M/D = 2,5$ .....	52
<b>Tabel 4.3</b> Nilai koefisien tahanan ( $C_d$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel $M/D = 2,5$ . .....	54
<b>Tabel 4.4</b> Nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) tandem tiga silinder bundar dengan konfigurasi seri paralel .....	55
<b>Tabel 4.5</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 1 untuk pendekatan eksperimental pada setiap tingkat bilangan Reynolds .....	56
<b>Tabel 4.6</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 1 untuk pendekatan komputasi pada setiap tingkat bilangan Reynolds. ....	57
<b>Tabel 4.7</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 2 untuk pendekatan eksperimental pada setiap tingkat bilangan Reynolds. ....	58
<b>Tabel 4.8</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 2 untuk pendekatan komputasi pada setiap tingkat bilangan Reynolds. ....	59
<b>Tabel 4.9</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 3 untuk pendekatan eksperimental pada setiap tingkat bilangan Reynolds.....	60
<b>Tabel 4.10</b> Hasil perhitungan koefisien tahanan ( $C_D$ ) model 3 untuk pendekatan komputasi pada setiap tingkat bilangan Reynolds. ....	61
<b>Tabel 4. 11</b> Hasil perhitungan rata-rata koefisien tekanan dengan metode..eksperimental pada model 1 .....	62
<b>Tabel 4. 12</b> Hasil perhitungan rata-rata koefisien tekanan dengan metode eksperimental pada model 2 .....	65
<b>Tabel 4. 13</b> Hasil perhitungan rata-rata koefisien tekanan dengan metode. eksperimental pada model 3.....	68

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Geometri benda uji [4].....	5
<b>Gambar 2. 2</b>	Koefisien drag [4].....	5
<b>Gambar 2. 3</b>	Distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama, (a) dengan variasi $Re$ , (b) dengan variasi $d/D$ [4] .....	6
<b>Gambar 2. 4</b>	Penambahan IDB pada benda uji [6].....	6
<b>Gambar 2. 5</b>	Hubungan antara $L/D$ dengan koefisien tahanan ( $C_D$ ) silinder persegi tersusun tandem dengan penambahan IDB pada $Re = 30,625$ dengan 3 tingkat $d/D$ [6].	7
<b>Gambar 2. 6</b>	Penambahan IDB pada benda uji [8] .....	7
<b>Gambar 2. 7</b>	Distribusi tekanan $C_p$ benda tandem (a) silinder segitiga (b) silinder persegi ...	8
<b>Gambar 2. 8</b>	Distribusi tekanan $C_p$ benda tandem (a) silinder segitiga (b) silinder persegi pada $L/D = 1,0$ pada $Re_D = 94.480$ untuk setiap $L/D$ [8] .....	8
<b>Gambar 2. 9</b>	Kontur distribusi tekanan dengan bilangan $Re_D = 94.480$ . .....	9
<b>Gambar 2.10</b>	Benda uji silinder persegi yang disusun tandem 3 buah dengan konfigurasi (a). seri dan (b). paralel [2] .....	9
<b>Gambar 2.11</b>	Hubungan antara $M/D$ & $N/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder persegi konfigurasi seri perlakuan model 1 dan 2 pada 7 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) [2] .....	10
<b>Gambar 2.12</b>	Hubungan antara $M/D$ & $N/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder persegi konfigurasi paralel perlakuan model 1 dan 2 pada 7 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) [2] .....	10
<b>Gambar 2.13</b>	Partikel fluida ketika mengalir pada lapisan batas [10].....	13
<b>Gambar 2.14</b>	Separasi aliran pada benda tegak [12] .....	14
<b>Gambar 2.15</b>	Skema terbentuknya lapisan geser ( <i>shear layer</i> ) yang selanjutnya akan membentuk <i>vortex</i> A dan B [13] .....	15
<b>Gambar 2. 16</b>	Skema mekanisme terjadinya pelepasan <i>vortex</i> ( <i>vortex shedding</i> ) pada sebuah silinder dalam aliran <i>steady</i> (penampang 2-D) [13].....	16
<b>Gambar 2.17</b>	Karakteristik aliran pada <i>tractor-trailer</i> [14] .....	17
<b>Gambar 2.18</b>	Pola Olakan [14].....	17
<b>Gambar 2.19</b>	Koefisien drag untuk elips dengan luas karakteristik berupa luas frontal, $A = bd$ atau luas platform $A = bl$ [10] .....	20
<b>Gambar 2.20</b>	Nilai koefisien tahanan benda dua dimensi pada $Re > 10^4$ [15].....	21
<b>Gambar 3. 1</b>	Model benda uji.....	23
<b>Gambar 3. 2</b>	Model benda uji tiga silinder tersusun tandem kombinasi seri paralel .....	24
<b>Gambar 3. 3</b>	Computational Domain .....	31
<b>Gambar 3. 4</b>	Panel ketika menjalankan aplikasi Gambit.....	32
<b>Gambar 3. 5</b>	Memasukkan gambar desain ke dalam aplikasi Gambit .....	33
<b>Gambar 3. 6</b>	Desain aliran yang dimasukkan ke dalam aplikasi Gambit.....	33
<b>Gambar 3. 7</b>	<i>Toolpad</i> untuk menggabungkan model dengan <i>Wind Tunnel</i> .....	33
<b>Gambar 3. 8</b>	Panel untuk menggabungkan model dengan <i>Wind Tunnel</i> .....	34
<b>Gambar 3. 9</b>	Tampilan bagian <i>Operation</i> .....	34
<b>Gambar 3.10</b>	Tampilan setelah di <i>Apply</i> .....	35
<b>Gambar 3.11</b>	<i>Toolpad Operation</i> .....	35

<b>Gambar 3.12</b> Tampilan kondisi batas.....	36
<b>Gambar 3.13</b> Panel <i>Export Mesh File</i> .....	36
<b>Gambar 3.14</b> Panel <i>Scale Grid</i> .....	37
<b>Gambar 3.15</b> Panel <i>Viscous Model</i> .....	37
<b>Gambar 3.16</b> Panel <i>Fluid</i> .....	38
<b>Gambar 3.17</b> Panel <i>Victory Inlet</i> .....	38
<b>Gambar 3.18</b> Panel <i>Solution Initialization</i> .....	39
<b>Gambar 3.19</b> Panel <i>Residual Monitor</i> .....	39
<b>Gambar 3.20</b> Plot dari residu iterasi.....	40
<b>Gambar 3.21</b> Panel <i>Force Reports</i> .....	40
<b>Gambar 3.22</b> Nilai FD .....	40
<b>Gambar 3.23</b> Panel <i>Pathlines</i> dan Panel <i>Grid Display</i> .....	41
<b>Gambar 3.24</b> Panel <i>Views, Contours, dan Grid Display</i> .....	41
<b>Gambar 3.25</b> Eksperimental setup.....	42
<b>Gambar 3.26</b> <i>Sub-sonic Wind Tunnel</i> (Dokumentasi, 2020).....	42
<b>Gambar 3.27</b> Motor listrik penggerak <i>fan</i> .....	43
<b>Gambar 3.28</b> Seksi uji .....	44
<b>Gambar 3.29</b> Tabung pitot.....	44
<b>Gambar 3.30</b> Alat ukur tekanan dinamis.....	45
<b>Gambar 3.31</b> Alat ukur kecepatan luar [18].....	45
<b>Gambar 3.32</b> Kontrol listrik .....	46
<b>Gambar 3.33</b> Alat ukur gaya tahanan ( <i>load cell</i> ) .....	46
<b>Gambar 3.34</b> Visualisasi Aliran .....	47
<b>Gambar 3.35</b> Termometer .....	48
<b>Gambar 3.36</b> Kunci L.....	48
<b>Gambar 3.37</b> Barometer .....	48
<b>Gambar 3.38</b> Mistar.....	49
<b>Gambar 3.39</b> Diagram alir penelitian .....	51
<b>Gambar 4.1</b> (A) Hasil visualisasi aliran dan (B) Kontur <i>stream function</i> pada kecepatan $U = 21$ m/s dengan variasi: (a) $M/D = 1,5$ (b) $M/D = 2,5$ .....	53
<b>Gambar 4.2</b> Hubungan antara $N/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem.tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 1 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan komputasi.....	56
<b>Gambar 4.3</b> Hubungan antara $N/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 1 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan eksperimental.....	57
<b>Gambar 4.4</b> Hubungan antara $M/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem.tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 2 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan komputasi.....	58
<b>Gambar 4.5</b> Hubungan antara $M/D$ dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 2 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan eksperimental.....	59



<b>Gambar 4. 6</b>	Hubungan antara M/D dan N/D dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 3 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan komputasi.....	60
<b>Gambar 4.7</b>	Hubungan antara M/D dan N/D dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel perlakuan model 3 pada 9 tingkat bilangan Reynolds ( $Re$ ) untuk pendekatan eksperimental. ....	61
<b>Gambar 4.8</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 1 <sub>C</sub> . ....	62
<b>Gambar 4.9</b>	Garis trendline hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 1 <sub>C</sub> .....	63
<b>Gambar 4.10</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 1 <sub>G</sub> .....	64
<b>Gambar 4.11</b>	Profil kontur <i>pressure coefficient</i> pada kecepatan 21 m/s dengan variasi N/D, a (0,0), b (1,1).....	65
<b>Gambar 4.12</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 2 <sub>A</sub> .....	66
<b>Gambar 4.13</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 2 <sub>G</sub> .....	66
<b>Gambar 4. 14</b>	Profil kontur <i>pressure coefficient</i> pada kecepatan 21 m/s dengan variasi N/D, a (0,1), b (1,1).....	67
<b>Gambar 4.15</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 3 <sub>A</sub> .....	69
<b>Gambar 4.16</b>	Hubungan koefisien tekanan ( $C_P$ ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 3 <sub>G</sub> .....	69
<b>Gambar 4.17</b>	Profil kontur <i>pressure coefficient</i> pada kecepatan 21 m/s dengan variasi M/D dan N/D, a (0,0), b (1,1). ....	70
<b>Gambar 4.18</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 1 <sub>B</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> .....	71
<b>Gambar 4.19</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 1 <sub>C</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 9 m/s. ....	71
<b>Gambar 4.20</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 1 <sub>G</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s. ....	72
<b>Gambar 4.21</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>A</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 11 m/s .....	72
<b>Gambar 4.22</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>A</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	73
<b>Gambar 4.23</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>D</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 7 m/s .....	73
<b>Gambar 4.24</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>D</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	74
<b>Gambar 4. 25</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>G</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 9 m/s .....	74
<b>Gambar 4.26</b>	Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 2 <sub>G</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	75

<b>Gambar 4. 27</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>A</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 7 m/s .....	75
<b>Gambar 4.28</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>A</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	76
<b>Gambar 4.29</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>C</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 7 m/s .....	76
<b>Gambar 4.30</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>C</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	76
<b>Gambar 4.31</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>G</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 7 m/s .....	77
<b>Gambar 4.32</b> Karakteristik aliran melintasi benda uji pada model 3 <sub>G</sub> dengan kecepatan <i>upstream</i> 21 m/s .....	77
<b>Gambar 4. 33</b> Perbandingan hasil penelitian dengan simulasi program CFD hubungan antara N/D dengan C <sub>D</sub> pada Re = 143763 tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel pada model 1.....	78
<b>Gambar 4. 34</b> Perbandingan hasil penelitian dengan simulasi program CFD hubungan antara M/D dengan C <sub>D</sub> pada Re = 143763 tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel pada model 2.....	79
<b>Gambar 4.35</b> Perbandingan hasil penelitian dengan simulasi program CFD hubungan antara M/D & N/D dengan C <sub>D</sub> pada Re = 143763 tandem tiga silinder bundar kombinasi seri paralel pada model 3 .....	80
<b>Gambar 4.36</b> Hubungan koefisien tekanan (C <sub>P</sub> ) terhadap perbandingan jarak silinder dengan metode eksperimental pada model 2 <sub>D</sub> .....	85

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Silinder bundar merupakan salah satu bentuk geometri yang banyak digunakan pada rekayasa struktur, industri dan transportasi. Berbagai aplikasi dari silinder bundar yang membentuk susunan tertentu seperti susunan tandem, in-line, staggered, atau square arrays dan lain-lain, banyak digunakan dalam aplikasi engineering seperti alat penukar kalor *shell and tube* atau tube banks, konstruksi perpipaan bawah laut, struktur penyangga anjungan lepas pantai, *cooling tower*, cerobong, dan sebagainya. Beban angin dan air pada suatu struktur menjadi salah satu faktor utama yang harus dipertimbangkan dalam desain. Seperti yang diketahui bahwa beban air dan angin pada suatu struktur yang berkelompok memiliki karakteristik yang berbeda dengan struktur tunggal dengan bentuk yang sama. Karena *interferensi* gabungan dari aliran di sekeliling struktur yang berkelompok menunjukkan berbagai fenomena yang menarik dan sulit diduga. Secara terkhusus dalam dunia transportasi seperti pesawat udara, kereta api, mobil dan kapal laut, gaya hambatan yang sangat besar sedapat mungkin dikurangi karena energi atau tenaga yang dibutuhkan untuk bergerak menjadi sangat besar. Hal inilah yang melatar belakangi ketertarikan para insinyur dan peneliti.

Selain geometri, penempatan pada instalasi juga sangat menentukan gaya hambat yang akan dialami oleh benda tersebut. Pada aplikasi teknik seringkali diinginkan gaya drag yang dialami sebuah benda ialah sekecil-kecilnya. Dari beberapa bentuk geometri yang dapat dijadikan sebagai alternatif dalam aplikasi teknik akan menghasilkan gaya drag yang berbeda, seperti diketahui bahwa geometri yang memiliki gaya drag yang lebih kecil banyak digunakan dalam aplikasi teknik. Berdasarkan hal tersebut maka akan dilakukan penelitian untuk mengetahui pola aliran pada benda tandem silinder bundar vertikal dengan memvariasikan *gap* antara benda satu dengan benda lainnya serta untuk mengetahui gaya drag yang dialami oleh benda.

Ketika suatu fluida mengalir melalui suatu benda, sebagai contoh silinder bundar, maka akan terjadi kehilangan energi akibat adanya gaya tahanan yang ditimbulkan oleh pengaruh lapisan batas dan oleh adanya pemisahan aliran. Dalam kategori pertama, tahanan disebabkan secara langsung oleh efek-efek viskos jadi oleh tegangan tangensial

dan disebut tahanan viskos atau tahanan gesek. Kategori ke dua, secara tak langsung disebabkan oleh viskositas karena pengaruh tekanan, jadi karena gaya-gaya normal dan disebut tahanan bentuk atau tahanan tekanan. Hal ini merupakan salah satu permasalahan yang dihadapi industri transportasi dalam meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistemnya. Untuk mengurangi kehilangan energi ini, bisa dirancang suatu bentuk penampang melintang benda secara tepat, sehingga aliran fluida dapat melintasi benda tanpa terjadi pemisahan aliran dan menghasilkan aliran yang seragam setelah melewati benda tersebut. (Salam dkk, 2019)

Berdasarkan jurnal penelitian yang mengkaji benda tandem menggunakan benda silinder bundar dengan panjang sisi 5cm terbuat dari acrylic setebal 2 mm yang disusun tandem secara seri dan parallel, diberikan perlakuan jarak dan 7 tingkat kecepatan dari 8 m/s sampai 20 m/s, penelitian berlangsung pada bilangan Reynolds ( $Re$ ) dari 9.395 sampai dengan 62.634. Hasil eksperimen menunjukkan karakteristik koefisien tahanan ( $CD$ ) pada konfigurasi meningkat bila jarak tiga silinder bundar tersusun tandem diperbesar, (Salam dkk, 2014).

Benda yang tersusun tandem akan mengalami penurunan pemisahan aliran atau diperkecil. Sampai saat ini banyak penelitian mengenai solusi untuk mengurangi kehilangan energi akibat gaya tahanan tersebut dan dirancang suatu bentuk penampang yang melintang benda secara tepat, sehingga aliran fluida dapat melintasi benda tanpa terjadi pemisahan aliran atau menunda terjadinya pemisahan aliran sampai kehilir dan menghasilkan aliran yang seragam setelah melewati benda tersebut.

Beban angin dan air mempunyai struktur yang berkelompok dan memiliki karakteristik berbeda dari struktur tunggal dengan bentuk yang sama, karena *interferensi* gabungan dari aliran disekeliling struktur yang berkelompok menunjukkan fenomena yang menarik dan tak terduga. Dalam kategori pertama, tahanan disebabkan secara langsung oleh efek viskos atau biasa disebut tegangan viskos atau tegangan geser. Kategori kedua, walaupun secara tidak langsung biasanya disebabkan tekanan oleh gaya normal atau biasa disebut tahanan bentuk atau tahanan tekanan.

Pada penelitian ini akan dilakukan terhadap tiga silinder bundar vertikal tersusun tandem. Penelitian-penelitian sebelumnya dilakukan terhadap dua silinder dengan berbeda bentuk atau dengan tambahan penghalang. Tiga silinder bundar tersusun tandem biasanya kita temukan pada konstruksi bangunan dan alat – alat engineering, seperti jembatan

layang, jembatan penyebrangan, bangunan lepas pantai, cerobong pabrik industri dan gedung tinggi di perkotaan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun beberapa rumusan masalah yang menjadi sumber pertimbangan untuk melaksanakan penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik aliran melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem dengan konfigurasi seri parallel?
2. Bagaimana koefisien tahanan, koefisien tekanan dan pemisahan aliran fluida melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem kombinasi seri parallel?
3. Bagaimana nilai koefisien tahanan dan koefisien tekanan optimum aliran fluida melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem kombinasi seri parallel?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran fluida yang melintasi tiga silinder bundar yang tersusun tandem dengan cara sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik aliran melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem dengan konfigurasi seri parallel.
2. Menganalisis koefisien tahanan, koefisien tekanan dan pemisahan aliran fluida melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem kombinasi seri parallel.
3. Menentukan nilai koefisien tahanan dan koefisien tekanan optimum aliran fluida melintasi tiga silinder bundar tersusun tandem kombinasi seri parallel.

## **1.4 Batasan Masalah**

Dengan melihat bahwa luasnya permasalahan yang perlu dikaji dan data data pengujian yang dibutuhkan maka dalam penelitian ini, maka kami membatasi dalam beberapa hal diantaranya adalah:

1. Pengujian baik secara komputasi maupun eksperimental dilakukan pada jenis aliran *steady*.
2. Fluida yang digunakan adalah udara dengan densitas  $1.225 \text{ kg/m}^3$  dan viscositas  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ .
3. Udara dianggap mengalir secara *incompressibel flow*.
4. Profil yang digunakan adalah silinder bundar vertikal yang disusun tandem, dengan

ukuran dimensi tinggi 5cm dan diameter.

5. Permukaan benda uji dianggap halus (licin).
6. Metode yang digunakan adalah metode komputasi dengan model turbulensi *k-epsilon* standar dan metode eksperimental untuk pengukuran *drag* menggunakan *load cell* (pendekatan eksperimental hanya berupa pengukuran hambatan).
7. Kemungkinan terjadinya perpindahan panas diabaikan.
8. Laju aliran angin yang melewati wind tunnel dalam beberapa variasi kecepatan yaitu 5m/s, 7m/s, 9m/s, 11 m/s, 13 m/s, 15m/s, 17m/s, 19m/s, 21m/s

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritik dan manfaat praktis, yaitu sebagai berikut:

### 1. Manfaat Teoritik

Apabila diketahui besarnya koefisien tahanan dan jarak titik pemisahan aliran melalui tandem silinder bundar vertikal (benda uji), maka hal tersebut dapat berkontribusi ilmiah baru dibidang mekanika fluida, khususnya aerodinamika dalam melengkapi nilai koefisien tahanan dan koefisien tekanan yang dikemukakan oleh berbagai literatur.

### 2. Manfaat Praktis

Apabila diketahui besarnya nilai koefisien tahanan dan koefisien tekanan aliran melalui tandem silinder bundar vertikal (benda uji), maka praktisi bidang aerodinamis dapat menggunakannya dalam mendesain dan menganalisis lebih efektif dan efisien berbagai jenis peralatan industri otomotif, penerbangan dan *power plant*.

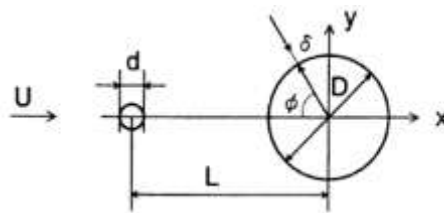
### 3. Manfaat Aplikatif

Apabila diketahui nilai koefisien tahanan dan koefisien tekanan aliran melalui tandem silinder bundar vertikal (benda uji), maka memfasilitasi kebijakan pemerintah dalam penghematan energi dalam bidang transportasi dan dengan sendirinya memberikan keuntungan bagi masyarakat pengguna transportasi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

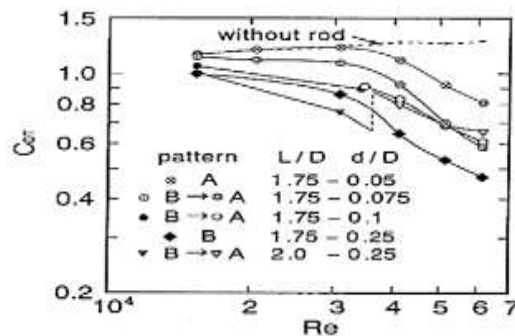
### 2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang usaha untuk menurunkan gaya hambat telah dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi [4]. Penelitian dilakukan dengan konfigurasi berupa silinder utama yang diberi batang pengganggu di depannya seperti yang ditampilkan pada gambar 2.1. Diameter silinder adalah  $D = 40$  mm, dan diameter batang  $d$  rentangnya dari 1 sampai 10 mm. Jarak antara sumbu silinder dan batang,  $L$  adalah 50-120 mm. Bilangan Reynold didasarkan pada  $D$  rentang dari  $1,5 \times 10^4$  sampai  $6,2 \times 10^4$ .



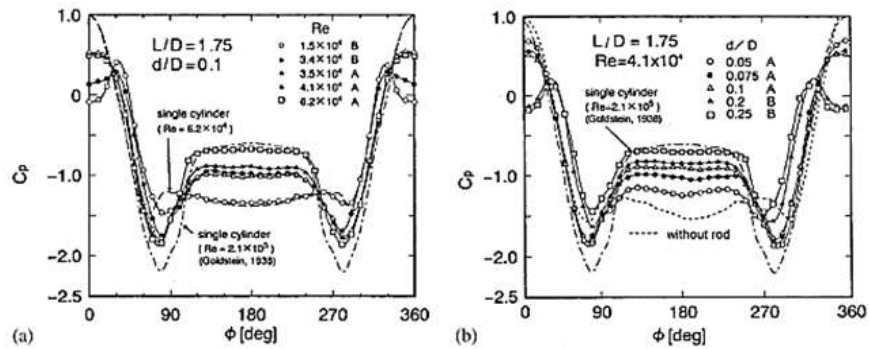
**Gambar 2. 1** Geometri benda uji [4]

Penelitian ini menunjukkan adanya pengaruh  $Re$  terhadap penurunan  $C_D$ , bahwa  $C_D$  menurun seiring dengan meningkatnya nilai  $Re$  dan  $d/D$  serta berkurangnya nilai  $L/D$  seperti yang terlihat pada gambar 2.2 dibawah ini.



**Gambar 2. 2** Koefisien drag [4]

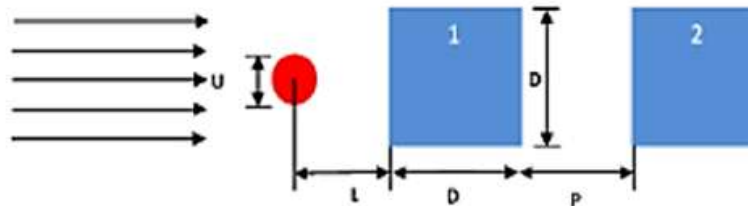
Dan untuk penurunan *pressure drag* lebih banyak dipengaruhi oleh  $Re$  dibandingkan  $d/D$  dan  $L/D$ .



**Gambar 2.3** Distribusi tekanan pada silinder sirkuler utama, (a) dengan variasi.Re, (b) dengan variasi d/D [4]

Terjadi dua pola aliran dengan dan tanpa *vortex shedding* dari batang. Pola aliran berubah tergantung pada diameter batang, posisi dan angka Reynolds. Kondisi optimum dari pengurangan *drag* adalah pada  $d/D = 0,25$ ,  $L/D = 1,75 - 2,0$ . Dari gambar 2.3 diatas diketahui bahwa pada kondisi tersebut *vortex* tidak tumpah dari batang dan lapisan geser dari batang menempati muka depan dari silinder. Pengurangan total *drag* yang meliputi *drag* dari batang adalah 63% dibandingkan dengan yang satu silinder.

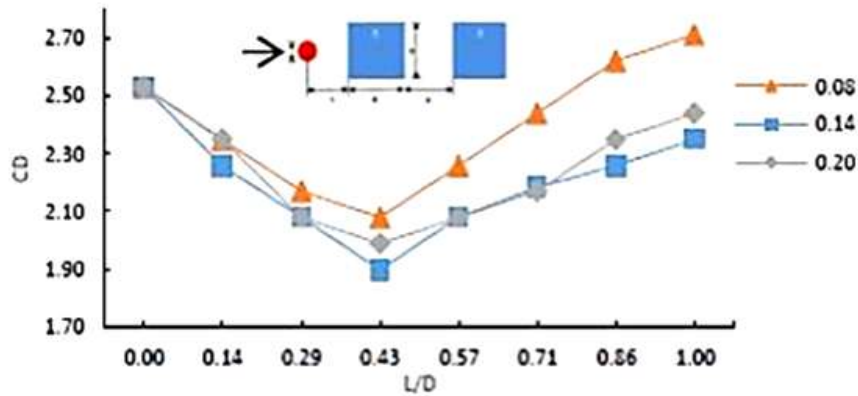
Penelitian tentang reduksi tahanan aliran melintasi silinder persegi tersusun tandem, dengan penambahan *inlet disturbance body (IDB)* berupa silinder sirkular dilakukan oleh Salam, et.al. [6] seperti pada gambar 2.4.



**Gambar 2. 4** Penambahan IDB pada benda uji [6]

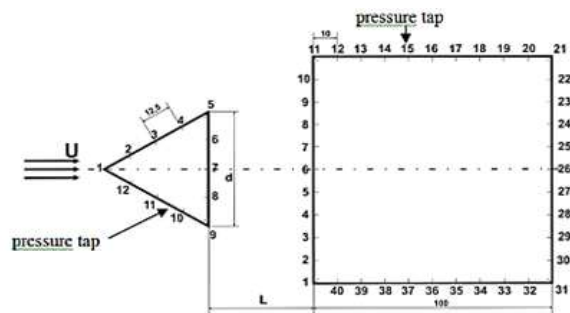
Penelitian tersebut menunjukkan pola nilai koefisien tahanan ( $C_D$ ) menurun dengan peningkatan  $L/D$  dan  $d/D$  dan diperoleh nilai  $C_d$  terendah pada  $L/D = 0,43$  dan  $d/D = 0,14$  untuk semua tingkat bilangan Reynolds seperti yang ditampilkan pada gambar 2.5.





**Gambar 2.5** Hubungan antara  $L/D$  dengan koefisien tahanan ( $C_D$ ) silinder persegi tersusun tandem dengan penambahan IDB pada  $Re = 30,625$  dengan 3 tingkat  $d/D$  [6]

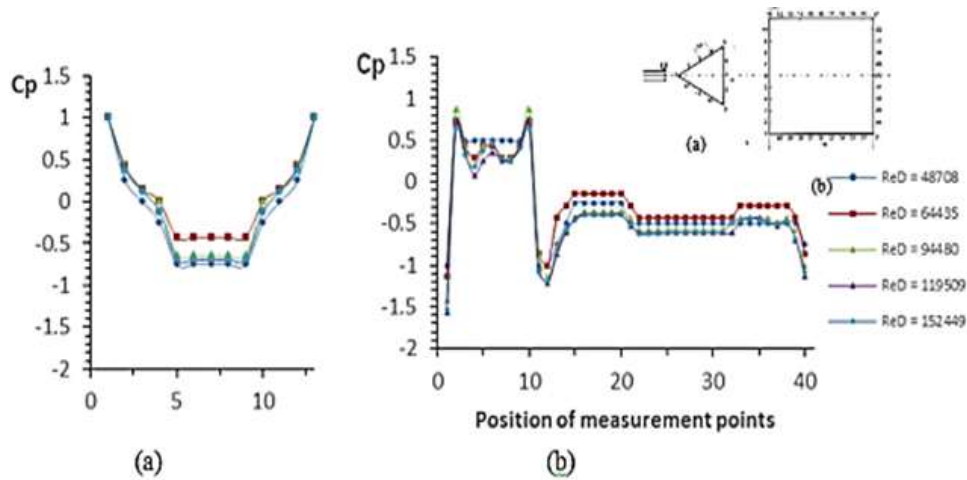
Hal ini disebabkan karena pemisahan aliran teredam lebih awal dengan penambahan silinder sirkular *IDB* sebelum tandem silinder persegi. Bila nilai  $L/D$  lebih besar atau lebih kecil dari 0,43, maka nilai  $C_D$  bertambah besar, hal ini disebabkan karena vorteks aliran mendorong aliran ke atas, yang menyebabkan terjadinya lapisan batas di atas silinder persegi bertambah besar. Penempatan silinder sirkular sebagai *IDB* yang dipasang sebelum tandem silinder persegi, mengakibatkan reduksi tahanan silinder persegi sebesar 35,7692 %.



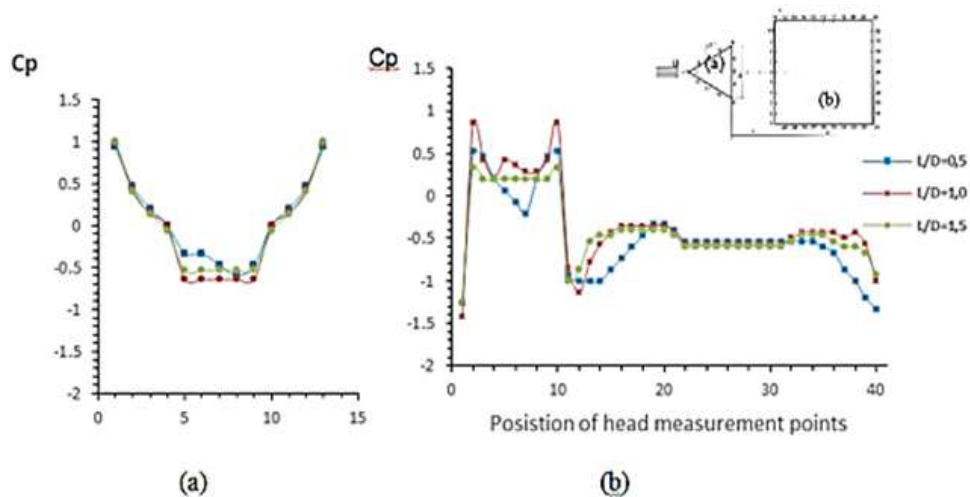
**Gambar 2. 6** Penambahan *IDB* pada benda uji [8]

Penelitian mengenai distribusi tekanan aliran fluida melalui silinder segitiga dan silinder persegi di  $d/D = 0,5$  dilakukan oleh Salam, et.al. [8] dengan benda uji seperti pada gambar 2.6.

Penelitian tersebut dianalisis secara eksperimental di berbagai bilangan Reynolds,  $Re_D = 48708, 64435, 94480, 119509$  dan  $152449$  dengan  $L/D = 0,5; 1,0$  dan  $1,5$  seperti pada gambar dibawah ini.

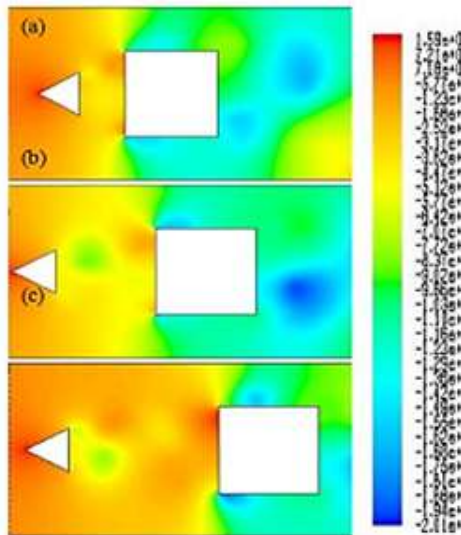


**Gambar 2.7** Distribusi tekanan  $C_p$  benda tandem (a) silinder segitiga (b) silinder persegi pada  $L/D = 1,0$  untuk 5 bilangan Reynolds [8]



**Gambar 2.8** Distribusi tekanan  $C_p$  benda tandem (a) silinder segitiga (b) silinder persegi pada  $L/D = 1,0$  pada  $Re_D = 94.480$  untuk setiap  $L/D$  [8]

Hasil pengujian menunjukkan bahwa koefisien tekanan berubah dengan jarak antara dua silinder dan mencapai terkecil di  $L/D = 1,0$ . Pola distribusi koefisien tekanan hampir serupa untuk semua bilangan Reynolds dan  $L/D$  meskipun nilai koefisien tekanan berubah dengan bilangan Reynolds dan  $L/D$ .

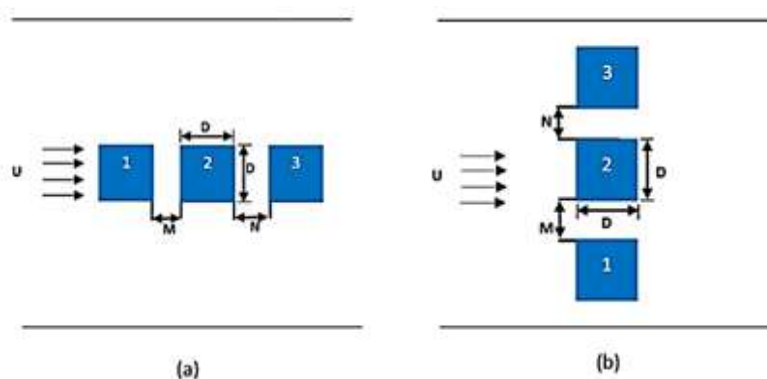


**Gambar 2. 9** Kontur distribusi tekanan dengan bilangan  $ReD = 94.480$ .

(a)  $L/D = 0,5$ ; (b)  $L/D = 1,0$ ; (c)  $L/D = 1,5$  [8]

Pada gambar 2.9 diketahui bahwa pola distribusi tekanan sebagian besar tergantung pada geometri silinder baik segitiga atau silinder persegi, sedangkan rasio jarak dari dua silinder ke diameter silinder utama hanya mempengaruhi nilai tinggi dan rendah dari koefisien tekanan. Koefisien tekanan negatif dominan di sisi depan silinder persegi, menunjukkan bahwa susunan silinder segitiga di depan satu persegi sangat efektif dalam pengurangan drag pada silinder persegi

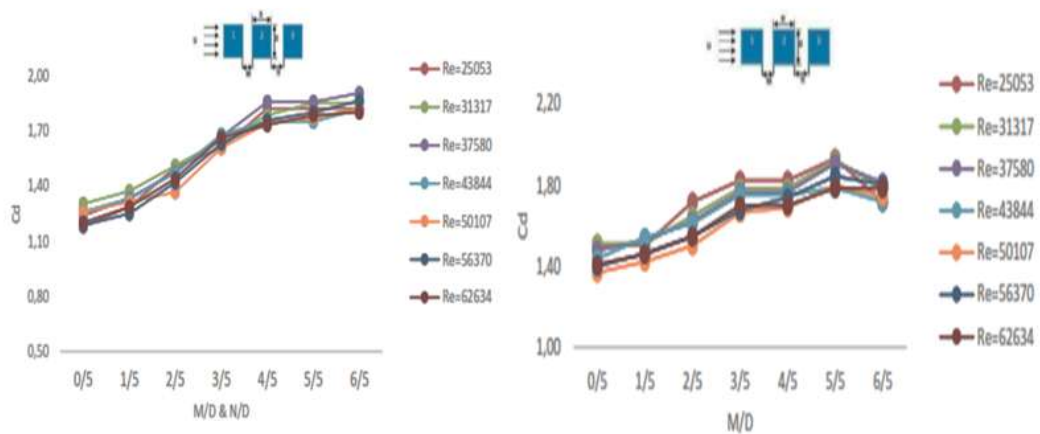
Penelitian tentang karakteristik koefisien tahanan aliran fluida melintasi tiga silinder persegi tersusun tandem pernah dilakukan oleh Salam, et.al. [2]. Ketiga silinder tersebut disusun dalam konfigurasi seri dan paralel.



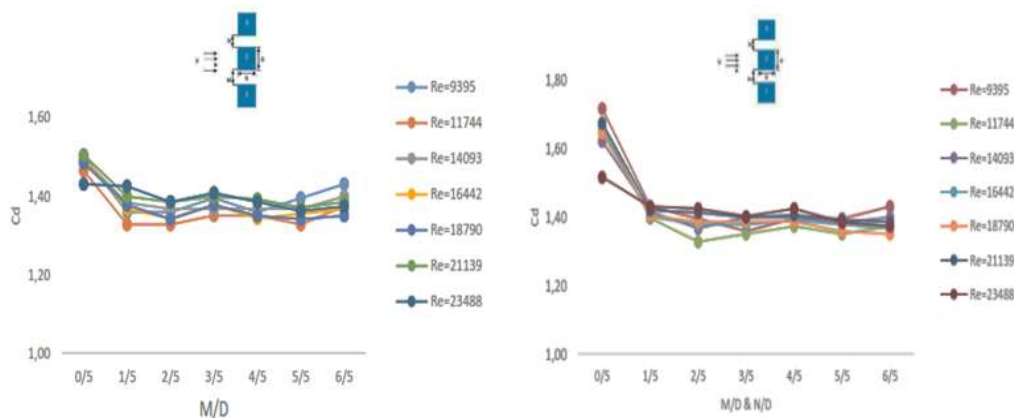
**Gambar 2.10** Benda uji silinder persegi yang disusun tandem 3 buah dengan konfigurasi (a). seri dan (b). paralel [2]

Dari gambar 2.10 tersebut masing-masing konfigurasi diberikan 2 model perlakuan jarak, yaitu model 1 jarak silinder 1 dengan silinder 2 (M) berubah sedangkan jarak silinder

2 dengan silinder 3 (N) tetap 6 cm dan model 2 M dan N berubah dengan jarak yang sama, kemudian diberikan perlakuan 7 tingkat kecepatan yang sama dari 8 m/s sampai dengan 20 m/s. Penelitian berlangsung pada bilangan Reynolds (Re) dari 9395 sampai dengan 62634, atau aliran laminar untuk aliran eksternal.



**Gambar 2.11** Hubungan antara M/D & N/D dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder persegi konfigurasi seri perlakuan model 1 dan 2 pada 7 tingkat bilangan Reynolds (Re) [2]



**Gambar 2.12** Hubungan antara M/D & N/D dengan koefisien tahanan aliran ( $C_D$ ) tandem tiga silinder persegi konfigurasi paralel perlakuan model 1 dan 2 pada 7 tingkat bilangan Reynolds (Re) [2]

Hasil eksperimen ditampilkan pada gambar 2.11 yang menunjukkan karakteristik koefisien tahanan ( $C_D$ ) pada konfigurasi seri model 1 maupun model 2 meningkat bila M/D dan N/D diperbesar, sedangkan pada konfigurasi paralel model 1 dan model 2 menurun bila M/D dan N/D diperbesar seperti yang ditampillkan pada gambar 2.12. Nilai koefisien tahanan yang optimum pada konfigurasi seri model 1  $C_D = 1,37$  dan mereduksi tahanan

aliran udara sebesar 34,76 %, sedangkan pada model 2  $C_D = 1,18$  dan mereduksi tahanan aliran udara 43,81 %. Konfigurasi paralel model 1 dan model 2 nilainya sama yaitu  $C_D = 1,33$  dan mereduksi tahanan aliran udara sebesar 36,67 %.

## 2.2. Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran laminar dan turbulen dibedakan berdasarkan karakteristik internal aliran. Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dapat dialami suatu aliran yang mempengaruhi gerak partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida dan aliran fluida tersebut disebut dengan aliran laminar. Saat gangguan yang timbul semakin besar hingga mencapai kondisi peralihan (*transition state*) pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang mulai berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak fluktuatif atau acak dan terjadi percampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatas atau disebut dengan aliran turbulen.

Perbedaan mendasar antara aliran laminar dan turbulen adalah gerak olakan atau ketidakteraturan pada aliran turbulen jauh lebih efektif dalam pengangkutan massa serta momentum fluida dibandingkan gerak molekuler. Kondisi aliran laminar dan turbulen dapat dinyatakan dengan bilangan Reynolds.

## 2.3. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah suatu bilangan tak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap tegangan geser yang ditimbulkan aliran fluida. Adapun penurunan rumus dari bilangan Reynolds untuk aliran luar (*eksternal flow*) adalah sebagai berikut [9],

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{Gaya geser}}$$

dimana:

$$\text{Gaya inersia} = P \times A = \rho \cdot U^2 \cdot L^2$$

$$\text{Gaya geser} = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U}{L}\right) \cdot L^2$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U}{L}\right) \cdot L^2}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu}$$

dimana:

- U = Kecepatan aliran fluida (m/s)
- L = Panjang karakteristik (m)
- P = Massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)
- μ = Viskositas dinamis fluida (N.s/m<sup>2</sup>)

Atau bilangan Reynolds ini juga didasarkan pada diameter (D) benda sehingga,

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

dimana:

- D = Diameter silinder persegi (m)
- ν = Viskositas kinematis fluida (m<sup>2</sup>/s)

#### 2.4. Lapisan Batas

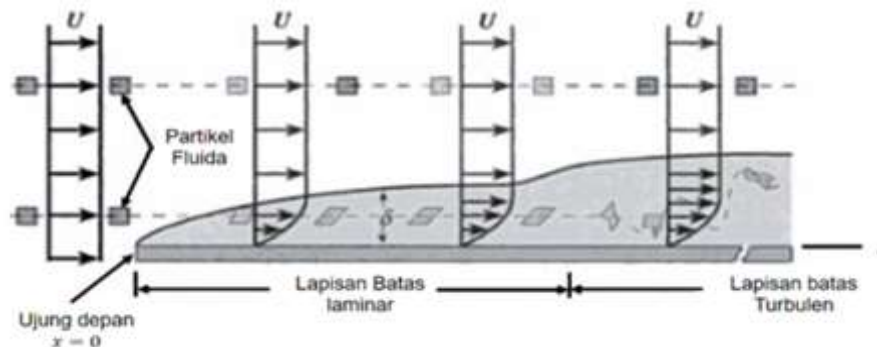
Pengertian lapisan batas adalah daerah dimana aliran mengalami hambatan karena adanya tegangan geser yang besar pada permukaan benda, sehingga partikel-partikel fluida terpaksa berhenti pada sekitar permukaan benda karena gesekan viskos [10].

Lapisan batas adalah konsep yang dikembangkan oleh Ludwig Prandtl (1874-1953) yang merupakan seorang ilmuwan dari *Gottigen University*. Lapisan batas didefinisikan sebagai lapisan yang terbentuk pada permukaan suatu benda yang dilewati fluida karena viskositas dan faktor gesekan antara fluida dengan permukaan benda hingga pada kondisi *inviscid*. Aliran *inviscid* adalah aliran dimana gesekan, konduktivitas panas dan difusi massa dapat diabaikan [11].

Lapisan batas muncul pada permukaan benda karena sifat *viscous* dari fluida yang cenderung menempel pada permukaan yang bersifat stasioner yang menyebabkan aliran fluida di atasnya melambat karena interaksi tumbukan antar molekul fluida dan permukaan benda. Kecepatan pada daerah lapisan batas meningkat secara perlahan hingga mencapai kecepatan aliran bebas (*free stream*). Fluida dengan kecepatan aliran bebas dapat dimodelkan *inviscid* jika berada diluar daerah lapisan batas. Aliran fluida yang berada diluar lapisan batas disebut aliran tak berotasi, namun pada saat aliran tersebut masuk ke dalam lapisan batas maka aliran disebut aliran berotasi. Pada bagian *downstream* lapisan batas, ada bagian

dimana alirannya menjadi turbulen yang dikarenakan partikel fluida menjadi sangat terdistorsi.

Lapisan batas memiliki ketebalan yang membatasi area dimana efek *viscous* masih berlaku pada suatu aliran fluida atau tidak. Semakin jauh jarak permukaan benda yang dilewati oleh fluida, maka ketebalan lapisan batas akan lebih besar. Ketebalan sebuah lapisan batas dinotasikan dengan  $\delta$  dimana perubahan kecepatan yang terjadi pada lapisan batas akan menentukan gradien kecepatan pada permukaan benda dan juga tegangan gesernya.



**Gambar 2. 13** Partikel fluida ketika mengalir pada lapisan batas [10]

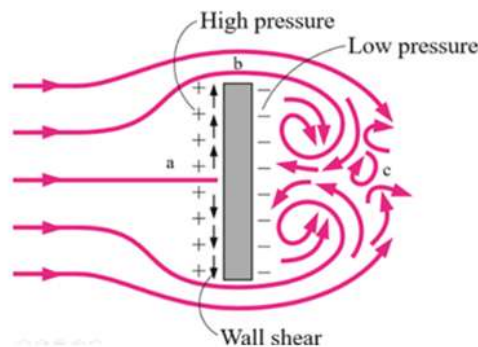
Pada gambar 2.13 menunjukkan lapisan batas yang disebabkan oleh fluida yang mengalir pada plat datar. Partikel fluida yang berada cukup dekat dengan permukaan pelat akan terhambat karena gesekan sehingga kecepatannya mendekati nol. Saat lapisan batas laminar tidak mampu mempertahankan kondisi *steady* yang dimilikinya, maka akan terbentuk lapisan turbulen. Kondisi lapisan batas tergantung pada kekasaran permukaan benda dan tingkat turbulensi aliran *free stream*.

Jika bilangan Reynolds cukup besar, hanya fluida didalam lapisan batas relatif tipis pada pelat yang akan merasakan efeknya. Artinya, kecuali didaerah dekat pelat, kecepatan aliran pada dasarnya akan sebesar  $V = U i$ , yaitu kecepatan *upstream*. Untuk pelat dengan panjang tak terhingga yang membentang dari  $x = 0$  sampai  $x = \infty$ , tidaklah jelas bagaimana mendefinisikan bilangan Reynolds karena tidak ada panjang karakteristiknya. Untuk pelat dengan panjang tertentu, jelas bahwa panjang pelat  $L$  dapat digunakan sebagai panjang karakteristik. Namun untuk pelat dengan panjang tak terhingga, jarak koordinat sepanjang pelat dari ujung depan, sebagai panjang karakteristik dan bilangan Reynolds didefinisikan sebagai  $Re_x = U_x / \nu$  [10].

## 2.5. Separasi Aliran

Separasi adalah kondisi dimana aliran udara yang mengalir disepanjang permukaan benda tidak mampu lagi menempel pada permukaan tersebut. Separasi aliran berakibat pada

terbentuknya aliran balik disekitar benda. Aliran yang bergerak secara teratur akan terpecah saat terjadinya separasi dan mengakibatkan terjadinya penurunan distribusi tekanan dan menimbulkan gaya *drag* [11].



**Gambar 2. 14** Separasi aliran pada benda tegak [12]

Pada gambar 2.14 menunjukkan skema terjadinya separasi aliran pada benda tegak. Adanya separasi aliran merupakan bentuk efek dari viskositas fluida. Karena disebabkan efek viskos, fluida di titik b pada permukaan benda kehilangan energi kinetik sehingga tidak memiliki momentum untuk mengalir dalam lapisan. Titik a adalah titik dimana separasi aliran terjadi. Sedangkan di titik c terjadi aliran balik (*wake*) karena perbedaan tekanan yang cukup besar antara sisi depan dan sisi belakang benda. Perbedaan tekanan inilah penyebab timbulnya gaya *drag*.

## 2.6. Pola Aliran *Vortex*

Bila suatu medan aliran fluida (air atau udara, misalnya) terhalang oleh sebuah benda maka pola aliran fluida tersebut akan terganggu dari kondisi stasionernya lalu akan mencari kondisi kesetimbangan barunya. Misalkan pada kasus sebuah silinder yang berada dalam aliran *steady*, maka akan terjadilah suatu pola aliran tertentu di sekeliling permukaan silinder tersebut. Ternyata, pola aliran ini salah satunya tergantung pada suatu parameter yang disebut angka Reynolds.

Nilai  $Re$  inilah yang akan menentukan bagaimana bentuk pola aliran yang akan terjadi. Beberapa di antaranya misalnya, bila nilai  $Re < 5$ , maka yang terjadi adalah pola aliran yang mulus, tanpa terjadi pusaran-pusaran lokal fluida (*vortex*) dan tidak terjadi pula pemisahan aliran pada saat aliran sudah melewati silinder (*creeping flow*).

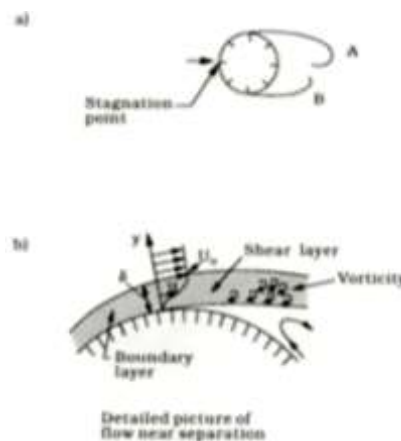
Selanjutnya bila kecepatan aliran dinaikkan, yang berarti nilai  $Re$  makin bertambah besar, misalnya untuk rentang  $5 < Re < 40$ , maka akan mulai terbentuk *vortex*. Dalam rentang



nilai  $Re$  ini akan terbentuk sepasang *vortex* simetris di belakang silinder yang berputar stasioner tanpa terpecah selama rentang nilai  $Re$  tidak berubah.

Namun ketika nilai  $Re$  ini terus dinaikkan, maka medan aliran makin menjadi tidak stabil, yang mana lambat-laun formasi *vortex* yang terbentuk mulai berantakan dengan pola-pola yang tertentu. Maka pada saat itulah akan timbul suatu fenomena yang dinamakan Pelepasan *Vortex* (*Vortex Shedding*), yang mulai terjadi pada saat nilai  $Re > 40$ . Fenomena ini adalah terlepasnya *vortex* secara bolak-balik di sisi-sisi silinder dengan pola dan frekuensi tertentu. Pola pelepasan *vortex* ini pun secara lebih detail akan memiliki bentuk tertentu sesuai dengan rentang angka Reynolds-nya.

Fenomena pelepasan *vortex* ini memang biasa terjadi pada hampir semua jenis aliran fluida yang memiliki nilai angka  $Re > 40$ . Pada nilai  $Re$  ini, lapisan batas (*boundary layer*) di sekeliling permukaan silinder akan memisah akibat adanya gradien tekanan balik dari geometri yang divergen dari aliran di sekitar sisi belakang silinder. Akibatnya terbentuklah suatu lapisan geser (*shear layer*). Hal ini secara skematis diilustrasikan dalam gambar 2.15.



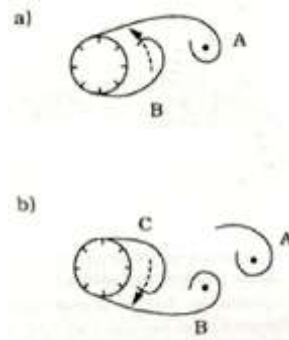
**Gambar 2.15** Skema terbentuknya lapisan geser (*shear layer*) yang selanjutnya akan membentuk *vortex* A dan B [13]

Secara sederhana, mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* pada kasus aliran air melalui sebuah silinder dapat diterangkan sebagai berikut:

Jika  $Re > 40$ , maka pasangan *vortices* yang terbentuk menjadi tidak stabil oleh gangguan/usikan kecil, sehingga salah satu *vortex* akan tumbuh lebih besar dari yang lainnya (lihat gambar sketsa terjadinya *vortex shedding*). *Vorticity* dalam *vortex* A berputar searah jarum jam (CW), sedangkan *vorticity* dalam *vortex* B berputar berlawanan arah jarum jam (CCW). Selanjutnya gerakan aliran *vorticity* yang CCW akan memotong aliran *vorticity*

yang menyuplai *vortex* A, sehingga *vortex* A terlepas lalu menjadi *vortex* bebas dan akhirnya terseret aliran ke arah belakang/menjauhi silinder.

Setelah *vortex* A terlepas, terbentuklah *vortex* baru menggantikan *vortex* A yaitu *vortex* C. Maka selanjutnya, *vortex* B akan mengalami hal yang sama dengan *vortex* A sebelumnya, yaitu pertama, ukuran dan kekuatannya makin membesar lalu terpotong oleh *vortex* C dan akhirnya terlepas menjadi *vortex* bebas. Proses seperti ini akan berlangsung terus-menerus setiap terjadi pelepasan *vortex* baru pada setiap sisi silinder yang terlihat pada gambar 2.16.



**Gambar 2.16** Skema mekanisme terjadinya pelepasan *vortex* (*vortex shedding*) pada sebuah silinder dalam aliran *steady* (penampang 2-D) [13]

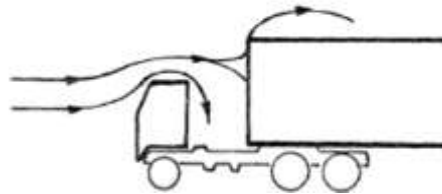
Jadi dari hal tersebut dapat dipahami bahwa pelepasan *vortex* hanya akan terjadi jika terdapat interaksi antara dua lapisan geser (*shear layer*) pada dua sisi silinder. Secara teoritik hal ini bisa dihindarkan dengan cara meniadakan interaksi tersebut. Misalnya dengan cara memberikan suatu pelat pemisah di bagian belakang silinder diantara dua lapisan tersebut. Maksudnya agar interaksi antar *vortex* bisa dicegah, sehingga akhirnya tidak terjadi pelepasan *vortex*.

Maka pada perkembangan selanjutnya, konsep inilah yang mendasari timbulnya berbagai macam upaya dengan cara menambahkan struktur-struktur bentuk tertentu pada permukaan silinder (*suppression devices*) dalam rangka mengurangi terjadinya pelepasan *vortex*, selanjutnya getaran akibat pelepasan *vortex*. Tetapi dalam prakteknya, bagaimanapun juga fenomena pelepasan *vortex* ini tidak bisa dihindari, sejauh ini hanya bisa diminimalisasi saja [13].

## 2.7. *Streamline*

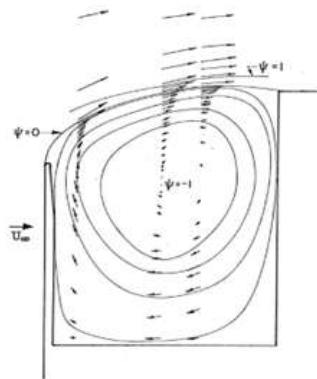
Klasifikasi aliran pada bentuk benda dapat tergantung pada apakah benda tersebut dibuat mulus mengikuti garis arus (*streamlined*) atau tumpul. Karakteristik aliran sangat bergantung pada seberapa banyak bagian yang dibuat mulus tersebut. Secara umum,

benda-benda *streamlined* (seperti *airfoil*, mobil balap, dan lain-lain.) memiliki pengaruh kecil pada fluida yang mengelilinginya, dibandingkan dengan pengaruh yang dimiliki benda tumpul (misalnya parasut, gedung-gedung, dan lain-lain) pada fluida. Biasanya, tapi tidak selalu, akan lebih mudah untuk mendorong sebuah benda *streamlined* melewati suatu fluida daripada mendorong sebuah benda tumpul yang ukurannya sama agar bergerak dengan kecepatan yang sama [10].



**Gambar 2. 17** Karakteristik aliran pada *tractor-trailer* [14]

Salah satu fokus merancang benda yang konstruksinya tandem agar dapat *streamlined*, selain merubah bentuk, memvariasikan jarak antar kedua benda yang saling tandem juga lebih efektif dan praktis. Hal ini telah dikemukakan oleh Koenig [14] bahwa dengan konfigurasi seperti ini, pengurangan gaya *drag* tercatat 10 sampai 15 %. Dengan terbentuknya olakan (*wake*) diantara benda tandem, tekanan stagnasi serta separasi aliran bisa ditunda sehingga aliran menjadi *streamlined* dan gaya *drag* menurun. Salah satu aplikasi dari penelitian ini, yaitu pada kendaraan *tractor-trailer* seperti yang terlihat pada gambar 2.17.



**Gambar 2. 18** Pola Olakan [14]

Pola olakan (*wake*) yang terjadi pada celah benda tandem pada rasio jarak yang ideal, membuat aliran yang lewat dapat *streamline* sehingga menunda terjadinya separasi. Fungsi olakan dapat dilihat pada gambar 2.18 menjelaskan tentang gambaran arus yang

ditandai dengan *streamfunction* ( $\psi$ ) yang bersirkulasi pada kecepatan tertentu. Dengan hal ini dapat menurunkan koefisien *drag* [14].

## 2.8. Koefisien Drag

*Drag* adalah besarnya gaya yang bergerak diatas sebuah objek yang memiliki posisi sejajar dengan aliran bebas. *Drag* pada suatu benda disebabkan oleh dua hal yakni gesekan antara fluida dengan permukaan benda kerja dan tekanan. *Drag* karena gesekan biasa disebut dengan *friction drag* dan tergantung pada luas permukaan yang bersentuhan langsung dengan fluida, tegangan geser, viskositas, gradien kecepatan, kekasaran permukaan benda dan *streamline body*. Sedangkan drag karena perbedaan tekanan disebut *form drag*, yang tergantung pada bentuk, ukuran, distribusi tekanan, *wake*, bilangan Reynolds dan *bluff body* dari suatu benda yang dikenakan aliran [10].

Setiap benda yang bergerak melalui suatu fluida akan mengalami *drag*, yaitu suatu gaya netto dalam arah aliran karena tekanan dan gaya geser pada permukaan benda. Gaya netto ini, yang merupakan kombinasi komponen gaya pada arah aliran dari gaya-gaya normal dan tangensial pada benda, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$D = \int dFx = \int p \cos \theta dA + \tau_w \sin \theta dA \quad (2)$$

Jika distribusi tekanan,  $p$ , dan tegangan geser dinding,  $\tau_w$ , diketahui. Tentu saja untuk melakukan pengintegralan dan menentukan *drag*, kita harus mengetahui bentuk benda (yaitu,  $\theta$  sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi dari  $\tau_w$  dan  $p$  di sepanjang permukaan. Distribusi-distribusi ini seringkali sangat sulit didapatkan, baik secara eksperimental maupun secara teoritis. Distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan dengan menggunakan serangkaian tap tekanan statik sepanjang permukaan benda.

Tanpa informasi terperinci yang berkaitan dengan distribusi tegangan geser dan tekanan pada sebuah benda, persamaan tersebut tidak dapat digunakan. Alternatif yang banyak digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien *drag* yang tak berdimensi dan menentukan nilai-nilai perkiraannya dengan cara, baik menggunakan analisis yang disederhanakan, atau dengan beberapa teknik numerik atau eksperimen yang sesuai. Koefisien *drag*,  $C_d$ , didefinisikan sebagai:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (3)$$

Dimana koefisien *drag* sama dengan *drag* yang dihasilkan oleh tekanan dinamik yang bekerja pada daerah dengan luas  $A$ . Biasanya,  $A$  ditetapkan sebagai *luas frontal* yaitu luas proyeksi yang dilihat oleh orang yang memandang benda dari suatu arah yang sejajar dengan kecepatan hulu  $U$  [10].

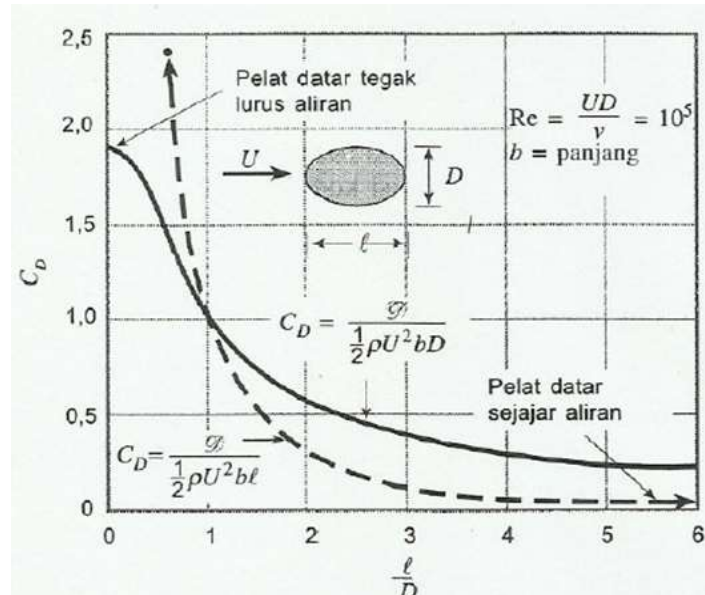
Oleh karena itu, gaya drag dapat dirumuskan sebagai:

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (4)$$

Dan jika  $C_D = 1$ , maka,

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (5)$$

Koefisien *drag* untuk berbagai benda tergantung pada bentuk dari benda tersebut, dengan bentuk yang berkisar mulai dari benda yang *streamlined* sampai benda yang tumpul. *Drag* pada elips dengan aspek rasio  $L/D$ , dimana  $D$  dan  $L$  adalah ketebalan dan panjang yang sejajar dengan aliran, mengilustrasikan ketergantungan ini. Koefisien *drag*  $C_d = D (\rho U^2 bd/2)$ , berdasarkan luas frontal,  $A = bd$ , dimana  $b$  adalah panjang normal terhadap aliran seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.19 semakin tumpul benda, semakin besar koefisien drag. Dengan  $L/D = 0$  (yaitu sebuah pelat datar tegak lurus terhadap aliran) kita memperoleh nilai  $C_d$  untuk pelat datar = 1.9. Dengan  $L/D = 1$ , nilai yang berkaitan untuk sebuah silinder bundar diperoleh. Dengan semakin membesarnya  $L/D$ , nilai dari  $C_d$  semakin berkurang.



**Gambar 2.19** Koefisien drag untuk elips dengan luas karakteristik berupa luas frontal,  $A = bd$  atau luas platform  $A = bl$  [10]

Parameter lain yang dapat membuat koefisien *drag* sangat tergantung padanya adalah bilangan Reynolds. Kategori utama dari ketergantungan bilangan Reynolds adalah aliran dengan bilangan Reynolds sangat kecil, aliran dengan bilangan Reynolds sedang (lapisan batas laminar) dan aliran dengan bilangan Reynolds sangat besar (lapisan batas turbulen). Aliran dengan bilangan Reynolds rendah ( $Re < 1$ ) diatur oleh kesetimbangan antara gaya-gaya viskos dan gaya tekanan. Efek-efek inersia sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Nilai yang umum  $C_D$  pada aliran-aliran dengan bilangan Reynolds kecil yang melewati bagian benda. *Drag* pada piringan (*disk*) tegak lurus terhadap aliran hanya 1,5 kali lebih besar dari pada *drag* pada piringan yang sejajar dengan aliran. Untuk aliran dengan bilangan Reynolds besar, rasio-rasio ini sangat besar. *Streamlining* (yaitu usaha membuat benda lebih ramping) dapat memberikan pengurangan *drag* yang cukup banyak pada aliran dengan bilangan Reynolds yang besar. Pada aliran dengan bilangan Reynolds kecil, hal ini dapat meningkatkan *drag* karena suatu peningkatan dalam luasan dan dimana gaya geser bekerja. Untuk kebanyakan benda, hasil-hasil untuk aliran dengan bilangan Reynolds kecil berlaku sampai dengan bilangan Reynolds sekitar 1 [10].

Berikut beberapa nilai koefisien tahanan suatu benda dua dimensi pada  $Re > 10^4$  seperti yang ditampilkan pada gambar 2.20 dibawah ini:

Shape	$C_D$ based on frontal area	Shape	$C_D$ based on frontal area	Shape	$C_D$ based on frontal area
Square cylinder:	2.1	Half-cylinder:	1.2	Plate:	2.0
	1.6		1.7	Thin plate normal to a wall:	1.4
Half tube:	1.2	Equilateral triangle:	1.6		
				Hexagon:	1.0
	2.3		2.0		0.7

Shape	$C_D$ based on frontal area																							
Rounded nose section:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>L/H:</th> <th>0.5</th> <th>1.0</th> <th>2.0</th> <th>4.0</th> <th>6.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_D</math>:</td> <td>1.16</td> <td>0.90</td> <td>0.70</td> <td>0.68</td> <td>0.64</td> </tr> </tbody> </table>						L/H:	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	$C_D$ :	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64						
L/H:	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0																			
$C_D$ :	1.16	0.90	0.70	0.68	0.64																			
Flat nose section:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>L/H:</th> <th>0.1</th> <th>0.4</th> <th>0.7</th> <th>1.2</th> <th>2.0</th> <th>2.5</th> <th>3.0</th> <th>6.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>C_D</math>:</td> <td>1.9</td> <td>2.3</td> <td>2.7</td> <td>2.1</td> <td>1.8</td> <td>1.4</td> <td>1.3</td> <td>0.9</td> </tr> </tbody> </table>						L/H:	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0	$C_D$ :	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9
L/H:	0.1	0.4	0.7	1.2	2.0	2.5	3.0	6.0																
$C_D$ :	1.9	2.3	2.7	2.1	1.8	1.4	1.3	0.9																
Elliptical cylinder:	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Laminar</th> <th>Turbulent</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:1</td> <td>1.2</td> <td>0.3</td> </tr> <tr> <td>2:1</td> <td>0.6</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>4:1</td> <td>0.35</td> <td>0.15</td> </tr> <tr> <td>8:1</td> <td>0.25</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table>			Laminar	Turbulent	1:1	1.2	0.3	2:1	0.6	0.2	4:1	0.35	0.15	8:1	0.25	0.1							
	Laminar	Turbulent																						
1:1	1.2	0.3																						
2:1	0.6	0.2																						
4:1	0.35	0.15																						
8:1	0.25	0.1																						

**Gambar 2. 20** Nilai koefisien tahanan benda dua dimensi pada  $Re > 10^4$  [15]

## 2.9. Koefisien Tekanan

Koefisien tekanan ( $C_P$ ) merupakan bagian dari *drag* yang langsung disebabkan oleh tekanan  $P$  terhadap sebuah benda. *Drag* ini sering disebut sebagai *drag* bentuk karena ketergantungan yang sangat kuat pada bentuk dari kendaraan. *Drag* tekanan adalah fungsi dari besarnya tekanan dan orientasi arah elemen permukaan dimana gaya tekan tersebut bekerja. Sebagai contoh, gaya tekan pada kedua sisi plat datar sejajar aliran mungkin saja sangat besar, tetapi gaya tersebut tidak berkontribusi pada *drag* karena gaya tersebut bekerja pada arah tegak lurus terhadap kecepatan *upstream*. Sebaliknya gaya tekanan pada plat datar yang tegak lurus aliran menyebabkan *drag* secara keseluruhan [10].

Koefisien tekanan ( $C_P$ ) ditentukan dari perbandingan perubahan tekanan sebelum dan sesudah melalui benda uji. [16], persamaan (6)

$$C_p = \frac{p - p_s}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (6)$$

Atau lebih sederhana bila koefisien tekanan ( $C_p$ ) ditentukan dari perbandingan antara tekanan atau head yang terjadi dititik uji permukaan benda uji terhadap tekanan atau head pada udara bebas [17] dengan persamaan (1)

$$C_p = \frac{h_{sm} - h}{h_{sm} - h_{tm}} \quad C_p = \frac{h_{sm} - h}{h_{sm} - h_{tm}} \quad (7)$$

Dimana:

$C_p$  = Koefisien tekanan

$h_{sm}$  = Head aliran udara statis manometer

$h_{tm}$  = Head aliran udara stagnasi manometer

$h$  = Head aliran udara di titik uji permukaan benda

Besarnya tekanan acuan tidak mempengaruhi *drag* secara langsung karena total gaya tekanan pada benda adalah nol jika tekanan konstan pada seluruh permukaan. Jika viskositas nol, *drag* tekanan pada setiap benda berbentuk apapun (simetris atau tidak) dalam aliran tunak akan bernilai nol. Namun jika viskositasnya tidak nol, total *drag* tekanan mungkin tidak nol karena separasi lapisan batas [10].