



---

Disertation - TM 143501

**STUDY OF CHARACTERISTICS OF FLOW  
AROUND FOUR CIRCULAR CYLINDERS IN IN-LINE  
SQUARE ARRANGEMENT NEAR A PLANE WALL  
IN TURBULENT BOUNDARY LAYER**

A. GRUMMY WAILANDUW  
2110301001

SUPERVISOR  
Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

DOCTORAL PROGRAM  
FIELD STUDY OF ENERGY CONVERSION ENGINEERING  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUTE TECHNOLOGY OF SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016



Disertasi - TM 143501

# **STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI SUSUNAN EMPAT SILINDER SIRKULAR IN-LINE SQUARE DEKAT DINDING PADA LAPIS BATAS TURBULEN**

A. GRUMMY WAILANDUW  
2110301001

DOSEN PEMBIMBING  
Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

PROGRAM DOKTOR  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016

Disertasi disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Doktor (Dr)**  
di  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

oleh :  
**A. GRUMMY WAILANDUW**  
**NRP. 2110301001**

**Tanggal Ujian : 9 Februari 2016**  
**Periode Wisuda : Maret 2016**

Disetujui oleh :

1. **Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA (Pembimbing)**  
NIP. 196001291987011001

2. **Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. (Co-Pembimbing)**  
NIP. 197104051997021001

3. **Prof.Dr-Eng.Ir. Yanuar, M.Sc., M.Eng. (Penguji)**  
NIP. 196001121987031003

4. **Prof.Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D (Penguji)**  
NIP. 196412281990031002

5. **Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji)**  
NIP. 197512062005011002

Direktur Program Pascasarjana,

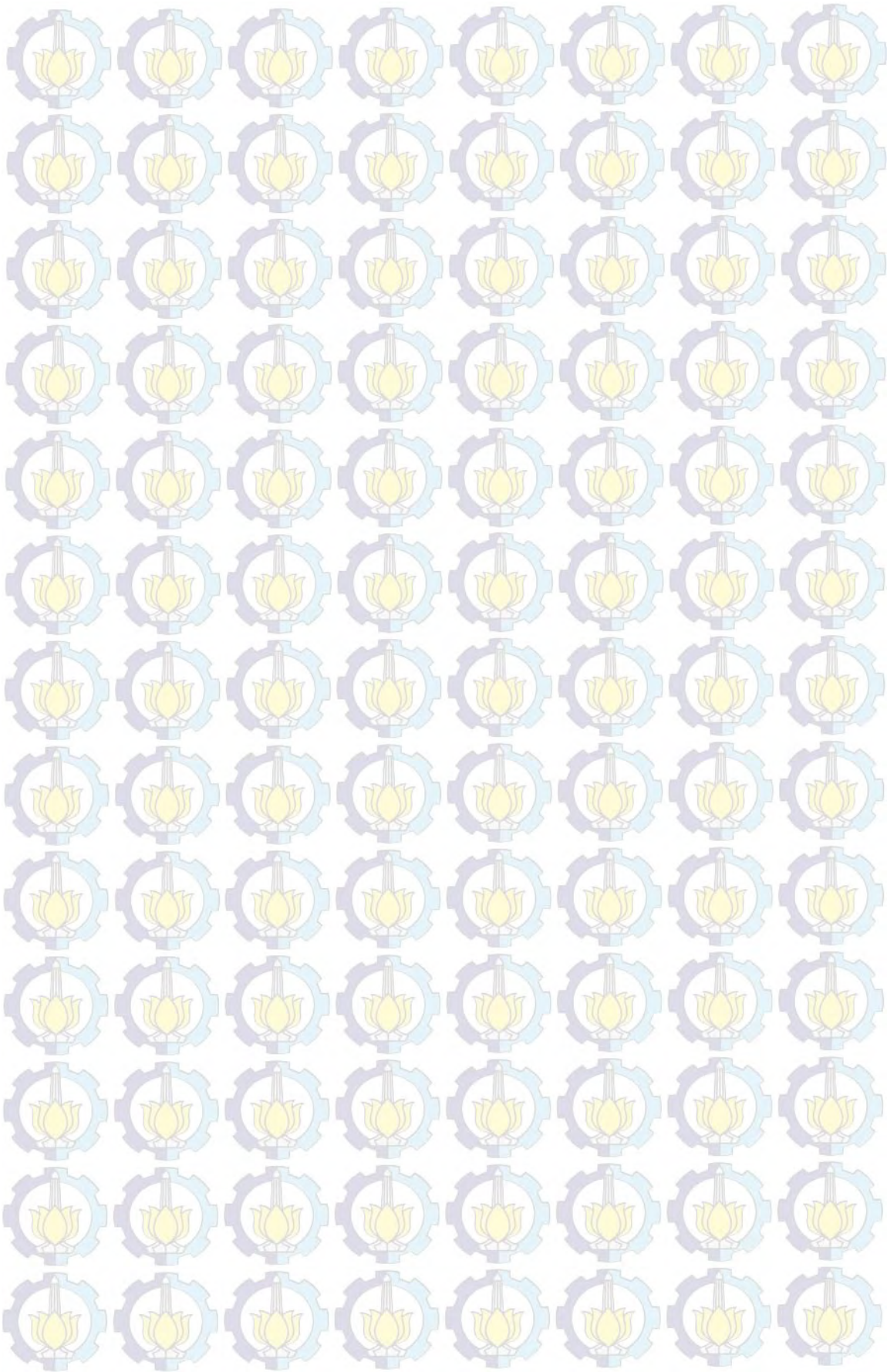
**Prof. Ir. Diauhar Manfaat, M.Sc.Ph.D**  
NIP. 19601202 198701 1 001

## DAFTAR ISI

	Hal
Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	ii
Surat Pernyataan Keaslian.....	iii
Abstrak.....	v
Abstract.....	vii
Kata Pengantar.....	ix
Daftar Isi .....	xi
Daftar Gambar.....	xiii
Daftar Tabel.....	xxxii
Daftar Notasi/Symbol.....	xxxiii
BAB 1 Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah dan Hipotesis.....	7
1.3 Batasan Masalah.....	8
1.4 Tujuan Penelitian.....	9
1.5 Manfaat Penelitian.....	9
BAB 2 Kajian Pustaka.....	11
2.1 Silinder Sirkular.....	11
2.2 Lapis Batas pada Bidang Datar.....	15
2.3 Penelitian-penelitian Terkait Sebelumnya.....	17
BAB 3 Metode Penelitian.....	49
3.1 Kelengkapan Eksperimen.....	49
3.2 Pemodelan Numerik.....	52
3.3 Peralatan Eksperimen.....	54
3.4 Kalibrasi Instrumen Eksperimen.....	56
3.5 Hasil Validasi Instrumen Eksperimen.....	61
3.6 Skema Penelitian.....	64
3.7 Tahapan Kegiatan Penelitian Pendahuluan yang Dilakukan.....	65

BAB 4 Analisis Data dan Pembahasan.....	67
4.1 Data dan Pembahasan Tebal Lapis Batas Turbulen dan Intensitas Turbulen.....	69
4.2 Data dan Pembahasan Karakteristik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square pada L/D= 4,0.....	75
4.3 Data dan Pembahasan Karakteristik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square pada L/D= 2,7.....	156
4.4 Diskusi tentang Pengaruh Adanya Dinding terhadap Karakteristik Aliran dari Susunan Empat Silinder Sirkular In-Line Square pada Lapis Batas Turbulen.....	237
BAB 5 Kesimpulan dan Saran.....	255
5.1 Kesimpulan.....	255
5.2 Saran.....	257
Daftar Pustaka.....	259
Biografi Penulis.....	263





<b>Gambar</b>		<b>Hal</b>
Gambar 2.1	Pertumbuhan boundary layer dan tekanan dari aliran yang melintasi permukaan silinder .....	11
Gambar 2.2	Regime aliran melalui silinder sirkular .....	12
Gambar 2.3	Regime dan struktur aliran dari susunan dua silinder yang mengalami interferensi .....	14
Gambar 2.4	Visualisasi aliran dari Karman vortex street di belakang silinder tunggal pada berbagai variasi bilangan Reynolds .....	15
Gambar 2.5	Lapisan batas kecepatan pada plat datar .....	16
Gambar 2.6	Jarak antara silinder dan sudut orientasi .....	17
Gambar 2.7	Distribusi tekanan sekeliling silinder sirkular pertama pada $\alpha=0^\circ$ untuk $S/D=1,1$ dan $S/D=5$ .....	18
Gambar 2.8	Strouhal number dan jarak rasio ( $L/D$ ) pada susunan in-line .....	20
Gambar 2.9	Koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada masing-masing silinder ..	21
Gambar 2.10	Koefisien drag dengan variasi rasio $L/D=1\div 6$ untuk setiap silinder .....	22
Gambar 2.11	Koefisien lift dengan variasi rasio $L/D=1\div 6$ untuk setiap silinder .....	23
Gambar 2.12	Pola aliran pada $\alpha=0^\circ$ : (a) $Re=2 \times 10^2$ dan (b) $Re=8 \times 10^2$ .....	23
Gambar 2.13	Variasi Strouhal number dengan rasio $L/D$ .....	25
Gambar 2.14	Variasi koefisien force: (a) koefisien gaya lift fluktuasi, (b) koefisien drag fluktuasi, (c) dan (d) koefisien rata-rata dari lift dan drag .....	26
Gambar 2.15	Pola aliran (I)-(III) yang ditunjukkan dengan distribusi vorticity sekeliling susunan 4 silinder dengan simulasi 2-D pada $Re=1 \times 10^2$ dan $2 \times 10^2$ untuk $L/D=1,6\div 5,0$ ...	27
Gambar 2.16	Visualisasi stable shielding flow pattern pada rasio $L/D=1,6$ dengan $Re=2 \times 10^2$ .....	28
Gambar 2.17	Visualisasi wiggling shielding flow pattern pada rasio $L/D=3,5$ dan $4,0$ dengan $Re=2 \times 10^2$ .....	28
Gambar 2.18	Visualisasi vortex shielding flow pattern pada rasio $L/D=5,0$ dengan $Re=2 \times 10^2$ .....	29
Gambar 2.19	Perbandingan distribusi kecepatan pada beberapa posisi x dengan rasio $L/D$ : a) 1,5; b) 2,5; c) 3,5; d) 5,0 dan $Re=1,1 \times 10^4$ ; $1,5 \times 10^4$ ; $2 \times 10^4$ .....	30
Gambar 2.20	Vorticity dan velocity field pada rasio $L/D=1,5$ .....	32
Gambar 2.21	Variasi koefisien drag dengan rasio gap dengan diameter ( $G/D$ ) .....	33
Gambar 2.22	Variasi koefisien drag dengan rasio gap dengan ketebalan lapis batas ( $G/\delta$ ) .....	34
Gambar 2.23	Variasi koefisien lift dengan rasio gap dengan diameter ( $G/D$ ) dengan pengganggu rod .....	34
Gambar 2.24	Variasi koefisien lift dengan rasio gap dengan diameter ( $G/D$ ) dengan pengganggu kawat mesh .....	35
Gambar 2.25	Variasi posisi titik stagnasi dengan rasio gap ( $G/D$ ) pada berbagai lapis batas .....	36



Gambar 2.26	Variasi nilai base pressure dengan rasio gap (G/D) pada berbagai lapis batas .....	37
Gambar 2.27	Koefisien drag rata-rata ( $C_D$ ) dengan rasio gap .....	37
Gambar 2.28	Koefisien drag rata-rata ( $C_D$ ) dengan gradien kecepatan .....	38
Gambar 2.29	Koefisien drag rata-rata ( $C_D$ ) dengan rasio $G/\delta$ .....	39
Gambar 2.30	Koefisien lift rata-rata dengan rasio G/D .....	39
Gambar 2.31	Distribusi tekanan pada upper (a) dan lower (b) silinder dengan berbagai G/B .....	41
Gambar 2.32	Profil kecepatan stream wise rata-rata pada berbagai posisi x .....	42
Gambar 2.33	Visualisasi aliran pada berbagai rasio G/D: 0,125; 0,25; 0,5; dan 1,5 .....	43
Gambar 2.34	Strouhal number dengan rasio gap pada $Re=7,8 \times 10^2$ .....	44
Gambar 2.35	Velocity vector rata-rata pada berbagai S/D: 0,1 (a); 0,2 (b); 0,3 (c); dan 0,4 (d) .....	45
Gambar 2.36	Spanwise vorticity field pada rasio gap 0,6 dan 0,2 dengan model simulasi DES .....	46
Gambar 2.37	Visualisasi Aliran dengan Velocity Pathline pada Susunan Empat Silinder Sirkular In-Line Square pada $L/D=1,5$ dan $G/D=0,2$ Dekat Dinding .....	48
Gambar 3.1	Model benda kerja silinder sirkular .....	49
Gambar 3.2	Dinding datar (top-view) .....	50
Gambar 3.3	Penempatan silinder, dinding, dan tiang penyanggah pada open-circuit subsonic wind tunnel .....	51
Gambar 3.4	Geometri set-up dan domain simulasi numerik .....	52
Gambar 3.5	Bentuk meshing 2-D dari model silinder sirkular dekat dinding menggunakan quadrilateral-map .....	52
Gambar 3.6	Posisi penempatan pitot static tube pada test section .....	56
Gambar 3.7	Grafik persamaan kalibrasi antara pressure transducer dan inclined manometer: a) persamaan tekanan statik, b) persamaan tekanan dinamik .....	57
Gambar 3.8	Sumbu koordinat dan posisi penempatan sensor hot wire anemometry pada daerah wake silinder downstream .....	58
Gambar 3.9	Grafik hasil kalibrasi antara kecepatan (U) dan tegangan (volt) pada daerah wake silinder downstream .....	59
Gambar 3.10	Perbandingan grafik $\theta$ vs $C_p$ untuk silinder sirkular antara Igarashi ( $Re=3,5 \times 10^4$ ), Merick ( $Re=3,52 \times 10^4$ ), dan penulis ( $Re=4,913 \times 10^4$ ) .....	61
Gambar 3.11	Frekuensi Vortex Shedding di Daerah Wake Silinder Sirkular Tunggal pada $Re=5,3 \times 10^4$ .....	63
Gambar 3.12	Pemeriksaan uniformitas/keseragaman aliran masuk .....	63
Gambar 3.13	Flow chart penelitian .....	64

Gambar 3.14	Perbandingan Grafik $\theta$ vs $C_p$ untuk Silinder Sirkular antara: Simulasi Numerik dengan Berbagai Model Viscous (sk- $\epsilon$ , rk- $\epsilon$ , sk- $\omega$ , sstk- $\omega$ ) dan Eksperimen (Merrick dan Bitsuamlak).....	65
Gambar 4.1	Perbandingan Tebal Lapis Batas pada Plat Datar Posisi $x/D=0$ , Peletakan Silinder <i>Upstream</i> = 620 mm dari <i>Leading Edge</i> , pada $Re=5,3 \times 10^4$ dalam Bentuk $U-\delta$ .....	70
Gambar 4.2	Hasil Pengukuran Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi $x/D=0$ , Peletakan Silinder <i>Upstream</i> = 620 mm dari <i>Leading Edge</i> , pada $Re=5,3 \times 10^4$ dalam Bentuk $u/U-y/\delta$ .....	71
Gambar 4.3	Hasil Simulasi Numerik Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi $x/D=-3$ , a) $G/D=0,0$ ; b) $G/D=1,0$ pada Rasio $L/D=2,7$ dan $Re=5,3 \times 10^4$ dengan Susunan Silinder Terpasang .....	72
Gambar 4.4	Hasil Simulasi Numerik Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi $x/D=-3$ , a) $G/D=0,0$ ; b) $G/D=1,0$ pada Rasio $L/D=4,0$ dan $Re=5,3 \times 10^4$ dengan Susunan Silinder Terpasang .....	73
Gambar 4.5	Fluktuasi Kecepatan pada <i>Center-line</i> Windtunnel pada $Re=5,3 \times 10^4$ .....	74
Gambar 4.6	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-1</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> pada $Re=5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS.....	75
Gambar 4.7	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-2</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> pada $Re=5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS.....	76
Gambar 4.8	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-3</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> pada $Re=5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS .....	77
Gambar 4.9	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-4</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> pada $Re=5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS .....	78
Gambar 4.10	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> .....	79
Gambar 4.11	Visualisasi <i>Velocity Pathline</i> pada Rasio $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> .....	80
Gambar 4.12	Visualisasi Aliran Berupa Profil <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 silinder <i>In-Line Square</i> $L/D=4,0$ di <i>Center-line</i> .....	81

Gambar 4.13	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,0$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	83
Gambar 4.14	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,0$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	84
Gambar 4.15	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,0$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	85
Gambar 4.16	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,0$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	86
Gambar 4.17	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D=4,0$ dan $G/D=0,0$ .....	87
Gambar 4.18	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D=4$ , $G/D=0,0$	88
Gambar 4.19	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D=4,0$ dan $G/D=0,0$ .....	89
Gambar 4.20	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D=4$ dan Variasi $G/D=0,0$ pada Bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	90
Gambar 4.21	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	91
Gambar 4.22	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D=4$ dan variasi $G/D=0,1$ pada bilangan Reynolds $Re=5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	92

Gambar 4.23	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	93
Gambar 4.24	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	94
Gambar 4.25	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,1$ .....	95
Gambar 4.26	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 0,1$	96
Gambar 4.27	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,1$ .....	97
Gambar 4.28	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 0,1$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	98
Gambar 4.29	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	99
Gambar 4.30	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	100
Gambar 4.31	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	101
Gambar 4.32	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	102

Gambar 4.33	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,2$ .....	103
Gambar 4.34	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 0,2$ .....	104
Gambar 4.35	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,2$ .....	105
Gambar 4.36	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 0,2$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	106
Gambar 4.37	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-1</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	107
Gambar 4.38	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-2</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	108
Gambar 4.39	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-3</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	109
Gambar 4.40	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-4</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	110
Gambar 4.41	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,3$ .....	111
Gambar 4.42	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 0,3$ .....	112
Gambar 4.43	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,3$ .....	113
Gambar 4.44	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 0,3$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	114

Gambar 4.45	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	115
Gambar 4.46	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	116
Gambar 4.47	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	117
Gambar 4.48	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	118
Gambar 4.49	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,4$ .....	119
Gambar 4.50	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 0,4$	120
Gambar 4.51	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,4$ .....	121
Gambar 4.52	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 0,4$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	122
Gambar 4.53	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	123
Gambar 4.54	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	124

Gambar 4.55	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	125
Gambar 4.56	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	126
Gambar 4.57	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,5$ .....	127
Gambar 4.58	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 0,5$	128
Gambar 4.59	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 0,5$ .....	129
Gambar 4.60	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 0,5$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	130
Gambar 4.61	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	131
Gambar 4.62	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	132
Gambar 4.63	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	133
Gambar 4.64	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 4$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	134

Gambar 4.65	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 4,0$ dan $G/D= 1,0$ .....	135
Gambar 4.66	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 4$ , $G/D= 1,0$ .....	136
Gambar 4.67	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 4,0$ dan $G/D= 1,0$ .....	137
Gambar 4.68	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D= 1,0$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	138
Gambar 4.69	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-1</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen) .....	139
Gambar 4.70	Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) pada Silinder <i>Upstream Silinder-1</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	141
Gambar 4.71	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-2</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	142
Gambar 4.72	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-3</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	143
Gambar 4.73	Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) pada Silinder <i>Upstream Silinder-3</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	145
Gambar 4.74	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-4</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	146
Gambar 4.75	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 4$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	147
Gambar 4.76	Variasi $C_{Dp}$ terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 4,0$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	148
Gambar 4.77	Variasi $C_{Lp}$ terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 4,0$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	150



Gambar 4.78	Variasi $St$ terhadap Rasio Gap $G/D$ dari Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 4,0$ Dekat Dinding pada Posisi Pengukuran $x= 3,5D$ ; dan 4 (empat) Variasi $y$ , dengan $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	151
Gambar 4.79	Variasi Profil Kecepatan terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 4,0$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ pada Posisi Pengukuran $x= 3.5D$ (Eksperimen).....	154
Gambar 4.80	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-1</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS.....	157
Gambar 4.81	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-2</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS.....	158
Gambar 4.82	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream Silinder-3</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS .....	159
Gambar 4.83	Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream Silinder-4</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS .....	160
Gambar 4.84	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> .....	161
Gambar 4.85	Visualisasi <i>Velocity Pathline</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> .....	162
Gambar 4.86	Visualisasi Aliran Berupa Profil <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 silinder <i>In-Line Square</i> $L/D= 2,7$ di <i>Center-line</i> .....	163
Gambar 4.87	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-1</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	164
Gambar 4.88	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-2</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	165

Gambar 4.89	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	166
Gambar 4.90	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	168
Gambar 4.91	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,0$ .....	169
Gambar 4.92	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,0$	170
Gambar 4.93	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,0$ .....	171
Gambar 4.94	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,0$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS .....	172
Gambar 4.95	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	173
Gambar 4.96	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	174
Gambar 4.97	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	175
Gambar 4.98	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,1$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	176

Gambar 4.99	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,1$ .....	177
Gambar 4.100	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,1$	178
Gambar 4.101	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,1$ .....	179
Gambar 4.102	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,1$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	180
Gambar 4.103	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-1</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	181
Gambar 4.104	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-2</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	182
Gambar 4.105	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-3</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	183
Gambar 4.106	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-4</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,2$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	184
Gambar 4.107	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,2$ .....	185
Gambar 4.108	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,2$	186
Gambar 4.109	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,2$ .....	187
Gambar 4.110	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,2$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	188

Gambar 4.111 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	189
Gambar 4.112 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	190
Gambar 4.113 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	191
Gambar 4.114 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,3$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	192
Gambar 4.115 Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,3$ .....	193
Gambar 4.116 Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,3$	194
Gambar 4.117 Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,3$ .....	195
Gambar 4.118 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,3$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	196
Gambar 4.119 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	197
Gambar 4.120 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	198

Gambar 4.121 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	199
Gambar 4.122 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,4$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	200
Gambar 4.123 Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,4$ .....	201
Gambar 4.124 Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,4$	202
Gambar 4.125 Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,4$ .....	203
Gambar 4.126 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,4$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	204
Gambar 4.127 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-1</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	205
Gambar 4.128 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-2</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	206
Gambar 4.129 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream</i> <b>silinder-3</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	207
Gambar 4.130 Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream</i> <b>silinder-4</b> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 0,5$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS .....	208

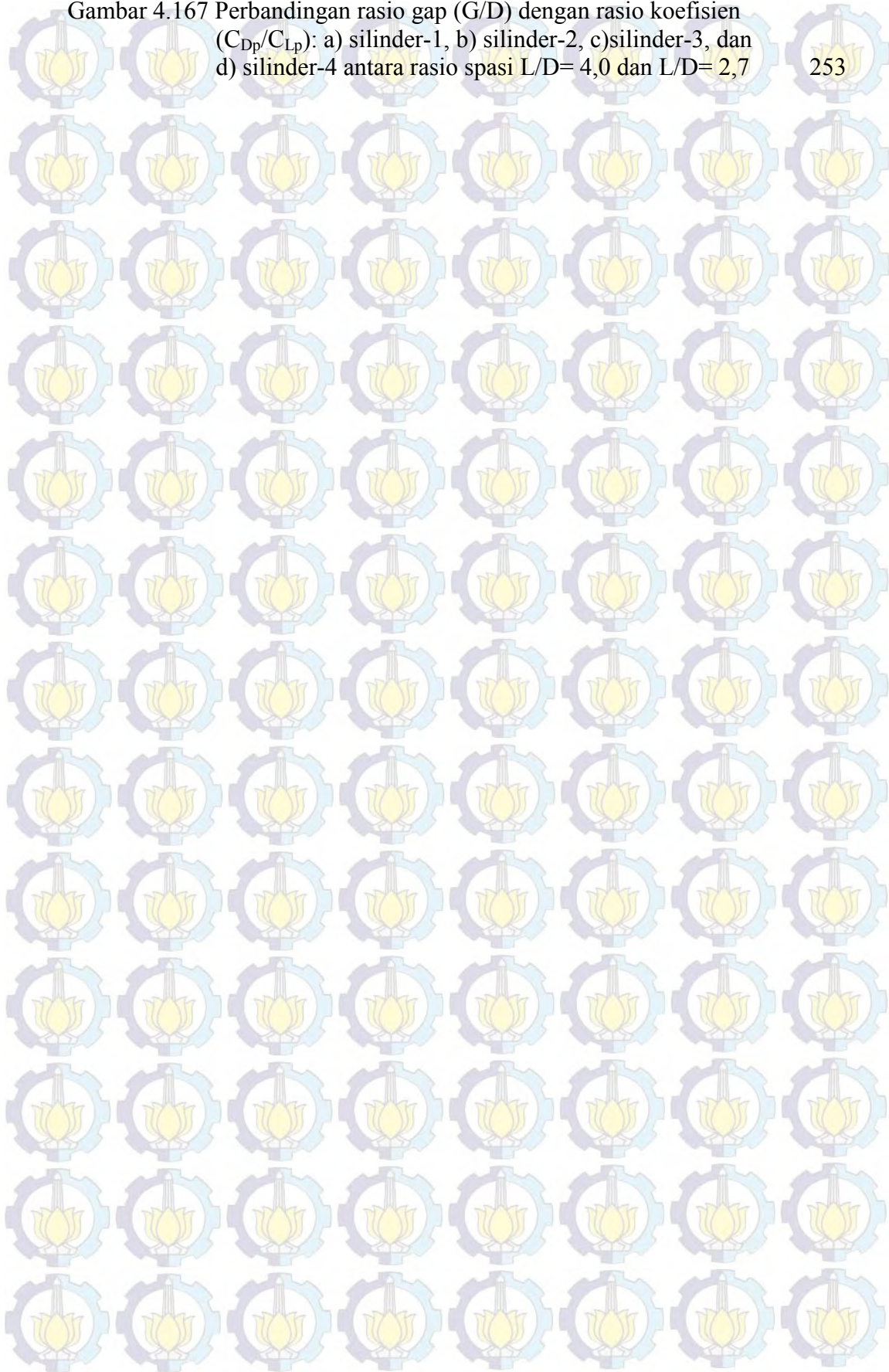
Gambar 4.131	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,5$ .....	209
Gambar 4.132	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 0,5$	210
Gambar 4.133	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,5$ .....	211
Gambar 4.134	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 0,5$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	212
Gambar 4.135	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-1</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	213
Gambar 4.136	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-2</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS.....	214
Gambar 4.137	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>upstream silinder-3</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	215
Gambar 4.138	Perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada kontur silinder <i>downstream silinder-4</i> dari susunan empat silinder sirkular <i>in-line square</i> dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan variasi $G/D= 1,0$ pada bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , eksperimen dan numerik 3D-URANS	216
Gambar 4.139	Visualisasi <i>Vorticity Contours</i> pada Rasio $L/D= 2,7$ dan $G/D= 1,0$ .....	217
Gambar 4.140	Visualisasi <i>velocity pathline</i> pada $L/D= 2,7$ , $G/D= 1,0$	218
Gambar 4.141	Visualisasi Aliran berupa <i>Velocity Vector</i> yang Melintasi Susunan 4 Silinder <i>In-Line Square</i> pada $L/D= 2,7$ dan $G/D= 1,0$ .....	219
Gambar 4.142	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D= 1,0$ pada Bilangan Reynolds $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS	220

Gambar 4.143	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-1</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	221
Gambar 4.144	Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) pada Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-1</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	223
Gambar 4.145	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream</i> <b>Silinder-2</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	224
Gambar 4.146	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-3</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	226
Gambar 4.147	Perbandingan Distribusi Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) pada Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-3</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	227
Gambar 4.148	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder <i>Downstream</i> <b>Silinder-4</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	228
Gambar 4.149	Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> dengan $L/D= 2,7$ dan Variasi $G/D$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ (Eksperimen).....	229
Gambar 4.150	Variasi $C_{Dp}$ terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 2,7$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	231
Gambar 4.151	Variasi $C_{Lp}$ terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 2,7$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	232
Gambar 4.152	Variasi $St$ terhadap Rasio Gap $G/D$ dari Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 2,7$ Dekat Dinding pada Posisi Pengukuran $x= 3,5D$ ; dan 4 (empat) Variasi $y$ , dengan $Re= 5,3 \times 10^4$ .....	233
Gambar 4.153	Variasi Profil Kecepatan terhadap Rasio Gap $G/D$ pada Susunan 4 Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> $L/D= 2,7$ Dekat Dinding pada $Re= 5,3 \times 10^4$ pada Posisi Pengukuran $x= 3.5D$ (Eksperimen).....	235
Gambar 4.154	Perbandingan Koefisien Lift ( $C_{Lp}$ ) <b>Silinder-1</b> antara Rasio $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen.....	237

Gambar 4.155 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-1</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	238
Gambar 4.156 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder <i>Downstream</i> <b>Silinder-2</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	240
Gambar 4.157 Perbandingan Koefisien Drag ( $C_{Dp}$ ) <b>Silinder-2</b> antara Rasio $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen .....	241
Gambar 4.158 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder <i>Upstream</i> <b>Silinder-3</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	242
Gambar 4.159 Perbandingan Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) <b>Silinder-3</b> antara Rasio $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen .....	243
Gambar 4.160 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder <i>Downstream</i> <b>Silinder-4</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	244
Gambar 4.161 Perbandingan Koefisien <i>Base Pressure</i> ( $C_{pb}$ ) <b>Silinder-4</b> antara Rasio $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen .....	245
Gambar 4.162 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada <b>Plat Datar</b> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	246
Gambar 4.163 Perbandingan Profil Kecepatan Daerah Wake Silinder <i>Downstream</i> dari Susunan Empat Silinder Sirkular <i>In-Line Square</i> Dekat Dinding dengan $L/D= 4,0$ dan $L/D= 2,7$ pada Variasi $G/D= 0,0$ , $G/D= 0,2$ , dan $G/D= 1,0$ pada $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen .....	247
Gambar 4.164 Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada $G/D= 0,0$ .....	248
Gambar 4.165 Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada $G/D= 0,2$ .....	249
Gambar 4.166 Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada $G/D= 1,0$ .....	250



Gambar 4.167 Perbandingan rasio gap ( $G/D$ ) dengan rasio koefisien ( $C_{Dp}/C_{Lp}$ ): a) silinder-1, b) silinder-2, c) silinder-3, dan d) silinder-4 antara rasio spasi  $L/D=4,0$  dan  $L/D=2,7$



## DAFTAR NOTASI / SIMBOL

$A, B, \text{ dan } C$	konstanta kalibrasi
AR	aspect ratio [non-dimensional]
B	diameter minor silinder elip [mm]
$C_D$	koefisien drag [non-dimensional]
$C_D'$	koefisien drag fluktuasi [non-dimensional]
$C_{Dp}$	koefisien drag pressure [non-dimensional]
$C_L$	koefisien lift [non-dimensional]
$C_L'$	koefisien lift fluktuasi [non-dimensional]
$C_{Lp}$	koefisien lift pressure [non-dimensional]
$C_p$	koefisien tekanan [non-dimensional]
$C_{pb}$	koefisien base pressure [non-dimensional]
$\phi$	diameter kawat [mm]
D	diameter silinder [mm]
$\delta/D$	rasio tebal lapis batas dengan diameter silinder [non-dimensional]
E	tegangan [volt]
$f_s$	frekuensi shedding [Hz]
G	jarak antara permukaan bawah silinder lower dengan dinding [mm]
G/D	rasio jarak antara permukaan bawah silinder lower dan dinding dengan diameter silinder [non-dimensional]
$G/\delta$	rasio jarak antara permukaan bawah silinder lower dan dinding dengan tebal lapis batas [non-dimensional]
G/B	rasio jarak antara permukaan bawah silinder lower dan dinding dengan diameter minor silinder [non-dimensional]
H	<i>shape factor</i> [non-dimensional]
I	kuat arus [mA]
l	panjang silinder [mm]
L	jarak longitudinal titik pusat silinder satu dengan silinder lainnya dalam konfigurasi susunan tandem [mm]
L/D, S/D	rasio jarak vertikal atau horisontal antara titik pusat silinder satu dan silinder lainnya dengan diameter silinder [non-dimensional]

$n$	eksponen kalibrasi
$p$	tekanan statik kontur lokal [Pa]
$p_{\infty}$	tekanan statik free-stream [Pa]
$P/D$	rasio jarak horisontal antara titik pusat silinder satu dan silinder lainnya dengan diameter silinder [non-dimensional]
$R$	koefisien regresi [non-dimensional]
$Re_D$	bilangan Reynolds, berdasarkan diameter silinder [non-dimensional]
$Re_x$	bilangan Reynolds pada jarak $x$ [non-dimensional]
$Re_c$	bilangan Reynolds kritis [non-dimensional]
$St$	bilangan Strouhal [non-dimensional]
$T$	jarak transversal antara titik pusat silinder satu dengan silinder lainnya dalam konfigurasi susunan side-by-side [mm]
$T/D$	rasio jarak vertikal/transversal antara titik pusat silinder satu dan silinder lainnya dengan diameter silinder [non-dimensional]
$u$	kecepatan lokal [m/sec]
$U, U_{\infty}$	kecepatan aliran free-stream [m/sec]
$u/U_{\infty}$	rasio kecepatan lokal dengan kecepatan free-stream [non-dimensional]
$x/D$	rasio jarak dari titik pusat keempat silinder dengan diameter silinder ke arah sumbu $x$ [non-dimensional]
$y/D$	rasio jarak dari titik pusat keempat silinder dengan diameter silinder ke arah sumbu $y$ [non-dimensional]
$y^+$	jarak titik pusat cell yang terdekat dengan kontur [mm]
<b>Simbol Greek</b>	
$\alpha$	sudut orientasi/arah aliran [derajat]
$\delta$	tebal lapis batas [mm]
$\theta$	sudut yang dibentuk sekeliling silinder [derajat]
$\theta_s$	titik stagnasi [derajat]
$\theta_{sp}$	titik separasi [derajat]
$\rho$	densitas udara [ $\text{kg/m}^3$ ]



## KATA PENGANTAR

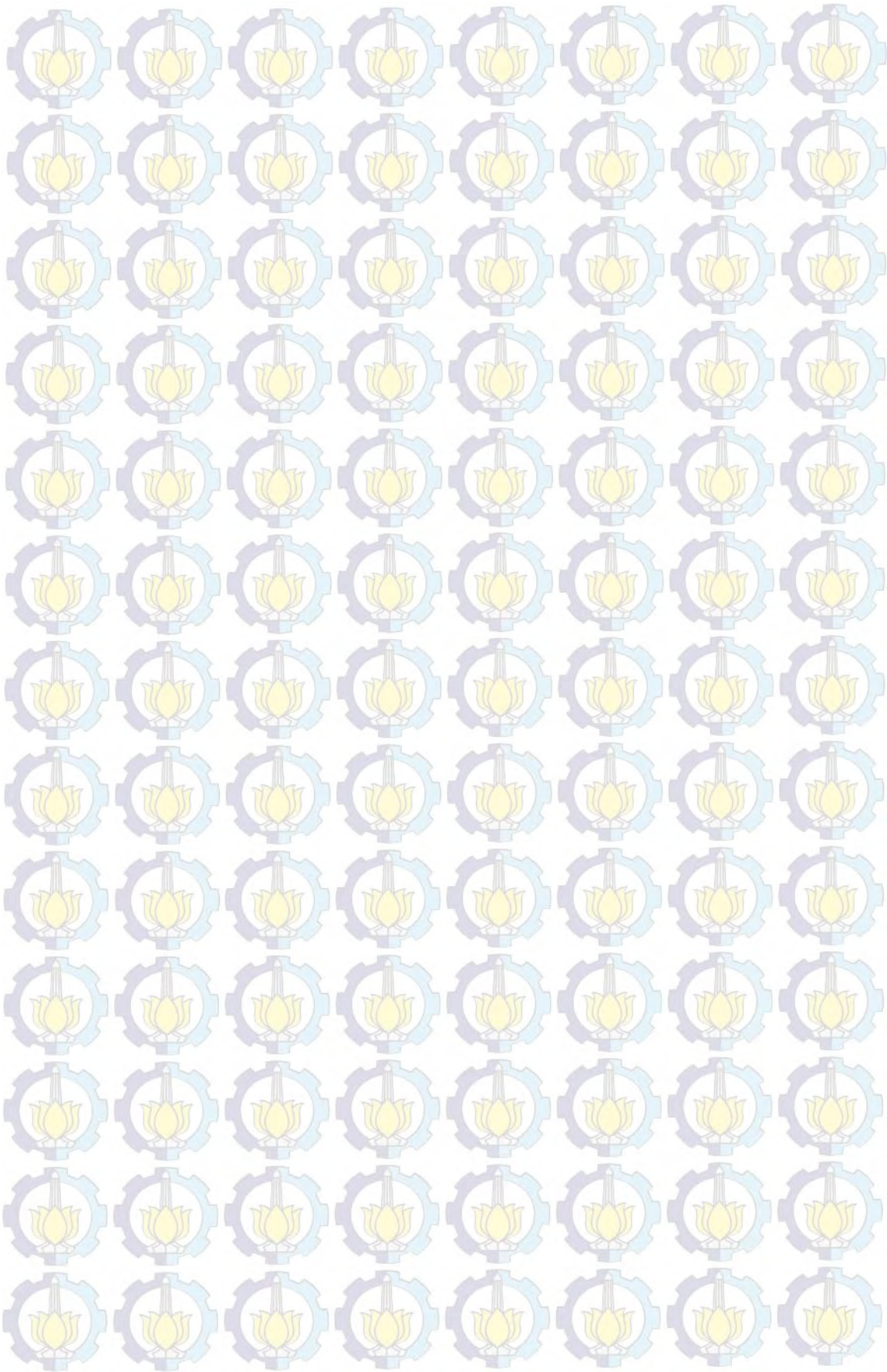
Pertama-tama penulis panjatkan puji syukur kehadirat Tuhan YME atas rahmat dan berkatNya yang dianugerahkan kepada penulis, sehingga penulisan disertasi ini dapat terselesaikan dengan baik. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA selaku Pembimbing dan Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. selaku Co-Pembimbing, yang telah bersusah-payah memberikan bimbingan dan arahan selama studi dan pelaksanaan penelitian.
2. Prof. Dr. Eng. Yanuar, M.Sc., M.Eng., Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, Ph.D, dan Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D. yang telah memberikan masukan dan saran untuk sempurnanya hasil penelitian.
3. Rektor Universitas Negeri Surabaya (UNESA) beserta jajarannya yang telah memberi kesempatan untuk mengikuti studi S-3.
4. Bapak Nur Rochman dan Bapak Sutrisno, teknisi lab Mek-Flu ITS, dan Mas Faizal, teknisi CNC ITS, Mas Danny, teknisi lab CAE ITS, yang telah banyak membantu dalam pembuatan model dan kelengkapannya.
5. Mahasiswa jurusan Teknik Mesin UNESA, Muqtadiru, Koko, Yohan, Bagas, Aries, Moh. Azis, Rizki dan lainnya yang tidak dapat kami sebut satu-persatu yang telah membantu selama proses pengambilan data.
6. Bapak Suwono yang selalu memberi dorongan dan motivasi untuk segera menyelesaikan studi.
7. Terakhir untuk istriku dan anak semata wayang, Anick dan Febri yang telah sabar menemani dalam suka maupun susah.

Akhirnya kritik dan saran dari semua pihak sangat diharapkan untuk peningkatan kualitas penelitian dan penulisan dimasa yang akan datang. Semoga ilmu ini bermanfaat bagi penulis maupun lembaga.

Surabaya, Februari 2016

Penulis



# STUDI KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI SUSUNAN EMPAT SILINDER SIRKULAR *IN-LINE SQUARE* DEKAT DINDING PADA LAPIS BATAS TURBULEN

Nama mahasiswa : A. Grummy Wailanduw  
NRP : 2110301001  
Pembimbing : Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
Co-Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

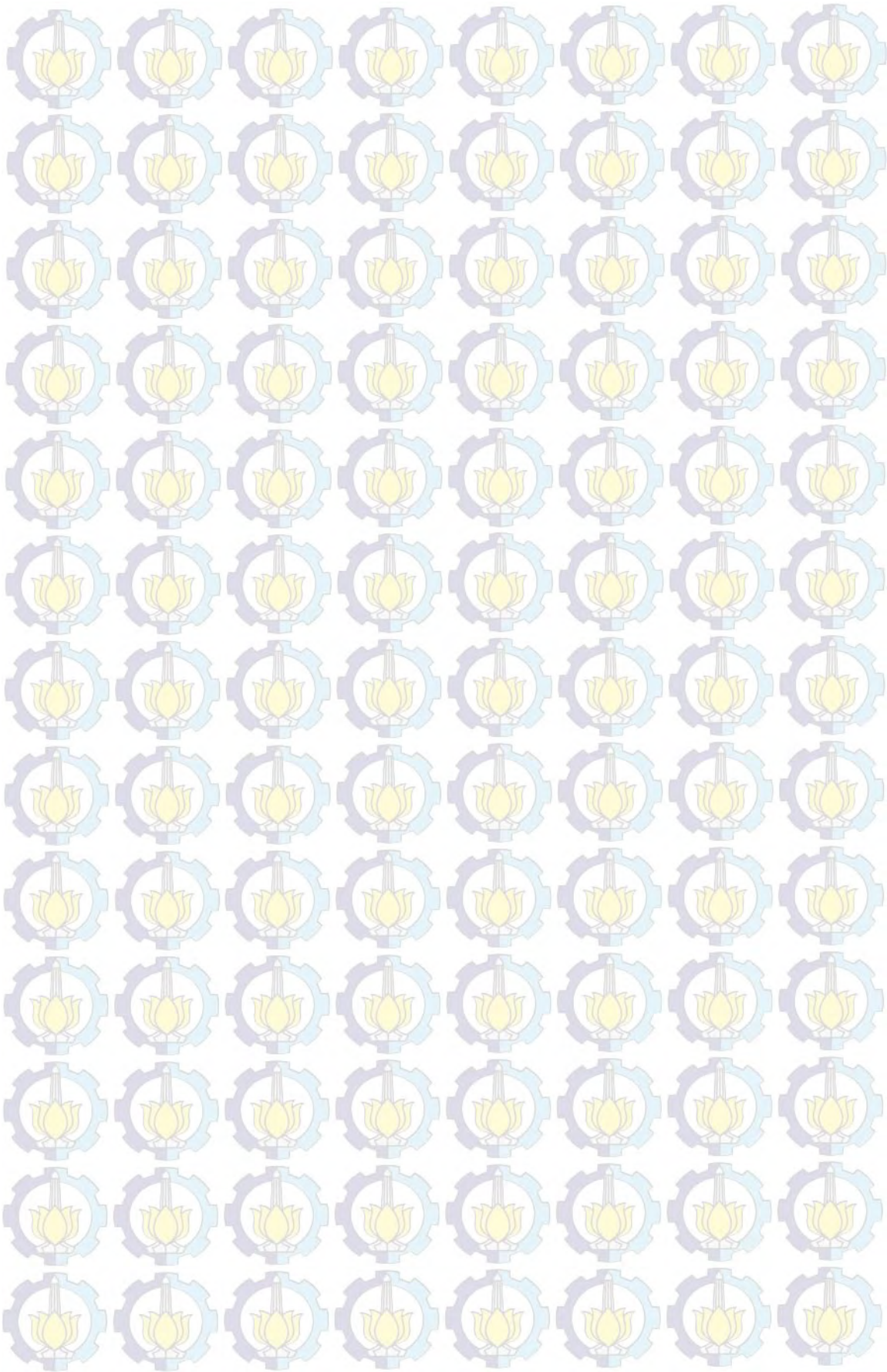
## ABSTRAK

Aliran yang melintasi suatu *bluff body* yang salah satunya adalah bentuk silinder sirkular banyak dijumpai dalam aplikasi engineering. Ketika melintasi susunan silinder aliran tersebut akan membentuk suatu *pattern* tertentu, dan hal ini akan berdampak terhadap karakteristik aerodinamik dari silinder dalam susunan tersebut. Penelitian ini akan meneliti fenomena aliran yang terjadi di sekeliling susunan 4 silinder sirkular yang membentuk konfigurasi *in-line square* dekat dinding datar pada lapis batas turbulen.

Metode eksperimen diterapkan dengan menggunakan *open circuit subsonic wind tunnel* untuk memperoleh data kuantitatif tentang distribusi tekanan statik dari masing-masing kontur silinder dan dinding, maupun profil kecepatan di daerah wake silinder *downstream*. Selain itu data kualitatif seperti visualisasi pola aliran yang terjadi disekeliling susunan silinder diperoleh melalui metode simulasi menggunakan paket program **CFD** dengan pendekatan 2D dan 3D U-RANS dan model viscous  $k-\omega$  SST. Kedua metode penelitian ini dilakukan pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  dengan rasio gap  $G/D= 0,0 \div 0,5$  interval 0,1 dan  $G/D= 1,0$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder.

Berdasarkan penelitian terhadap susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding diperoleh hasil: a) distribusi tekanan dari masing-masing kontur silinder dalam susunan dipengaruhi dengan adanya dinding, baik pada rasio  $L/D= 4,0$  maupun  $L/D= 2,7$ ; b) pengaruh dinding terhadap karakteristik aerodinamik dari silinder dapat diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelompok, yakni sangat kuat pada rasio gap  $G/D= 0,0$ , kuat pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , lemah pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$ , dan tidak ada pengaruh pada rasio gap  $G/D= 1,0$ ; dan c) terjadi perubahan pola aliran yang unik diantara susunan silinder ketika rasio spasi  $L/D= 4,0$  diturunkan menjadi  $L/D= 2,7$  pada semua variasi rasio  $G/D$ .

**Kata kunci:** empat silinder sirkular, *in-line square*, dekat dinding, lapis batas turbulen.





# STUDY OF CHARACTERISTICS OF FLOW AROUND FOUR CIRCULAR CYLINDERS IN IN-LINE SQUARE ARRANGEMENT NEAR A PLANE WALL IN TURBULENT BOUNDARY LAYER

Name : A. Grummy Wailanduw  
Student ID : 2110301001  
Supervisor : Prof.Dr.Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

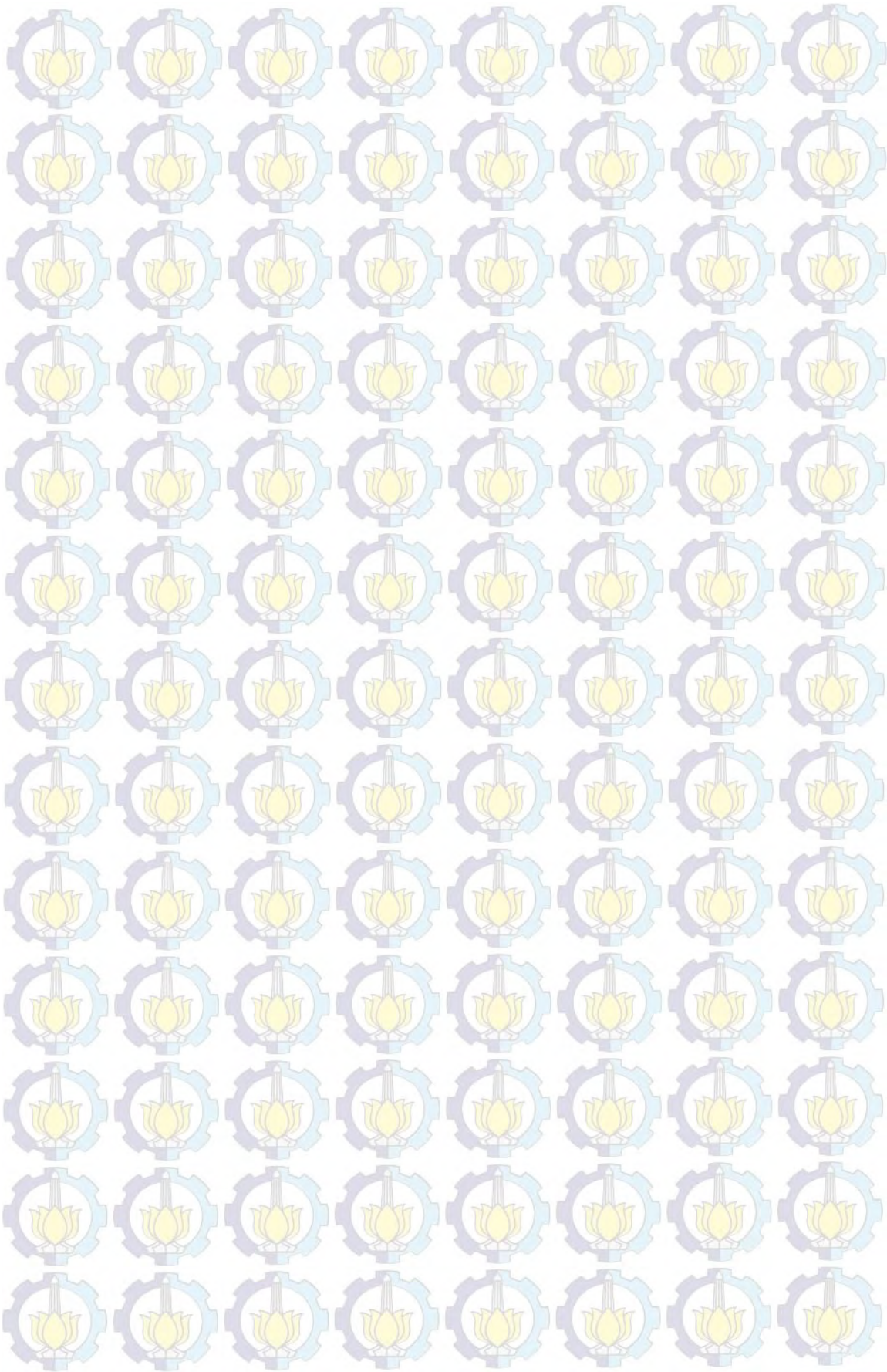
## ABSTRACT

The flow crossed over a bluff body such as a circular cylinder could be found in engineering applications. It makes a specific flow patterns and affected to aerodynamic characteristic of those cylinders, when it passed through a cylinders arrangement. This research would investigated a flow phenomena around four circular cylinders in in-line square arrangement near a plane wall in turbulent boundary layer.

An experiment method would be applied using an open circuit subsonic wind tunnel to collected a quantitative data such as: a static pressure distributions on the cylinders and the wall contours, and a velocity profiles near wake region on the cylinders downstream. While a qualitative data such as: a visualization of flow pattern around the cylinders arrangement would be get with a simulation model using a CFD package programme, with the 2D and 3D U-RANS approach with  $k-\omega$  SST viscous model. Both of these methods would be applied on each  $L/D=4,0$  and  $L/D=2,7$  spacing ratio, and  $G/D=0,0\div 0,5$  interval 0,1 and  $G/D=1,0$  gap spacing ratio at  $Re=5,3\times 10^4$  based on a circular cylinder diameter.

The results of this research showed that: a) the pressure distributions of each cylinders contour be affected with an excistence of wall on  $L/D=4,0$  spacing ratio as well as  $L/D=2,7$ ; b) the affected of the gap between a lower surface of cylinder and wall to an aerodynamic characteristics of the cylinders can be classified into three groups such as: a very strong influence at  $G/D=0,0$  ratio, a strong influence at  $0,1\leq G/D\leq 0,2$  ratios; a weak influence at  $0,3\leq G/D\leq 0,5$  ratios, and not influence like an isolated cylinder at  $G/D\leq 1,0$  ratios, c) it occured of an unique flow patterns when  $L/D=4,0$  spacing ratio changed to the  $L/D=2,7$  at all of the variation of the  $G/D$  ratios.

**Key words:** Four Circular Cylinders, In-line Square, Near a Plane Wall, Turbulent Boundary Layer.



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Aliran yang melintasi suatu *bluff body* termasuk di sini yang mempunyai bentuk silinder sirkular banyak dijumpai dalam aplikasi *engineering*, seperti bangunan konstruksi cerobong (*chimney*), bangunan gedung, bejana bertekanan atau *reaction tower* pada industri kimia, *cooling tower*, struktur penyangga anjungan lepas pantai, konstruksi sistem perpipaan bawah laut, dan alat penukar kalor (*heat exchangers*) *shell and tube* atau *tube banks*. Saat melintasi bodi aliran tersebut akan membentuk suatu pola aliran atau *flow pattern* yang tertentu sesuai dengan geometri kontur bodi, dan juga menimbulkan gaya-gaya aerodinamik, seperti *lift force* dan *drag force*, pada bodi. *Lift force* menyebabkan efek getaran atau vibrasi pada konstruksi sehingga dapat mengurangi kekuatan dari material tersebut, sementara *drag force* dikaitkan dengan suatu aliran dapat memperlambat atau mengurangi momentum aliran tersebut. Gaya-gaya aerodinamik pada silinder sirkular ini terjadi sebagian besar karena dipengaruhi atau didominasi oleh *pressure forces*, sedangkan pengaruh *viscous forces* relatif kecil, terutama pada bilangan Reynolds yang cukup tinggi.

Karakteristik aliran yang terjadi ini akan makin berbeda ketika silinder sirkular ini disusun membentuk formasi susunan dua silinder (*tandem, side-by-side, staggered*), tiga silinder (*aligned* dan *triangular*), empat silinder (*in-line, regular square*), atau banyak silinder (*irregular* dan *triangular multi pipe*), ataupun silinder sirkular yang ditempatkan dekat dinding (*near-wall*). Pola aliran yang terbentuk disekitar kontur bodi semakin kompleks, dan gaya-gaya yang terjadi selain dipengaruhi oleh *pressure forces* dan *viscous forces*, juga dipengaruhi oleh adanya *flow interference* akibat pola aliran yang terbentuk ketika silinder sirkular satu disusun berdekatan dengan silinder sirkular yang lain, atau antara dinding dengan silinder sirkular tersebut.

*Flow interference* adalah fenomena aliran yang terbentuk ketika aliran pada silinder sirkular *downstream* dipengaruhi oleh aliran silinder sirkular *upstream* atau sebaliknya keberadaan silinder sirkular *downstream* akan

mempengaruhi pola aliran yang terbentuk pada silinder sirkular *upstream*, ataupun aliran pada silinder sirkular dekat dinding dipengaruhi oleh aliran dinding tersebut. Fenomena *flow interference* ini sangat bergantung pada jarak (*spacing*) antara silinder sirkular dan jumlah silinder dalam susunan, konfigurasi susunan silinder atau orientasi susunan silinder terhadap arah aliran, kecepatan *free stream* dan diameter silinder atau bilangan Reynolds. Variabel tersebut bertambah dengan sifat-sifat lapis batas, seperti jenis dan tebal lapis batas dari dinding, apabila silinder atau susunan silinder tersebut ditempatkan di atau dekat dinding.

Sementara *lift force* timbul ketika kecepatan aliran yang mengalir pada kontur bodi mengalami perubahan karena efek *viscous*, sehingga terjadi perbedaan distribusi tekanan antara bagian atas dan bagian bawah dari bodi, dan menghasilkan suatu getaran atau vibrasi ketika perbedaan tersebut berlangsung secara kontinyu. Bodi tersebut akan mengalami *lift force* positif apabila distribusi tekanan di bagian bawah bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian atas, dan sebaliknya menimbulkan *lift force* negatif apabila distribusi tekanan bagian atas bodi lebih besar dari distribusi tekanan bagian bawah. Besar kecilnya *lift force* ditentukan oleh orientasi arah aliran terhadap *bluff body* tunggal atau dalam susunan tertentu, serta geometri dari kontur bodi.

Sedangkan *drag force* terjadi ketika aliran yang mengalir pada bodi bagian atas dan bagian bawah tersebut terlepas atau terpisah (separasi) dari bodi. Terlepasnya aliran dari kontur bodi dikarenakan momentum aliran tersebut tidak mampu mengatasi *adverse pressure* akibat geometri bodi dan *skin friction* akibat *shear stress*. Besar kecilnya *drag force* ditentukan oleh kapan terjadinya pemisahan aliran tersebut, dengan kata lain apabila separasi terjadi lebih awal maka *wake region* makin lebar dan berarti *drag force* juga besar, dan sebaliknya apabila separasi tertunda maka *wake region* lebih sempit sehingga *drag force* juga kecil. Faktor-faktor yang menentukan posisi separasi pada silinder sirkular antara lain: kecepatan *free stream* dan profil aliran, *free stream turbulence*, geometri, dan kekasaran permukaan bodi.

Penelitian yang mengamati karakteristik aliran yang melintasi silinder sirkular tunggal sudah banyak dilakukan. Seperti yang dilaporkan oleh Goldstein (1965) dan Bearman (1969) menunjukkan bahwa silinder sirkular yang diletakkan

melintang terhadap aliran, memiliki nilai koefisien drag ( $C_D$ )= 1,2 pada bilangan Reynolds ( $Re$ )=  $1 \times 10^3 \div 1 \times 10^5$ , dimana  $Re$  ditentukan berdasarkan diameter silinder ( $D$ ) dan kecepatan rata-rata aliran ( $U_\infty$ ).

Sama halnya dengan silinder tunggal, penelitian yang terkait dengan susunan silinder sirkular, yaitu: dua silinder sirkular yang tersusun *side-by-side*, *tandem*, ataupun *stagger* telah banyak dilakukan. Menurut Zdravkovich dan Pridden (1977), bahwa jika dua silinder sirkular ditempatkan pada posisi yang sangat berdekatan (*small spacing*), baik tersusun secara *side-by-side*, *tandem*, ataupun *stagger* akan mengubah pola aliran yang terjadi (*discontinuity flow pattern*), dan ini memberi dampak juga terhadap besaran gaya-gaya aerodinamik, seperti *lift* maupun *drag*. Selanjutnya Zdravkovich (1987) mengklasifikasikan perilaku aliran dalam dua jenis *interference*; pertama, silinder sirkular *downstream* sebagian atau seluruhnya dilingkupi oleh *wake* dari silinder sirkular *upstream* dan ini disebut dengan *wake interference*; kedua, silinder sirkular *downstream* tidak dilingkupi oleh *wake* dari silinder sirkular *upstream* dan ini disebut dengan *proximity interference*. Sumner (2010) yang merangkum dari hasil-hasil penelitian tentang konfigurasi susunan dua silinder sirkular, menjelaskan bahwa *wake* dan *proximity interference* yang ditimbulkan oleh konfigurasi susunan silinder mempunyai pengaruh yang kuat terhadap pola aliran yang terjadi, gaya-gaya aerodinamik, *vortex shedding*, dan parameter lainnya.

Karakteristik aliran menjadi kompleks dan tidak merupakan fungsi linear ketika dua silinder sirkular yang tersusun *side-by-side* dan *tandem* ini digabung, sehingga membentuk susunan empat silinder sirkular *square configuration*. Fenomena *wake interference* pada susunan *tandem* dan *biased flow* pada susunan *side-by-side* akan saling berinteraksi dan mempengaruhi, sehingga terbentuk pola aliran yang baru. Penelitian-penelitian yang terkait dengan susunan empat silinder sirkular sudah banyak dilakukan, dan berikut ini hanya dijabarkan penelitian yang terkait dengan susunan empat silinder sirkular *equispaced square configuration*.

Beberapa peneliti seperti Sayers (1988), Lam dan Lo (1992), Lam dan Fang (1995), Lam et.al. (2003), telah melakukan penelitian secara eksperimen maupun secara visualisasi tentang pola aliran yang terjadi di sekeliling susunan *equispaced* silinder sirkular yang diletakkan di *center-line*, meliputi: *upstream*,

*downstream*, maupun *near wake region*, dan pengaruh terhadap karakteristik aerodinamik seperti *pressure*, *drag*, dan *lift coefficient* dengan memvariasi rasio L/D dan sudut orientasi aliran ( $\alpha$ ).

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan pada L/D= 4 dengan kondisi pengujian aliran laminar, Re= 200, menunjukkan bahwa silinder *downstream* dilingkupi penuh oleh silinder *upstream*. *Vortex shedding* tidak terjadi pada silinder *upstream*, dan lapis geser (*shear layers*) dari silinder *upstream* mengembang menjadi *vortices* hanya setelah mencapai *rear-side* dari silinder *downstream*. Posisi dari separasi lapis batas (*boundary layer*) mirip seperti pada silinder tunggal, dan diperoleh gaya *drag* rata-rata pada silinder *upstream* lebih besar dari silinder *downstream*, tetapi pada silinder *downstream* lebih menerima gaya fluktuasi yang lebih besar karena disebabkan oleh *wake vortices* yang tidak stabil.

Sedangkan hasil visualisasi menunjukkan pada L/D  $\leq 3,94$  *vortex shedding* dari silinder *upstream* tertahan, lapis geser (*shear layers*) menjadi tidak stabil ketika *attach* pada silinder *downstream* dan *wake* akan terdefleksi secara tajam dari *streamwise* menuju pada satu sisi, sementara ketika L/D < 1,7 pada silinder *downstream* mulai terjadi kondisi *bistable*, *narrow wake* dan *wide wake* akan terbentuk pada silinder. Selain itu melalui penelitian tersebut dapat diidentifikasi 3 (tiga) jenis pola aliran berdasarkan rasio L/D, yaitu *free oscillation of shear layer* terjadi pada rasio L/D besar, *re-attachment of shear layer* yang terjadi pada rasio L/D *intermediate*, dan *narrow gap* yang terjadi pada rasio L/D kecil. Sementara penelitian secara eksperimen dan simulasi numerik 2-D maupun 3-D telah dilakukan oleh Lam, et.al. (2008), Lam dan Zou (2009), Lam dan Zou (2010), yang dilakukan pada kondisi pengujian di *turbulent flow region* dan *laminar flow region*.

Fenomena interferensi aliran semakin kompleks ketika susunan silinder sirkular tersebut diletakkan dekat dinding (*near wall*). Selain terjadi interferensi aliran antar silinder sirkular, juga terjadi interferensi aliran antar lapis batas dari dinding dengan pola aliran yang terbentuk pada silinder sirkular. Penelitian terkait dengan silinder tunggal dekat dinding yang telah dilakukan, antara lain:

Zdravkovich (1985), Lei et.al. (1999), Choi dan Lee (2000), Wang dan Tan (2008), Price et.al. (2002) dan Lin et. al. (2008).

Berdasarkan eksperimen diperoleh hasil bahwa variasi rasio gap silinder terhadap dinding berpengaruh terhadap *drag* dan *lift coefficient*, tetapi ketebalan lapis batas dinding lebih berpengaruh secara signifikan terhadap *drag coefficient*.

Sedangkan melalui visualisasi dapat diidentifikasi perilaku aliran menjadi empat pola yang berbeda, yaitu: terbentuknya *vortex shedding* yang tidak beraturan terutama pada *lower side* dari silinder *wake*, tetapi *outer shear layer* tetap terbentuk secara periodik pada rasio gap yang sangat kecil; mulai ada kombinasi antara *inner shear layer shedding* dari silinder dengan lapis batas dinding pada rasio gap kecil; terbentuknya onset *vortex shedding* dari silinder pada rasio gap menengah; dan tidak terjadi separasi dari lapis batas dinding, juga silinder *upstream* atau *downstream* pada rasio gap yang besar. Sementara penelitian susunan dua silinder sirkular secara tandem dekat dinding telah dilakukan oleh Yuwono, et.al. (2010) yang memvariasikan jarak antara silinder sirkular dengan dinding, diamati distribusi tekanan sepanjang permukaan silinder dan pada dinding datar.

Berdasarkan hasil penelitian empat silinder sirkular yang tersusun secara *equispaced* di *center line*, pada sudut orientasi ( $\alpha$ ) =  $0^\circ$ , silinder *downstream* akan dilingkupi oleh *wake* dari silinder *upstream* atau terjadi *re-attachment* lapis geser bebas (*free shear layers*) dari aliran silinder *upstream* pada silinder *downstream* terutama pada rasio  $L/D < 4$ . Bahkan pada kecepatan yang rendah, kondisi pengujian laminar, fenomena tersebut berlangsung pada  $L/D = 4$ . *Vortex shedding* hanya akan terbentuk di daerah *wake* dari silinder *downstream*, sementara pada daerah *wake* dari silinder *upstream* tidak terjadi *vortex shedding*. Hal ini dapat diketahui dari sangat bervariasinya nilai bilangan *Strouhal* (*St*) dari setiap silinder. Sedangkan pada rasio  $L/D = 1,26$  terjadi kondisi *bistable* pada silinder *downstream*, yaitu terbentuknya *narrow wake* dengan frekuensi *shedding* yang besar, dan *wide wake* dengan frekuensi *shedding* yang kecil. Diantara kedua rasio terdapat rasio kritis,  $L/D = 2,7$ , dimana terjadi perubahan yang besar pada koefisien tekanan dan karakteristik *drag* dan *lift* pada silinder *downstream*. Seluruh peneliti juga mendapatkan bahwa dengan perbedaan pola aliran yang

terbentuk akan mempengaruhi distribusi tekanan, sehingga dapat disimpulkan bahwa rasio  $L/D$  juga mempengaruhi distribusi tekanan, dan akhirnya juga akan mempengaruhi karakteristik *drag* dan *lift*.

Sementara menurut hasil penelitian silinder sirkular tunggal dekat dinding, bahwa nilai *drag* dan *lift coefficient* sangat dipengaruhi oleh rasio  $G/D$  dan ketebalan lapis batas dari dinding. Didapatkan juga pada rasio  $G/D$  tertentu ( $0,2 \leq G/D < 0,6$ ), bahkan pada rasio  $G/D < 1,4$  (pada lapis batas turbulen yang lebih tebal) timbul *lift coefficient* yang negatif, yaitu gaya tegak-lurus pada aliran mengarah pada silindernya. Perubahan kedua koefisien dikarenakan pada rasio yang kecil ( $G/D < 3$ ), terjadi interferensi aliran oleh lapis batas dari dinding terhadap aliran di sekeliling silinder. Bahkan pada rasio  $0,6 \leq G/D < 3$ , *vortex shedding* yang terbentuk pada daerah *wake* dari silinder meningkat, dan frekuensi *shedding* ini semakin besar ketika silinder sirkular tersebut ditempatkan pada lapis batas yang lebih tebal. Tetapi pada rasio  $G/D < 0,2$  aliran di gap sangat lemah sehingga tidak terbentuk *vortex shedding* pada daerah *wake*. Hasil yang sama diperoleh pada susunan 2 silinder secara tandem yang ditempatkan dekat dinding, ketika rasio  $G/D < \delta/D$  maka titik stagnasi dari silinder *upstream* tidak berada pada *front side* dan mulai menuju ke *front side* ketika rasionya semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan lapis batas berpengaruh terhadap nilai *drag coefficient* silinder.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa ketika aliran melintasi empat silinder sirkular yang terletak pada *center line* dan tersusun secara *in line*, maka rasio spasi  $L/D$  berpengaruh secara signifikan terhadap pola aliran yang terbentuk disekeliling silinder dan besaran gaya aerodinamik dari masing-masing silinder maupun susunan silinder secara keseluruhan. Sementara itu ketika aliran melintasi silinder sirkular tunggal dekat dinding maupun susunan dua silinder sirkular secara tandem dekat dinding, maka rasio gap  $G/D$  berpengaruh secara signifikan terhadap pola aliran yang terbentuk disekeliling silinder dan besaran gaya aerodinamik dari silinder sirkular.

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya, maka penelitian ini akan difokuskan pada susunan empat silinder sirkular yang membentuk *equispaced in-line configuration* dan ditempatkan dekat dinding.



Posisi susunan silinder akan ditempatkan pada daerah lapis batas turbulen dari dinding. Selain itu berdasarkan penelusuran peneliti sejauh ini belum ada penelitian terkait dengan konfigurasi tersebut, dan juga topik ini sangat menarik untuk diteliti.

## 1.2. Perumusan Masalah dan Hipotesis

Dengan melihat hasil-hasil penelitian dari susunan 4 silinder pada *center line*, dan silinder tunggal maupun susunan 2 silinder secara tandem yang ditempatkan dekat dinding, maka diprediksi pola aliran yang terjadi disekeliling susunan 4 silinder *equispaced in-line* yang diletakkan dekat dinding akan dipengaruhi oleh interaksi kedua rasio  $L/D$  dan  $G/D$ . Kondisi *bistable* (*wide* dan *narrow wake*), titik kritis dimana terjadi perubahan yang besar pada besaran koefisien tekanan, perilaku pola aliran yang sama seperti silinder tunggal, dan fenomena *vortex shedding* yang terjadi pada susunan empat silinder sirkular di *center line* akan mengalami perubahan pada besaran rasionya. Hal ini dikarenakan adanya interaksi antara lapis batas dari dinding dan pola aliran yang terjadi disekeliling susunan silinder sirkular. Begitu juga dengan besaran gaya aerodinamik dari masing-masing silinder maupun silinder secara keseluruhan.

Penelitian ini akan dikembangkan untuk mengamati perilaku aliran yang terjadi apabila susunan 4 silinder sirkular *equispaced in-line* yang ditempatkan dekat dinding. Untuk mendapatkan informasi tentang pengaruh dinding terhadap pola aliran yang terbentuk disekeliling susunan silinder, maka susunan empat silinder sirkular ini divariasikan pada  $L/D = 2,7$  dan  $4$ , dan jarak gap dengan dinding ( $G/D$ ) divariasikan yaitu:  $0 \leq G/D \leq 0,5$  (dengan interval  $0,1$ ); dan  $G/D = 1$ . Pengambilan rasio  $L/D = 2,7$  dengan pertimbangan bahwa pada penelitian susunan 4 silinder di *centerline* terdahulu rasio tersebut merupakan rasio kritis, dimana terjadi perubahan yang drastis pada koefisien tekanan dan karakteristik aerodinamik dari silinder *downstream*. Nilai gaya fluktuasi pada silinder *upstream* dan *downstream* menjadi turun, sementara frekuensi *vortex shedding* dari silinder *upstream* mendekati nol. Sementara pengambilan rasio  $L/D = 4$  dengan pertimbangan bahwa pada penelitian terdahulu diperoleh hasil posisi titik stagnasi dari silinder *upstream* simetri. Selain itu gaya drag pada silinder *upstream* lebih

besar dari silinder *downstream*, tetapi gaya fluktuasi dari silinder *downstream* lebih besar dari silinder *upstream*. Dengan berpedoman pada tolok ukur tersebut, memudahkan dalam menyimpulkan pengaruh dinding terhadap pola aliran yang terjadi disekeliling susunan 4 silinder. Untuk mendapatkan informasi yang lebih rinci tentang pengaruh tebal lapis batas dari dinding terhadap pola aliran di sekeliling silinder dan karakteristik aerodinamik dari setiap silinder maupun susunan silinder secara keseluruhan, maka dilakukan pengukuran pada beberapa variasi rasio G/D seperti yang disebutkan di atas. Pengamatan pengaruh ketebalan lapis batas ini dibatasi pada daerah lapis batas turbulen.

Berdasarkan analisa terhadap hasil-hasil penelitian sebelumnya seperti dirinci di atas, maka dapat disusun beberapa hipotesis dalam penelitian ini:

1. Besaran distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) dari masing-masing silinder dan dinding datar yang terbentuk pada susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding akan dipengaruhi oleh perubahan rasio G/D dan perubahan rasio L/D.
2. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan data distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ), maka besaran koefisien *drag* ( $C_{Dp}$ ) dan *lift* ( $C_{Lp}$ ) dari masing-masing silinder pada susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding akan dipengaruhi oleh perubahan rasio G/D dan perubahan rasio L/D.
3. Bentuk *velocity profile* di daerah wake silinder *downstream* pada susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding akan dipengaruhi oleh perubahan rasio G/D dan perubahan rasio L/D.
4. Frekuensi *vortex shedding* yang ditunjukkan melalui bilangan *Strouhal* ( $St$ ) pada susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding akan dipengaruhi oleh perubahan rasio G/D dan perubahan rasio L/D.

### 1.3. Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam penelitian lebih terarah, maka perlu diambil beberapa batasan, yaitu:

1. Empat silinder sirkular dengan konfigurasi *equispaced in-line (in-line square)*.

2. Fluida yang mengalir adalah udara dengan pendekatan aliran fluida *uniform* pada sisi inlet, *steady* dan *incompressible*, dengan bilangan Reynolds =  $5,3 \times 10^4$  (didasarkan pada diameter silinder sirkular).
3. Interaksi antara *boundary layer* dinding bawah *wind tunnel test section* dengan plat datar tersebut dapat diabaikan.
4. Pengaruh perpindahan panas selama aliran udara berinteraksi dengan empat silinder sirkular maupun dinding dapat diabaikan.
5. Penempatan *center* dari silinder *upstream* pada daerah lapis batas turbulen dengan jarak dari *leading edge* dinding 620 mm.
6. Perhitungan koefisien drag ( $C_D$ ) dan koefisien lift ( $C_L$ ) dari masing-masing silinder berdasarkan koefisien tekanan.

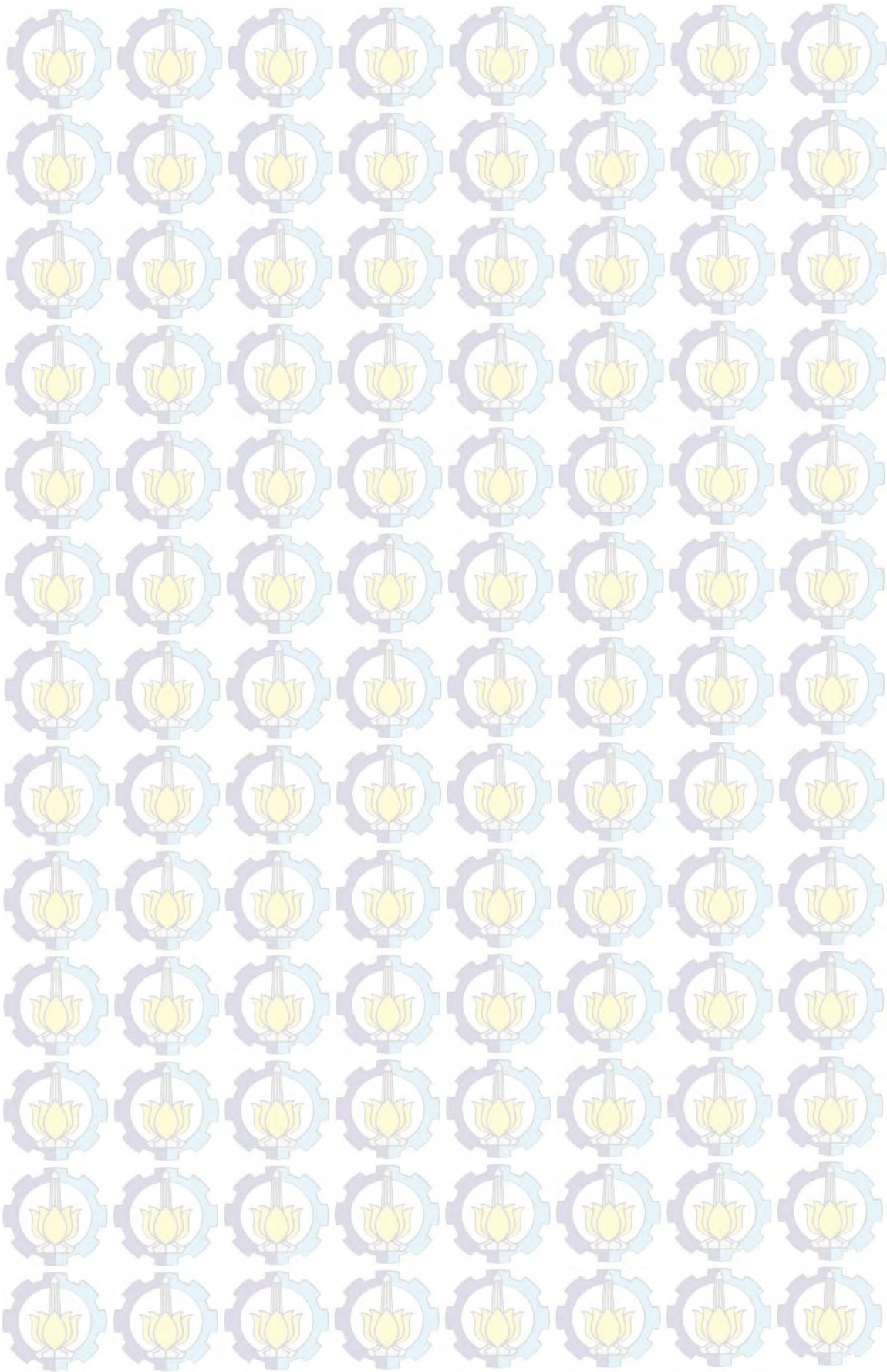
#### 1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk menjelaskan fenomena aliran yang terjadi di sekeliling dan di belakang 4 silinder sirkular yang tersusun *in-line square* dekat dinding datar, dan mengetahui karakteristik aerodinamik dari susunan silinder tersebut. Sedangkan tujuan khusus yang akan dicapai melalui penelitian ini adalah:

1. Diperoleh data-data tentang distribusi tekanan pada masing-masing silinder, yang selanjutnya data tersebut digunakan untuk mengetahui koefisien drag dan lift pada masing-masing silinder sirkular.
2. Diperoleh data-data tentang *frekuensi shedding* di daerah wake silinder *downstream*, yang selanjutnya data tersebut dapat digunakan untuk menghitung *Strouhal number* pada daerah *wake* dari silinder *downstream*.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Penjelasan tentang fenomena aliran dan pengukuran gaya-gaya aerodinamik yang terjadi disekeliling susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding ini bermanfaat sebagai *bank data*, yang nantinya dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam mendesain suatu peralatan *engineering* ataupun desain konstruksi, karena konfigurasi ini merupakan suatu konfigurasi dasar.



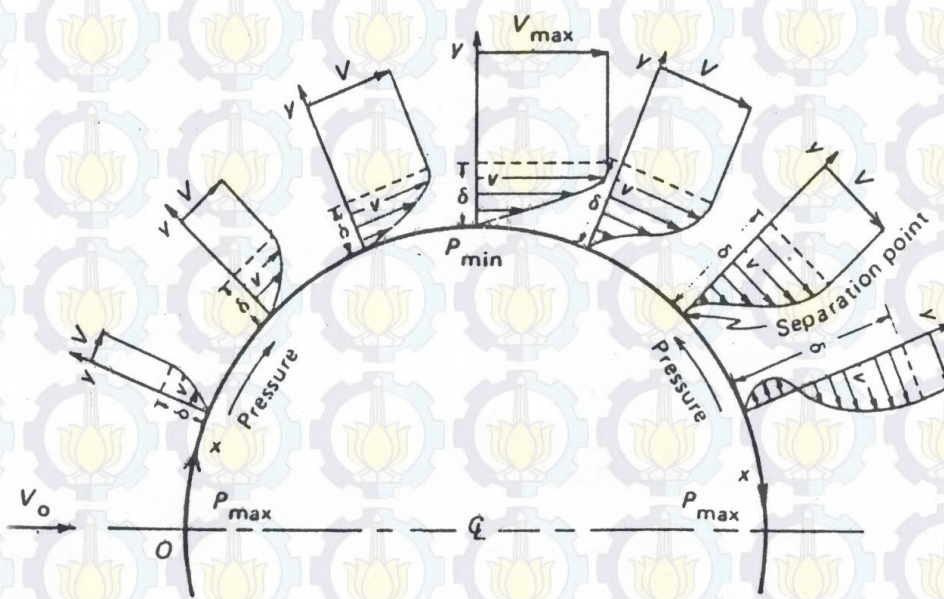
## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

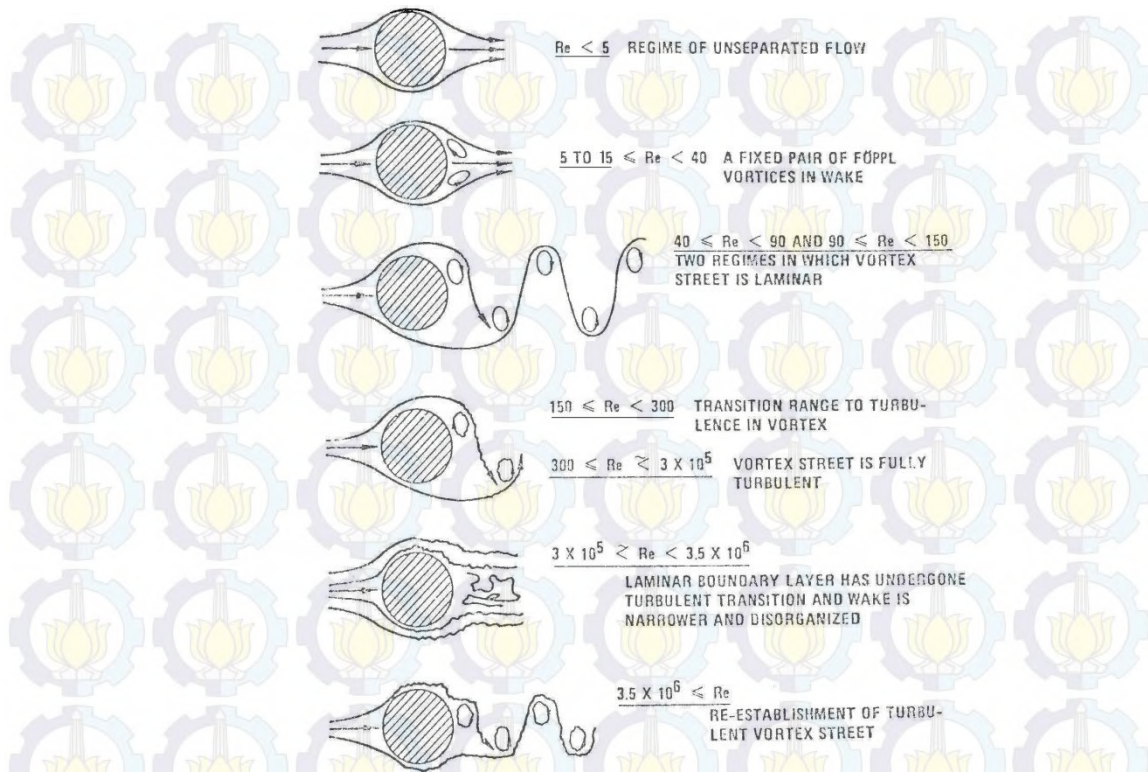
#### 2.1. Silinder sirkular

##### 1. Distribusi tekanan, gaya drag, dan rejim aliran pada silinder sirkular

Medan aliran yang melintasi permukaan silinder terbagi menjadi *upperside* dan *lowerside* di titik stagnasi. Fluida kemudian akan mengalami separasi karena momentum fluida didekat dinding tidak mampu menghadapi kombinasi gaya viscous dan gradien tekanan searah aliran. Titik separasi terjadi pada daerah yang tekanannya meningkat (*adverse pressure gradient*). Selanjutnya akan terbentuk *viscous wake*, seperti diilustrasikan oleh Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Pertumbuhan Boundary Layer dan Tekanan dari Aliran yang Melintasi Permukaan Silinder (Bearman, 1984)



Gambar 2.2. Regime Aliran melalui Silinder Sirkular (Lienhard, 1966)

Gambar 2.2 menunjukkan pengaruh bilangan Reynolds terhadap *regime* aliran disekeliling silinder sirkular tunggal, dipresentasikan oleh *Lienhard* (1966), sebagai berikut :

1. Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) yang sangat kecil ( $Re < 5$ ) aliran tidak terseparasi. Seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds*, aliran terseparasi untuk membentuk sepasang resirkulasi eddy pada tiap sisi dari silinder.
2. Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) yang semakin meningkat, *shedding eddy* menjadi semakin panjang searah aliran, panjangnya meningkat secara linier terhadap bilangan *Reynolds* sampai aliran stabil pada  $Re \sim 4 \times 10^1$ , *vortices* kemudian terpecah, konsekuensinya periodik *staggered vortex street* terbentuk.
3. Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) hingga  $\sim 1,5 \times 10^2$ , *vortex street* bertambah lebar yang berjalan di belakang hingga beberapa diameter. Peningkatan pertama kali dari *wake* yang berkembang menjadi dua baris sejajar *staggered vortices*. Teori inviscid *Von Karman*

menunjukkan *vortex street* akan stabil saat rasio lebar dengan jarak *streamwise* adalah 0,28. Pada daerah ini, *vortex street* adalah laminar.

4. Pada bilangan *Reynolds* ( $Re$ ) =  $3 \times 10^2$ , memunculkan lapisan batas laminar yang melalui bagian depan silinder, selanjutnya saat melalui bagian belakang silinder, lapisan terseparasi dan memecah menjadi *turbulent wake*. Dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* ( $3 \times 10^2 \leq Re < 3 \times 10^5$ ) titik separasi akan bergerak ke depan.
5. Pada bilangan *Reynolds* sekitar  $3 \times 10^5$ , titik separasi akan bergerak ke belakang hal ini dipengaruhi oleh turbulensi aliran bebas (*free stream*) dan kekasaran permukaan benda, yang ini akan menyebabkan *drag* semakin turun dengan tajam dan *vortex shedding* menjadi tidak beraturan.
6. Pada bilangan *Reynolds* yang lebih tinggi lagi *vortex street* muncul kembali.

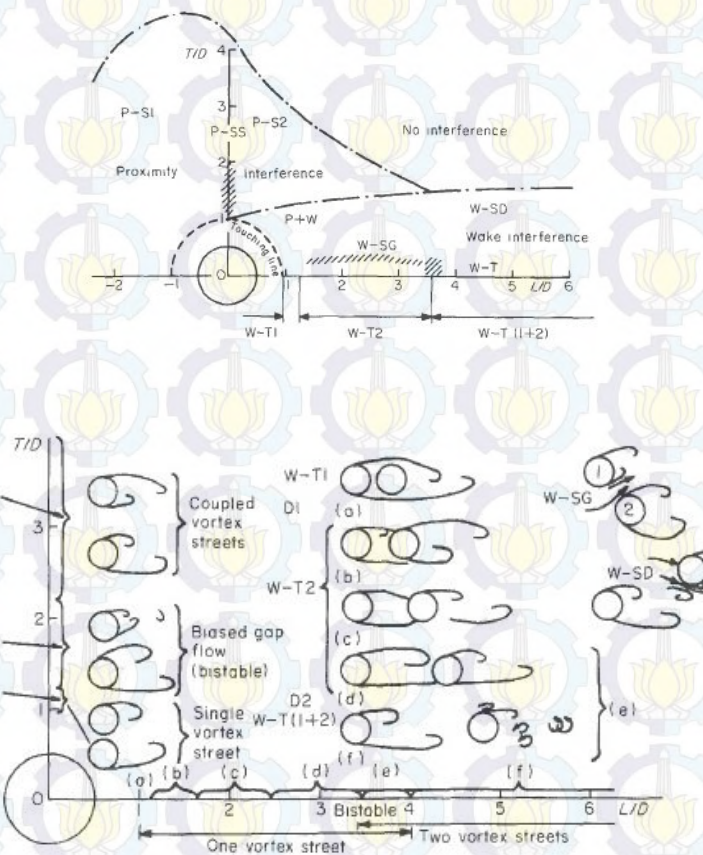
## 2. Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular dengan Susunan *Side-by-side* (Transversal) dan Susunan *Tandem* (Longtudinal).

Medan aliran di sekitar sepasang silinder sirkular baik susunan *side-by-side* maupun *tandem* yang rigid sangatlah rumit. Beberapa tujuan dari studi tersebut adalah mengukur gaya fluida dan atau distribusi tekanan yang bekerja pada tiap silinder, profil kecepatan, *vortex shedding*, dan memahami pola-pola resultan aliran. Saat salah satu atau kedua silinder elastis dan bergetar, medan aliran menjadi secara signifikan lebih rumit karena interaksi dari aliran fluida dan gerakan silinder. Interferensi antara dua silinder yang terjadi yaitu saat keduanya cukup saling berdekatan satu sama lain atau silinder belakang (silinder *downstream*) berdekatan atau di dalam *wake* silinder di depannya (silinder *upstream*).

Berdasarkan susunan dari dua silinder, dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok *regime* aliran seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.3 dengan penjelasan sebagai berikut :

1. *Proximity interference* (P) yaitu medan aliran atau gerakan salah satu silinder mempengaruhi yang lainnya, hal ini terjadi pada susunan silinder *side-by-side* (transversal) dan *slightly staggered*.

2. *Wake interference* yaitu medan aliran atau gerakan dari silinder *upstream* mempengaruhi silinder *downstream* di dalam *wake*, hal ini terjadi pada susunan silinder *tandem* maupun *staggered* untuk  $L/D > 4$ .
3. *Proximity and wake interference* yaitu pada celah yang kecil, *wake* di belakang silinder *upstream* diganggu oleh silinder *downstream*, hal ini terjadi pada susunan silinder *tandem* maupun *staggered* untuk  $L/D < 4$ .
4. *No interference* yaitu medan aliran atau gerakan salah satu silinder tidak mempengaruhi silinder lainnya.



Gambar 2.3. Regime dan Struktur Aliran dari Susunan Dua Silinder yang Mengalami Interferensi (Zdravkovich, 1987).

Interferensi aliran dari susunan silinder sangat dipengaruhi oleh orientasi aliran, jarak dan jumlah silinder dalam susunan, dan juga faktor-faktor yang mempengaruhi aliran pada silinder tunggal, seperti: bilangan Reynolds, *surface roughness*, dan turbulensi aliran.



### 3. Bilangan Strouhal pada Silinder Sirkular

Karman *vortex street* dan pola-pola *vortex* lainnya telah diteliti dan dipelajari selama seabad. Frekuensi *vortex shedding* ( $f_s$ ) dari silinder tunggal pada aliran *uniform* berkaitan dengan diameter silinder ( $D$ ) dan kecepatan aliran ( $U$ ) melalui bilangan *Strouhal* ( $St$ ) tak berdimensi dapat ditulis yaitu :

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (2.1)$$

dengan:

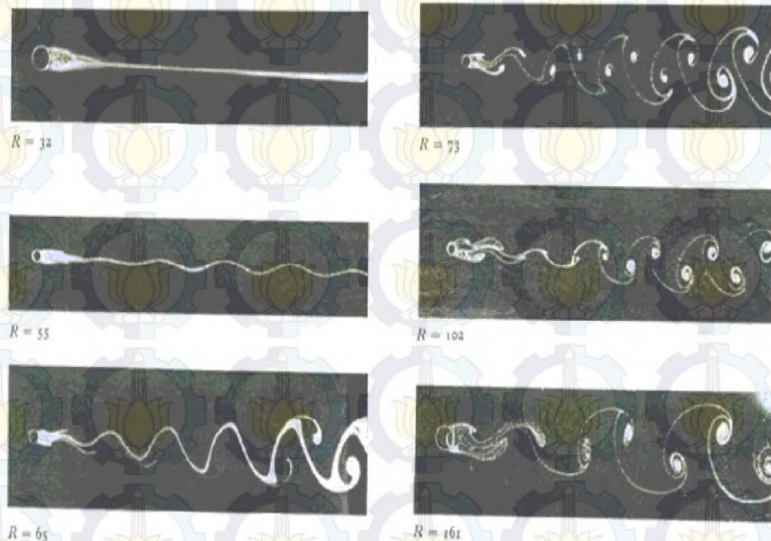
$St$  = bilangan Strouhal

$f_s$  = frekuensi shedding, dalam 1/t

$D$  = diameter silinder, dalam m

$U$  = kecepatan aliran free-stream, dalam m/sec.

Bilangan *Strouhal* mengkarakteristikan *vortex shedding* dari silinder tunggal sebagai fungsi bilangan *Reynolds*. Gambar 2.4 menunjukkan *vortex street* pada beberapa variasi bilangan *Reynolds*.



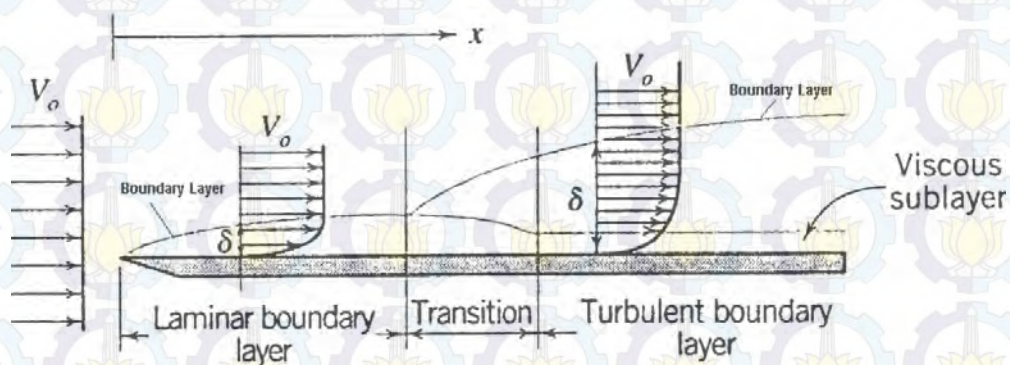
Gambar 2.4. Visualisasi Aliran dari Karman *Vortex Street* di Belakang Silinder Tunggal pada Berbagai Variasi Bilangan *Reynolds* (Zdravkovich, 1997)

### 2.2. Lapis batas pada bidang datar

Aliran yang mengalir di suatu objek solid, disebut dengan aliran luar atau *external flow*, terbagi menjadi dua daerah yang dibatasi oleh lapis batas tipis yang

disebut *boundary layer*. Aliran yang berada di dalam lapis batas atau *viscous flow* dipengaruhi oleh viskositas dan *pressure gradient* sehingga profil kecepatannya menjadi tidak seragam. Di luar lapis batas tidak ada pengaruh viskositas dan *pressure gradient* sehingga aliran dapat diberlakukan sebagai *inviscid flow*. Tetapi pada bidang/plat datar terjadi *zero pressure gradient flow*, artinya tidak terjadi perubahan tekanan dalam aliran selama mengalir di atas plat datar. Dengan demikian penyebab dari gradiasi kecepatan di dalam lapis batas karena adanya tegangan geser pada bidang datar akibat viskositas dari fluida yang mengalir.

Aliran *viscous* di dalam lapis batas tepat di atas permukaan plat datar kecepatannya sama dengan 0 (nol), atau dikatakan tidak terjadi slip (*no slip condition*) pada bidang tempatnya mengalir. Sampai batas ketebalan tertentu dari permukaan tempat mengalir terjadi gradiasi kecepatan hingga pada suatu titik tertentu dimana kecepatannya sama dengan kecepatan aliran bebas (*free stream*). Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5, perkembangan aliran yang terjadi didalam lapis batas dapat berupa laminar atau turbulen. Kecepatan aliran laminar dalam lapis batas adalah  $u$ , sementara kecepatan aliran turbulen didalam lapis batas adalah merupakan kecepatan rata-rata ( $\bar{u}$ ) ditambah dengan kecepatan fluktuasi pada tiga komponen ( $u'$ ,  $v'$ , dan  $w'$ ). Lapis batas yang terjadi pada plat datar apabila dialiri oleh suatu aliran ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Lapis batas laminar terjadi mulai ujung depan atau *leading edge* diikuti dengan transisi dan akhirnya menjadi turbulen.



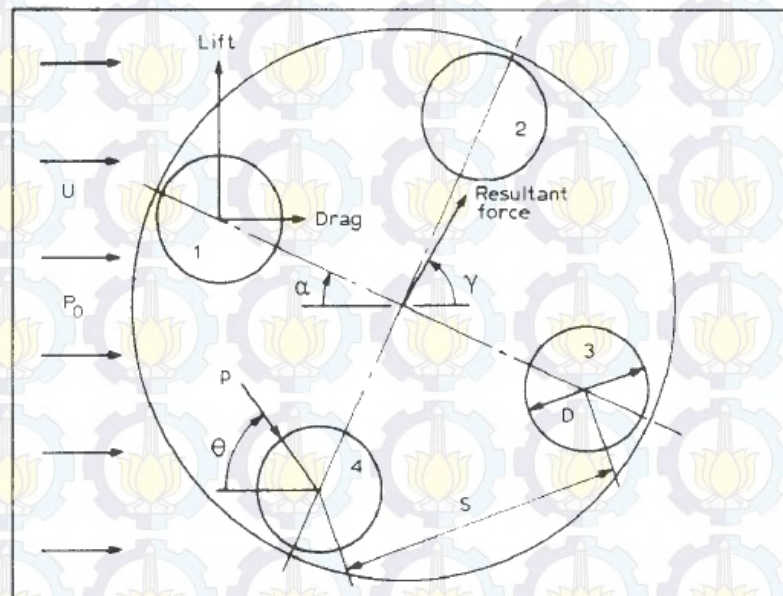
Gambar 2.5. Lapis Batas Kecepatan pada Plat Datar (Fox dan McDonald, 2010)

Secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi posisi transisi dalam lapisan batas adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan solid bodi atau *surface roughness*, perpindahan panas, gaya-gaya bodi atau *body forces*, dan gangguan-gangguan yang diberikan pada *free-stream* atau *free-stream disturbances*.

### 2.3. Penelitian-penelitian terkait sebelumnya

#### 1. Aliran melintasi empat silinder sirkular tersusun *equispaced (in-line squared)*

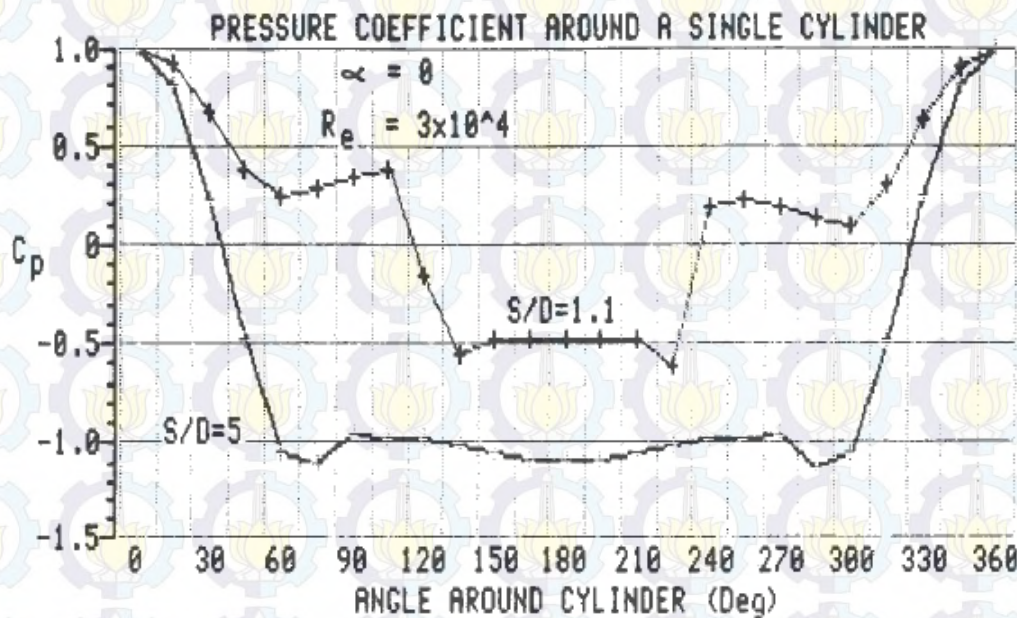
Sayers (1988) meneliti tentang interferensi aliran dari susunan *equispaced* 4 silinder sirkular. Dengan memvariasi rasio jarak antar silinder ( $S/D$ )= 1,1 <  $S/D$  < 5 dan orientasi (arah) aliran udara *free stream* ( $\alpha$ )= 0-180<sup>0</sup> terhadap susunan silinder sirkular seperti terlihat pada Gambar 2.6, diamati koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) dari setiap silinder secara sendiri-sendiri (pengamatan dilakukan pada silinder 1) dan secara keseluruhan (total), koefisien tekanan ( $C_P$ ), dan koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ).



Gambar 2.6. Jarak antara Silinder dan Sudut Orientasi (Sayers, 1988)

Diperoleh hasil koefisien *drag* dari silinder 1 pada  $\alpha=0^0$  dan rasio  $S/D=4$  dan  $5$  sama seperti silinder tunggal, yaitu  $C_D=1,1$ . Pada  $S/D=2$  harga koefisien *drag* turun menjadi 0,82, tetapi selanjutnya menjadi tetap  $C_D=0,95$  ketika  $S/D$  diperkecil lagi. Turunnya koefisien *drag* ini dikarenakan adanya silinder lain yang

berdekatan dengan silinder 1, sehingga mempengaruhi distribusi tekanan pada silinder 1. Tetapi perubahan koefisien *drag* relatif kecil karena kenaikan koefisien tekanan juga relatif sedikit dari -1,1 menjadi -0,49 ketika rasio S/D diturunkan.

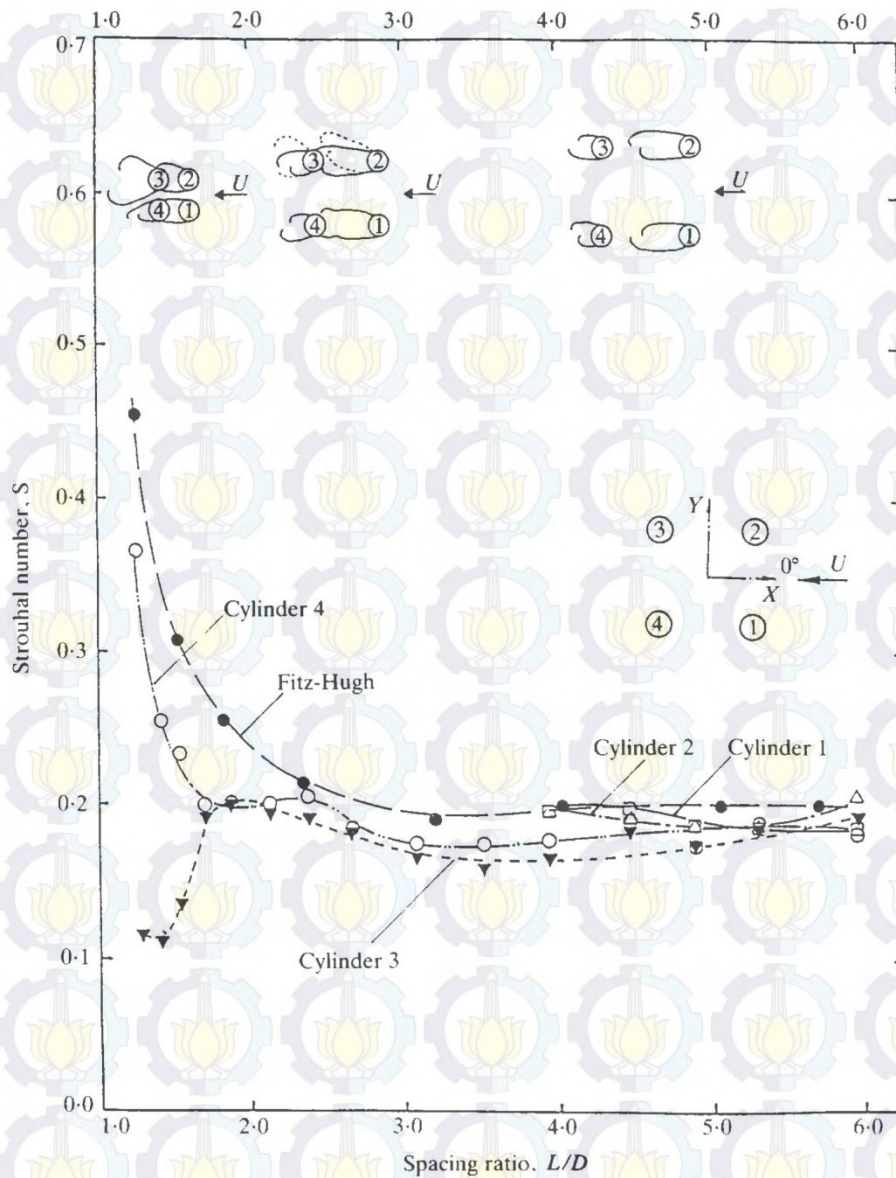


Gambar 2.7. Distribusi Tekanan sekeliling Silinder Sirkular Pertama pada  $\alpha = 0^\circ$  untuk  $S/D = 1,1$  dan  $S/D = 5$  (Sayers, 1988)

Melalui Gambar 2.7 terlihat sebaran koefisien tekanan positif pada bagian *upstream side* relatif lebih banyak untuk keseluruhan total sudut dan meniadakan kenaikan tekanan pada bagian *downstream side*, sehingga hanya menghasilkan perubahan yang kecil dalam koefisien *drag*. Bentuk kurva koefisien *drag* untuk keseluruhan silinder pada beberapa variasi S/D sama seperti pada susunan 3 silinder sirkular, kecuali pada sudut orientasi aliran  $\alpha$  minimum dan maksimum. Pada jarak S/D yang cukup besar,  $3 < S/D < 5$ , interferensi aliran yang terbentuk adalah *wake interference*, sedangkan pada jarak S/D yang lebih kecil silinder di dekat akan membelokkan aliran, terbentuk *proximity* dan *wake interference*, sehingga akan menurunkan koefisien *drag*. Akhirnya dapat disimpulkan bahwa perubahan harga koefisien *drag* sangat bergantung koefisien *base pressure*. Sementara koefisien *lift* dari silinder 1 pada  $\alpha = 0^\circ$  maupun silinder 4 pada  $\alpha = 135^\circ$  untuk seluruh variasi rasio S/D diperoleh  $C_L = 0$ , artinya aliran pada *upstream side* dan *downstream side* silinder simetri. Tetapi ketika orientasi aliran ( $\alpha$ ) diubah  $\alpha =$

$90^\circ$  harga koefisien *lift* meningkat secara cepat pada arah negatif dan mencapai nilai maksimum pada  $\sim 112,5^\circ$ , dan nilai ini bertambah ketika jarak S/D dikurangi. Hal ini dikarenakan ujung *wake* dari silinder 4 melampaui *lower side* silinder 1 sehingga membentuk seperti suatu batas, dan menyebabkan aliran yang melintasi luasan *lower side* silinder 1 berkurang dan akibatnya pada daerah tersebut aliran dipercepat sementara tekanannya berkurang dibanding dengan aliran pada *upper side*.

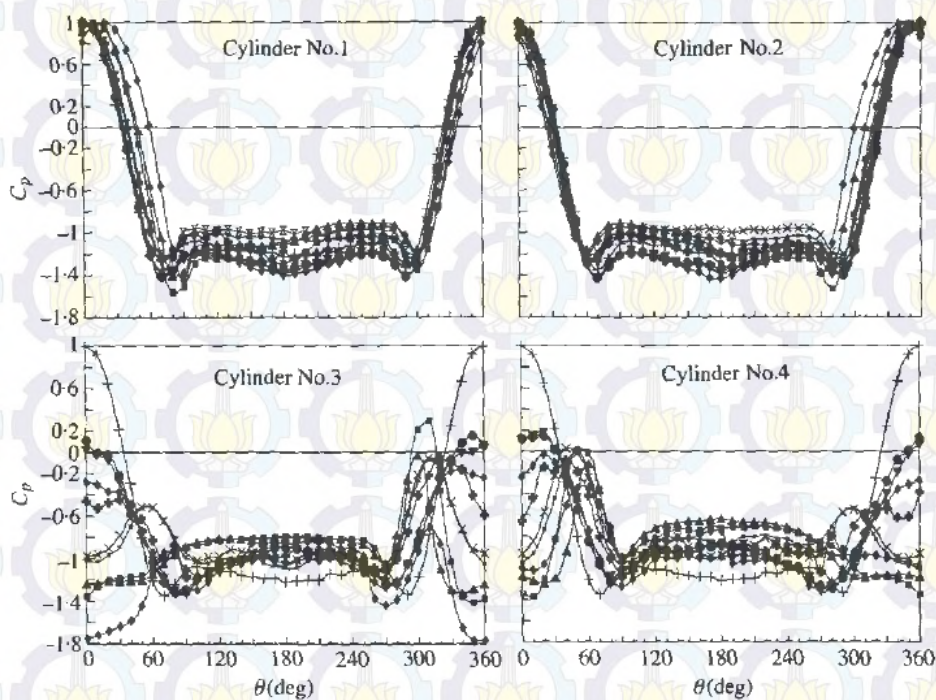
Berdasarkan penelitian visualisasi Lam dan Lo (1992) pada susunan empat silinder sirkular *in-line square configuration* ( $\theta = 0^\circ$ ) didapatkan perilaku aliran yang *bistable*, yaitu terbentuknya *wide* dan *narrow wake* yang bergantian dibelakang silinder *downstream* pada  $L/D \leq 1,54$ . Melalui Gambar 2.8 secara rinci dijelaskan pada  $4,47 < L/D < 5,96$ , nilai frekuensi *vortex shedding* atau *Strouhal number* (*St*) dari empat silinder sama seperti pada silinder tunggal, walaupun *St* untuk masing-masing silinder tidak sama persis, variasi antara silinder  $< 8,5\%$  dari deviasi maksimum pada silinder tunggal. Tetapi pada  $L/D = 3,94$  *St* dari silinder *downstream* berkurang, dan perbedaan dengan silinder *upstream* sekitar  $3\%$  dari  $0,2$ , naik sekitar  $12\%$  dari nilai pada silinder tunggal. Jika rasio  $L/D$  dikecilkan lagi, maka *regular shedding* dibelakang silinder *upstream* mengalami kondisi “suppressed”, sehingga lambat laun *wake* dari silinder *upstream* akan terdefleksi dari arah *streamwise*, yaitu *vortex shedding* pada silinder *upstream* tertekan, sehingga lapisan geser (*shear layers*) menjadi tidak stabil menyentuh silinder *downstream* yang akhirnya *wake* akan terdefleksi dengan tajam dari *streamwise* ke satu sisi. Ketika  $L/D$  diturunkan hingga  $< 1,70$  kondisi *bistable* mulai terjadi dibelakang silinder *downstream*, dan *wake* berubah dari *wide* menjadi *narrow* dan berlangsung berulang-ulang, dimana ketika *narrow wake* bilangan *Strouhal* =  $0,3$  pada  $L/D = 1,28$ , dan ketika *wide wake* bilangan *Strouhal* =  $0,112$  pada  $L/D = 1,41$ .



Gambar 2.8. Strouhal Number dan Rasio Spasi ( $L/D$ ) pada Susunan In-Line dengan  $Re = 2,1 \times 10^3$  (Lam dan Lo, 1992)

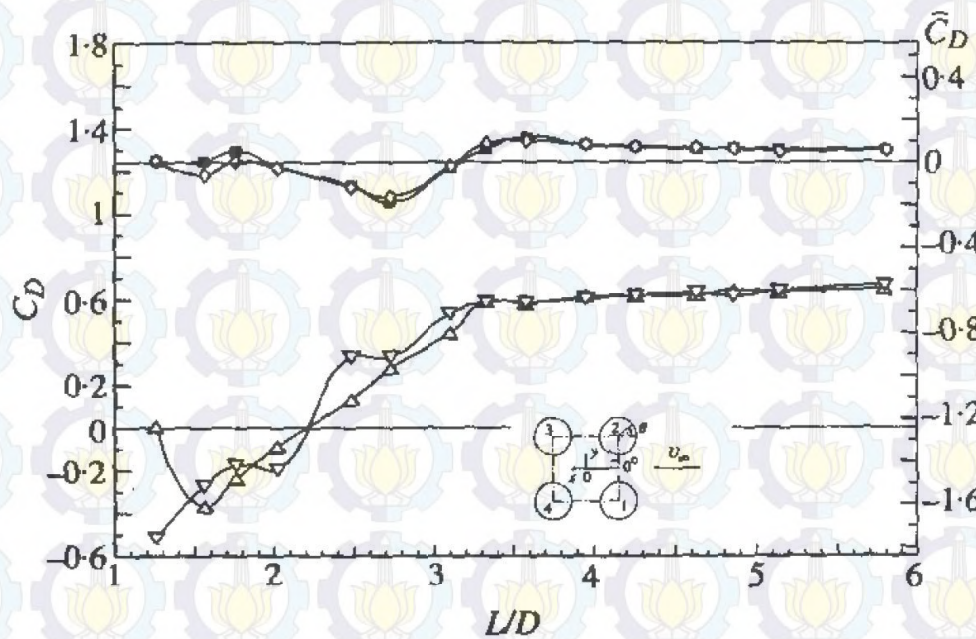
Selanjutnya penelitian eksperimen oleh Lam dan Fang (1995), yang mengamati distribusi tekanan dan gaya-gaya statik aerodinamik pada susunan empat silinder *equispaced* pada rasio  $L/D = 1,26 \div 5,80$  dan sudut aliran  $\alpha = 0^\circ \div 45^\circ$ . Gambar 2.9 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada rasio di atas dengan  $\alpha = 0^\circ$ . Diperoleh titik stagnasi pada silinder 1 dan silinder 2 bergerak dari *inner side* ke *front side* ( $\theta = 0^\circ$ ) dari silinder *upstream*, ketika rasio  $L/D$  diperbesar. Pada rasio  $L/D = 1,26$ , titik stagnasi untuk silinder 1 dan silinder 2 masing-masing  $\theta = 20^\circ$  dan  $340^\circ$ , dan akan menjadi simetri ketika  $L/D = 4$ . Lebih besar dari rasio

ini maka distribusi tekanan sekeliling silinder mendekati silinder tunggal. Distribusi tekanan pada silinder *downstream* menunjukkan perubahan yang signifikan sesuai variasi rasio. Pada rasio kecil,  $L/D < 2,48$ , koefisien tekanan pada *front side* dari silinder *downstream* tidak lebih dari  $-1,2$  karena berdekatan dengan *wake* dari silinder *upstream*, dan ini sama dengan nilai *rear side* dari silinder *upstream*. Juga hanya ada satu titik maksimum yaitu  $\theta = 305^\circ$  untuk silinder 3 dan  $\theta = 55^\circ$  untuk silinder 4. Pada rasio  $2,48 < L/D < 3,10$  diperoleh dua titik maksimum. Hal ini mempunyai implikasi terjadi *reattachment* dari *free shear layer* pada silinder *downstream* setelah terpisah dari silinder *upstream*, akibatnya terjadi perubahan pola aliran pada silinder *downstream* pada rasio ini. Dengan penambahan rasio, koefisien tekanan pada *front side* dari silinder *downstream* akan meningkat menjadi  $-0,5$  pada rasio  $L/D = 3,10$ . Untuk rasio yang besar  $L/D \geq 3,33$  koefisien tekanan pada *front side* dari silinder *downstream* meningkat menjadi  $0,2$ . Hal ini juga menunjukkan bahwa koefisien *base pressure* dari silinder *downstream* akan lebih besar dari pada silinder tunggal untuk seluruh variasi rasio.



Gambar 2.9. Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Masing-Masing Silinder (Lam dan Fang, 1995)

Gambar 2.10 menunjukkan perbandingan koefisien drag dari setiap silinder. Melalui Gambar 2.10 terlihat bahwa pengaruh interferensi dari silinder 1 dan silinder 2 sangat kecil. *Wake interference* pada silinder 3 dan silinder 4 tetap tidak berubah, yaitu koefisien drag= 0,6 untuk rasio  $L/D > 3,0$ . Tetapi nilai koefisien *drag* ini menjadi lebih kecil dan sama dengan 0 (nol) ketika  $L/D = 2,2$ . Untuk  $L/D < 2,2$  nilai koefisien *drag* menjadi negatif, ini menunjukkan adanya gaya tekan. Pada rasio minimum  $L/D = 1,26$  ada perbedaan koefisien *drag* antara silinder 2 dan silinder 4, karena terjadinya *wide* dan *narrow wake*.



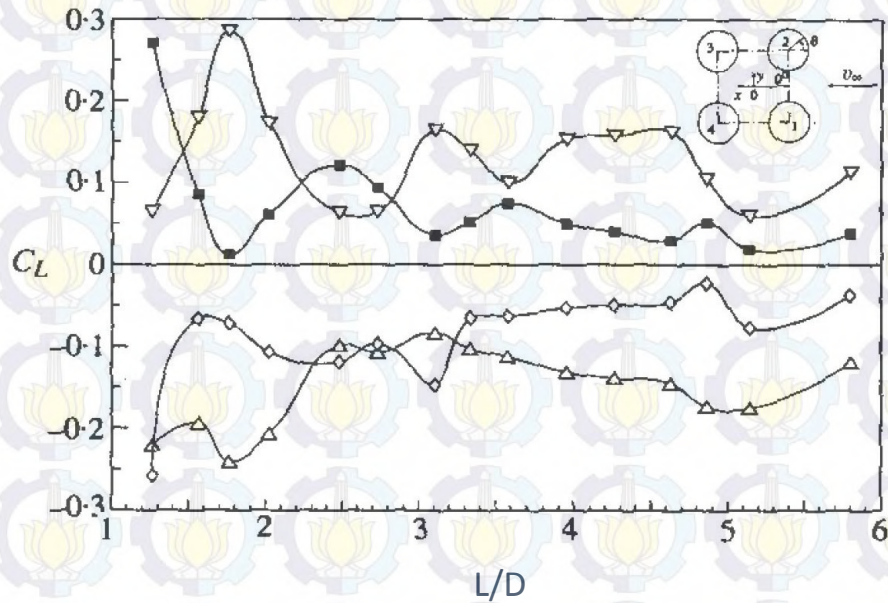
◇, cylinder 1; ■, cylinder 2; ▽, cylinder 3; Δ, cylinder 4; -, single cylinder

Gambar 2.10. Koefisien *Drag* dengan Variasi Rasio  $L/D=1\div 6$  untuk Setiap Silinder (Lam dan Fang, 1995)

Sedangkan karakteristik koefisien lift ditunjukkan pada Gambar 2.11, dimana koefisien *lift* pada silinder 1 dan silinder 4 mempunyai nilai yang negatif, sementara pada silinder 2 dan silinder 3 mempunyai nilai yang positif pada seluruh variasi rasio. Jadi timbul gaya *repulsive* antara kedua baris silinder. Oleh karena geometrinya simetri, koefisien lift pada silinder 1 mendekati sama dengan silinder 2, hanya tandanya berlawanan, hal ini juga sama untuk silinder 3 dan silinder 4. Karakteristik yang bergelombang menunjukkan bahwa adanya perubahan yang cepat dari pola aliran pada variasi rasio berkisar 0,3. Karakteristik



*base pressure* dari silinder 1 dan silinder 2 identik dan lebih rendah dari silinder tunggal pada  $L/D > 3$ , sementara pada rasio yang kecil *base pressure* ini akan lebih besar dari silinder tunggal kecuali pada  $L/D = 1,7$ . Untuk silinder 3 dan silinder 4 *base pressure* ini relatif sama, dan ini lebih besar dari silinder tunggal 0,2-0,6



◇, cylinder 1; ■, cylinder 2; ▽, cylinder 3; △, cylinder 4

Gambar 2.11. Koefisien Lift dengan Variasi Rasio  $L/D = 1 \div 6$  untuk Setiap Silinder (Lam dan Fang, 1995)



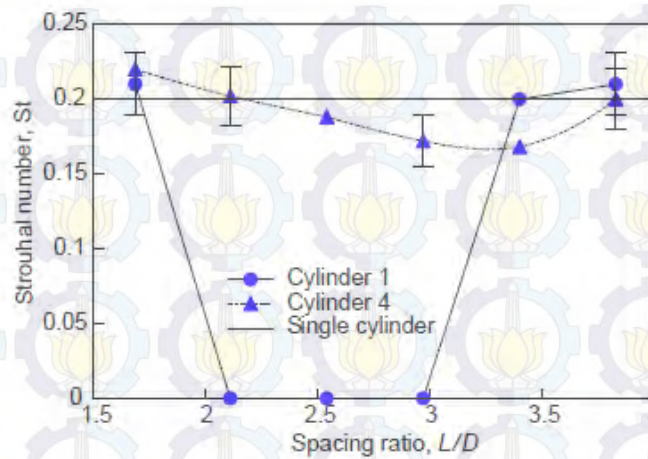
Gambar 2.12. Pola Aliran pada  $\alpha = 0^\circ$ : (a)  $Re = 2 \times 10^2$  dan (b)  $Re = 8 \times 10^2$  (Lam, et. al., 2003b)

Penelitian berikutnya dari Lam, et. al (2003a) dan Lam, et. al (2003b) mempertajam penelitian sebelumnya, menjelaskan bahwa variasi nilai dari *force*

*coefficient* dan bilangan *Strouhal* (*St*) dengan rasio *L/D* diatur oleh tiga pola aliran yang terbentuk. Secara rinci dapat dijelaskan seperti di bawah ini. Pada rasio  $L/D \geq 4$  pola aliran yang terbentuk disekitar susunan 4 silinder *in line* ( $\alpha = 0^\circ$ ) menyerupai dengan pola aliran pada susunan 2 silinder secara tandem, dimana *free shear layer* bergulung membentuk *vortices* dibelakang silinder *upstream*. Silinder *downstream* terbenam oleh *wake* dari silinder *upstream* dan dilanggar oleh *vortices*, sehingga *vortex* yang terbentuk jauh lebih pendek, dan dua *vortices* turbulen akan terbentuk dibagian belakang silinder seperti terlihat pada Gambar 2.12. Akibatnya gaya drag yang terjadi pada silinder *upstream* lebih besar dari pada silinder *downstream*, tetapi disisi lain gaya fluktuasi yang terjadi pada silinder *downstream* lebih besar dari pada silinder *upstream*. Pola aliran semacam ini disebut *free oscillations of shear layer*.

Apabila rasio *L/D* diperkecil  $2,1 < L/D < 3,0$ , maka pola aliran disekitar susunan 4 silinder *in line* ini akan menyerupai pola aliran susunan 2 silinder secara *side by side*, dimana *free shear layer* dari silinder *upstream* akan menyentuh atau *reattach* pada silinder *downstream*, sehingga *wake vortices* hanya terbentuk dibelakang silinder *downstream*. Fenomena ini akan membuat nilai gaya fluktuasi pada silinder *upstream* dan *downstream* menjadi turun, sementara frekuensi *vortex shedding* dari silinder *upstream* mendekati nol. Pola aliran ini disebut sebagai *reattachment of shear layer or shielding flow*. Pada rasio  $L/D < 2,1$  silinder *downstream* terbenam sepenuhnya oleh *wake* dari silinder *upstream*, sehingga *vortex* yang terbentuk dibelakang silinder *downstream* dibentuk oleh *free shear layer* yang terlepas dari silinder *upstream*. Pola aliran ini disebut *narrow gap flows*.

Selanjutnya Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara *Strouhal number* terhadap variasi rasio *L/D* untuk silinder 1 dan silinder 4. *Strouhal number* dari silinder 4 berkisar antara 0,2 untuk semua variasi rasio *L/D*, adanya *second harmonic shedding vortex* juga terdeteksi. Jadi ini menunjukkan bahwa *vortex shedding* terjadi dibelakang silinder 4 untuk seluruh variasi rasio *L/D*. Sementara pada silinder 1 frekuensi *shedding* berbeda pada  $L/D = 3,83$ , sedangkan pada  $L/D = 3,4$  harga tertingginya tidak tampak tetapi masih dapat diidentifikasi.

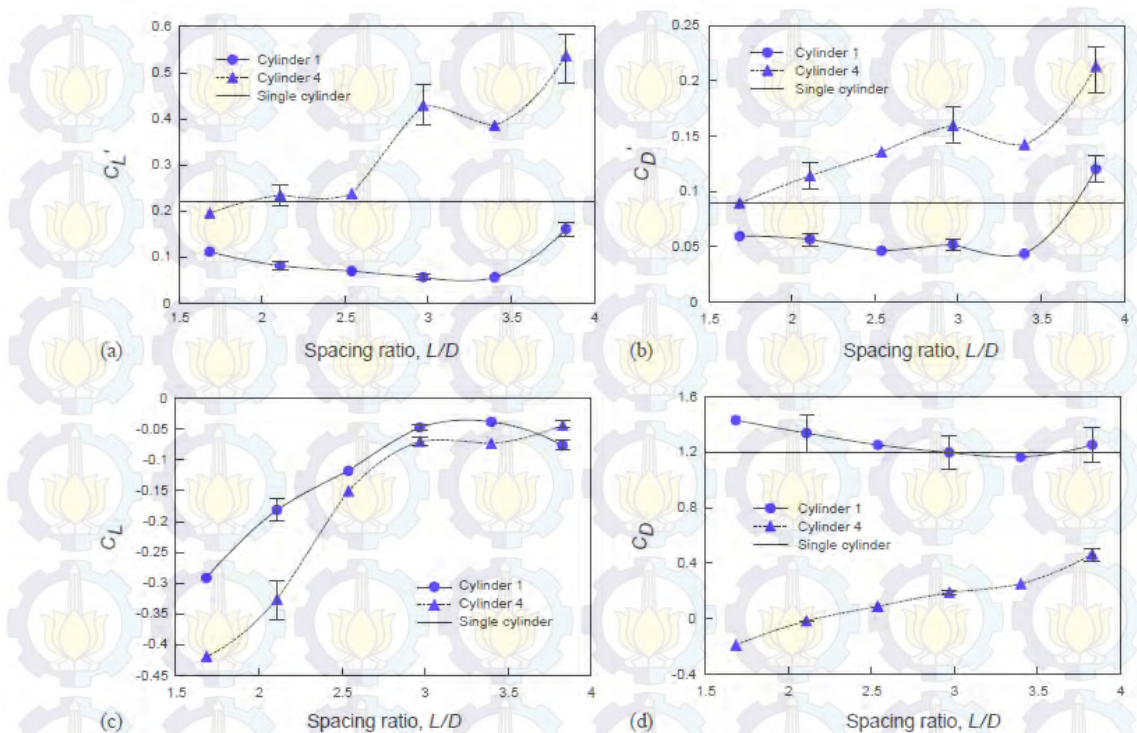


Gambar 2.13. Variasi *Strouhal Number* dengan Rasio L/D (Lam, et. al., 2003b)

Pengurangan lebih lanjut pada rasio L/D hingga 2,97, 2,54, dan 2,11 membuat harga tertingginya tidak teridentifikasi dan hilang. Hal ini menunjukkan bahwa *vortex shedding* dari silinder 1 hilang, dan terjadi fenomena *shear layer reattachment* atau silinder *downstream* menjadi bayangan dari silinder *upstream*.

Apabila rasio L/D dikecilkan lagi sampai 1,69 maka ujung tajam dari *a narrow* dan harga tertinggi akan timbul lagi dalam bentuk gaya lift. St ditentukan sangat dekat dengan silinder 4, ini berarti silinder *upstream* dan *downstream* sangat dekat satu sama lain, sehingga pengaruh *vortex shedding* dari silinder 1 diterima oleh silinder *downstream*.

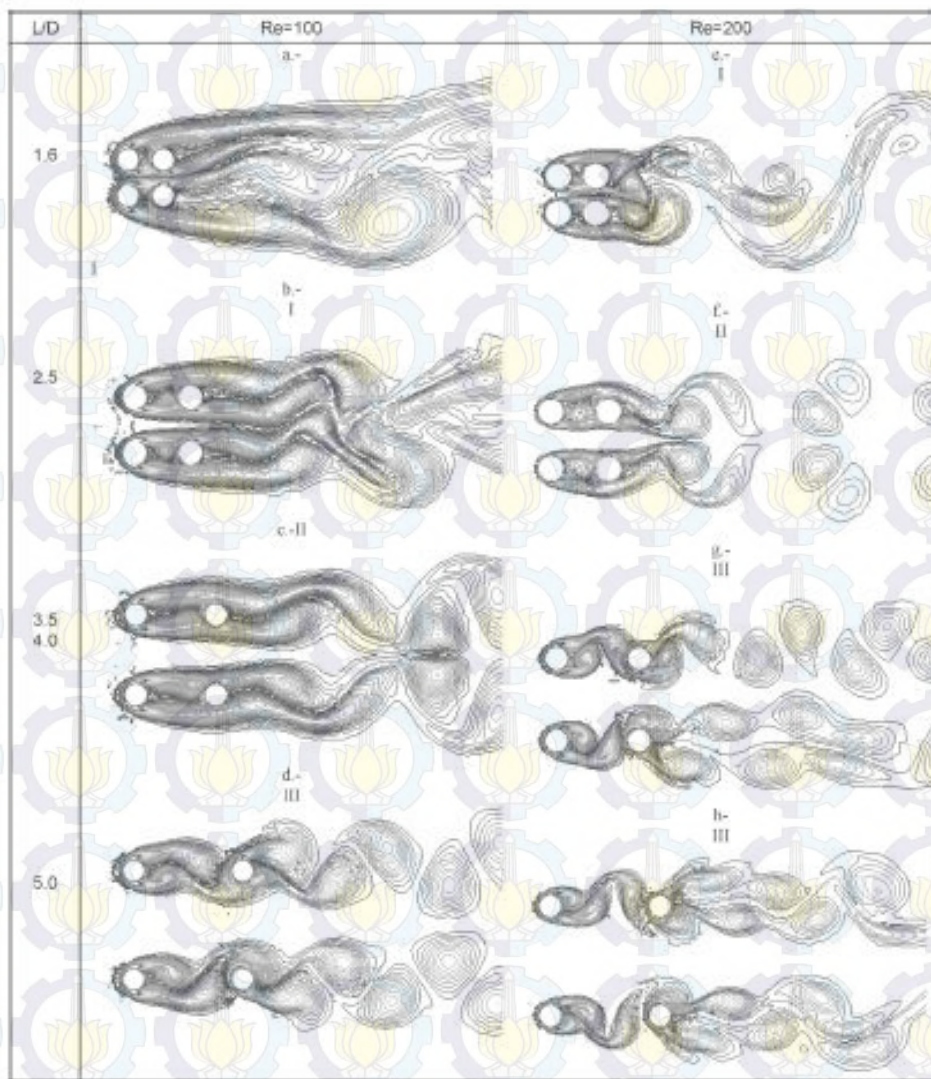
Gambar 2.14 menunjukkan hubungan antara koefisien force meliputi koefisien drag dan lift fluktuasi dengan rasio spasi L/D, dan koefisien drag dan lift rata-rata dengan rasio spasi L/D. Umumnya harga koefisien *lift* dan koefisien *drag* pada silinder 4 adalah dua kalinya silinder 1, dan ini menunjukkan pengaruh yang signifikan dari *vortex shedding* dibelakang silinder *downstream* dan stabilitor pengaruh *shielding flow* pada silinder *upstream*. Juga harga  $C_L'$  hampir dua kalinya harga  $C_D'$  untuk seluruh variasi rasio L/D, yang menarik untuk dicatat bahwa  $C_L'$  dan  $C_D'$  turun secara cepat ketika rasio L/D diturunkan dari 3,83 ke 3,4 untuk silinder 4. Pada posisi ini merupakan transisi pola aliran dari *vortex shedding flow* menuju *shear layer attachment flow*, disisi lain *fully shielded flow* pada silinder 1 pada L/D = 1,69-2,54 variasi dari gaya fluktuasi relatif kecil.



Gambar 2.14. Variasi Koefisien *Force*: (a) Koefisien Lift Fluktuasi, (b) Koefisien Drag Fluktuasi, (c) dan (d) Koefisien Rata-Rata dari Lift dan Drag (Lam, et. al., 2003b)

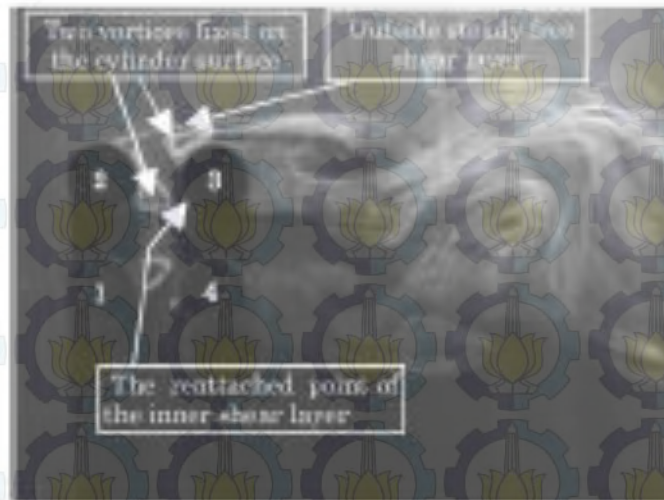
Koefisien *drag* rata-rata pada silinder 1 naik secara bertahap, sementara pada silinder 4 mengalami penurunan ketika rasio  $L/D$  diturunkan. Sebaliknya koefisien *lift* untuk kedua silinder 1 dan 4 negatif dan harganya turun secara cepat pada  $L/D < 2,97$ . Harga negatif ini menunjukkan bahwa silinder 1 dan silinder 4 masing-masing saling menolak satu sama lain, dan menunjukkan adanya interferensi antara 2 baris *side by side* silinder menjadi kuat ketika rasio  $L/D$  dikecilkan.

Penelitian simulasi numerik yang dilakukan oleh Lam, et. al. (2008) berikutnya untuk menjelaskan karakteristik aliran yang tidak terdeteksi pada penelitian eksperimen sebelumnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa perhitungan *force coefficient*, bilangan Strouhal dan transformasi pola aliran sesuai dengan penelitian sebelumnya.



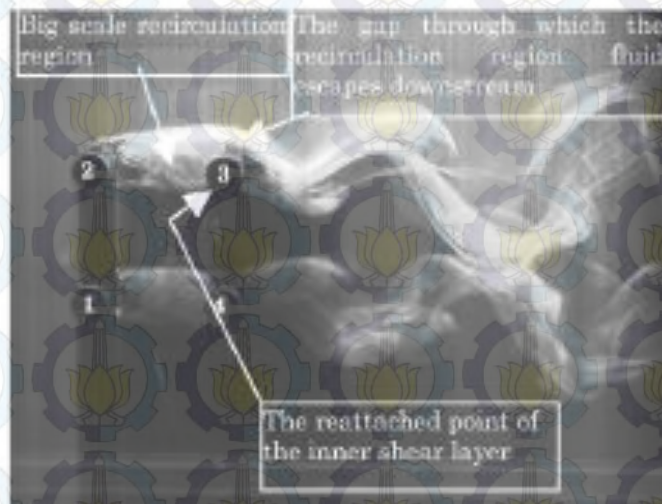
Gambar 2.15. Pola Aliran (I) – (III) yang Ditunjukkan dengan Distribusi *Vorticity* Sekeliling Susunan 4 silinder dengan Simulasi 2-D pada  $Re= 1 \times 10^2$  dan  $2 \times 10^2$  untuk  $L/D= 1,6 \div 5,0$  (Lam, et. al., 2008)

Selain itu melalui simulasi numerik teridentifikasi ada tiga pola aliran yang berbeda disekeliling susunan keempat silinder sirkular tersebut. Pola aliran pertama adalah *outer shear layer* dari silinder *upstream* melingkupi silinder *downstream* (Gambar 2.15 a, b, dan e), yang disebut dengan *stable shielding flow pattern*.



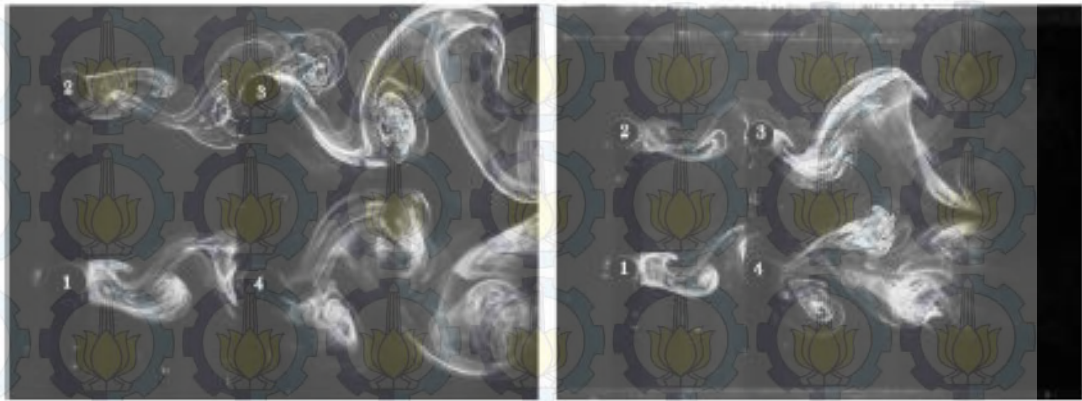
Gambar 2.16. Visualisasi *Stable Shielding Flow Pattern* pada Rasio  $L/D= 1,6$  dengan  $Re= 2 \times 10^2$  (Lam, et. al., 2008)

Pola aliran kedua adalah *inner* dan *outer* dari *free shear layer* menyentuh (*reattach*) pada permukaan silinder *downstream* (Gambar 2.15 c dan f) yang disebut dengan *wiggling shielding flow pattern*.



Gambar 2.17. Visualisasi *Wiggling Shielding Flow Pattern* pada Rasio  $L/D= 3,5$  dan  $4,0$  dengan  $Re= 2 \times 10^2$  (Lam, et. al., 2008)

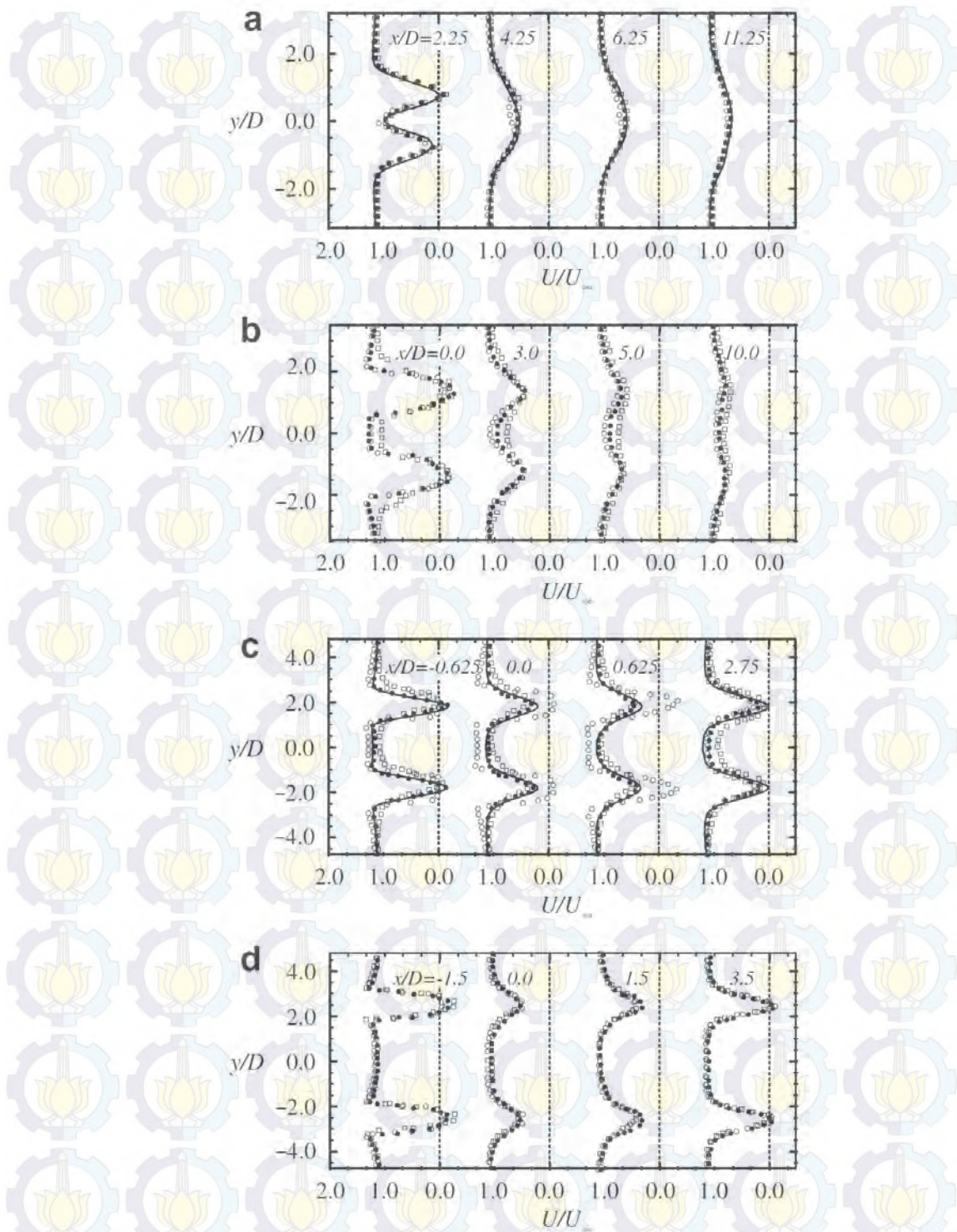
Pola aliran ketiga adalah *free shear layer* dari silinder *up-stream* bergelombang membentuk *vortices* dan melanggar permukaan silinder *down-stream* (Gambar 2.15 d, g, dan h), yang disebut *vortex shedding flow pattern*.



Gambar 2.18. Visualisasi *Vortex Shedding Flow Pattern* pada Rasio  $L/D= 5,0$  dengan  $Re= 2 \times 10^2$  (Lam, et. al., 2008)

Perubahan pola aliran dari satu aliran ke aliran yang lain tersebut menyebabkan perubahan pada *force coefficient* dan bilangan *Strouhal*. Visualisasi dari ketiga pola aliran masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2.16, Gambar 2.17, dan Gambar 2.18.

Penelitian yang dilakukan oleh Lam dan Zou (2009) mengamati aliran turbulen pada empat silinder sirkular yang tersusun secara *in line square*. Pada Gambar 2.19 posisi  $L/D = 1,5$  dan  $x/D= 2,25$  (Gambar a) ketika  $Re$  dinaikkan, tingkat kesimetrian dari profil kecepatan wake menurun. Harga minimum dari kecepatan *streamwise* rata-rata bervariasi dari 0,25 ke 0 pada  $y/D= -0,75$ , sementara harga tersebut selalu berkisar -0,2 pada  $y/D= 0,75$  ketika  $Re= 1,1 \times 10^4$  sampai  $2 \times 10^4$ . Ini mempunyai implikasi bahwa aliran selalu ada pada daerah aliran kembali dibelakang silinder *downstream* 3. Sebagai hasilnya panjang pembentukan *vortex* tidak sama untuk belakang kedua silinder *downstream*, dan ini menunjukkan bahwa struktur aliran dibelakang silinder *downstream* bias ke salah satu sisi, dan ini yang disebut kondisi *bistable* (sama halnya pada susunan *side by side* dimana pada bagian belakang terjadi *narrow* dan *wide wake*) pada seluruh bilangan  $Re$ . Berikutnya pada posisi lebih kebelakang  $x/D= 6,25$  sampai  $x/D= 11,25$  distribusi kecepatan *streamwise* rata-rata pada arah normal menunjukkan bahwa struktur *wake* dibelakang silinder *downstream* 3 dan 4 membentuk struktur campuran dengan *wake* tunggal yang lebar.



Gambar 2.19. Perbandingan Distribusi Kecepatan pada Beberapa Posisi  $x$  dengan Rasio  $L/D$ : a) 1,5; b) 2,5; c) 3,5; d) 5,0 dan  $Re$ :  $1,1 \times 10^4$ ;  $1,5 \times 10^4$ ;  $2 \times 10^4$  (Lam dan Zou, 2009)

Berikutnya distribusi kecepatan *streamwise* rata-rata pada arah normal dengan rasio  $L/D = 2,5$  (Gambar 2.19b) dibelakang kedua silinder *downstream*



(silinder 3 dan 4), distribusi kecepatan pada dasarnya tidak berbeda untuk seluruh bilangan  $Re$  yang diuji. Harga kecepatan *streamwise* rata-rata pada  $x/D = 0$  adalah negatif dibelakang kedua silinder *upstream* (silinder 1 dan 2). Hal ini menunjukkan bahwa *free shear layer* dari silinder *upstream reattach* atau *roll-up* sangat dekat silinder *downstream* dan membangkitkan aliran balik antara silinder *upstream* dan *downstream*. Struktur *wake* dibelakang silinder *downstream* simetri dengan pusat datar dari  $y/D = 0$ . Pengaruh interferensi atau daerah campuran *wake* satu dengan yang lain tidak teramati berbeda pada posisi *downstream* berikutnya.

Berikutnya rasio kritis  $L/D = 3,5$  (Gambar 2.19c) pada posisi  $x/D = -0,625$ , harga kecepatan *streamwise* rata-rata adalah negatif (mencapai  $-0,2$  dan  $-0,1$  untuk  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $2 \times 10^4$ ) dibelakang silinder *upstream*, dan pada  $x/D = 0$  dan  $x/D = 0,625$  harga  $u/U_\infty$  adalah positif pada  $y/D = \pm 1,75$  untuk  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $2 \times 10^4$ . Untuk  $Re = 1,1 \times 10^4$  daerah aliran balik maksimum terjadi pada  $x/D = 0,625$  (mencapai  $u/U_\infty = -0,4$ ) dan harga kecepatan mendekati 0 pada  $y/D = \pm 1,75$  dan  $x/D = 0$  dan  $-0,625$ . Ini menunjukkan bahwa aliran dibelakang silinder *upstream* dalam kondisi aliran balik maksimum dan *vortex shedding* dari silinder *upstream* terjadi untuk  $Re = 1,5 \times 10^4$  dan  $2 \times 10^4$ , sementara *free shear layer* dari silinder *upstream roll up* membentuk *vortices* sebelum silinder *downstream* dan *vortices* terbentuk segera pada *downstream* cylinder 3 dan 4. Selanjutnya, juga ada penurunan panjang pembentukan *vortex* dibelakang silinder *upstream* ketika  $Re$  dinaikkan dari  $1,5 \times 10^4$  menjadi  $2 \times 10^4$ . Pada  $x/D = 2,75$ , harga  $u/U_\infty =$  menunjukkan penurunan pada posisi  $y/D = \pm 1,75$  ketika  $Re$  meningkat. Ini menunjukkan bahwa daerah terbentuknya *wake* pada silinder *downstream* pada  $Re = 1,1 \times 10^4$  lebih pendek dari  $Re$  yang lebih besar. Ini dikarenakan *shear layer* dari silinder *upstream roll-up* sangat dekat dengan bagian front dari silinder *downstream* pada  $Re = 1,1 \times 10^4$ , menciptakan aliran yang lebih turbulen dekat permukaan dari silinder *downstream* dan jadi membangkitkan pengurangan daerah pembentukan *vortex* dibelakang silinder *downstream*.

Pada  $L/D = 5,0$  dengan  $x/D = -1,5, 0, 1,5$  distribusi kecepatan *streamwise* rata-rata normal menunjukkan fenomena yang mirip seperti pada  $L/D = 3,5$  pada  $Re = 1,5 \times 10^4$ . Ini menunjukkan bahwa aliran dibelakang silinder *upstream* pada kondisi aliran balik yang maksimal dan mempertunjukkan pola aliran yang serupa

dimana *free shear layer* dari silinder *upstream* roll up kedalam *vortice mature* dan menabrak permukaan silinder *downstream* pada bilangan Re tersebut. Yang menarik bahwa distribusi kecepatan *streamwise* rata-rata pada  $x/D= 3,5$  sangat serupa/mirip dengan  $x/D= -1,5$ . Hal itu juga terjadi pada silinder tunggal pada bilangan Re yang serupa.



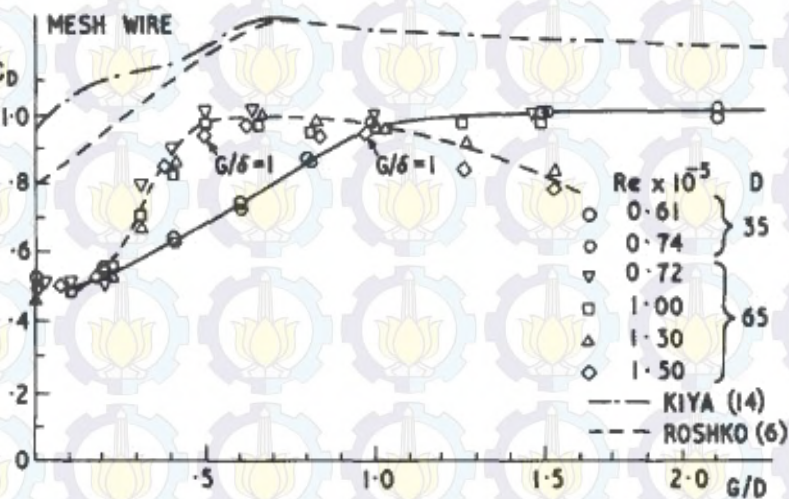
Gambar 2.20. *Vorticity* dan *Velocity Field* pada Rasio  $L/D= 1,5$  (Lam dan Zou, 2009)

Gambar 2.20 menunjukkan *vorticity field* dan *velocity field* pada rasio  $L/D = 1,5$  pada bilangan  $Re= 1,1 \times 10^4 - 2 \times 10^4$ . Ini bisa dilihat menunjuk pada karakteristik  $St$ , *free shear layer* dari silinder *upstream* melingkupi silinder *downstream* seutuhnya pada seluruh bilangan Re ini menunjukkan pola aliran yang *bistable* dibelakang silinder *downstream*. Struktur *wake* serupa dengan yang diamati oleh Lam dan Lo pada  $L/D = 1,54$  dan  $Re= 2,1 \times 10^4$ . Perubahan *narrow* dan *wide wake* dibelakang silinder *downstream* juga teramati pada setiap bilangan Re, tetapi hakekat *bistable* dari aliran *wake* tampak terjadi secara random dengan defleksi keatas dan kebawah.

## 2. Aliran melintasi silinder sirkular tunggal dekat dinding datar

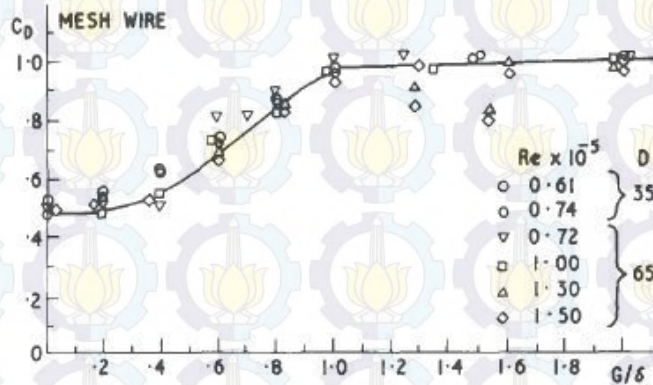
Aliran yang melintasi suatu *bluff body* termasuk bentuk silinder yang diletakkan dekat dinding akan saling berinteraksi, dimana lapis batas pada silinder akan berinteraksi dengan lapis batas dari dinding datar. Dengan adanya interaksi tersebut akan menimbulkan gaya-gaya aerodinamik pada silinder tersebut.

Berdasarkan penelitian Zdravkovich (1985) menunjukkan bahwa perubahan rasio gap dengan diameter ( $G/D$ ) relatif tidak mempengaruhi terhadap *drag force*, tetapi rasio gap dengan ketebalan lapis batas ( $G/\delta$ ) lebih berpengaruh terhadap *drag force*. Pada penelitian ini rasio ketebalan lapis batas turbulen dinding dan diameter silinder ( $\delta/D$ ) adalah 0,52 dan 0,97, masing-masing untuk silinder besar dan silinder kecil. Selanjutnya dengan mengutip penelitian dari Kiya, Zdravkovich menjelaskan bahwa perubahan *drag force* mulai terjadi ketika dicapai nilai rasio  $G/D_s$  antara 0,4 dan 0,5 bergantung pada diameter silinder. Hasil ini lebih dirinci lagi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.21, bahwa penurunan *drag coefficient* mulai terjadi pada  $G/D=0,52$  untuk diameter silinder 65 mm, dan  $G/D=0,97$  untuk diameter silinder 35 mm.



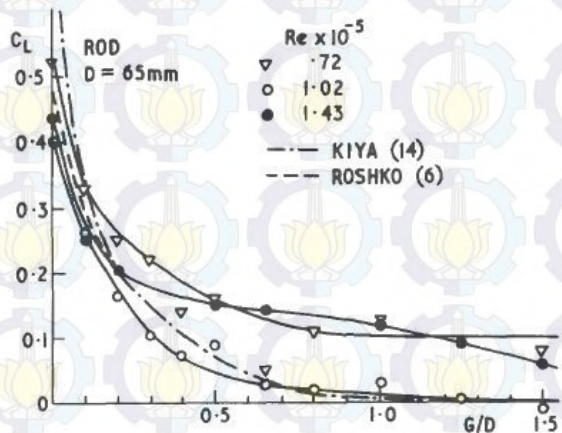
Gambar 2.21. Variasi Koefisien Drag dengan Rasio Gap dengan Diameter ( $G/D$ ) (Zdravkovich, 1985)

Tetapi apabila dihubungkan dengan rasio gap dengan ketebalan lapis batas ( $G/\delta$ ), maka penurunan koefisien drag mulai terjadi pada  $G/\delta=1,0$  seperti ditunjukkan pada Gambar 2.22



Gambar 2.22. Variasi Koefisien Drag dengan Rasio Gap dengan Ketebalan Lapis Batas ( $G/\delta$ ) (Zdravkovich, 1985)

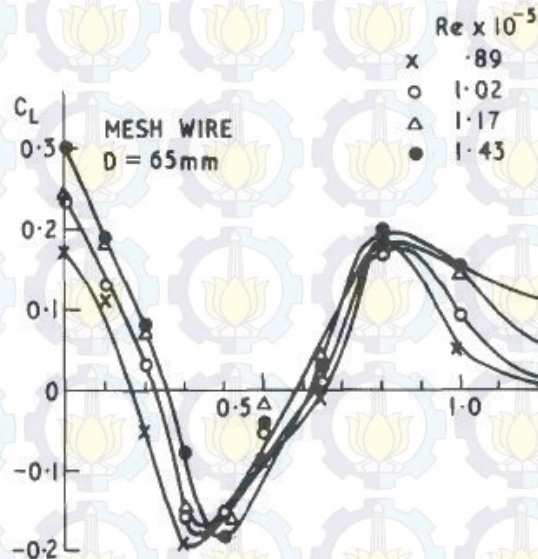
Sementara mengutip dari Gotkun, Buresti dan Launaro, Zdravkovich menjelaskan bahwa rasio  $G/D_s = 0,8$  baru mulai mempengaruhi perubahan *drag force*. Selain itu klasifikasi lapis batas yang terjadi pada dinding datar juga mempengaruhi *drag force*, hal mana untuk lebih merincikan pendapat dari Roskho bahwa perubahan *drag force* mulai terjadi ketika rasio  $G/D$  sama dengan ketebalan lapis batas. Diperkuat lagi dari hasil penelitian bersama Bearman, Zdravkovich menemukan bahwa penurunan *base pressure coefficient* mulai terjadi ketika  $G/D < 0,8$ .



Gambar 2.23. Variasi Koefisien Lift dengan Rasio Gap ( $G/D$ ) dengan pengganggu rod (Zdravkovich, 1985)

Sementara terkait dengan *lift force*, menurut penelitian Zdravkovich (1985) dan beberapa penelitian sebelumnya (Kiya dan Roskho) menunjukkan

bahwa kenaikan *lift force* yang tinggi baru dimulai ketika rasio gap dengan diameter silinder ( $G/D$ ) di bawah 0,2, dan gaya tersebut mencapai nilai yang maksimum ketika rasio  $G/D$  tersebut sama dengan 0 atau dengan kata lain silinder tersebut berada pada dinding datar (lihat Gambar 2.23 dan Gambar 2.24). Fenomena ini berlaku baik pada lapis batas laminar maupun turbulen.



Gambar 2.24. Variasi Koefisien Lift dengan Rasio Gap ( $G/D$ ) dengan Pengganggu Kawat Mesh (Zdravkovich, 1985)

Tabel 2.1. Interaksi lapis batas dinding dengan silinder

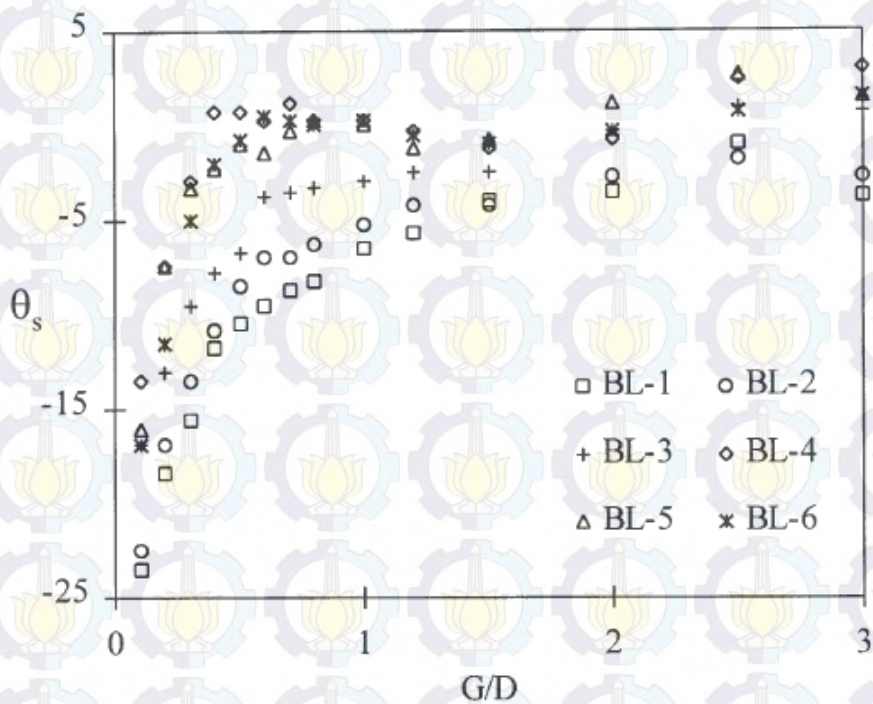
$G/D$	$\infty$	1	0.68	0.34
$\delta$ (mm)	44	34	32	16
$\delta/D$	0.68	0.52	0.49	0.24
$G/\delta$	$\frac{1}{2}$	1.91	1.41	1.41

(Zdravkovich, 1985)

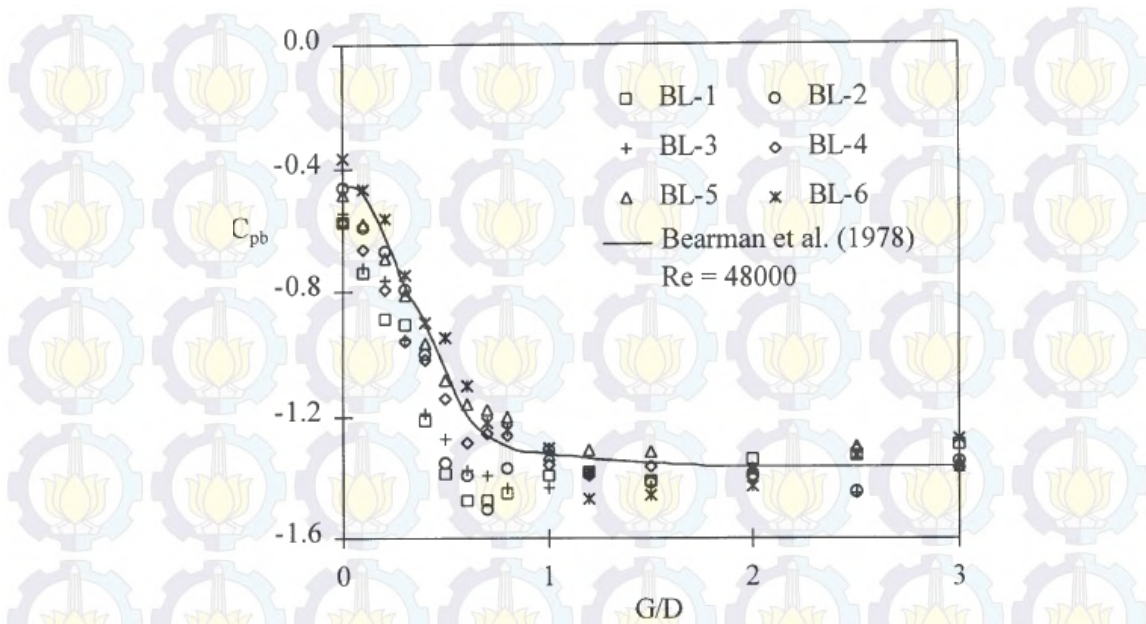
Pengaruh lapis batas dinding (jenis dan ketebalan) terhadap aliran di sekeliling silinder sirkular tunggal dikaji lebih mendalam oleh Lei, et. al. (1999). Dengan menempatkan silinder sirkular pada jarak 2D, 3D, dan 11D (BL-1, BL-2, dan BL-3) dari *leading edge* pada dinding datar yang tanpa diberi gangguan, dan dinding datar yang diberi gangguan *steel rod* dengan penempatan yang divariasi 3 kondisi (BL-4, BL-5, dan BL-6) terhadap posisi silinder sirkular yang tetap (11D

dari *leading edge*) untuk memperoleh variasi ketebalan lapis batas dan jenis lapis batas, Lei et. al mengkaji tentang pola aliran yang terbentuk di sekeliling silinder dan karakteristik aerodinamik yang timbul pada silinder sirkular. Rasio gap antara silinder sirkular dengan plat datar divariasikan mulai dari  $G/D = 0$  sampai dengan  $G/D = 3,0$  dan ketebalan lapis batas diukur melalui pengukuran *velocity profile* pada posisi dimana silinder sirkular itu akan ditempatkan, dan saat pengukuran dilakukan tanpa silinder terpasang.

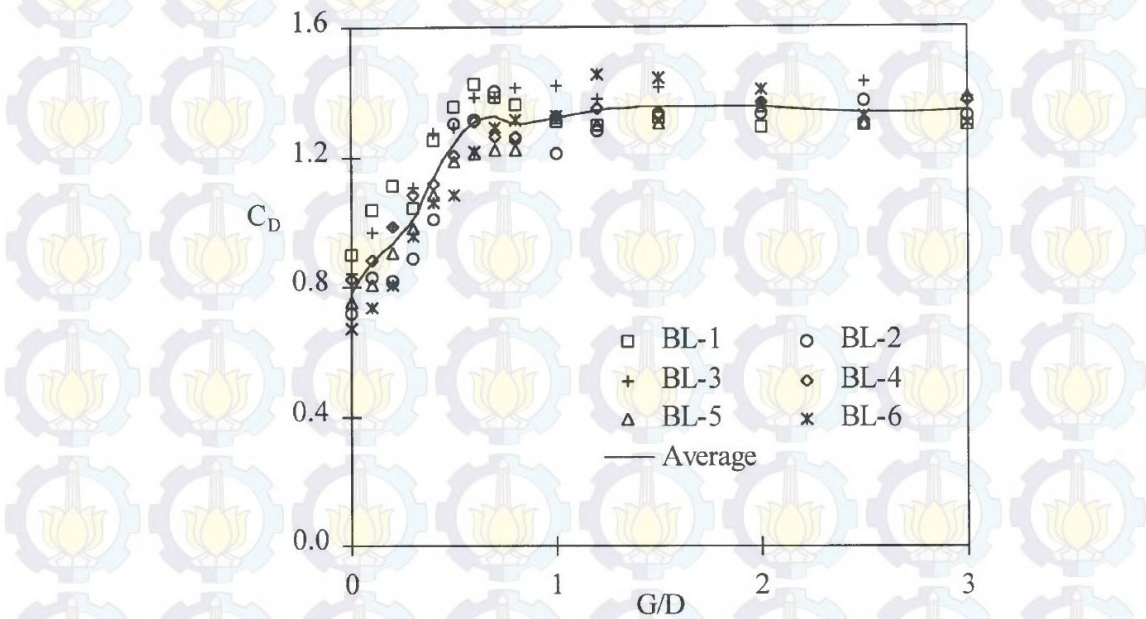
Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio gap, jenis dan ketebalan lapis batas mempengaruhi secara signifikan terhadap distribusi tekanan rata-rata di sekeliling silinder. Hal ini dapat diketahui dari perubahan posisi titik stagnasi pada silinder sirkular dan nilai *base pressure* yang bervariasi (lihat Gambar 2.25 dan Gambar 2.26). Selanjutnya diantara kedua variabel yang dimanipulasi, variabel rasio gap mempunyai pengaruh yang lebih kuat dibandingkan dengan lapis batas (jenis dan ketebalan) terhadap distribusi tekanan di sekeliling silinder.



Gambar 2.25. Variasi Posisi Titik Stagnasi dengan Rasio Gap ( $G/D$ ) pada Berbagai Lapis Batas (Lei et. al, 1999)



Gambar 2.26. Variasi Nilai *Base Pressure* dengan Rasio Gap ( $G/D$ ) pada Berbagai Lapis Batas (Lei et. al, 1999)

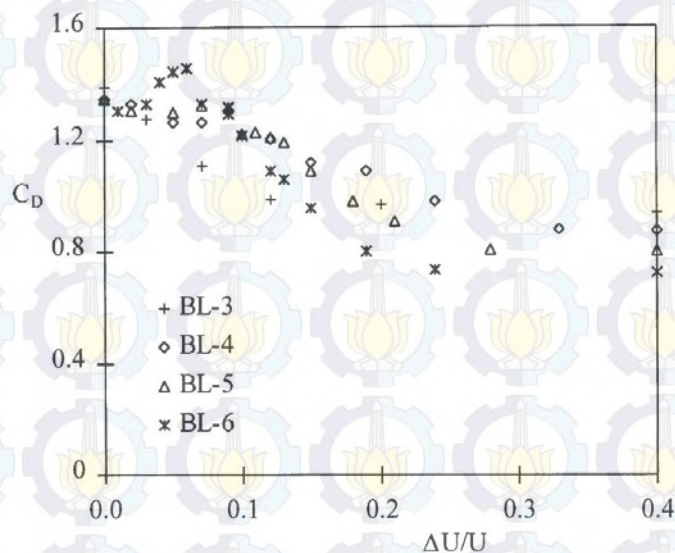


Gambar 2.27. Koefisien Drag Rata-Rata ( $C_D$ ) dengan Rasio Gap (Lei et. al, 1999)

Variasi antara koefisien drag rata-rata ( $C_D$ ) dengan rasio gap (seperti pada Gambar 2.27) menunjukkan adanya sedikit penyebaran dari beberapa ketebalan lapis batas, terutama pada rasio  $G/D > 1,0$ . Hal ini sesuai dengan pengamatan terdahulu saat pengukuran distribusi tekanan, bahwa apabila silinder ditempatkan pada dinding

( $G/D = 0$ ) maka diperoleh drag minimum karena base pressure nya maksimum. Base pressurnya berkurang, yang berarti dragnya meningkat ketika rasio gap dinaikkan hingga mencapai  $G/D = 0,6-0,7$ . Juga dapat diketahui bahwa harga koefisien drag pada lapis batas yang tipis lebih besar dibanding dengan lapis batas yang tebal, walaupun hal ini tidak berlaku untuk semua rasio gap.

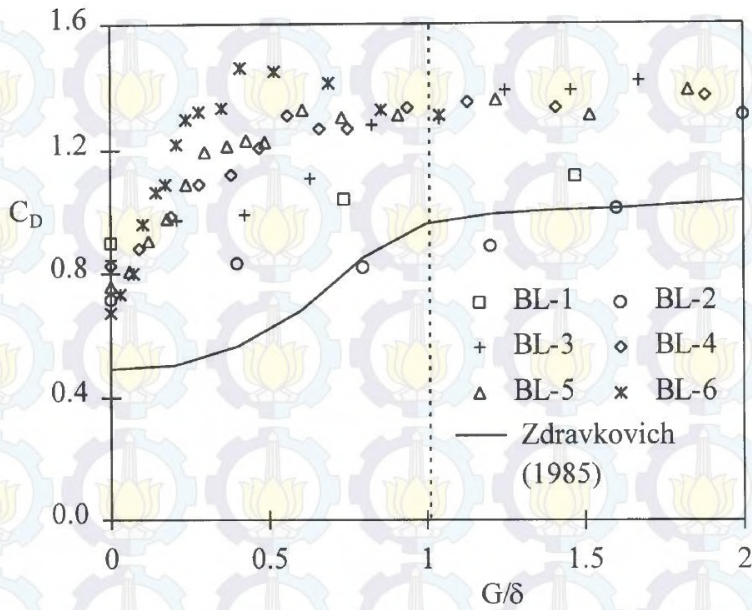
Hubungan antara koefisien drag rata-rata dengan gradien kecepatan (perbedaan kecepatan antara *upper side* dan *lower side* silinder) dapat dilihat pada Gambar 2.28 di bawah ini. Terjadinya gradien kecepatan ketika *lower side* silinder terbenam dalam lapis batas. Dari gambar itu juga dapat diketahui bahwa harga  $C_D$  menurun dengan cepat ketika gradien kecepatan meningkat (pada daerah 0-0,1), tetapi pada beberapa ketebalan lapis batas  $C_D$  tidak sensitif terhadap gradien kecepatan.



Gambar 2.28. Koefisien Drag Rata-Rata ( $C_D$ ) dengan Gradien Kecepatan (Lei et. al, 1999)

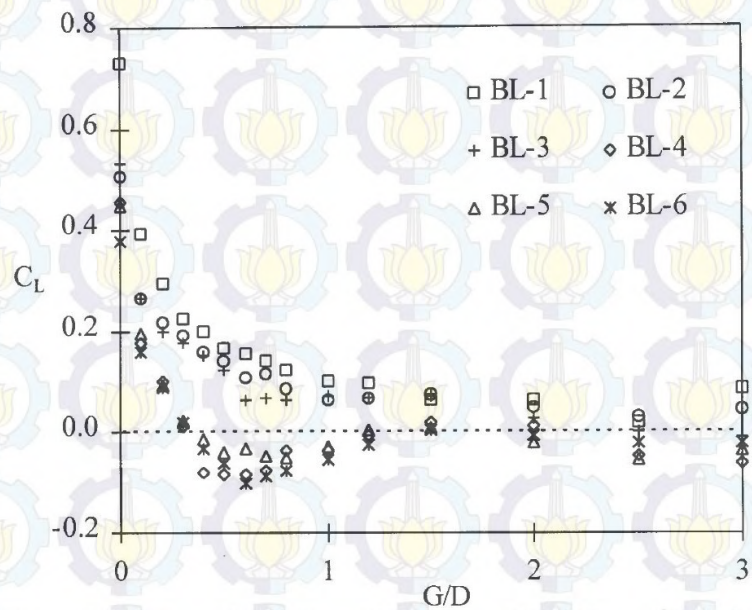
Hubungan antara koefisien drag rata-rata ( $C_D$ ) dengan rasio  $G/\delta$  dapat dilihat pada Gambar 2.29 di bawah ini. Sesuai dengan pendapat Zdravkovich, bahwa  $C_D$  hampir tidak dipengaruhi oleh gap rasio, sampai *lower side* dari silinder tidak terbenam dalam lapis batas. Hal ini dapat diketahui dari hasil perhitungan  $C_D$  ketika pengujian distribusi tekanan pada silinder yang ditempatkan pada ketebalan lapis batas (BL) 1-3.





Gambar 2.29. Koefisien Drag Rata-Rata ( $C_D$ ) dengan Rasio  $G/\delta$  (Lei et. al, 1999)

Hubungan antara koefisien lift rata-rata ( $C_L$ ) dengan rasio gap  $G/D$  dapat dilihat pada Gambar 2.30 berikut ini. Berdasarkan gambar tersebut, secara umum dapat dikatakan bahwa harga  $C_L$  dipengaruhi oleh rasio gap  $G/D$ , tetapi kondisi ini hanya berlaku pada  $G/D \leq 1,5$ .



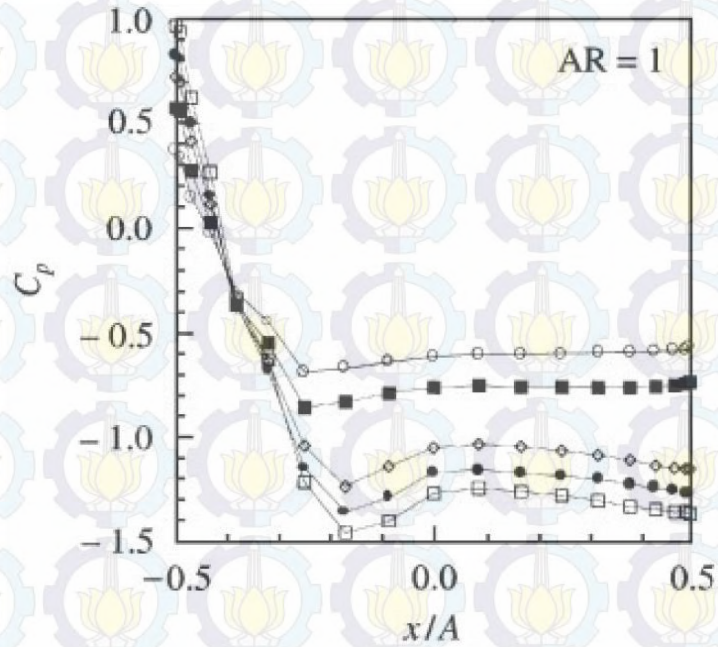
Gambar 2.30. Koefisien Lift Rata-Rata dengan Rasio  $G/D$  (Lei et. al, 1999)

Artinya pada rasio  $G/D$  lebih besar dari 1,5 maka harga  $C_L$  mendekati 0. Variasi yang terjadi pada harga  $C_L$  dikarenakan pada saat silinder diletakkan dekat dinding ( $G/D \leq 1,5$ ) terjadi perubahan posisi titik stagnasi pada silinder. Melalui gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan dalam penurunan harga  $C_L$  antara lapis batas tanpa pengganggu dan lapis batas dengan pengganggu, dimana penurunan harga  $C_L$  dengan pengganggu terjadi lebih cepat. Adanya pengganggu menyebabkan distribusi tekanan pada sisi gap menjadi negatif, sehingga menimbulkan *downforce* (gaya yang menekan silinder ke arah dinding). Tetapi *downforce* ini tidak mampu menekan silinder ke bawah ketika rasio gap masih relatif kecil, artinya gaya lift yang timbul karena pengaruh dinding masih lebih besar dari *downforce*.

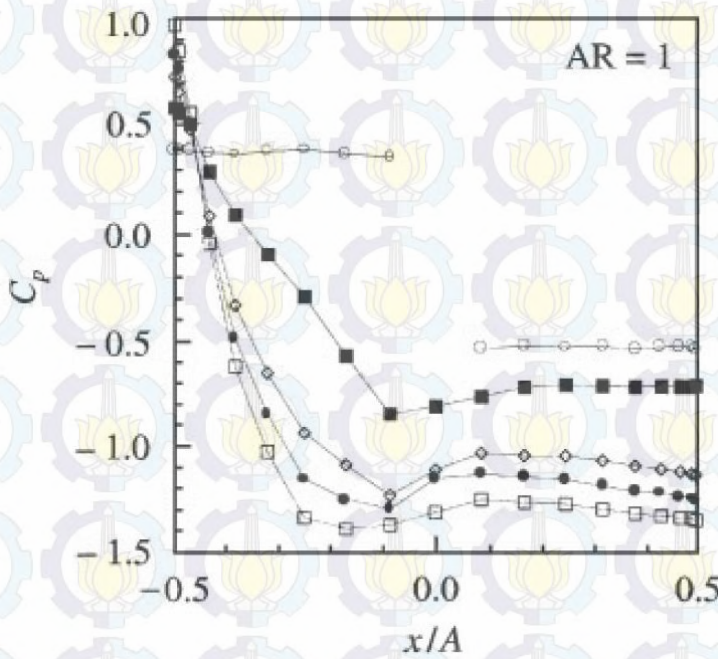
Choi dan Lee (2000), mengamati pengaruh variasi rasio jarak gap dengan tinggi penampang silinder ( $G/B$ ) terhadap karakteristik aliran di sekeliling silinder elip dan silinder sirkular yang diletakkan dekat dinding. Pada penelitian ini ketebalan lapis batas turbulen dinding ( $\delta$ ) dimana silinder ditempatkan adalah 75 mm, sementara diameter minor silinder elip dan silinder sirkular masing-masing adalah 21.2 mm. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa makin besar rasio  $G/B$ , *drag coefficient* kedua silinder makin bertambah besar sedangkan *lift coefficient* makin berkurang. Pada keseluruhan variasi gap, *drag coefficient* dari silinder elip setengahnya dari silinder sirkular. Pada rasio  $G/B$  yang lebih besar dari nilai kritis  $G/B=4$ , *vortices* yang terbentuk di daerah dekat *wake* semakin beraturan. Variasi distribusi tekanan permukaan pada silinder elip lebih kecil dibandingkan pada silinder sirkular untuk berbagai rasio gap, terutama pada *upper surface*. Pada rasio gap yang kecil, akan memaksa aliran melalui gap tersebut sehingga membatasi *vortex shedding* terutama pada *lower side* dari silinder *wake*. Efek pemaksaan dari silinder elip lebih dibandingkan pada silinder sirkular, *wake region* di belakang silinder elip lebih kecil, dan profil kecepatan cenderung berinteraksi lebih cepat dengan lapis batas dari plat datar (lihat Gambar 2.31 di bawah ini).

Dari Gambar 2.31 di atas juga dapat diketahui bahwa ketika silinder diletakkan pada dinding ( $G/B=0$ ), maka koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada permukaan

*lower* mempunyai harga positif yang relatif tetap pada *front windward surface* dan harga negatif pada *leeward surface*.



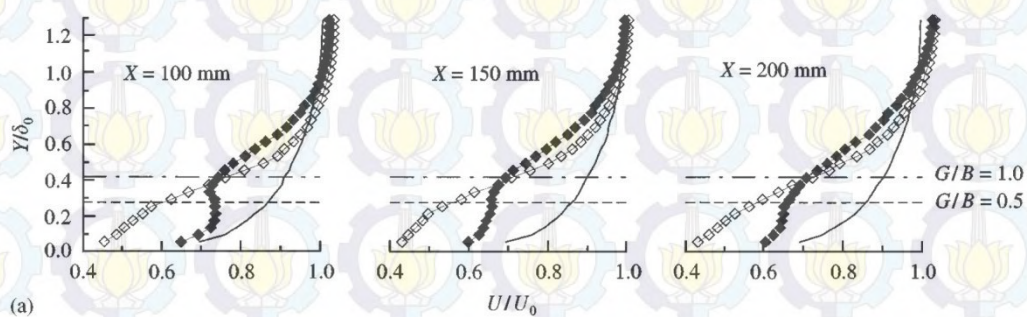
(a)



(b)

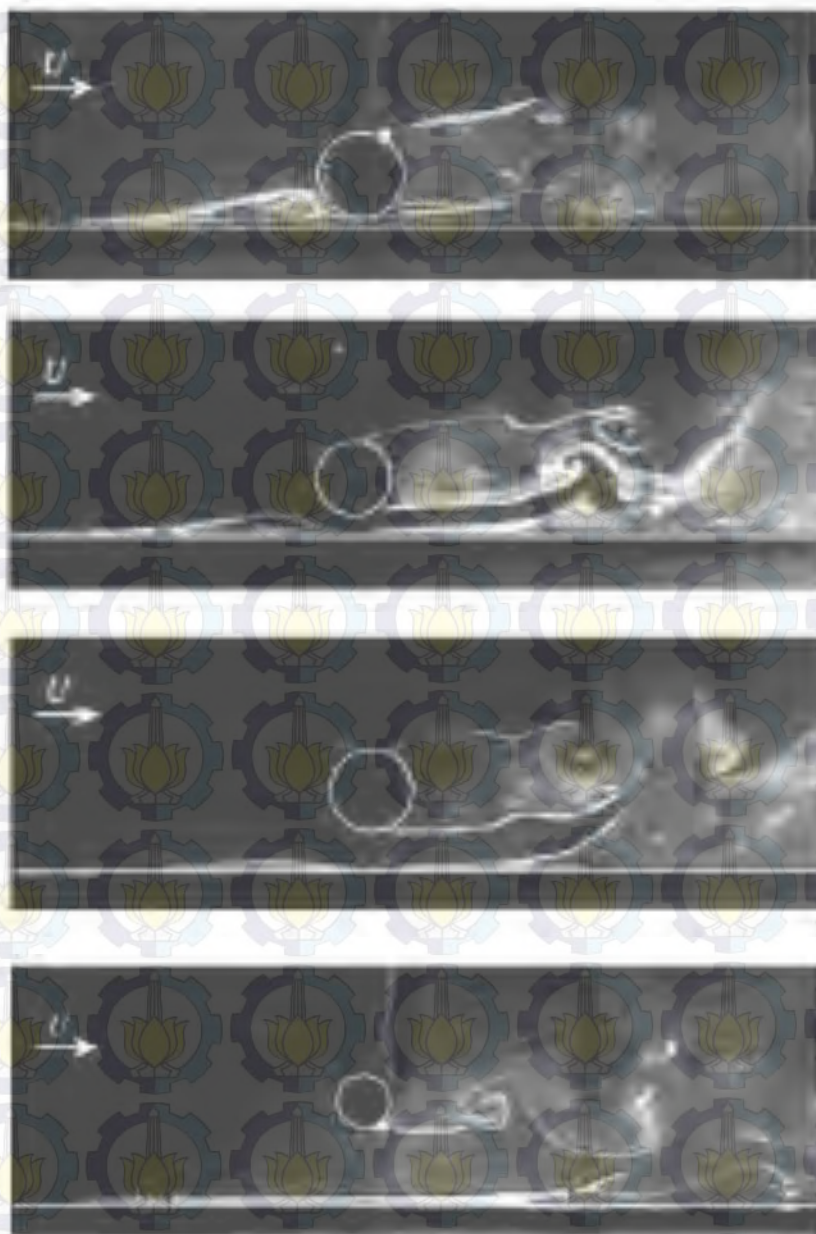
Gambar 2.31. Distribusi Tekanan pada *Upper* (a) dan *Lower* (b) Silinder dengan Berbagai G/B (Choi dan Lee, 2000)

Hubungan antara profil kecepatan streamwise rata-rata pada berbagai posisi  $x$  (diukur dari koordinat awal) dapat dilihat pada Gambar 2.32 berikut ini. Melalui gambar tersebut dapat dilihat perbedaan profil kecepatan tanpa silinder (garis lurus) dan dengan silinder pada rasio  $G/B= 0,5$  dan  $G/B= 1,0$ , dimana vortex shedding tampak pada bagian near wake pada rasio gap  $G/B > 0,5$ . Dibanding dengan  $G/B= 1,0$  pada rasio gap yang kecil adanya silinder menyebabkan aliran tertahan sehingga profil kecepatan aliran dekat permukaan dinding mempunyai harga yang lebih kecil.



Gambar 2.32. Profil Kecepatan Streamwise Rata-Rata pada Berbagai Posisi  $x$  (Choi dan Lee, 2000)

Sementara Price et. al. (2002) yang melakukan penelitian visualisasi dengan memvariasi jarak gap antara dinding datar dan silinder sirkular dari  $0 \leq G/D \leq 2,0$  pada kondisi lapis batas yang diasumsikan laminar dan ketebalan lapis batas ( $\delta$ ) dimana silinder tersebut ditempatkan adalah  $0,46-0,42D$ , memperoleh hasil bahwa pola aliran dapat diklasifikasikan menjadi empat kategori atau region yang berbeda (lihat Gambar 2.33). Pada  $G/D= 0$  dan  $0,125$  (*very small gap ratios*) aliran di gap sangat lemah, dan separasi dari lapis batas dinding terjadi pada silinder *upstream* dan *downstream*. Terjadi separasi *bubble* pada *upstream* silinder, yang dilanjutkan dengan *reattachment* aliran pada dinding ketika melalui gap. *Outer shear layer* memiliki vortisitas yang lebih besar dari *inner shear layer*, tetapi *shear layer* tersebut meninggalkan silinder dan tidak membentuk vortex. Sementara *inner shear layer* setelah melalui gap, juga akan meninggalkan dinding. Meskipun *vortex shedding* yang terbentuk tidak beraturan, tetap terbentuk *outer shear layer* secara periodik.

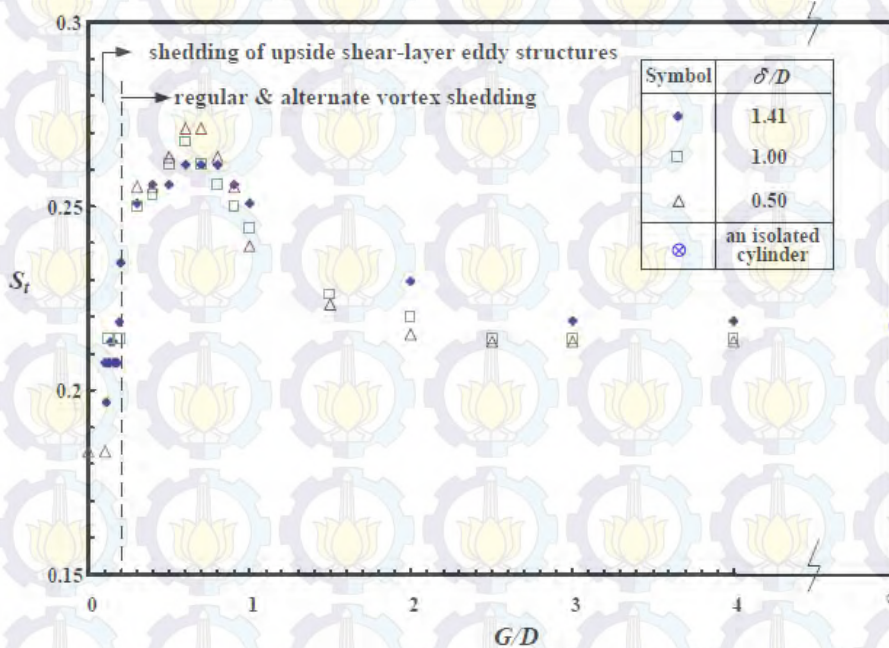


Gambar 2.33. Visualisasi Aliran pada Berbagai Rasio G/D: 0,125; 0,25; 0,5; dan 1,5 (Price et. al., 2002)

Pada  $G/D = 0,250$  dan  $0,375$  (*small gap ratios*) pola aliran mirip seperti pada  $G/D \leq 0,125$  tetapi sekarang mulai ada kombinasi antara *inner shear layer shedding* dari silinder dengan lapis batas dinding. Separasi *bubble* pada *upstream* silinder lebih kecil dibanding *very small gap ratios*, dan semakin kecil ketika rasio gap  $G/D$  meningkat. Sementara aliran yang melalui gap mengalami percepatan, sehingga aliran tersebut *reattachment* pada dinding. *Inner shear layer* dari

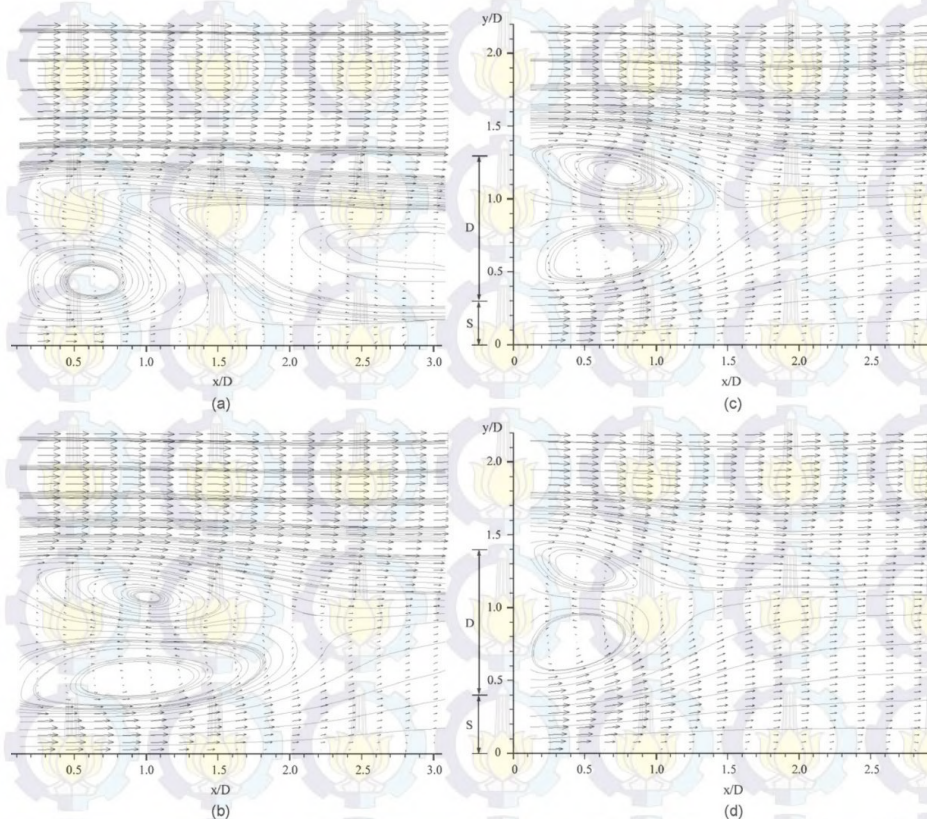
silinder dan *shear layer* dinding mempunyai arah vortisitas yang berlawanan, sedangkan *outer shear layer* mulai *curl up*. Pada  $G/D= 0,50$  dan  $0,75$  (*intermediate gap ratios*) *inner* dan *outer shear layer* silinder *curl-up* mulai membentuk *vortex shedding*, dan disini dikarakterkan sebagai onset *vortex shedding* dari silinder. Separasi pada dinding *upstream* silinder masih terjadi karena masih adanya separasi *bubble* pada *upstream* silinder, meskipun bertambah kecil dibanding *intermediate gap ratios*. Separasi dari dinding pada *downstream* silinder terjadi berdekatan dengan vortex yang terbentuk, dan bergabung dengan *vortex shedding* dari silinder. Dan pada  $G/D= 1,0, 1,5,$  dan  $2,0$  (*large gap ratios*) fenomena aliran mendekati silinder sirkular yang terisolasi, tidak ada separasi dari lapis batas dinding pada *upstream* silinder. Walaupun pada *downstream* silinder *vortex shedding* yang dibentuk silinder mempengaruhi lapis batas dinding, sehingga mengalami separasi. Vortisitas dari silinder dan dari dinding mempunyai arah yang berlawanan, dan ini akan semakin berkurang ketika rasio gap semakin bertambah.

Serupa dengan Price et. al, penelitian yang dilakukan oleh Lin et. al. (2005 dan 2008) pada  $Re= 7,8 \times 10^2$ , mengkarakteristikan fenomena aliran di daerah *wake* menjadi 4 (empat) region:



Gambar 2.34. *Strouhal Number* dengan Rasio Gap pada  $Re= 7,8 \times 10^2$  (Lin et. al., 2008)

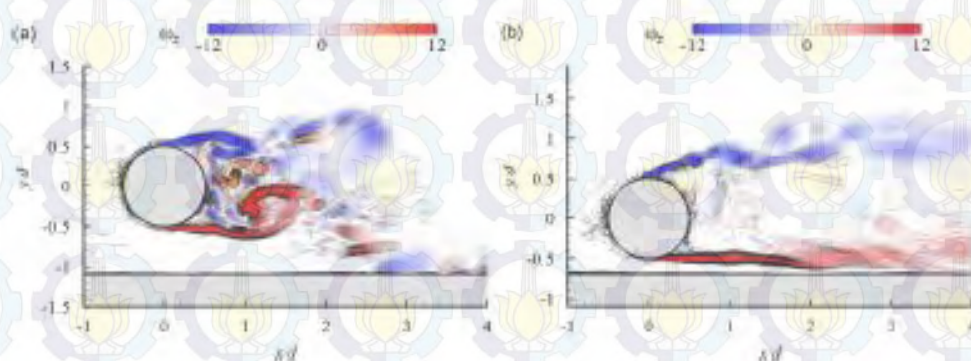
(a)  $G/D \geq 3$ , frekuensi *vortex shedding* hampir tidak dipengaruhi oleh plat datar atau dianalogikan seperti silinder terisolasi, dan  $St$  konstan; (b)  $0,6 \leq G/D < 3$ , frekuensi *vortex shedding* meningkat; (c)  $0,2 \leq G/D < 0,6$ , frekuensi *vortex shedding* menurun; dan (d)  $G/D < 0,2$  tidak terjadi *vortex shedding* yang beraturan pada silinder *downstream*, tetapi yang berlangsung *eddy structures* dengan bentuk *shedding* dan berkembang dari *upperside* lapisan geser. Profil kecepatan pada *upperside* lapisan geser ( $x/D = 3 \div 6$ ) untuk variasi rasio  $G/D = 0, 0,1, \text{ dan } 0,15$  pada  $Re = 7,8 \times 10^2$  sampai  $1,15 \times 10^4$  menunjukkan bentuk yang serupa. Hubungan antara *Strouhal number* dengan rasio gap dapat dilihat pada Gambar 2.34. Melalui gambar tersebut juga dapat diketahui perbedaan *Strouhal number* untuk beberapa ketebalan lapis batas  $\delta/D = 0,86; 1,22; \text{ dan } 1,41$ . Bilangan ini bertambah besar ketika rasio gap mengecil, dan mencapai harga maksimum pada  $G/D = 0,6$ , tetapi apabila rasio ini diperkecil lagi ( $G/D < 0,6$ ) maka bilangan ini juga menurun. Pada  $G/D \geq 3,0$  *Strouhal number* menjadi konstan, yaitu 0,218.



Gambar 2.35. *Velocity Vector* Rata-Rata pada Berbagai  $S/D$ : 0,1 (a); 0,2 (b); 0,3 (c); dan 0,4 (d) (Wang dan Tan, 2008)

Wang dan Tan (2008) melakukan eksperimen untuk melihat karakteristik aliran dekat *wake* pada silinder sirkular yang diletakkan dekat dinding dengan variasi rasio gap ( $S/D$ )  $0,1 \leq S/D \leq 1,0$  pada  $Re = 1,2 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder dan ketebalan lapis batas turbulen ( $\delta$ ) =  $0,4D$ . Hasil yang diperoleh seperti pada Gambar 2.35 menunjukkan pada  $S/D \geq 0,3$  aliran dikarakteristikan oleh adanya semacam *vortex shedding* dari *upside* dan *lowerside* dari silinder secara periodik. Pada  $S/D \leq 0,6$  aliran *wake* berkembang secara tidak simetri jika ditinjau dari pusat silinder, tetapi untuk beberapa kuantitas seperti bilangan *Strouhal* dan kecepatan konveksi dari *vortex shedding* secara umum tetap dan tidak bergantung pada  $S/D$ .

Penelitian silinder sirkular dekat dinding secara numerik telah dilakukan oleh Nishino, et. al. (2008). Dengan menggunakan model simulasi U-RANS dan DES, hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil eksperimen. Menggunakan model DES dapat diidentifikasi *vorticity field* pada beberapa rasio  $h/d$  seperti terlihat pada Gambar 2.36.



Gambar 2.36. *Spanwise Vorticity Field* pada Rasio Gap 0,6 dan 0,2 dengan Model Simulasi DES (Nishino, et. al., 2008)

### 3. Aliran melintasi susunan dua silinder sirkular dekat dinding datar

Penelitian susunan dua silinder sirkular secara tandem dekat dinding telah dilakukan oleh Yuwono, dkk. (2010). Dengan variasi jarak antara pusat silinder sirkular *upstream* dan silinder sirkular *downstream*  $P/D = 1,5$  dan variasi jarak antara silinder sirkular dengan dinding  $0 \leq G/D \leq 0,467$ , diamati distribusi tekanan sepanjang permukaan silinder dan pada dinding datar. Hasilnya menunjukkan titik stagnasi silinder sirkular *upstream* pada  $G/D < \delta/D$  tidak berada pada sisi depan,



dan mulai bergerak ke depan ketika  $G/D$  diperbesar. Sementara pada silinder sirkular *downstream* terjadi *reattachment* aliran pada *lowerside*, dan titik *reattachment* ini cenderung bergerak keatas ketika  $G/D$  diperbesar sama seperti pada sudut  $\theta = 0^\circ$ .

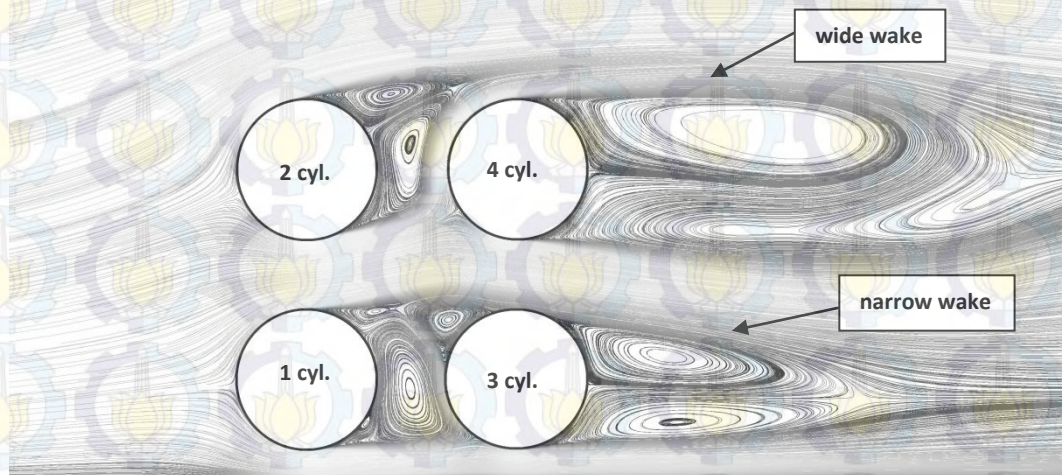
Selanjutnya Wailanduw, et. al. (2015) telah melakukan penelitian susunan dua silinder sirkular secara *side-by-side* dekat dinding pada rasio gap  $G/D = 0,2$  dan rasio *transversal* (jarak antara pusat silinder upper dan silinder lower)  $T/D = 1,5$  secara eksperimen dan simulasi numerik. Pengujiannya dilakukan pada  $Re = 5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder dan menggunakan metode 2D-URANS dengan model *viscous turbulence*  $k-\omega$  SST untuk simulasinya. Melalui eksperimen diperoleh hasil distribusi tekanan dari kontur silinder, terutama silinder lower dipengaruhi dengan keberadaan dinding didekatnya. Sementara dari hasil simulasi numerik menunjukkan terjadinya fenomena *biased* pada aliran di gap kedua silinder, sehingga membentuk *narrow wake* pada silinder upper dan *wide wake* pada silinder lower.

#### 4. Aliran melintasi susunan empat silinder sirkular dekat dinding

Penelitian pendahuluan telah dilakukan Wailanduw, et. al. (2014) pada susunan empat silinder sirkular dekat dinding dengan rasio spasi (jarak antara pusat masing-masing silinder)  $L/D = 1,5$  dan rasio gap  $G/D = 0,2$  secara eksperimen dan simulasi numerik. Pengujian dilakukan pada  $Re = 5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder dan menggunakan metode 2D-URANS dengan model *viscous turbulence*  $k-\omega$  SST. Berdasarkan hasil eksperimen menunjukkan adanya perbedaan titik staganasi pada silinder *upstream*, silinder-1 dan silinder-2, yang berarti terjadi perbedaan interaksi aliran antara silinder lower dengan silinder upper, dan silinder lower dengan dinding. Pada silinder *downstream*, silinder-3 dan silinder-4, khususnya pada *upperside* silinder menunjukkan bahwa *shear layer* silinder *upstream* melingkupi sisi kedua silinder tersebut. Tetapi ada perbedaan nilai distribusi tekanan dari kedua silinder pada sisi ini, dimana pada silinder-3 terjadi *secondary peak* karena adanya percepatan aliran yang terjadi pada silinder lower dan silinder upper. Sementara pada *lowerside* silinder-3 dan silinder-4 sama-sama menunjukkan terjadinya fenomena *reattachment*. Melalui

distribusi tekanan pada plat datar keberadaan silinder-1 dan silinder-3 menunjukkan adanya efek *blockage* aliran yang terjadi pada permukaan bawah silinder dan dinding, dan *reattachment* aliran pada dinding terjadi pada  $x/D \geq 7$ .

Sedangkan melalui hasil simulasi pada Gambar 2.37 terlihat secara jelas menunjukkan adanya fenomena *reattachment* yang berlangsung pada *lowerside* silinder *downstream* dan dinding, dan fenomena *secondary peak* yang terjadi pada *upperside* silinder-3. Juga melalui simulasi ini terlihat aliran di celah antara silinder pada daerah wake silinder *downstream* terjadi fenomena *biased*. Pada daerah wake silinder-3 terjadi *narrow wake*, sementara pada silinder-4 terjadi *wide wake*.



Gambar 2.37. Visualisasi Aliran dengan Velocity Pathline pada Susunan Empat Silinder Sirkular In-Line Square pada  $L/D= 1,5$  dan  $G/D= 0,2$  Dekat Dinding (Wailanduw, et. al., 2014)

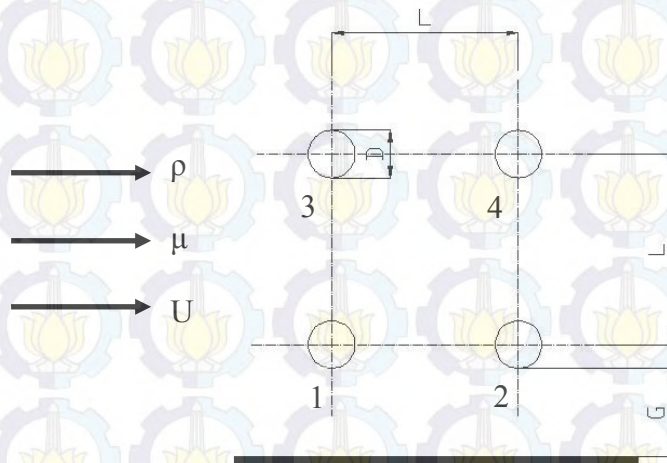
## BAB 3

### METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik 2D dan 3D-URANS pada empat silinder sirkular yang tersusun *in-line square* dekat dinding datar untuk mensimulasikan berbagai fenomena fisik yang kemungkinan sulit diperoleh dalam suatu eksperimen, kemudian diikuti dengan eksperimen pada lorong angin (*wind tunnel*) untuk mengukur distribusi tekanan statik dari kontur silinder dan plat datar yang juga digunakan untuk menghitung koefisien gaya-gaya aerodinamik seperti *drag* dan *lift*, mengukur tebal lapis batas dinding sebelum susunan terpasang, dan *velocity profile* di belakang *downstream cylinder*.

#### 3.1. Kelengkapan Eksperimen

##### 1. Model benda kerja



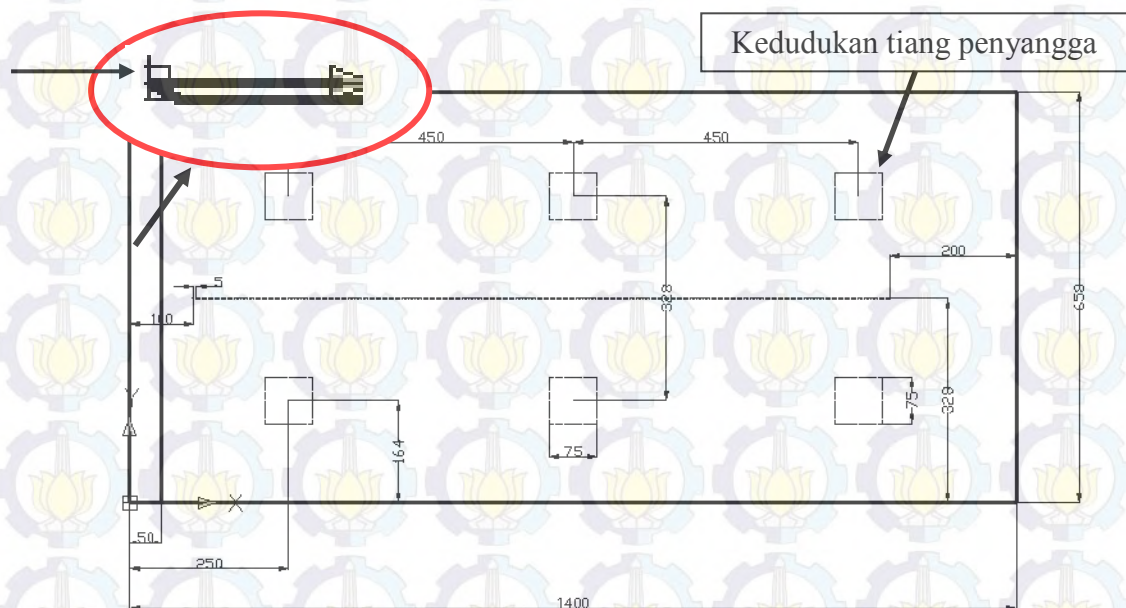
Gambar 3.1. Model Benda Kerja Silinder Sirkular

Gambar 3.1 menunjukkan model benda kerja dalam penelitian ini, dan silinder sirkular dibuat dari pipa PVC dengan diameter luar ( $D$ )= 60 mm. Berikutnya pada *midspan* setiap silinder dipasang 4 (empat) *pressure tap* yang masing-masing memiliki diameter 1,0 mm dengan kedudukan *pressure tap* pertama dengan *pressure tap* berikutnya berbeda  $90^\circ$ , untuk mengukur distribusi tekanan statik kontur silinder. Juga dibuatkan mekanisme pemutar untuk

menggerakkan keempat silinder sirkular secara bersamaan dengan interval  $5^\circ$ , sehingga akan diperoleh sejumlah 72 data distribusi tekanan statik lokal untuk setiap silinder. Rasio jarak antara titik pusat antar silinder terhadap diameter silinder divariasikan  $(L/D) = 2,7$  dan  $4$ , sementara rasio jarak antara dinding terhadap permukaan silinder divariasikan  $(G/D) = 0,0 \leq G/D \leq 0,5$  dengan interval  $0,1$  dan  $G/D = 1$ .

## 2. Desain dinding

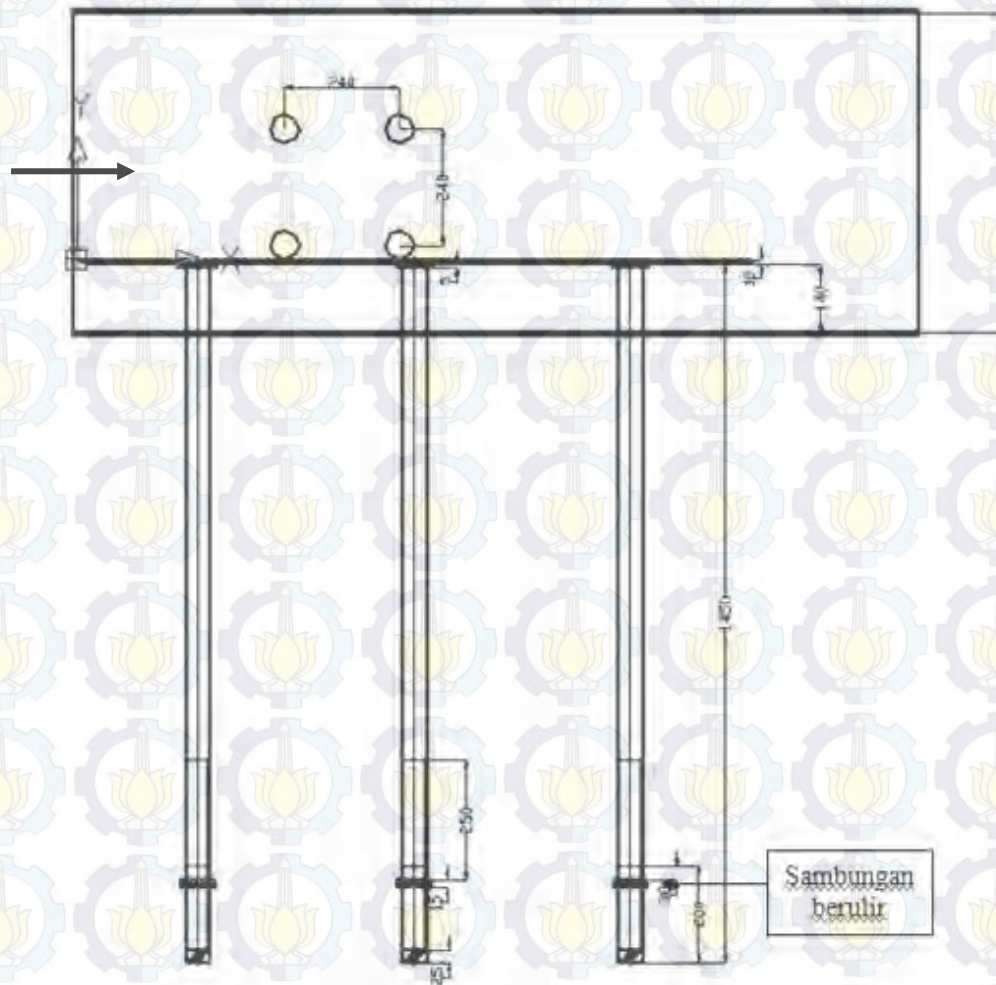
Dinding dibuat dari akrilik dengan ketebalan  $10\text{ mm}$  dan mempunyai panjang  $1400\text{ mm}$  seperti terlihat pada Gambar 3.2. Pada bagian *leading edge* dinding bawah dibuat runcing dengan sudut  $30^\circ$  dengan tujuan untuk memperoleh aliran masuk yang rata. Selanjutnya pada permukaan *midspan* dinding atas dipasang *pressure tap*, dimana pemasangan *pressure tap* pertama pada jarak  $100\text{ mm}$  dari *leading edge* dan *pressure tap* berikutnya masing-masing berjarak  $5\text{ mm}$  sampai *pressure tap* terakhir pada jarak  $200\text{ mm}$  dari *trailing edge*, untuk mengukur distribusi tekanan statik kontur dinding. Untuk memasang dinding dibuatkan tiang penyangga sebanyak 6 (enam) buah yang ditempatkan pada jarak  $164\text{ mm}$  dari *midspan* dinding. Jarak tiang penyangga pertama dari *leading edge* dan terakhir dari *trailing edge* adalah  $250\text{ mm}$ , untuk memperoleh kedudukan dinding yang seimbang.



Gambar 3.2. Dinding Datar (*top-view*)

### 3. Penempatan silinder, dinding, dan tiang penyangga pada *open circuit subsonic wind tunnel*

Gambar 3.3 menunjukkan desain bagian ujung kaki tiang penyangga yang dibuat berbentuk sambungan berulir, sehingga bisa diatur ketinggian dari masing-masing tiang tersebut. Ini bertujuan agar bisa digunakan untuk mengatur jarak antara dinding dan silinder sirkular dalam berbagai variasi G/D.



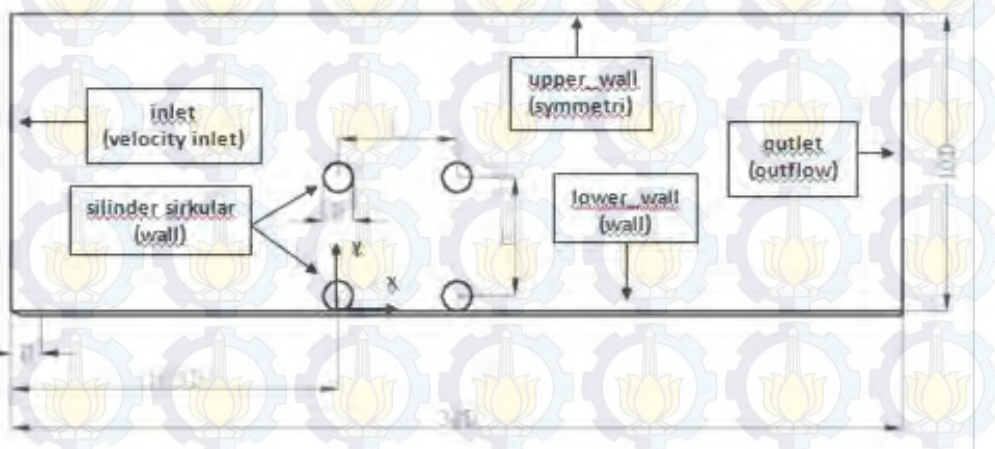
Gambar 3.3. Penempatan Silinder, Dinding, dan Tiang Penyangga pada *Open Circuit Subsonic Wind Tunnel*

Untuk memperoleh kepastian bahwa dinding yang terpasang pada tiang penyangga tersebut benar-benar datar/level, maka pada permukaan dinding *test section* dari lorong angin diberi garis ukur/penggaris yang dipakai sebagai pedoman tingkat kerataan dinding.

### 3.2. Pemodelan Numerik

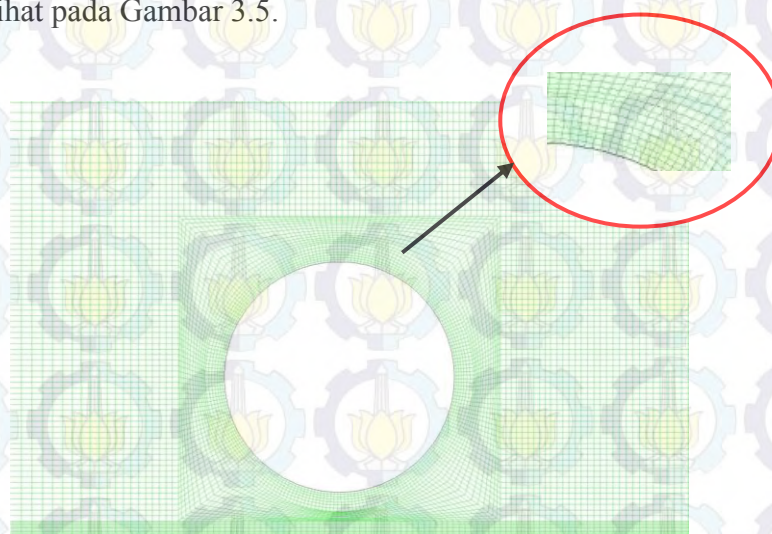
Tahapan-tahapan yang perlu dilakukan dalam pemodelan numerik dengan menggunakan program FLUENT versi 6.3.26 adalah sebagai berikut:

1. Membuat geometry set-up dan domain simulasi (Gambar 3.4) dalam bentuk dua dimensi (2-D), untuk susunan in-line dari empat silinder sirkular pada masing-masing jarak gap dengan dinding ( $G/D$ ) = 0,1 ÷ 0,5; dan 1,0 dengan rasio spasi antara pusat silinder ( $L/D$ ) = 4,0 dan  $L/D = 2,7$ .



Gambar 3.4. Geometri Set-up dan Domain Simulasi Numerik

2. Membuat meshing dua dimensi dalam bentuk *quadrilateral map*, seperti terlihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Bentuk Meshing 2-D dari Model Silinder Sirkular dekat Dinding Menggunakan *Quadrilateral-Map*

3. Menentukan *boundary condition* dari domain yang dibuat.

Kondisi batas atau *boundary condition* dari simulasi:

Inlet : *velocity inlet*

Outlet : *outflow*

Lower wall : *wall*

Upper wall : *symmetry*

Wire : *wall*

Silinder 1, 2, 3, dan 4 : *wall*

Operating pressure : *atmospheric pressure*

4. Memilih teknik untuk iterasi, yaitu menggunakan *pressure velocity coupling* SIMPLE dan diskretisasi menggunakan *second order upwind* agar menghasilkan akurasi dan *stability* yang tinggi.

5. Melakukan proses iterasi dengan menggunakan pemodelan *Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes* (U-RANS) 2D. Memilih model turbulensi yang akan digunakan, yaitu  $k - \omega$  SST karena menurut Wilcox (2000) model tersebut lebih akurat untuk daerah *viscous sublayer* dan memprediksi pengaruh *adverse pressure gradient* seperti silinder sirkular. Lebih lanjut dijelaskan, bahwa model ini merupakan penyempurnaan dari  $k - \epsilon$  dan  $k - \omega$  standard. Proses iterasi dengan 2D-URANS ini digunakan untuk menggambarkan pola aliran yang berlangsung disekitar silinder, karena menurut Wang et al. (2013) apabila perbandingan panjang silinder ke arah span ( $L$ ) dengan diameter silinder ( $D$ ), yang disebut *aspect ratio* ( $AR$ )  $\geq 8$ , maka aliran dapat dianggap sebagai 2D. Sedangkan hasil proses iterasi dengan 3D-URANS, selain digunakan untuk menghitung distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) di kontur silinder dan dinding, juga digunakan untuk menjelaskan tentang faktor penyebab ketidaksamaan hasil yang diperoleh melalui metode eksperimen dengan metode numerik. Sebenarnya telah diketahui bahwa kondisi pengambilan data kedua metode ini berbeda, yakni data yang diperoleh dari metode eksperimen merupakan nilai atau harga rata-rata (*averaged value*) sementara dari metode numerik merupakan nilai sesaat (*instantaneous value*). Upaya

yang dilakukan peneliti dalam metode numerik agar kondisinya serupa dengan metode eksperimen adalah menentukan waktu pengambilan  $t$ -nya dengan melihat *time history* grafik  $C_L$  dari keseluruhan silinder yang sudah cenderung tetap, dan menggunakan nilai rata-rata dari satu siklus.

6. Melakukan *post processing* dari hasil iterasi. Melalui *post processing* ini dapat diperoleh informasi tentang struktur *vortex*; tekanan rerata dan fluktuasi, seperti: gaya dan koefisien tekanan ( $C_p$ ) masing-masing silinder, koefisien *drag* dan *lift* masing-masing silinder; dan karakteristik *vortex shedding* seperti: pola aliran melalui distribusi *vorticity*, distribusi *velocity profile*, *vorticity* dan *velocity field*, *stream line for a distribution velocity*, *spanwise vorticity contour*, *time history* dari koefisien drag dan koefisien lift, *a mean streamwise velocity distribution*.

### 3.3. Peralatan Eksperimen

Sarana yang dipergunakan untuk eksperimen antara lain: *open-circuit subsonic wind tunnel* dengan spesifikasi *test section*: 660 mm x 660 mm x 1800 mm. Silinder sirkular dengan ukuran diameter luar ( $D$ ) = 60 mm dan panjang ( $l$ ) = 660 mm, maka *aspect ratio* adalah 11, dan *blockage ratio* per silinder adalah 11,1 % sementara *total blockage*-nya adalah 22,2 %. *Wall effect* atau *blockage* untuk aliran yang melintasi *bluff bodies* adalah rasio luasan model dengan luasan *test section* (Ramamurthy dan Lee, 1973). Apabila berupa susunan bodi, maka luasan *test section* diganti dengan luasan antara titik pusat dari bodi yang berdekatan.

Alat ukur yang dipergunakan: *hotwire anemometry*, *pitot static tube*, *inclined* manometer, *pressure transducer* type PX655-05BDI, dan data logger (DAQ) type OM-DAQPRO-5300, untuk pengambilan data distribusi tekanan statik, *velocity profile* di lorong angin. Data-data yang diperoleh dari hasil pengujian di lorong angin dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui distribusi tekanan, *velocity profile*, sementara untuk visualisasi aliran yang diperoleh melalui simulasi atau pemodelan numerik dianalisis secara kualitatif.



Sementara nilai koefisien *drag* ( $C_D$ ) dan koefisien *lift* ( $C_L$ ) dalam penelitian ini diperoleh melalui perhitungan menggunakan data distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ). Mengingat bahwa pengujian ini dilakukan pada bilangan Reynolds *subcritical*, maka *drag* dan *lift* karena *pressure* lebih dominan, dengan demikian yang dihitung masing-masing silinder adalah koefisien *drag pressure* ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien *lift pressure* ( $C_{Lp}$ ). Metode ini banyak diterapkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya, seperti: Sayers (1988), Lam dan Fang (1995), Lei, et al. (1999), dan Choi dan Lee (2000). Besaran dari  $C_p$ ,  $C_D$  dan  $C_L$  sebagai berikut:

$$C_p = \frac{p - p_s}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (3.1)$$

$$C_D = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (3.2)$$

$$C_L = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) \sin(\theta) d\theta \quad (3.3)$$

dimana:

$C_p$  adalah koefisien tekanan

$C_D$  adalah koefisien hambat (drag)

$C_L$  adalah koefisien angkat (lift)

$p$  adalah tekanan statik kontur lokal, dalam satuan **Pa**

$p_s$  adalah tekanan statik free-stream, dalam satuan **Pa**

$U$  adalah kecepatan free-stream, dalam satuan **m/sec**

$C_p(\theta)$  adalah koefisien tekanan kontur pada posisi  $\theta$

Selanjutnya untuk menghitung integral distribusi koefisien tekanan menggunakan integrasi numerik metode Simpson 1/3, yaitu:

$$\frac{1}{2} \int_a^b y(x) dx = \frac{b-a}{2x3n} \{y_0 + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + y_n\} \quad (3.4)$$

dimana:

$a$  : sudut awal = 0

$b$  : sudut akhir =  $\pi$

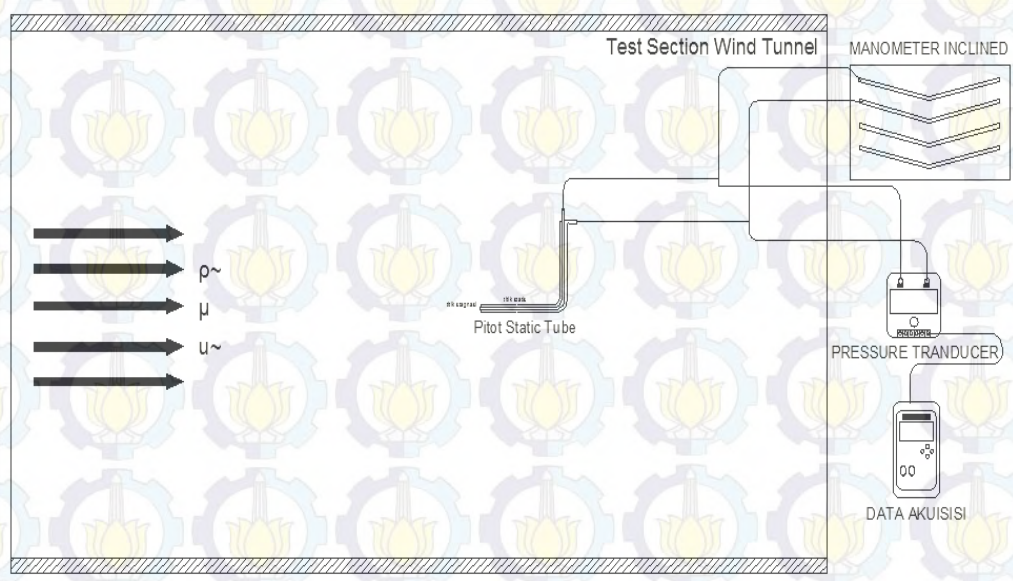
$n$  : jumlah titik (setelah dikurangi awal/ $y_0$  dan akhir/ $y_n$ )

Menurut Alam, et al. (2005) yang mengutip dari Sumner, et. al. bahwa aplikasi *engineering* umumnya ditentukan pada bilangan Re *higher subcritical*.

Lebih lanjut Alam mengutip dari Zdravkovich dan Norberg, bahwa bilangan Re yang termasuk *higher subcritical* berkisar antara  $Re = 3 \times 10^4 - 2 \times 10^5$  dimana *wake* dan *shear layer* pada silinder yang terjadi adalah turbulen sementara lapisan batas masih laminar. Pada penelitian ini pengamatan fenomena aliran dan pengukuran distribusi tekanan statik maupun *velocity profile* ini dilakukan pada bilangan  $Re = 5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder.

### 3.4. Kalibrasi instrumen eksperimen

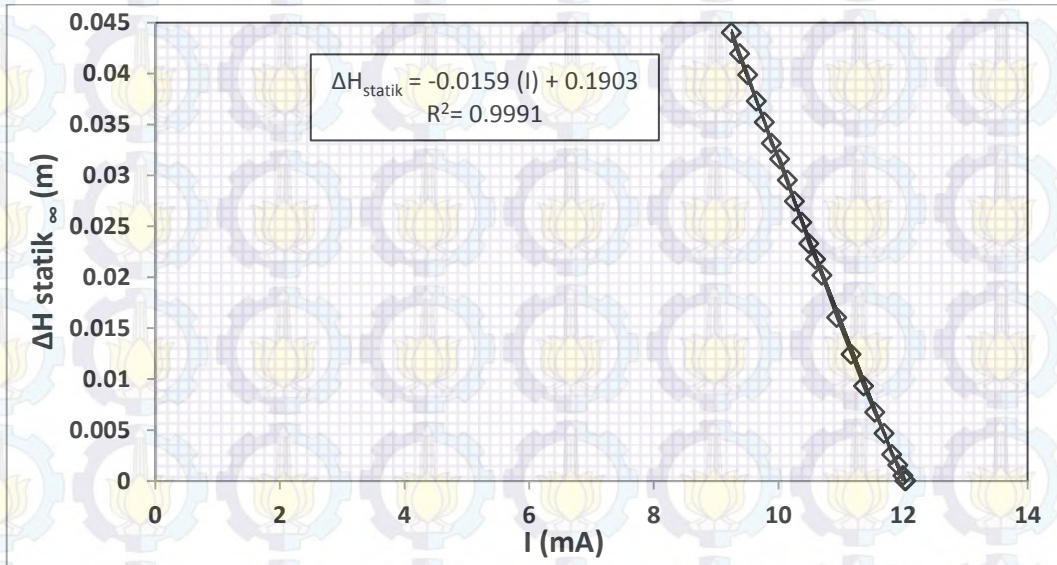
*Pressure transducer* yang akan digunakan sebelumnya dikalibrasi dengan V-manometer dengan sudut  $15^\circ$  yang menggunakan *red oil*. Proses kalibrasi ini dilakukan pada dua kondisi: Kondisi pertama, saat benda kerja belum terpasang, yaitu dengan menempatkan *pitot tube* pada bagian *center* dari *test section*. (Gambar 3.6)



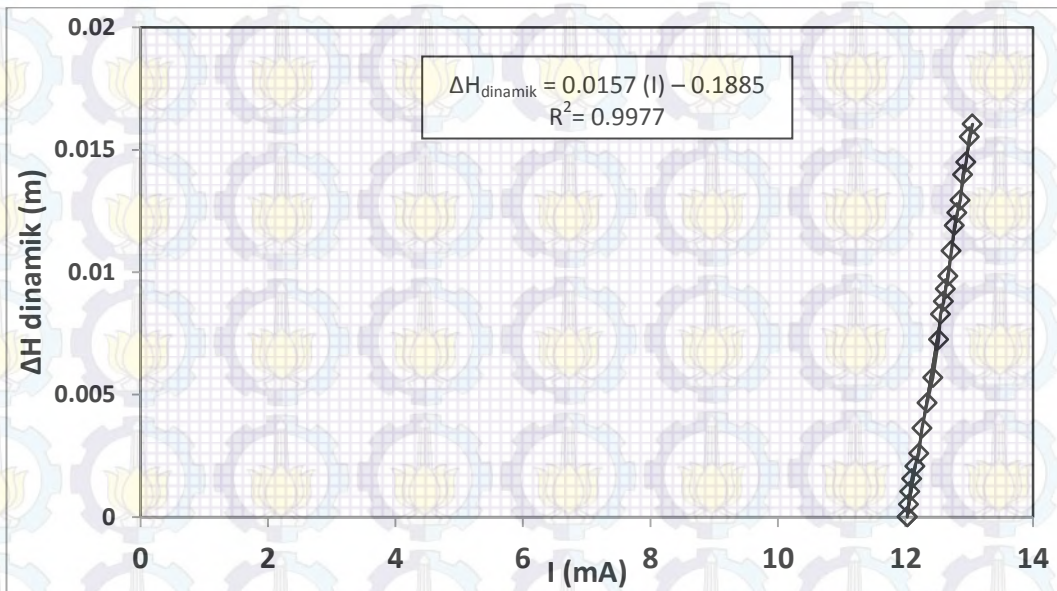
Gambar 3.6. Posisi Penempatan Pitot-Static Tube pada Test Section

Melalui pengukuran ini, dengan menggunakan bantuan data logger (DAQ), diperoleh persamaan kalibrasi hubungan antara data manometer berbentuk beda ketinggian ( $\Delta H$  dalam m) dan data *pressure transducer* berbentuk kuat arus (I dalam mA) untuk statik *free stream* dan dinamik *free stream*. Kondisi kedua, pada saat benda kerja dalam hal ini silinder sirkular tunggal terpasang pada bagian

center dari test section. Serupa dengan kondisi pertama, dengan bantuan data logger diperoleh persamaan kalibrasi hubungan antara data manometer berbentuk  $\Delta H$  dan data *pressure transducer* berbentuk I dalam mA untuk statik kontur silinder sirkular.



(a)



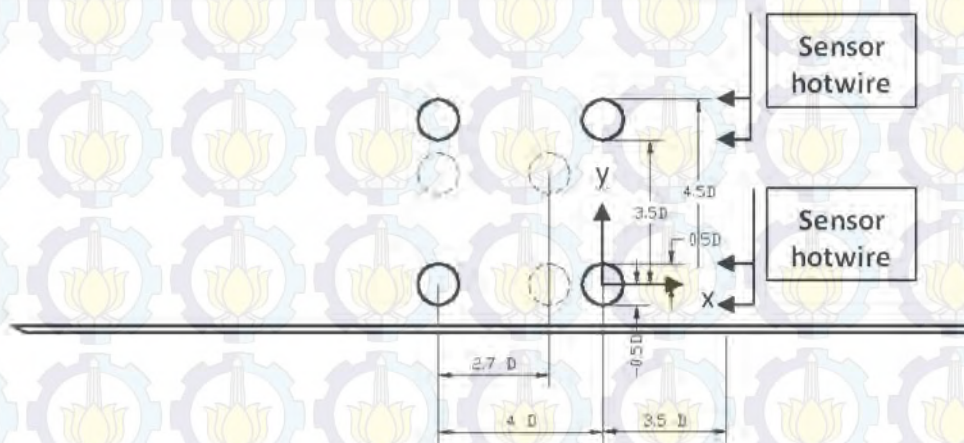
(b)

Gambar 3.7. Grafik Persamaan Kalibrasi antara *Pressure Transducer* dan *Inclined Manometer*: a) Persamaan Tekanan Statik, b) Persamaan Tekanan Dinamik

Hasil kalibrasi antara *pressure transducer* dan manometer dalam bentuk persamaan seperti terlihat pada Gambar 3.7 yaitu:

- persamaan tekanan statik (*free-stream* dan kontur),  $\Delta H_{\text{statik}} = -0,0159 (I) + 0,1903$
- persamaan tekanan dinamik (*free-stream*),  $\Delta H_{\text{dinamik}} = 0.0157 (I) - 0.1885$

Berikutnya kalibrasi juga dilakukan pada *hotwire anemometry* yang akan digunakan untuk pengukuran kecepatan dan pengukuran frekuensi *shedding* di daerah wake silinder *downstream*. Posisi penempatan sensor *hotwire anemometry* di daerah wake silinder *downstream*, dan sumbu koordinat yang dipakai sebagai acuan pada saat dilakukan kedua pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar 3.8.

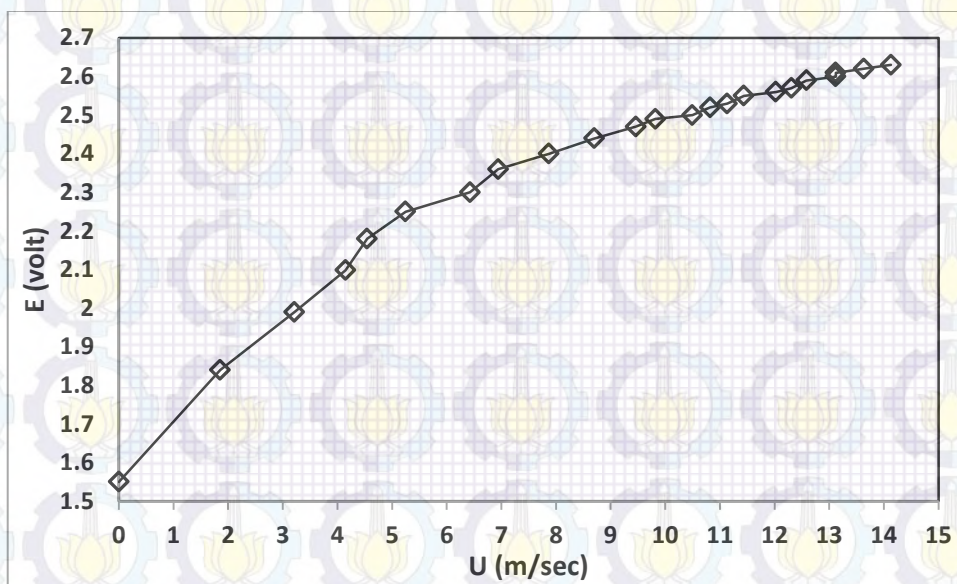


Gambar 3.8. Sumbu Koordinat dan Posisi Penempatan Sensor *Hotwire Anemometry* pada Daerah Wake Silinder *Downstream*

Pengukuran frekuensi *shedding* untuk rasio spasi  $L/D = 4,0$  dilakukan pada dua posisi, yaitu di daerah wake silinder-2 pada posisi:  $y = -0,5D$  dan  $y = 0,5D$ , dan di daerah wake silinder-4 pada posisi:  $y = 3,5D$  dan  $y = 4,5D$  dari sumbu koordinat  $y$ , dan  $x = 3,5D$  dari sumbu koordinat  $x$ . Sementara untuk rasio spasi  $L/D = 2,7$ , di daerah wake silinder-2 pada posisi:  $y = -0,5D$  dan  $y = 0,5D$ , dan di daerah wake silinder-4 pada posisi:  $y = 2,2D$  dan  $y = 3,2D$  dari sumbu koordinat  $y$ , dan  $x = 3,5D$  dari sumbu koordinat  $x$ . Sedangkan pengukuran profil kecepatan dilakukan di daerah wake silinder *downstream* dengan ketinggian (sumbu koordinat  $y$ ) dari permukaan plat datar sampai  $y = 7,0D$ , dan  $x = 3,5D$  dari sumbu koordinat  $x$ .

Urut-urutan atau prosedur pelaksanaan kalibrasi *hotwire anemometry* dapat dirinci sebagai berikut:

- a. Pengukuran kecepatan aliran free-stream di *center-line* test section menggunakan pitot static tube (data ini sudah diperoleh dari pengukuran sebelumnya).
- b. Mengkalibrasi pengukuran kecepatan aliran free-stream di *center-line* test section menggunakan *hotwire anemometry* dimulai dari kecepatan 0 (nol) sampai dengan kecepatan maksimum, berikutnya diulang mulai kecepatan maksimum sampai kecepatan 0 (nol). Model pengukuran seperti ini bertujuan untuk melihat apakah terjadi perbedaan yang signifikan dari hasil kedua metode ini. Hasil pengukuran di langkah pertama dan langkah kedua ini diperoleh data hubungan antara kecepatan  $U$  (m/sec) dan tegangan  $E$  (volt) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Grafik Hasil Kalibrasi antara Kecepatan ( $U$ ) dan Tegangan ( $E$ ) pada Daerah Wake Silinder *Downstream*

- c. Hasil kedua pengukuran ini selanjutnya dimasukkan dalam persamaan *analysis of variance* yang terdapat pada *software* MINITAB seri 14 untuk melihat tingkat perbedaan sehingga diperoleh error yang terjadi, dan akhirnya mendapatkan konstanta kalibrasi  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  dalam bentuk persamaan regresi.

d. Langkah berikutnya adalah memasukkan konstanta tersebut kedalam persamaan respon kalibrasi. Menurut Bruun (1995), tersedia beberapa bentuk persamaan respon antara lain:

Power Laws,  $E^2 = A + B U^n$

Extended Power Laws,  $E^2 = A + B U^{1/2} + CU$

Polynomial,  $U = A + B E + CE^2$

dimana:

$E$  adalah tegangan yang terbaca pada data logger melalui *pressure transducer*, dalam satuan **Volt**

$A$ ,  $B$ , dan  $C$  adalah konstanta kalibrasi

$U$  adalah kecepatan aliran free-stream, dalam satuan **m/sec**

$n$  adalah eksponen kalibrasi ( $n=0,5$ )

Hasil substitusi konstanta kalibrasi pada ketiga persamaan tersebut dan besaran error masing-masing persamaan ditunjukkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Perbandingan Hasil Persamaan Respon Kalibrasi

Persamaan	A	B	C	n	ε (%)
<i>Simple Power Law</i>					
$E^2 = A + B U^n$	2,081	1,280	-	0,5	0,095%
	1.79	1,726	-	0,4	0,095%
<i>Extended Power Law</i>					
$E^2 = A + B U^n + CU$	2.417	0.857	0.097	0.5	0.095%
<i>Polynomial</i>					
$U = A + B E + CE^2$	38.629	- 45.628	13.759		0.098%

e. Mengacu dari Tabel 3.1 maka dipilih persamaan respon kalibrasi yang sederhana, tetapi juga memiliki error (ε) yang tidak besar. Dalam hal ini diambil persamaan *Simple Power Law* dengan eksponen kalibrasi ( $n$ )= 0,5 yaitu:

$E^2 = 2.081 + 1.28 U^{0.5}$  atau

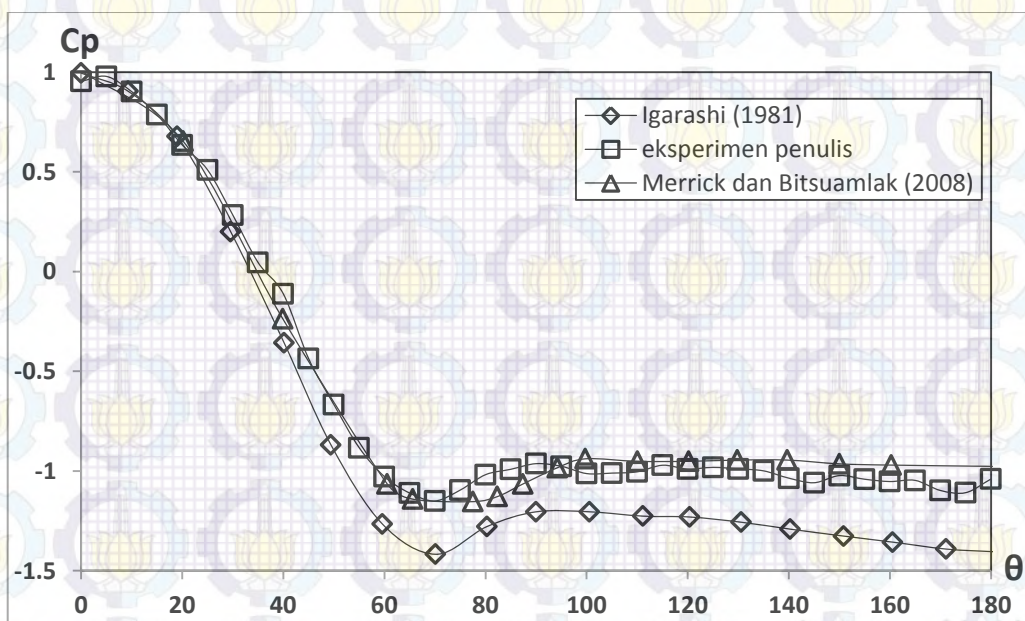
$U = ((E^2 - 2.081) / 1.28)^2$

Selanjutnya persamaan tersebut digunakan untuk menghitung besaran kecepatan free stream hasil pengukuran dari data logger dalam tegangan.

f. Berikutnya dilakukan validasi pada kasus silinder sirkular tunggal di center-line dengan pengukuran frekuensi shedding ( $f_s$ ) pada daerah wake di posisi  $x=3D$  dan  $y=+1D$ . Data yang diperoleh melalui data logger pada pengukuran ini dalam domain waktu ( $t$ ) diubah menjadi domain frekuensi menggunakan metode *Fast Fourier Transforms* (FFT) pada paket software SIGVIEW seri 3.2. Hasil pengukuran  $f_s$  ini dimasukkan ke dalam persamaan 2.1 untuk menghitung besarnya nilai bilangan Strouhal ( $St$ ), kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya untuk melihat validitas dan reliabilitas dari hotwire anemometry yang digunakan. Selain itu juga ketika plat datar ditempatkan pada *test section* dilakukan pemeriksaan uniformitas aliran untuk memastikan bahwa aliran masuk *test section* tetap dalam kondisi seragam. Pemeriksaan ini dilakukan dengan memasang benang-benang yang diikatkan pada seutas kawat yang ditempatkan secara vertikal pada bagian depan dari plat datar. Pengujian uniformitas aliran ini dilakukan pada bilangan  $Re=5,3 \times 10^4$ .

### 3.5. Hasil validasi instrumen eksperimen

#### 1. Validasi silinder sirkular tunggal



Gambar 3.10. Perbandingan Grafik  $\theta$  vs  $C_p$  untuk Silinder Sirkular antara: Igarashi ( $Re=3,5 \times 10^4$ ), Merick ( $Re=3,52 \times 10^4$ ), dan Peneliti ( $Re=4,913 \times 10^4$ )

Untuk mengecek validitas dan reliabilitas dari sistem pengukuran yang akan dipergunakan, maka dilakukan validasi pada silinder sirkular tunggal yang ditempatkan di *center-line* dari *test section windtunnel*. Hasil pengukuran ini selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran yang telah dilakukan peneliti-peneliti sebelumnya. Gambar 3.10 menunjukkan hasil validasi untuk silinder sirkular tunggal di *center-line* antara peneliti sekarang dengan beberapa peneliti terdahulu (Igarashi, 1981 dan Merrick dan Bitsuamlak, 2008). Melalui Gambar 3.10 dapat dilihat bahwa hasil validasi menunjukkan trend yang sama. Perbandingan antara koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ), dimana  $C_{pb}$  diukur pada titik  $180^\circ$  dibelakang silinder, dan koefisien *drag pressure* ( $C_{Dp}$ ) dari masing-masing peneliti dapat diketahui pada tabel berikut ini.

Tabel 3.2. Perbandingan Koefisien *Base Pressure* ( $C_{pb}$ ) dan Koefisien *Drag Pressure* ( $C_{Dp}$ )

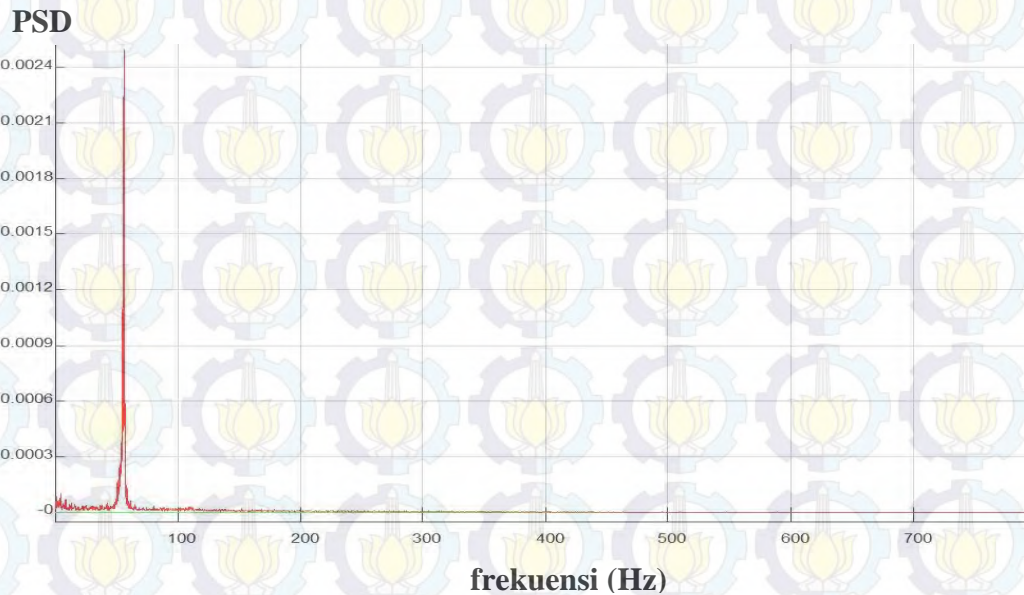
	Re	$C_{pb}$	$C_{Dp}$
Igarashi	$Re= 3,5 \times 10^4$	-1.40	1.26
Merrick dan Bitsuamlak	$Re= 3,52 \times 10^4$	-0.98	0.76
Peneliti (sekarang)	$Re= 4,913 \times 10^4$	-1.01	1.10

Berdasarkan Tabel 3.2 tersebut, perbedaan antara peneliti sekarang dan kedua peneliti terdahulu, untuk  $C_{pb}$  dan  $C_{Dp}$ , terjadi *under-predicted* dengan hasil Igarashi, sementara *over-predicted* dengan hasil Merrick dan Bitsuamlak. Perbedaan ini terjadi selain dikarenakan perbedaan bilangan Reynolds yang diambil, dan terutama *blockage ratio*, *aspect ratio*, dan intensitas turbulensi yang jauh lebih tinggi antara peneliti sekarang dan kedua peneliti terdahulu, yang masing-masing: 9.1% vs. 0.125%, 11 vs. 3 dan 4% vs. 0.55-0.6.

Berikutnya juga disampaikan hasil pengukuran frekuensi shedding ( $f_s$ ) di daerah wake silinder sirkular tunggal di *center-line* pada posisi  $x= 3D$  dan  $y= +1D$  menggunakan *hotwire anemometry*. Pengukuran dilakukan dengan jumlah sampel 2000 per detik selama 32 detik pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ . Dengan menggunakan metode FFT pada software SIGVIEW seri 3.2 dengan normalisasi, maka diperoleh nilai puncak (peak) frekuensi terjadi pada ( $f_s$ )= 55,75 Hz (lihat Gambar 3.10). Nilai  $f_s$  tersebut dimasukkan pada persamaan 2.1 sehingga dapat diperoleh besarnya



bilangan Strouhal ( $St$ )= 0,25. Hasil ini dibandingkan dengan peneliti sebelumnya, Lin (2005), yang mendapatkan  $St= 0,218$  pada  $Re= 7,8 \times 10^2$ . Perbedaan besaran  $St$  ini dimungkinkan karena adanya perbedaan  $Re$  pengujian, maupun perbedaan intensitas turbulen dari wind tunnel yang digunakan.



Gambar 3.11. Frekuensi Vortex Shedding di Daerah Wake Silinder Sirkular Tunggal pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

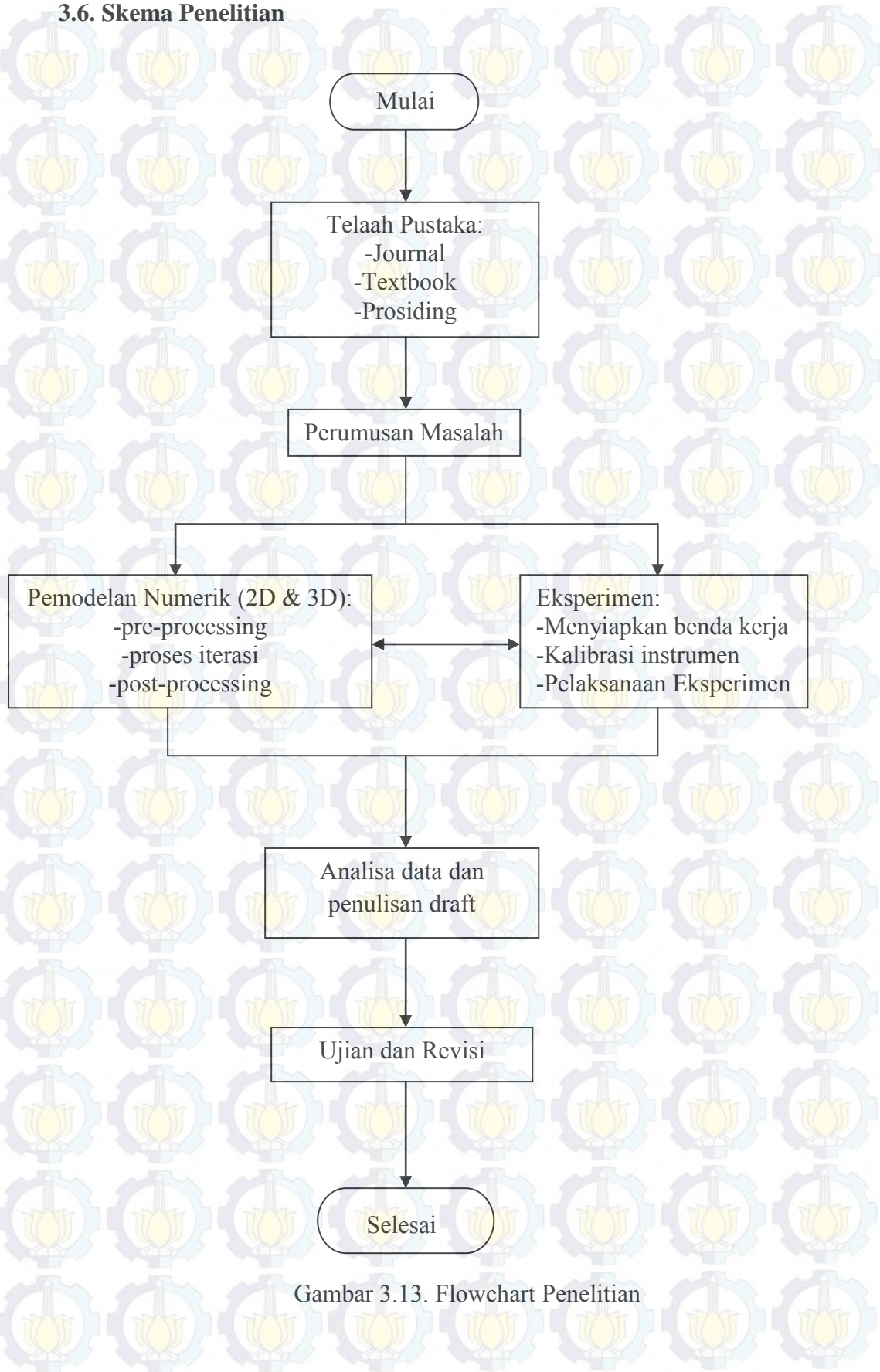
## 2. Hasil pemeriksaan uniformitas/keseragaman aliran

Berdasarkan pemeriksaan keseragaman aliran yang dilakukan pada bilangan  $Re= 5,3 \times 10^4$  dengan mengikatkan benang pada bagian masuk *test section*, diperoleh kondisi aliran yang seragam. Hal ini dapat diamati pada posisi benang-benang yang lurus seperti ditunjukkan foto pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Pemeriksaan Uniformitas/Keseragaman Aliran Masuk

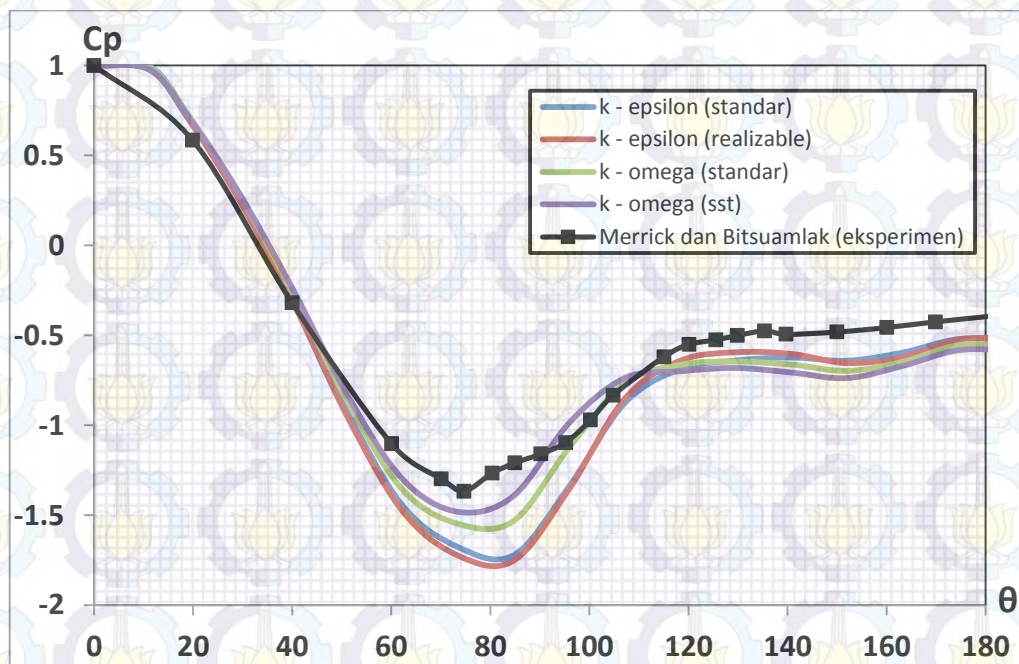
### 3.6. Skema Penelitian



Gambar 3.13. Flowchart Penelitian

### 3.7. Tahapan kegiatan penelitian pendahuluan yang dilakukan

Kegiatan simulasi numerik ini sebelumnya didahului dengan melakukan pengecekan terhadap model *turbulence viscous* yang akan digunakan. Pengecekan ini melalui perbandingan antara hasil running dari beberapa model *turbulence viscous* dengan hasil penelitian dari peneliti lain yang telah dipublikasi pada kasus silinder sirkular tunggal di *center-line*.



Gambar 3.14. Perbandingan Grafik  $\theta$  vs  $C_p$  untuk Silinder Sirkular antara: Simulasi Numerik dengan Berbagai Model Viscous ( $k-\epsilon$ ,  $rk-\epsilon$ ,  $sk-\omega$ ,  $sstk-\omega$ ) dan Eksperimen (Merrick dan Bitsuamlak, 2008)

Gambar 3.14 menunjukkan hasil pengujian distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) pada silinder sirkular tunggal yang diperoleh menggunakan metode simulasi numerik dengan beberapa model *turbulence viscous* ( $k-\epsilon$  standar,  $k-\epsilon$  realizable,  $k-\omega$  standar, dan  $k-\omega$  sst), dan hasil eksperimen (Merrick dan Bitsuamlak, 2008). Dari Gambar 3.14 terlihat bahwa hasil simulasi numerik menggunakan model viscous  $k-\omega$  sst mempunyai tren yang lebih mendekati hasil eksperimen dibanding dengan model viscous yang lainnya. Hasil ini sesuai dengan Wilcox (2000) yang menyatakan bahwa untuk model  $k-\omega$  SST lebih akurat untuk daerah *viscous sublayer* dan memprediksi pengaruh *adverse pressure gradient* seperti silinder sirkular.

Kegiatan selanjutnya terkait dengan penggunaan metode simulasi numerik adalah melakukan *grid independence test*. Melalui tes ini diharapkan dapat diperoleh efisiensi jumlah mesh yang optimal dengan tingkat *error* yang rendah.

Tabel 3.3. *Grid Independence Test* pada Silinder Sirkular Tunggal  $Re= 53000$

Name	Number of nodes	Number of faces	Value of $y^+$	$C_{pb}$	$C_{pb}$
Grid A	143600	286300	22.2	-0.636	Merrick dan Bitsuamlak (experimen) -0.984
Grid B	197020	392980	20.2	-0.755	
Grid C	255740	510140	5.4	-1.019	
Grid D	319100	636800	14.4	-0.881	

Tabel 3.3 menunjukkan hasil variasi jumlah mesh 4 variasi, yang dilakukan terhadap nilai  $y^+$  dan koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ). Parameter nilai  $y^+$  menggambarkan jarak dari center mesh/cell terdekat dengan kontur permukaan. Menurut FLUENT *guidelines*, penggunaan model viscous  $k - \omega$ , pembuatan meshnya mengikuti *wall function* apabila *enhanced wall treatment* nya tidak aktif. Selanjutnya menurut *guidelines* tersebut, diusahakan pembuatan mesh yang terdekat dengan kontur mengikuti *the log-law*, yaitu mempunyai nilai  $y^+ = 5 \sim 30$ . Sementara parameter lainnya dari *grid independence test* adalah nilai koefisien base pressure ( $C_{pb}$ ), dalam hal ini menggambarkan nilai distribusi tekanan pada *trailing edge* silinder sirkular ( $\theta = 180^\circ$ ).

Berdasarkan kedua parameter ( $y^+$  dan  $C_{pb}$ ) tersebut, maka jumlah mesh yang diambil dalam melakukan simulasi numerik pada penelitian ini adalah grid C, karena memiliki nilai  $y^+$  yang paling kecil ( $y^+ = 5,4$ ), walaupun nilai  $C_{pb}$  sedikit *over predicted* dibanding nilai eksperimen (Merrick dan Bitsuamlak, 2008).

Validasi simulasi numerik ini peneliti lakukan selain pada silinder sirkular tunggal, susunan dua silinder sirkular (tandem dan side-by-side), dan susunan empat silinder sirkular (*in-line equispaced configuration*) yang keseluruhannya di centerline; juga pada silinder sirkular tunggal, susunan dua silinder sirkular side-by-side yang keseluruhannya dekat dinding. Hasil simulasi numerik yang dilakukan ini kesemuanya dibandingkan dengan hasil penelitian eksperimen yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang telah dipublikasikan.

## BAB 4

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan disampaikan secara rinci tentang data-data penelitian yang diperoleh melalui eksperimen yang dilakukan di wind tunnel dan melalui simulasi numerik menggunakan software FLUENT. Melalui metode eksperimen didapat data kuantitatif meliputi tebal lapis batas dinding, distribusi tekanan setiap kontur silinder dan dinding, dan profil kecepatan di daerah wake dari silinder downstream. Pengukurannya dilakukan pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ , dengan variasi rasio gap  $G/D= 0,0\div 0,5$  dengan interval 0,1 dan  $G/D=1,0$ . Sementara melalui metode simulasi numerik didapat data kualitatif meliputi *vorticity contour*, *velocity pathline*, profil kecepatan di daerah *upstream* dari susunan silinder, daerah antara susunan silinder, dan daerah wake dari susunan silinder.

Informasi tentang tebal lapis batas ( $\delta$ ) dinding yang dipasang *turbulent generator* berupa kawat pada bagian ujung dekat *leading edge* ini perlu disampaikan disini agar dapat diketahui secara jelas posisi silinder, terutama susunan silinder lower dalam lapis batas ketika variasi rasio gap  $G/D$  dilakukan. Seperti hasil yang diperoleh Zdravkovich (1985) pada penelitian silinder tunggal yang ditempatkan dekat dinding, bahwa rasio  $G/\delta$  lebih berpengaruh terhadap karakteristik aerodinamik dari silinder, khususnya koefisien drag ( $C_D$ ), sementara rasio  $G/D$  berpengaruh terhadap koefisien lift ( $C_L$ ).

Informasi tentang distribusi tekanan dari kontur silinder dan dinding, dan profil kecepatan di daerah wake silinder *downstream* juga perlu disampaikan disini agar dapat diketahui secara jelas apakah dengan keberadaan dinding yang ditempatkan dekat susunan silinder menimbulkan perbedaan distribusi tekanan dari setiap kontur silinder.. Selain itu juga dapat digunakan untuk melihat adakah interferensi antara susunan silinder lower terhadap susunan silinder upper, atau adakah interferensi antara susunan silinder *downstream* terhadap susunan silinder *upstream* pada susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding.

Karena menurut Zdravkovich (1987) untuk susunan multi silinder termasuk susunan empat silinder *in-line square*, fenomena interferensi aliran lebih

kompleks. Selain bergantung pada parameter di silinder tunggal, seperti: bilangan Reynolds, kekasaran permukaan, *free stream turbulence* dan parameter lainnya, juga sangat bergantung pada orientasi aliran, rasio spasi dan jumlah silinder dalam susunan tersebut. Susunan empat silinder *in-line square* pada orientasi aliran  $\alpha = 0^\circ$  dan rasio spasi tertentu dapat dipandang sebagai susunan paralel dua silinder secara tandem. Selanjutnya untuk dua silinder yang diletakkan secara berdekatan maka akan terbentuk salah satu dari empat pola interferensi, yaitu *proximity interference*, *wake interference*, kombinasi *proximity* dan *wake inference*, atau tidak terjadi interferensi sama sekali pada kedua silinder sehingga dikatakan silinder berperilaku seperti silinder tunggal.

Sedangkan hasil *post processing* seperti *vorticity contour*, *velocity pathline*, dan profil kecepatan dari susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding disampaikan juga untuk melengkapi penjelasan tentang fenomena pola aliran disekeliling silinder, yang dapat menunjukkan terjadinya interferensi antara dinding dengan susunan silinder dan antar silinder, terutama pada daerah *upstream* dari susunan silinder *upstream*, dan daerah *wake* dari susunan silinder *downstream*.

Urut-urutan penyajian data dan pembahasan dalam bab ini disusun sebagai berikut: (a) data dan pembahasan tebal lapis batas dinding sebelum dan ketika susunan silinder terpasang; (b) data dan pembahasan distribusi tekanan, koefisien *base pressure* ( $C_{Pb}$ ), koefisien aerodinamik ( $C_{Dp}$  dan  $C_{Lp}$ ), Strouhal number, dan profil kecepatan untuk susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio spasi  $L/D = 4,0$  di *center-line* dan di dekat dinding dengan variasi rasio gap  $G/D = 0,0 \div 0,5$  dengan interval 0,1 dan  $G/D = 1,0$ ; (c) data dan pembahasan distribusi tekanan, koefisien *base pressure* ( $C_{Pb}$ ), koefisien aerodinamik ( $C_{Dp}$  dan  $C_{Lp}$ ), Strouhal number, dan profil kecepatan untuk susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio spasi  $L/D = 2,7$  di *center-line* dan di dekat dinding dengan variasi rasio gap  $G/D = 0,0 \div 0,5$  dengan interval 0,1 dan  $G/D = 1,0$ ; dan (d) diskusi tentang pengaruh adanya dinding terhadap karakteristik aliran dari susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding pada lapis batas turbulen.

Penyajian data dan pembahasan distribusi tekanan ini dilakukan pada setiap silinder dalam susunan dan dinding untuk semua variasi rasio gap  $G/D$ .

Data-data kuantitatif yang diperoleh melalui metode simulasi numerik seperti distribusi tekanan untuk setiap silinder dan dinding, dan profil kecepatan di daerah wake silinder *downstream* juga ditampilkan. Sedangkan visualisasi aliran seperti *vorticity contour*, *velocity pathline*, maupun profil kecepatan ditampilkan pada bagian akhir dari setiap pembahasan rasio gap G/D dan rasio L/D.

#### 4.1. Data dan Pembahasan Tebal Lapis Batas Turbulen dan Intensitas Turbulen

Pada penelitian ini untuk membangkitkan lapis batas turbulen dari dinding dipasang kawat dengan diameter ( $\phi$ )= 3,5 mm pada jarak ( $x$ )= 50mm dari *leading edge* yang berfungsi sebagai *turbulent generator*. Seperti telah disampaikan di atas bahwa pengukuran tebal lapis batas ( $\delta$ ) dinding ini diperlukan agar dapat diketahui secara jelas posisi silinder, khususnya susunan silinder lower dalam lapis batas ketika variasi rasio gap G/D dilakukan. Pengukuran tebal ( $\delta$ ) lapis batas dinding ini dilakukan pada posisi dimana titik pusat silinder *upstream* akan dipasang, dengan kondisi susunan silinder belum ditempatkan. Menurut Fox dan McDonald (2010), penentuan posisi titik pusat agar memperoleh lapis batas turbulen dengan menggunakan persamaan:

$$Re_x = \frac{\rho U x}{\mu} = 500.000 \quad (4.1)$$

dimana:

$\rho$  adalah densitas udara, dalam satuan  $\text{kg/m}^3$

$U$  adalah kecepatan aliran udara (kecepatan free-stream), dalam satuan  $\text{m/sec}$

$x$  adalah jarak *downstream* dari *leading edge* plat datar, dalam satuan  $\text{m}$

$\mu$  adalah viskositas absolut udara, dalam satuan  $\text{kg/(m.sec)}$

Sedangkan kondisi pengambilan data dalam eksperimen ini sudah ditentukan di depan sebesar  $Re = 5,3 \times 10^4$  berdasarkan diameter silinder. Berikutnya dengan menggunakan persamaan:

$$Re_D = \frac{\rho U_\infty D}{\mu} \quad (4.2)$$

dimana:

$\rho$  adalah densitas udara, dalam satuan  $\text{kg/m}^3$

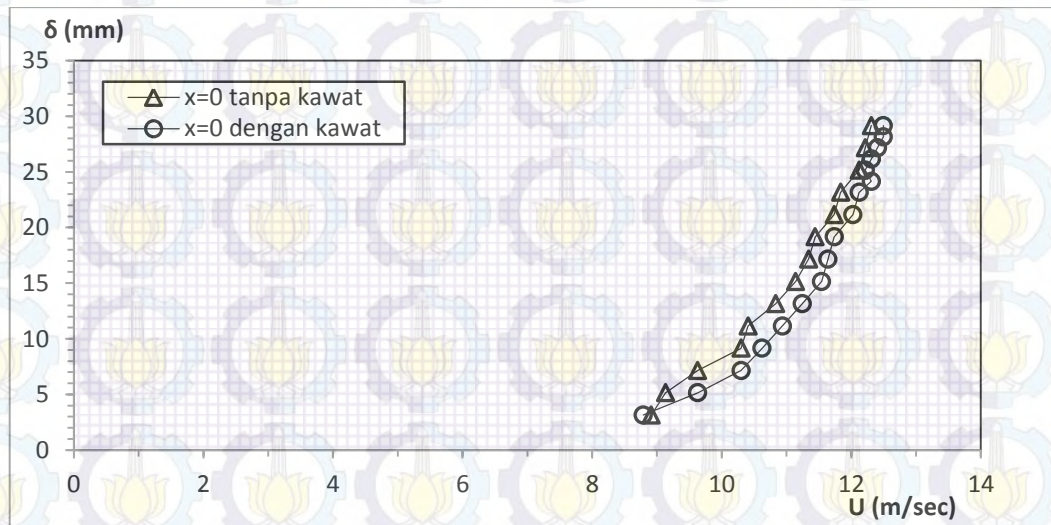
$U_\infty$  adalah kecepatan free-stream, dalam satuan  $\text{m/sec}$

$D$  adalah diameter silinder, dalam satuan **m**

$\mu$  adalah viskositas absolut udara, dalam satuan **kg/(m.sec)**

dapat dihitung besaran dari kecepatan free-stream ( $U_\infty$ ). Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan 4.2 diperoleh nilai kecepatan free-stream ( $U_\infty$ )= 12,9 m/sec. Berikutnya nilai kecepatan tersebut dimasukkan dalam persamaan 4.1, sehingga diperoleh jarak *downstream* dari *leading edge*, yaitu  $x= 0,566$  m atau  $x= 566$  mm. Dengan demikian pengambilan posisi penempatan titik pusat silinder *upstream* dalam susunan empat silinder pada penelitian ini ( $x$ )= 620 mm dari *leading edge* plat datar adalah sudah berada dalam lapis batas turbulen.

Selanjutnya untuk mengetahui kondisi aliran yang akan melintasi susunan silinder, diamati *shape factor* aliran yang diperoleh secara numerik pada posisi  $x/D= -3$  dan susunan silinder sudah terpasang. Pengambilan posisi ini dengan pertimbangan pada posisi tersebut efek keberadaan dinding terhadap aliran pada *upstream* silinder belum terjadi.



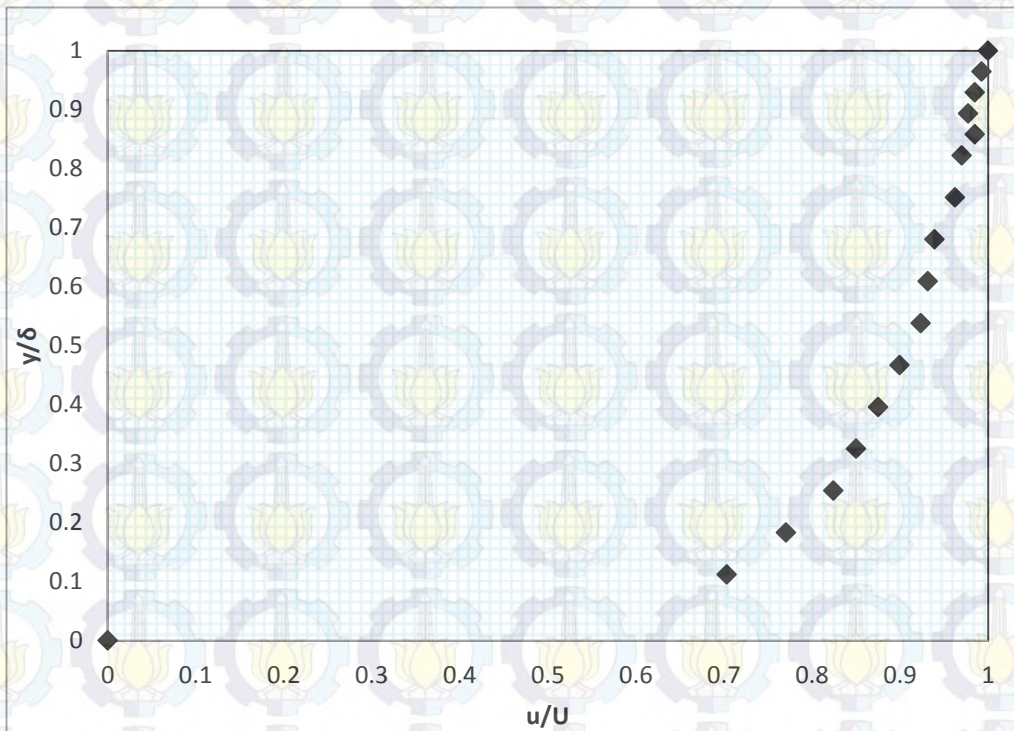
Gambar 4.1. Perbandingan Tebal Lapis Batas pada Plat Datar Posisi  $x/D= 0$ , Peletakan Silinder *Upstream* = 620 mm dari *Leading Edge*, pada  $Re= 5,3 \times 10^4$  dalam Bentuk  $U - \delta$

Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan tebal lapis batas ( $\delta$ ) pada plat datar yang tanpa dan dengan diberikan pengganggu (*turbulent generator*) dalam bentuk kawat, sebelum susunan silinder sirkular ditempatkan. Pemilihan kawat sebagai pengganggu ini sama dengan yang dilakukan oleh Zdravkovich (1985)



maupun Choi dan Lee (2000). Dapat disimpulkan bahwa dengan diberi kawat pengganggu, ketebalan lapis batas dari plat datar relatif sama dibanding tanpa kawat pengganggu.

Hal ini disebabkan karena penempatan kawat pengganggu yang relatif cukup jauh dari posisi penempatan titik pusat silinder *upstream* ( $x = 570$  mm), dan juga pada posisi ini  $Re_x > Re_c$ , dimana  $Re_c$  adalah bilangan Reynolds transisi yang harganya 500.000 (Fox dan McDonald, 2010). Jika dihitung rasio tebal lapis batas ( $\delta$ ) terhadap diameter silinder sirkular ( $D$ ) pada posisi pengukuran dimana nantinya titik pusat silinder *upstream* akan diletakkan yakni pada lokasi  $x = 620$  mm dari *leading edge*, adalah  $\delta/D = 0,49$  untuk tanpa kawat pengganggu, dan  $\delta/D = 0,5$  untuk diberi kawat pengganggu.



Gambar 4.2. Hasil Pengukuran Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi  $x/D = 0$ , Peletakan Silinder *Upstream* = 620 mm dari *Leading Edge*, pada  $Re = 5,3 \times 10^4$  dalam Bentuk  $u/U - y/\delta$

Gambar 4.2 menunjukkan hubungan antara rasio tebal lapis batas dengan ketinggian ( $y/\delta$ ) dan rasio kecepatan yang terjadi dalam lapis batas ( $u/U$ ), ketika susunan silinder sirkular belum terpasang.

Dengan menggunakan bantuan persamaan *displacement thickness* ( $\delta^*$ ):

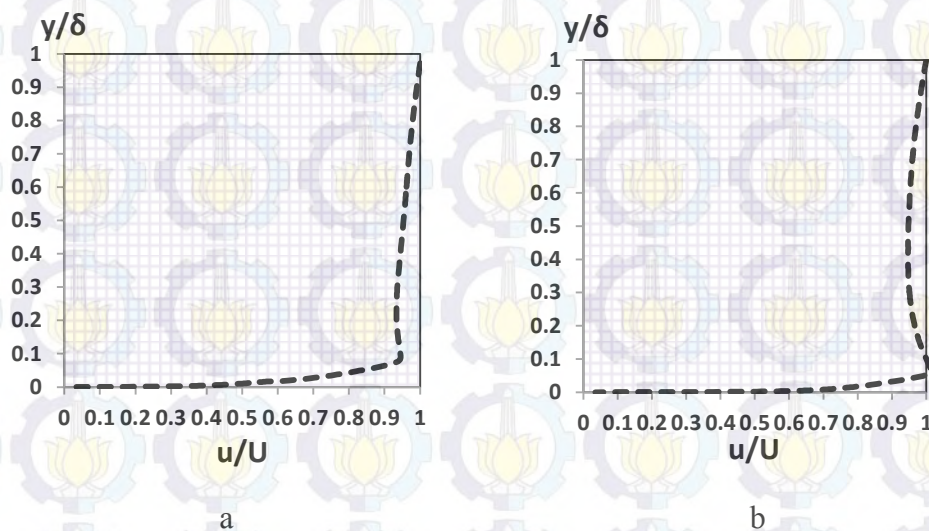
$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (4.3)$$

dan persamaan *momentum thickness* ( $\theta$ ):

$$\theta = \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{maka dapat dihitung besaran } \textit{shape factor} (H) &= \delta^* / \theta & (4.5) \\ &= 1,48 \end{aligned}$$

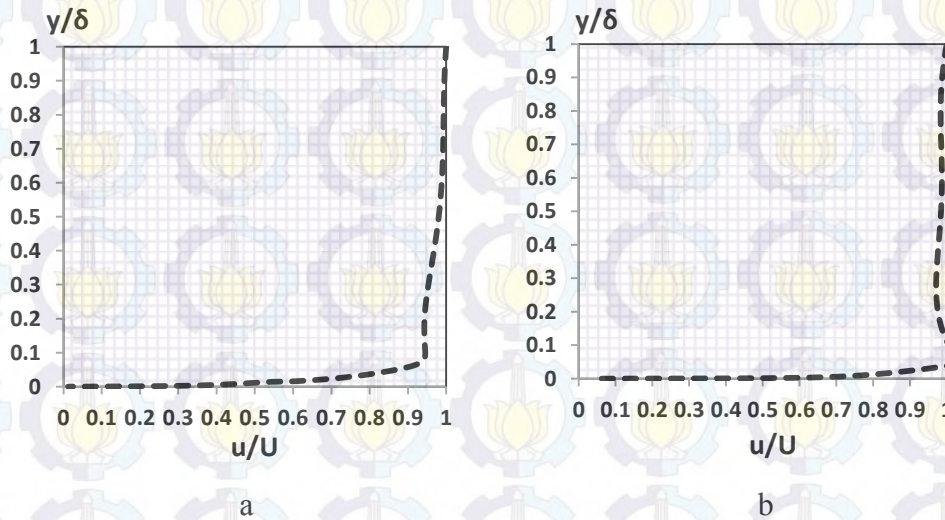
Dengan besaran *shape factor* tersebut menunjukkan bahwa lapis batas termasuk dalam klasifikasi jenis lapis batas turbulen, karena menurut Fox dan McDonald (2010) bahwa *shape factor* ( $H$ ) lapis batas turbulen meningkat dari  $H= 1,3$  untuk *zero pressure gradient* sampai mendekati  $H=2,5$  pada separasi.



Gambar 4.3. Hasil Simulasi Numerik Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi  $x/D= -3$ , a)  $G/D= 0,0$ ; b)  $G/D= 1,0$  pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $Re= 5,3 \times 10^4$  dengan Susunan Silinder Terpasang

Gambar 4.3 menunjukkan profil kecepatan yang diperoleh melalui simulasi numerik ketika susunan silinder tersebut telah terpasang. Pengukurannya dilakukan pada jarak  $x/D= -3$ , dimana  $x/D= 0$  adalah posisi *center-line* susunan silinder *upstream* ditempatkan, dengan rasio susunan  $L/D= 2,7$  masing-masing pada rasio celah permukaan silinder *lower* dengan plat datar ( $G/D$ )=  $0,0$  dan  $1,0$ . Berdasarkan perhitungan *shape factor* ( $H$ ), pada rasio  $G/D= 0,0$  diperoleh nilai

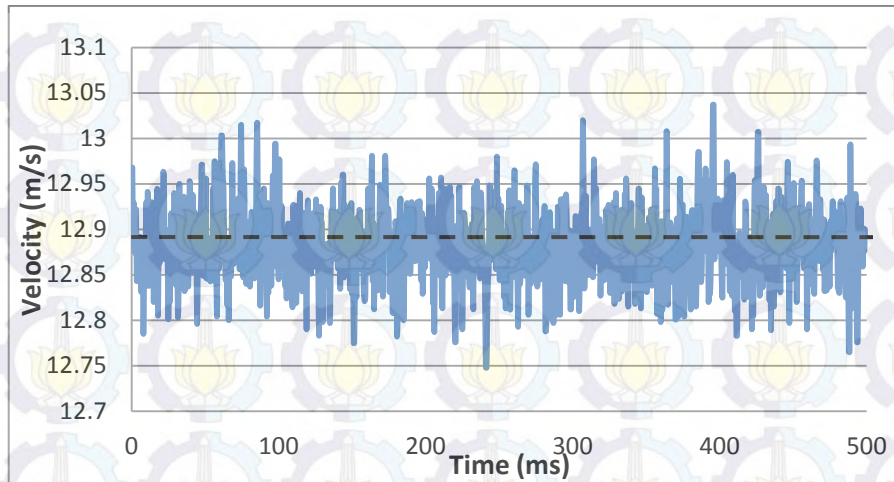
sebesar: 1,79, sedangkan pada rasio  $G/D= 1,0$  diperoleh nilai sebesar: 1,48. Hal ini menunjukkan bahwa klasifikasi jenis lapis batas untuk kedua kondisi adalah turbulen.



Gambar 4.4. Hasil Simulasi Numerik Profil Kecepatan dalam Lapis Batas pada Plat Datar Posisi  $x/D= -3$ , a)  $G/D= 0,0$ ; b)  $G/D= 1,0$  pada Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $Re= 5,3 \times 10^4$  dengan Susunan Silinder Terpasang

Gambar 4.4 menunjukkan profil kecepatan yang diperoleh melalui simulasi numerik ketika susunan silinder tersebut telah terpasang. Pengukurannya dilakukan pada jarak  $x/D= -3$ , dimana  $x/D= 0$  adalah posisi *center-line* susunan silinder *upstream* ditempatkan, dengan rasio susunan  $L/D= 4,0$  masing-masing pada rasio celah permukaan silinder *lower* dengan plat datar ( $G/D$ )= 0,0 dan 1,0. Berdasarkan perhitungan *shape factor* ( $H$ ), pada rasio  $G/D= 0,0$  diperoleh nilai sebesar: 2,01, sedangkan pada rasio  $G/D= 1,0$  diperoleh nilai sebesar: 1,55. Hal ini menunjukkan bahwa klasifikasi jenis lapis batas untuk kedua kondisi adalah turbulen.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi jenis lapis batas ketika susunan silinder sirkular terpasang, masing-masing pada rasio  $L/D= 2,7$  dan 4,0 dengan rasio  $G/D= 0,0$  dan 1,0, adalah lapis batas turbulen.



Gambar 4.5. Fluktuasi Kecepatan yang diukur di *Center-line* Windtunnel pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.5 menunjukkan fluktuasi kecepatan yang diukur dengan *hotwire anemometry* pada *center-line* wind tunnel. Pengukuran *free stream* intensitas turbulen dari wind tunnel yang akan digunakan pada eksperimen ini dilakukan pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , yang selanjutnya data tersebut diolah dengan menggunakan persamaan:

$$U' = (\sum (U_{\text{mean}} - U_n)^2 / n)^{0,5} \quad (4.6)$$

$$IT = (U' / U_{\text{mean}}) \times 100\% \quad (4.7)$$

dimana:

$U_{\text{mean}}$  = kecepatan rata-rata

$U_n$  = kecepatan ke n (n= 1, 2, 3, 4, ..... , n)

$U'$  = penyimpangan dari kecepatan rata-rata

n = jumlah pengukuran

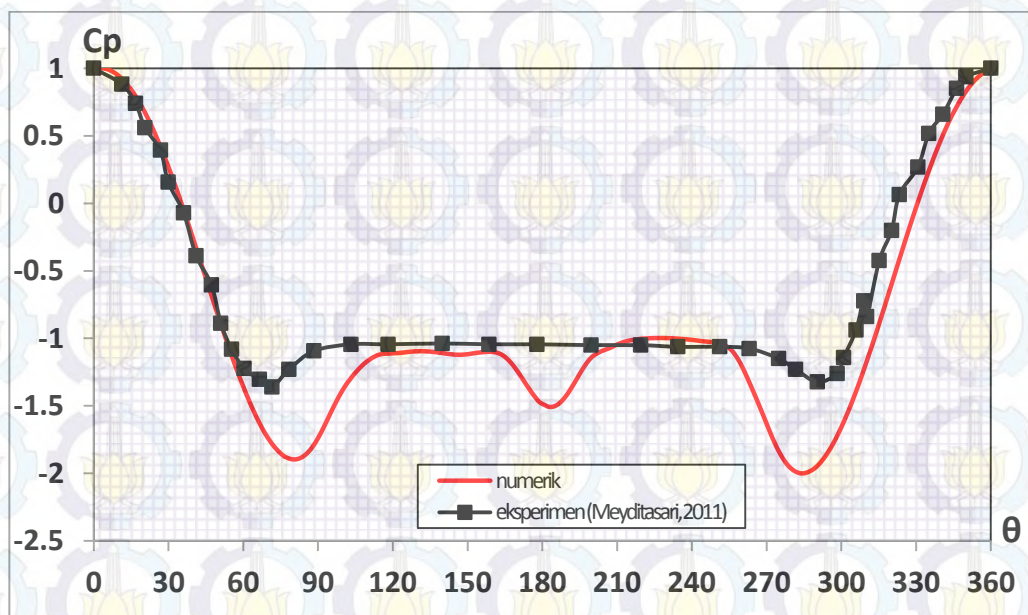
IT = intensitas turbulen

Berdasarkan pengolahan data diperoleh hasil intensitas turbulen (IT) dari wind tunnel yang akan digunakan adalah= 4,48 %. Harga intensitas turbulen tersebut termasuk relatif besar, jika dibandingkan dengan intensitas turbulen dari wind tunnel yang digunakan oleh peneliti lainnya seperti Sayers (1988), Lam dan Fang (1995), Lam et al. (2003b), Zdravkovich (1985), Choi dan Lee (2000), yang rata-rata  $IT < 1\%$ .

## 4.2. Data dan Pembahasan Karakteristik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square ( $L/D= 4,0$ )

### 1. Center-line

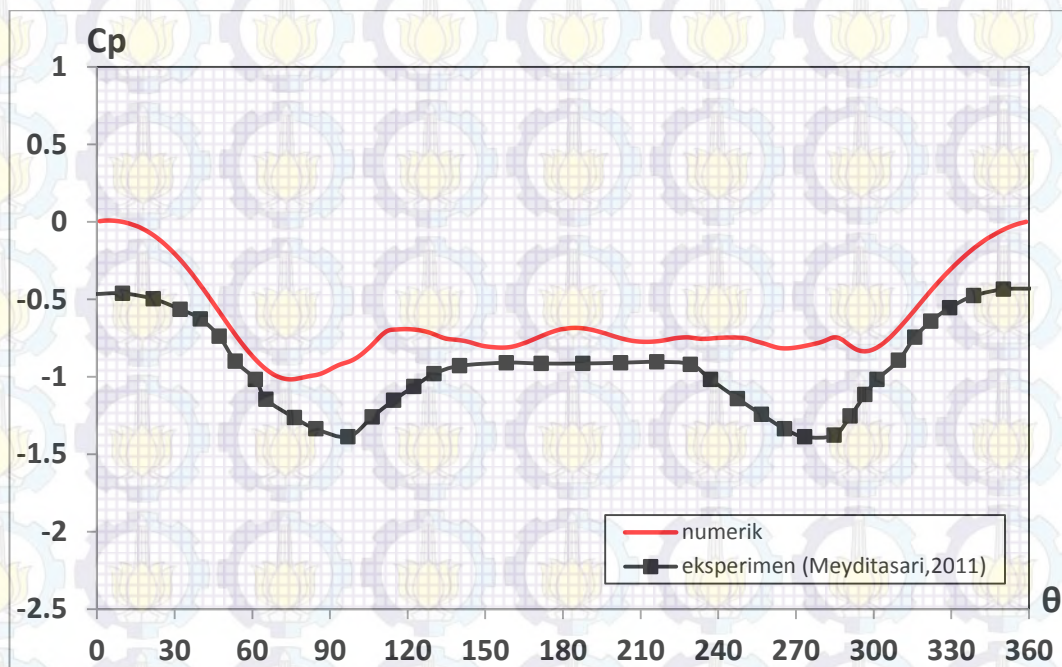
Berikut ini akan disajikan data tentang distribusi tekanan kontur setiap silinder pada susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio spasi  $L/D= 4,0$  di *center-line*, hasil perhitungan koefisien *drag* ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien *lift* ( $C_{Lp}$ ) berdasarkan distribusi tekanan, dan visualisasi aliran berupa *vorticity contour*, *velocity pathline*, dan profil kecepatan *upstream* ( $x/D= -1,0$ ) silinder *upstream*, diantara susunan silinder ( $x/D= 2,0$ ) dan daerah wake silinder *downstream* ( $x/D= 7,5$ ) yang keseluruhannya diperoleh melalui metode simulasi numerik. Data-data ini disampaikan untuk mengetahui karakteristik aliran pada susunan empat silinder di *center-line*.



Gambar 4.6. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 4,0$  di *Center-line* pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.6 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D= 4,0$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada *upper-side* dan *lower-side* silinder relatif tidak simetri, dimana pada *upper-side*

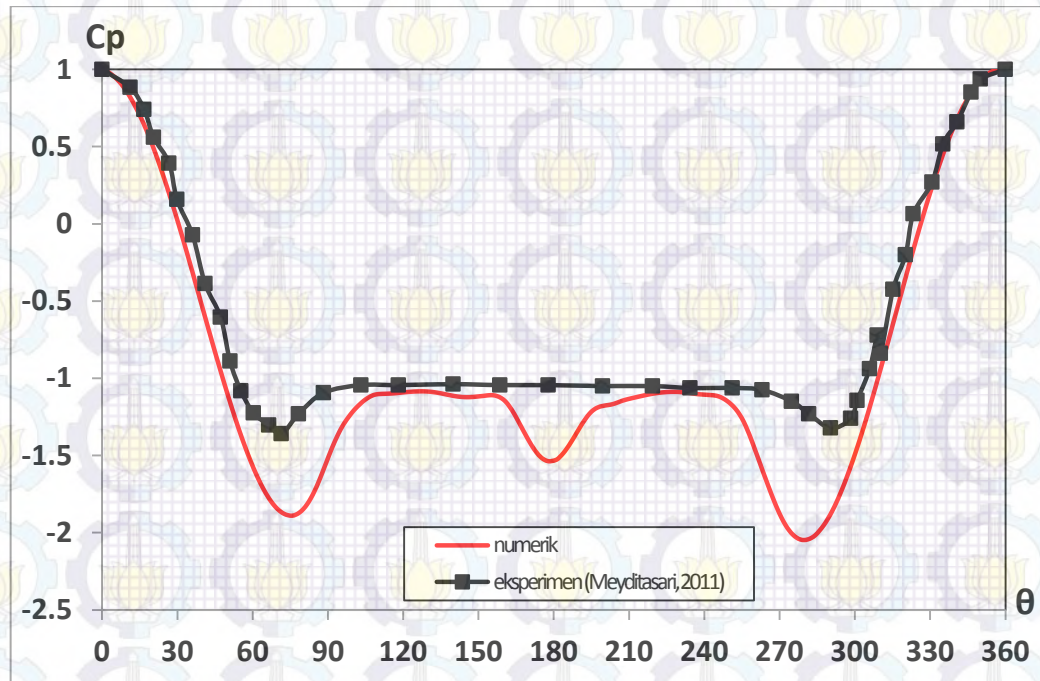
karena membentuk gap dengan *lower-side* silinder-3 sehingga aliran mengalami percepatan dibanding dengan pada *lower-side*. Hal ini ditunjukkan dari perbedaan posisi tekanan minimum, dimana pada *upper-side* silinder terjadi pada  $\theta = 80^\circ$  sedangkan pada *lower-side* silinder terjadi pada  $\theta = 284^\circ$ . Kondisi ini juga membuat titik stagnasi silinder-1 bergerak ke *inner-side* silinder,  $\theta_s = 2^\circ$  dari *front-side*. Percepatan aliran pada *upper-side* silinder juga menyebabkan mundurnya posisi titik separasi  $\theta_{sp} = 109^\circ$ , dan pada *lower-side* silinder yang posisi titik separasinya terjadi pada  $\theta_{sp} = 244^\circ$ . Dengan menggunakan data distribusi tekanan ini, dihitung harga koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) pada silinder-1 dan diperoleh 1,01, sementara harga koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = -0,057.



Gambar 4.7. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-2* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 4,0$  di *Center-line* pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.7 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D = 4,0$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini memiliki harga yang negatif, baik pada *upper-side* dan *lower-side* silinder, sementara pada *rear-side* silinder terjadi kenaikan tekanan

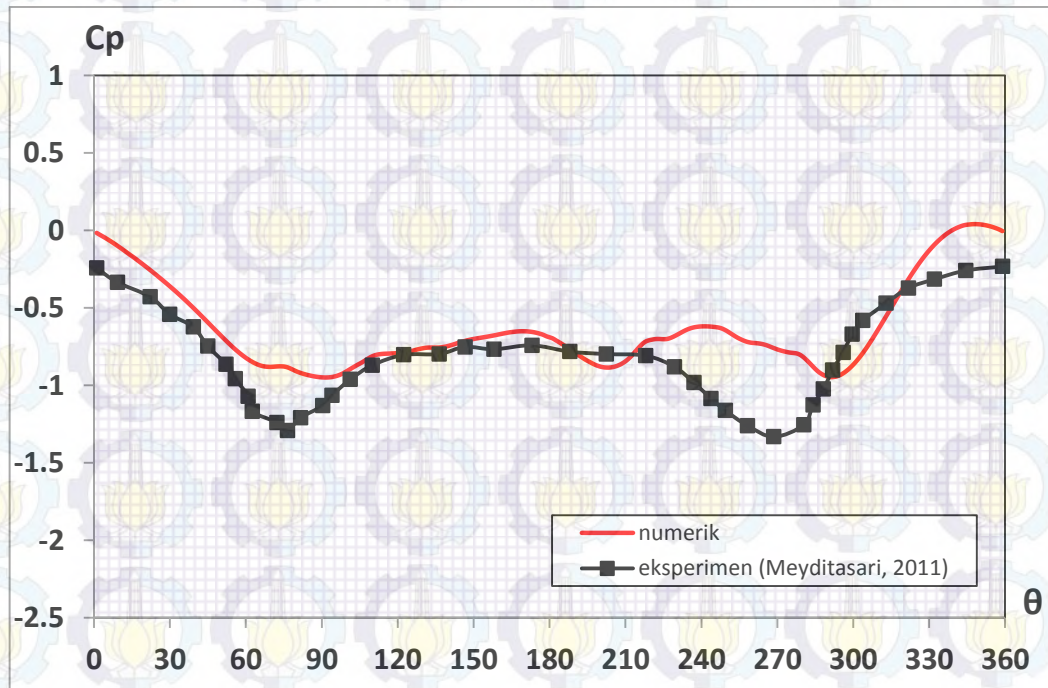
yang menunjukkan terjadinya fenomena separasi pada daerah wake. Harga  $C_p \geq 0$  menunjukkan bahwa kontur silinder-2 terutama pada *front-side* silinder ini tertimpa atau *impinge* oleh vortex yang terbentuk pada silinder *upstream*. Hal ini juga ditunjukkan dari nilai koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) silinder-2 adalah 0,39, sementara nilai koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,04.



Gambar 4.8. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* Silinder-3 dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 4,0$  di Center-line pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.8 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D= 4,0$  di center-line. Melalui Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada *upper-side* dan *lower-side* silinder relatif tidak simetri, dimana pada *lower-side* karena membentuk gap dengan *upper-side* silinder-1 sehingga aliran mengalami percepatan dibanding dengan pada *upper-side*. Hal ini ditunjukkan dari perbedaan posisi tekanan minimum, dimana pada *upper-side* silinder terjadi pada  $\theta= 76^\circ$  sedangkan pada *lower-side* silinder terjadi pada  $\theta= 280^\circ$ . Kondisi ini juga membuat titik stagnasi silinder-3 bergerak ke *inner-side* silinder,  $\theta_s= 358^\circ$  dari *front-side*. Percepatan aliran pada *lower-side* silinder juga menyebabkan

mundurnya posisi titik separasi  $\theta_{Sp} = 244^{\circ}$ , dan pada *upper-side* silinder yang posisi titik separasinya terjadi pada  $\theta_{Sp} = 109^{\circ}$ . Dengan menggunakan data distribusi tekanan ini, dihitung harga koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) pada silinder-3 dan diperoleh 1,04, sementara harga koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = -0,036.

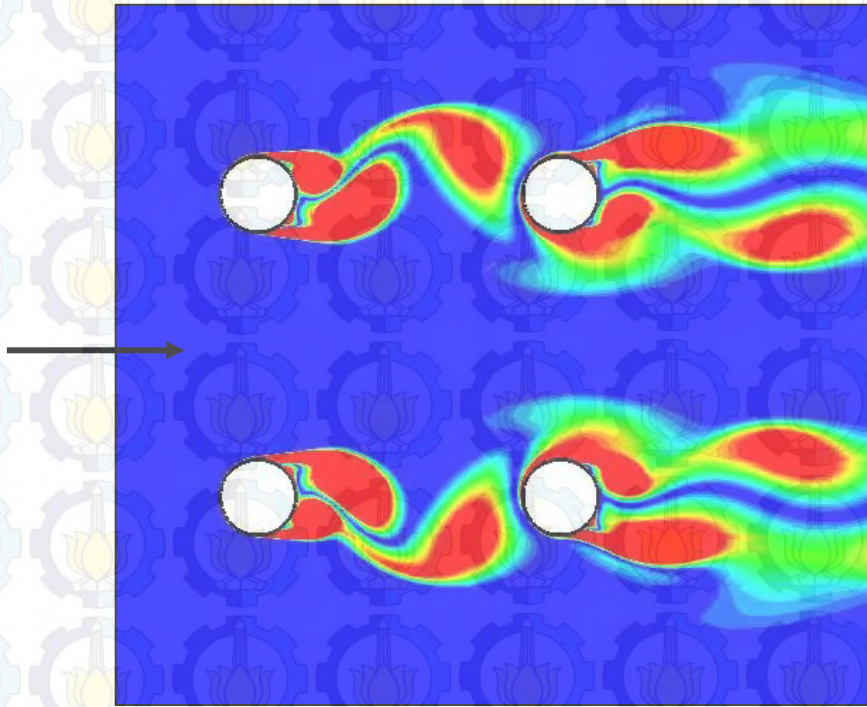


Gambar 4.9. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 4,0$  di Center-line pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Dibandingkan dengan Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.9 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D = 4,0$  di center-line. Melalui Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini memiliki harga yang negatif, baik pada *upper-side* dan *lower-side* silinder, sementara pada *rear-side* silinder terjadi kenaikan tekanan yang menunjukkan terjadinya fenomena separasi pada daerah wake. Harga  $C_p \geq 0$  menunjukkan bahwa kontur silinder-4 terutama pada *front-side* silinder ini tertimpa atau *impinge* oleh vortex yang terbentuk pada silinder *upstream*. Hal ini juga ditunjukkan dari nilai koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) silinder-4 adalah 0,38, sementara nilai koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,082.



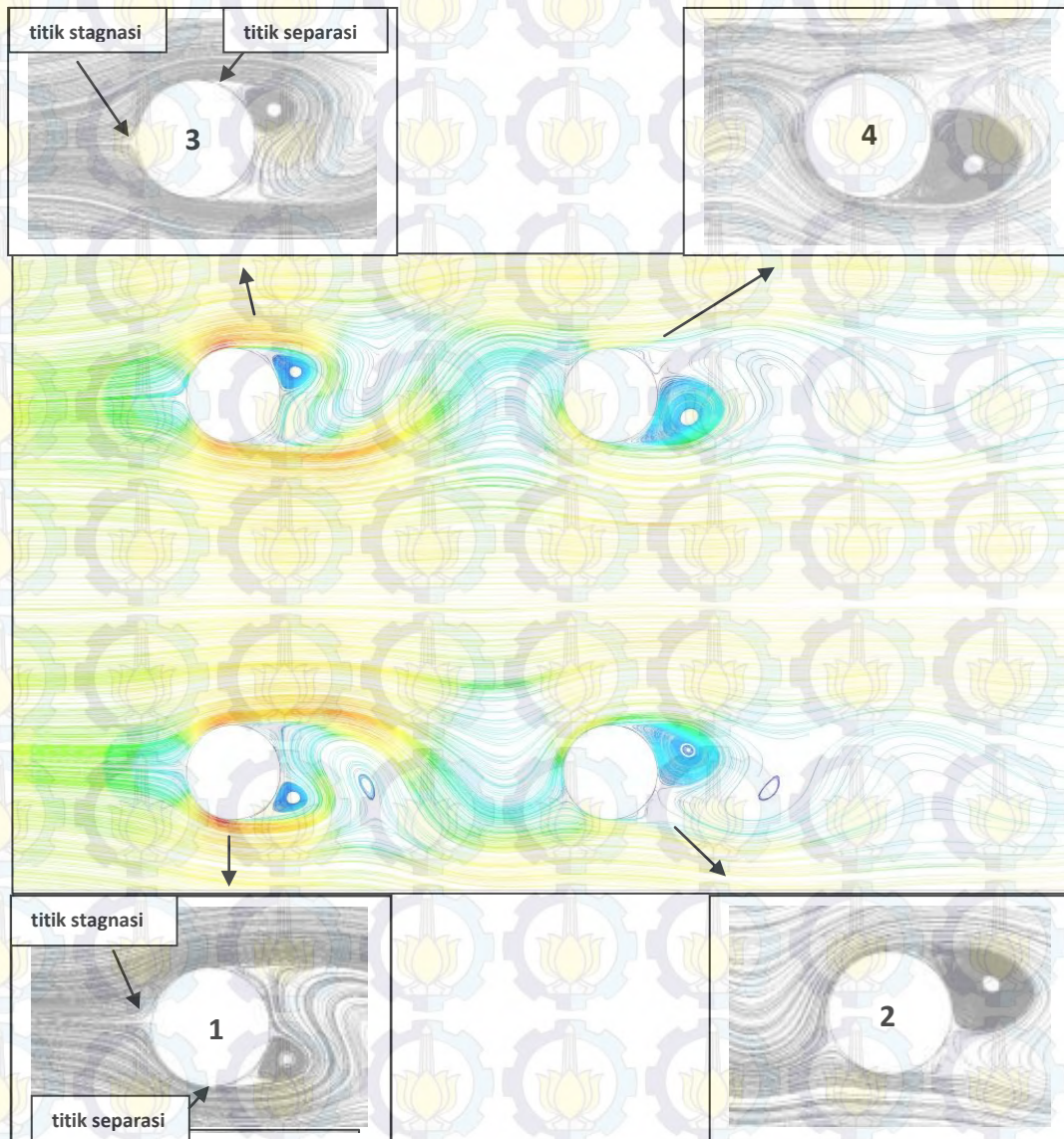
Selanjutnya ditampilkan visualisasi aliran dalam bentuk *vorticity contour*, *velocity pathline*, dan profil kecepatan dari aliran yang melintasi susunan 4 silinder *in-line square* di *center-line*.



Gambar 4.10. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D=4,0$  di *Center-line*

Gambar 4.10 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=4,0$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.10 terlihat bahwa silinder *downstream* terbenam pada wake dari silinder *upstream*, dan *free shear layer* dari silinder *upstream* “mengenai” atau *impinge* pada silinder *downstream*, juga pada daerah wake dari silinder *downstream* terbentuk *vortices shed*. Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa *vortices shed* yang terbentuk pada silinder *upstream* lebih besar dari silinder *downstream*, dan *vortices shed* yang terbentuk pada silinder-silinder *lower* anti-phase dengan silinder-silinder *upper*. Fenomena serupa diperoleh oleh Lam dan Zou (2009), yang juga mendapatkan hasil bahwa *fluctuating lift* dari silinder *downstream* lebih besar dari *fluctuating lift* dari silinder *upstream*. Sehingga susunan silinder pada rasio  $L/D=4,0$  di *center-line* rejim interferensi alirannya masuk dalam kategori campuran antara *proximity* dan *wake interference* (Zdravkovich, 1987), karena pada rasio spasi ini masih terjadi interaksi aliran antara silinder *lower* dan silinder

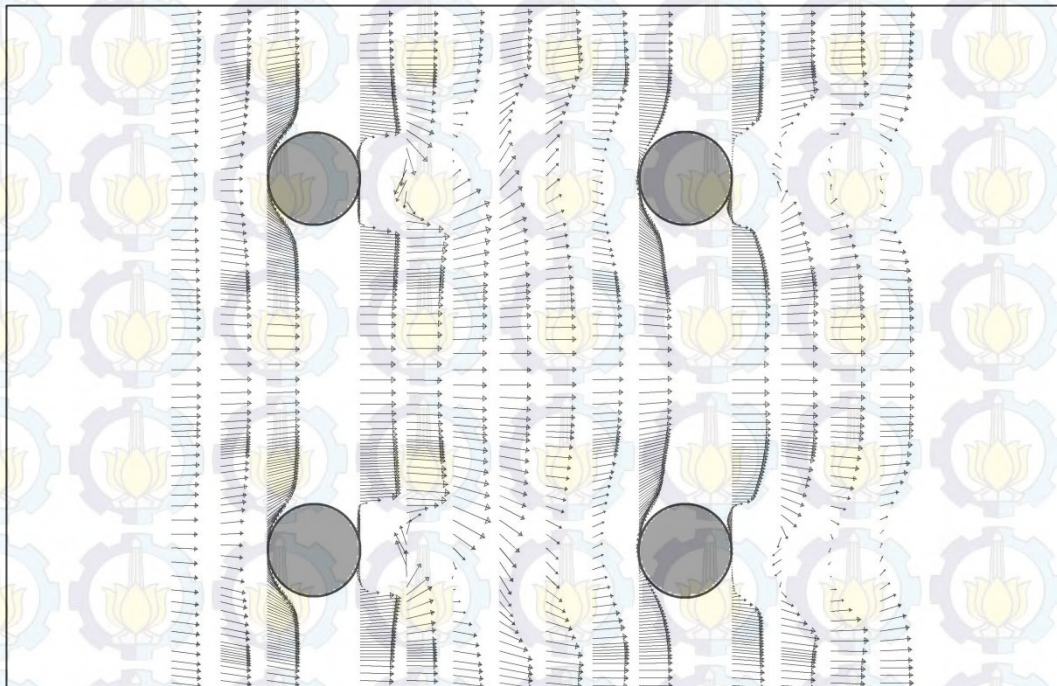
upper dari silinder *upstream*, artinya aliran disekitar silinder lower silinder-1 masih dipengaruhi oleh keberadaan silinder upper silinder-3 ataupun sebaliknya. Tetapi pada rasio spasi ini perilaku aliran antara silinder *upstream* dengan silinder *downstream* sudah menyerupai paralel dua susunan silinder secara tandem, dimana aliran disekeliling silinder *downstream* dipengaruhi oleh silinder *upstream*.



Gambar 4.11. Visualisasi *Velocity Pathline* pada Rasio  $L/D=4,0$  di *Center-line*

Gambar 4.11 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=4,0$  di *center-line*. Dari Gambar 4.11 dapat dilihat posisi

titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada silinder *upstream* silinder-1 dan silinder-3, dan titik separasi ( $\theta_{sp}$ ) yang terjadi pada kedua silinder tersebut. Melalui visualisasi ini juga terlihat adanya perbedaan akselerasi aliran yang terjadi pada *upper-side* dan *lower-side* silinder *upstream* silinder-1 dan silinder-3. Momentum aliran yang lebih besar pada celah antara silinder-1 dan silinder-3 menyebabkan titik stagnasi bergerak menuju ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder, dan tekanan minimum dan separasi pada sisi celah dari silinder *upstream* menjadi tertunda.



Gambar 4.12. Visualisasi Aliran Berupa Profil *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 silinder *In-Line Square*  $L/D=4,0$  di *Center-line*

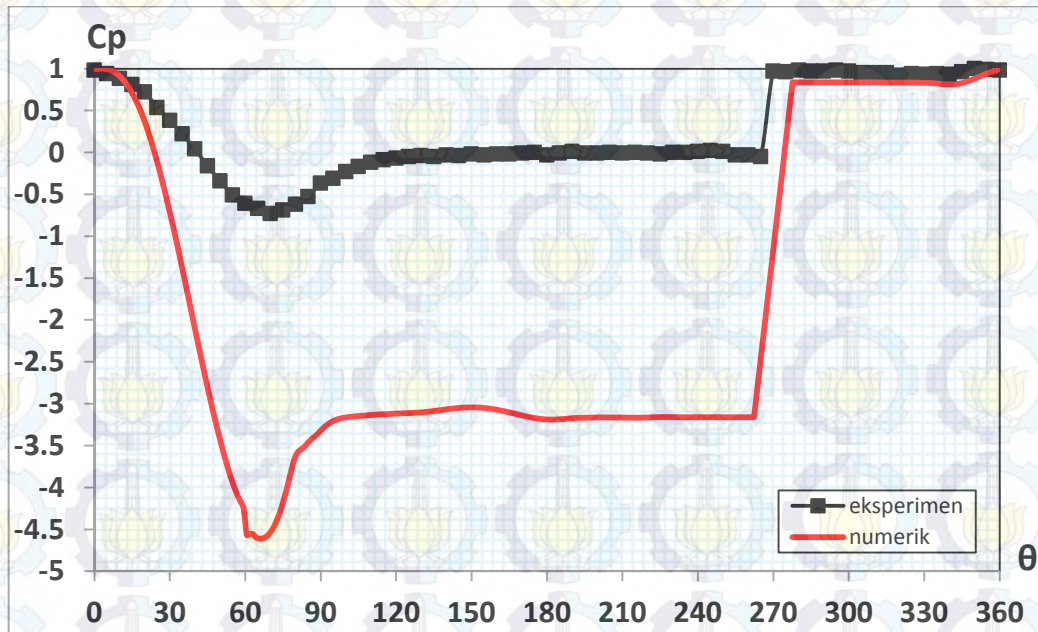
Gambar 4.12 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square*  $L/D=4,0$  di *center-line*, pada posisi  $x/D=-0,5$ ,  $x/D=-1,0$  dan  $x/D=-1,5$  dimana posisi  $x/D=0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Sedangkan posisi diantara silinder *upstream* dan silinder *downstream* masing-masing  $x/D=0,5$ ,  $x/D=1,0$ ,  $x/D=1,5$ ,  $x/D=2,0$ ,  $x/D=2,5$ ,  $x/D=3,0$ , dan  $x/D=3,5$ . Sementara posisi di daerah wake silinder *downstream* masing-masing  $x/D=4,5$ ,  $x/D=5,0$ ,  $x/D=5,5$ , dan  $x/D=6,0$ . Melalui Gambar 4.12 terlihat bahwa aliran *free stream* saat akan melintasi susunan silinder *upstream* (silinder-1 dan silinder-3) memiliki orientasi aliran yang sejajar dengan

*streamwise* (sudut  $\alpha = 0^\circ$ ), artinya *streamwise* aliran *free stream* tidak terdefleksi ketika akan melintasi susunan. Setelah melalui silinder *upstream*, aliran *free stream* yang akan melalui silinder *downstream* terutama aliran di celah kedua silinder masing-masing terdefleksi dari *streamwise* ke *outerside* silinder. Momentum aliran di celah silinder *upstream* yang kuat masih belum mampu untuk mengatasi keberadaan silinder *downstream*, sehingga aliran di celah ini terdefleksi dari *streamwise* menuju ke *outerside* kedua silinder *downstream*, tetapi karena jarak antara silinder *upstream* dan silinder *downstream* cukup jauh sehingga membuat aliran terdefleksi kembali ke arah *streamwise*. Hal ini menunjukkan lemahnya interferensi aliran disekitar silinder *upstream* dengan keberadaan silinder *downstream*. Setelah melalui silinder *downstream* di daerah dekat wake terbentuk *adverse pressure gradient* yang ditunjukkan dari vektor aliran yang berlawanan dengan aliran *free stream*. Juga melalui visualisasi *velocity vector*, ini ditunjukkan evolusi kecepatan fluida ketika sebelum mengalir pada susunan empat silinder, ketika mengalir diantara susunan empat silinder, dan setelah melalui susunan empat silinder untuk memperkuat informasi tentang orientasi aliran *free stream* sebelum mengalir pada susunan silinder.

## 2. Dekat Dinding

Berikut ini akan disajikan data kuantitatif dan kualitatif ketika aliran melintasi susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio spasi  $L/D = 4,0$  di dekat dinding, dengan rasio gap  $G/D = 0,0 \div 0,5$  dengan interval  $0,1$  dan  $1,0$ . Data-data tersebut meliputi: distribusi tekanan dari kontur setiap silinder dan plat datar, hasil perhitungan koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) berdasarkan distribusi tekanan, dan visualisasi aliran berupa *vorticity contour*, *velocity pathline*, dan profil kecepatan akan melintasi silinder *upstream* ( $x/D = -1,0 \div -3,0$ ), diantara susunan silinder ( $x/D = 2,0$ ), dan daerah wake silinder *downstream* ( $x/D = 7,5$ ) yang diperoleh melalui metode eksperimen dan metode simulasi numerik. Data-data ini disampaikan untuk menjelaskan karakteristik aliran pada susunan empat silinder *in-line square* di dekat dinding.

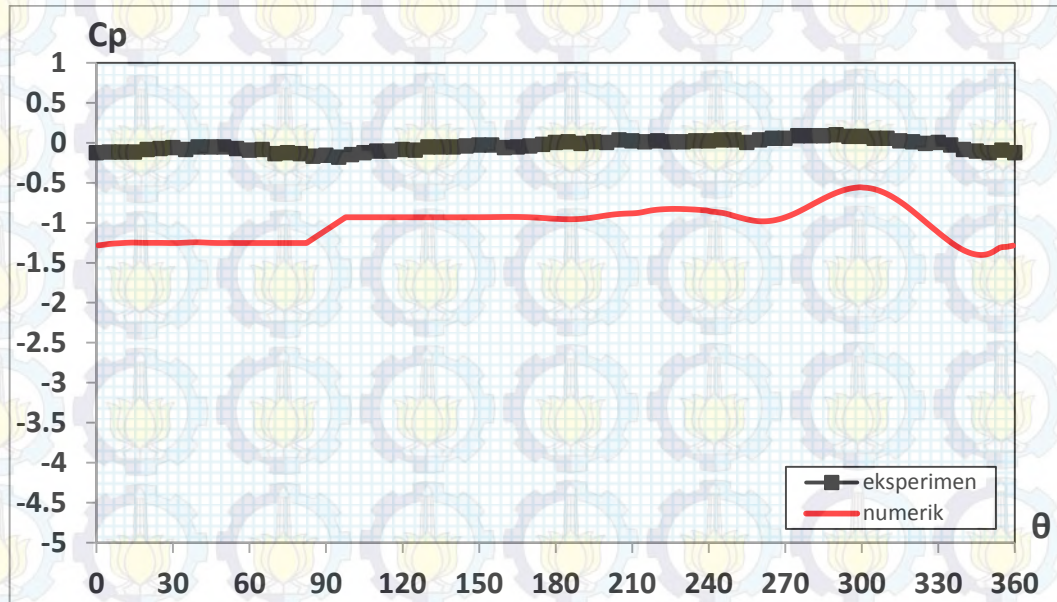
a. Pada  $G/D = 0,0$  (silinder menyentuh dinding)



Gambar 4.13. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan Variasi  $G/D = 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.13 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,0$  (silinder menyentuh dinding). Melalui Gambar 4.13 dapat diketahui ketika rasio  $G/D = 0,0$ , aliran pada *lowerside* terhenti karena silinder menyentuh dinding sehingga harga  $C_p = 0$  terjadi pada sudut  $\theta = 270^\circ$ . Sementara pada *upperside* silinder fluida mendapat tambahan momentum akibat efek *blockage* di *lowerside*, sehingga aliran terdefleksi ke sisi ini dan mengalami percepatan atau akselerasi, hal mana dapat dilihat dari posisi tekanan minimum pada  $\theta = 70^\circ$ , dan selanjutnya mengalami separasi pada  $\theta = 110^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,63 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,69 untuk silinder-1. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai. Hanya akselerasi aliran pada *upperside* silinder pada metode numerik lebih besar, hal

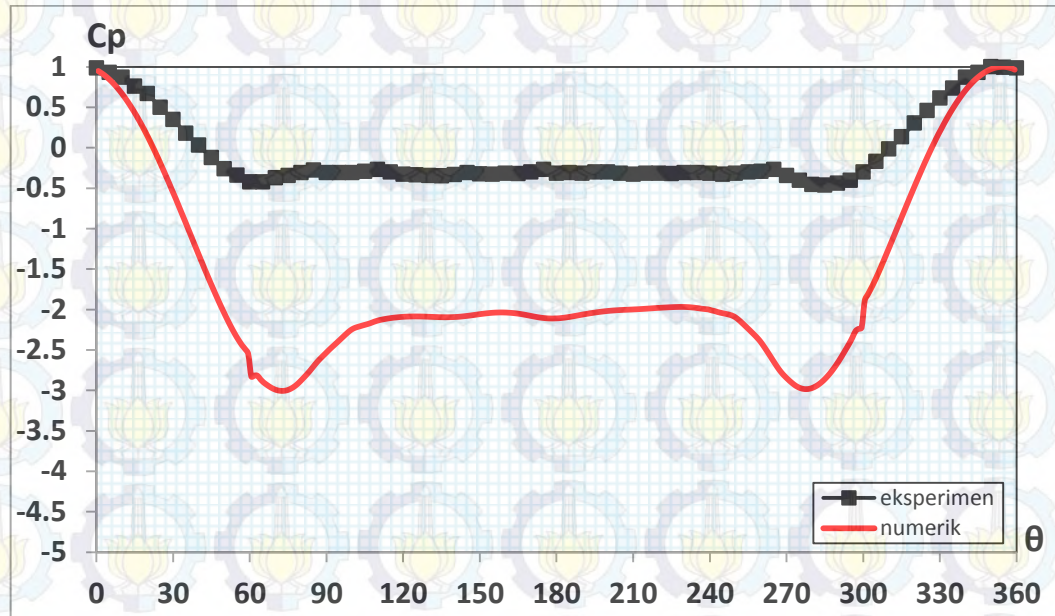
mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



Gambar 4.14. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.14 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.14 dapat diketahui distribusi koefisien tekanan  $C_p$  memiliki harga yang negatif, terutama pada *upperside* silinder. Ini menunjukkan bahwa kontur *upperside* silinder-2 ini dilingkupi atau *shield on* oleh *inner shear layer* dari silinder *upstream*. Sedangkan pada *lower-side* silinder aliran berhenti karena posisi silinder menyentuh dinding, dan harga  $C_p= 0$  pada  $\theta= 270^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = -0,04 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,13 untuk silinder-2. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang mirip. Walaupun dari hasil numerik tampak pada *frontside* silinder terjadi fenomena

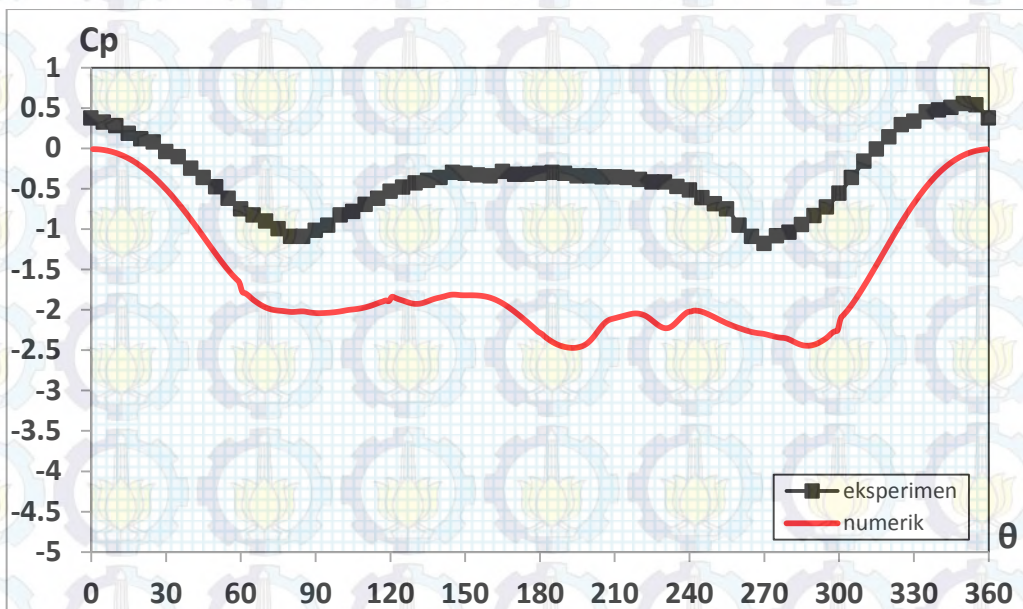
*reattachment*, hal mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



Gambar 4.15. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.15 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder upstream silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari gambar 4.15 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder relatif tidak simetri. Hal mana dapat diketahui dari posisi tekanan minimum *upperside* silinder terjadi pada  $\theta= 60^0$ , sementara pada *lowerside* terjadi pada  $\theta= 285^0$ . Ini dikarenakan adanya efek blockage pada gap antara silinder lower (silinder-1) dengan dinding, sehingga aliran cenderung mengalir ke atas mengarah pada gap antara silinder lower (silinder-1) dengan silinder upper (silinder-3). Akibatnya pada sisi lower silinder-3 mengalami percepatan lebih besar dibanding sisi uppernya, dan menyebabkan titik stagnasi pada silinder-3 bergerak ke *inner-side* dan terjadi pada  $\theta_s= 350^0$ . Juga membuat titik separasi pada *lowerside* mundur menjadi  $\theta_{sp}= 265^0$  dibanding dengan

*upper*side yang terjadi lebih awal pada  $\theta_{sp} = 85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,69 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,04 untuk silinder-3. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang relatif sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upper*side dan *lower*side silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi. Hal mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.

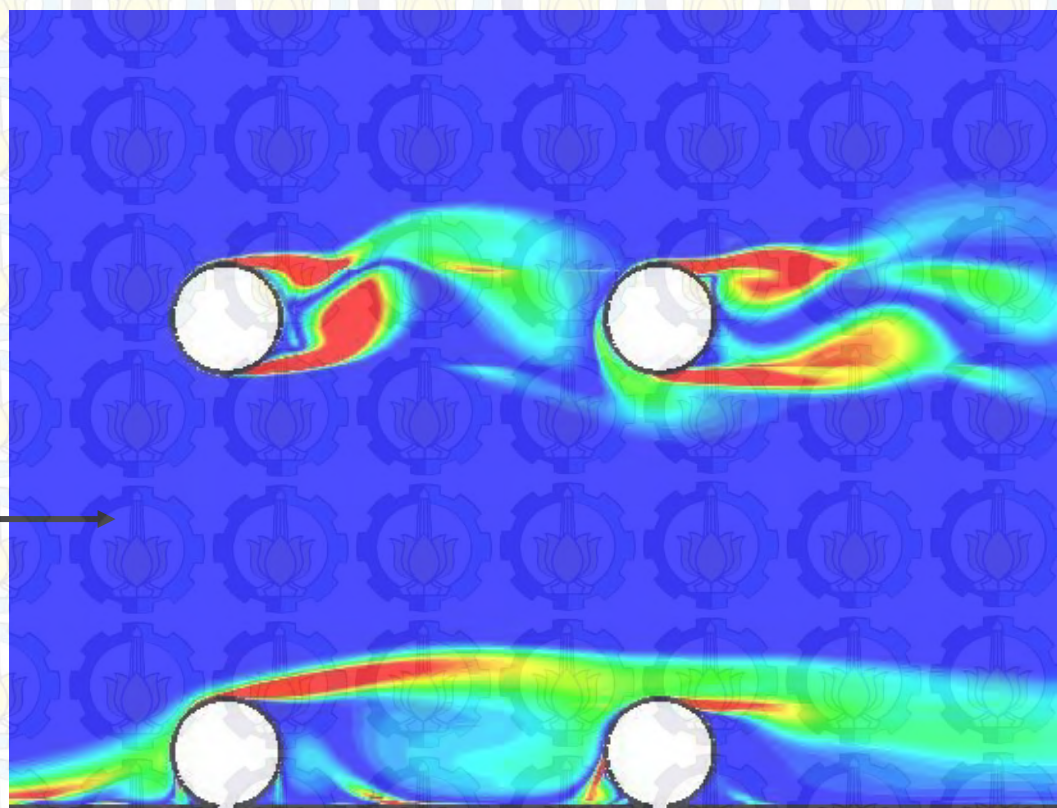


Gambar 4.16. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan Variasi  $G/D = 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.16 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,0$ . Dari gambar 4.16 terlihat bahwa distribusi tekanan silinder tersebut relatif simetri, tetapi menyerupai distribusi tekanan pada kontur silinder sirkular tunggal. Pada *lower*side silinder tepatnya pada  $\theta = 350^\circ$  mempunyai nilai tekanan maksimum, yang berarti bahwa pada kontur silinder



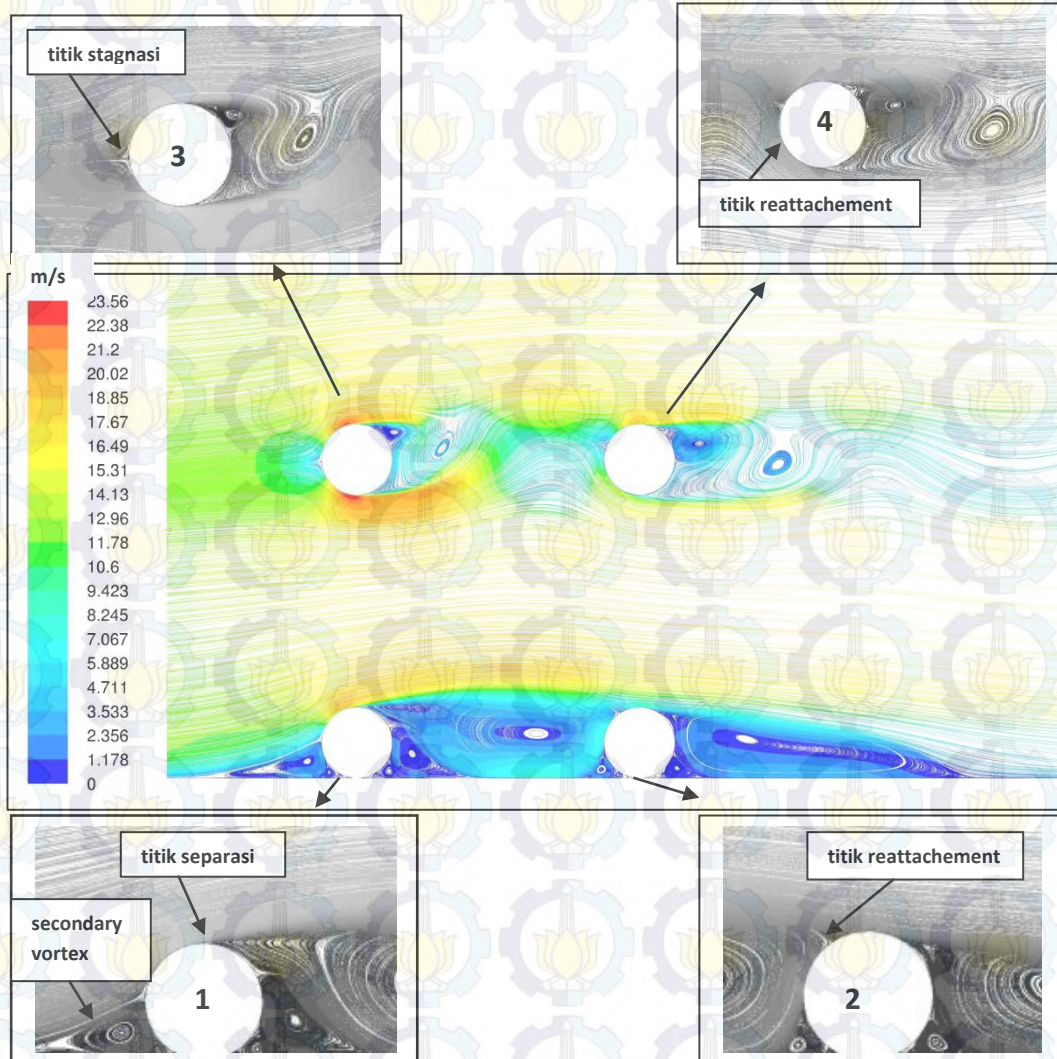
tersebut terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder upstream. Posisi tekanan minimum dari *upperside* terjadi pada  $\theta = 80^\circ$  dan titik separasi ( $\theta_{sp}$ ) =  $145^\circ$ , sementara pada *lowerside* terjadi pada  $\theta = 270^\circ$  dan separasi ( $\theta_{sp}$ ) =  $230^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,40 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,08 untuk silinder-4. Dibanding dengan distribusi tekanan yang diperoleh melalui metode numerik terdapat perbedaan posisi *reattachment*, dimana dengan metode ini terjadi pada *frontside* dari kontur silinder-4 ini.



Gambar 4.17. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,0$

Gambar 4.17 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,0$ . Melalui Gambar 4.17 terlihat bahwa tidak terbentuk *vortices shed* pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2. Dengan posisi silinder menyentuh dinding membuat tidak terdapat *outer shear layer*, sedangkan *inner shear layer* dari silinder-1 melingkupi silinder-2. Sementara pada kedua silinder upper terlihat

bahwa silinder-4 terbenam oleh wake dari silinder-3, *free shear layer* dari silinder-3 *impinge* pada kontur silinder-4. Pada silinder-3 dan silinder-4 sudah terbentuk *vortices shed* tetapi belum sempurna.

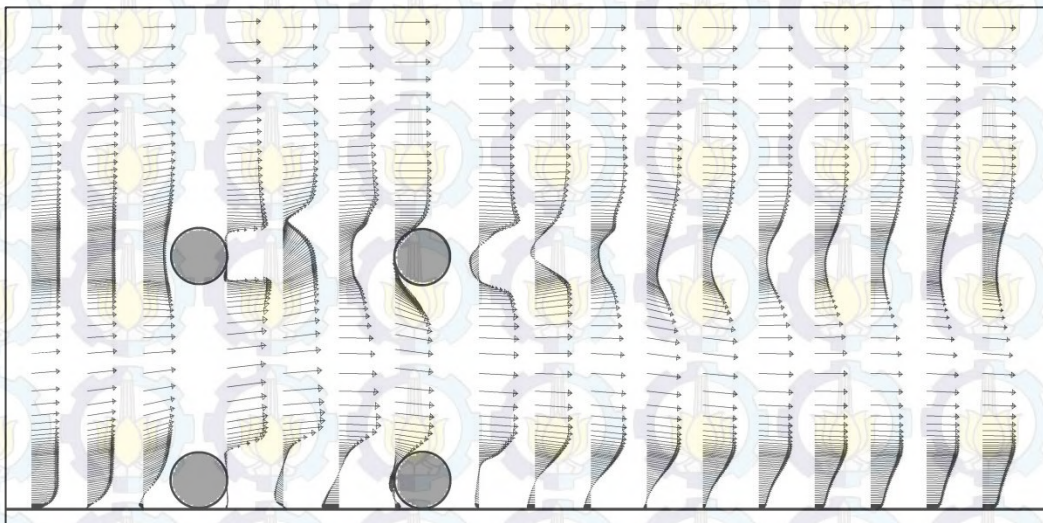


Gambar 4.18. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$

Gambar 4.18 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.18 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Tampak pada *lowerside* silinder-1, karena silinder menyentuh dinding sehingga membuat aliran terhenti dan terbentuk *secondary vortex* pada upstream silinder-1, yang akhirnya semua fluida terdefleksi pada *upperside*. Ini menyebabkan momentum aliran pada

celah antara kedua silinder *lower* dan *upper* menjadi bertambah. Peningkatan akselerasi aliran pada *upperside* silinder-1 mempercepat transisi dari laminar menjadi turbulen, dan membuat separasi tertunda. Dengan momentum aliran yang besar membuat *inner shear layer* dari silinder-1 mampu melingkupi *upperside* kontur silinder-2, hal mana sesuai dengan distribusi tekanan silinder-2 yang bernilai negatif.

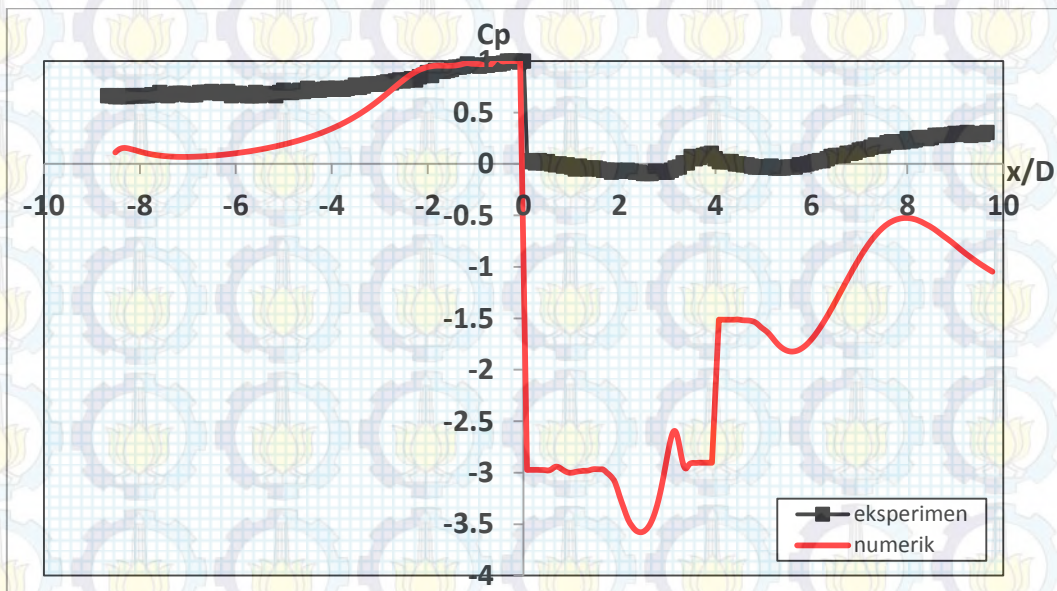
Momentum aliran yang besar pada celah antara kedua silinder *lower* dan *upper* juga membuat akselerasi aliran pada *lowerside* silinder-3, sehingga titik stagnasi bergerak ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder, dan posisi tekanan minimum dan separasi pada *lowerside* menjadi tertunda. *Inner shear layer* dari silinder-3 yang begitu kuat membuat aliran terdefleksi ke atas, sehingga *outer shear layer* menjadi tertahan dan membuat posisi tekanan minimum dan separasi pada *upperside* terjadi lebih awal. Dan akhirnya membuat momentum aliran berkurang, sehingga *inner shear layer* tersebut *attach* pada *lowerside* kontur silinder-4.



Gambar 4.19. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$

Gambar 4.19 menunjukkan visualisasi aliran berupa profil *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.19 terlihat evolusi vektor

velocity aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D = -3,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan *streamwise*, dan mulai pada posisi sekitar  $x/D = -2,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari *streamwise*. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding yang menimbulkan *blockage* sehingga terjadi *secondary vortex* di *upstream* silinder-1, yang ditandai dari adanya vektor velocity yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor velocity yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Momentum aliran yang besar di gap, sehingga membuat *inner shear layer* dari silinder-2 akhirnya menyentuh atau *reattachment* dinding, dan ini berlangsung pada posisi sekitar  $x/D = 9,0$ .

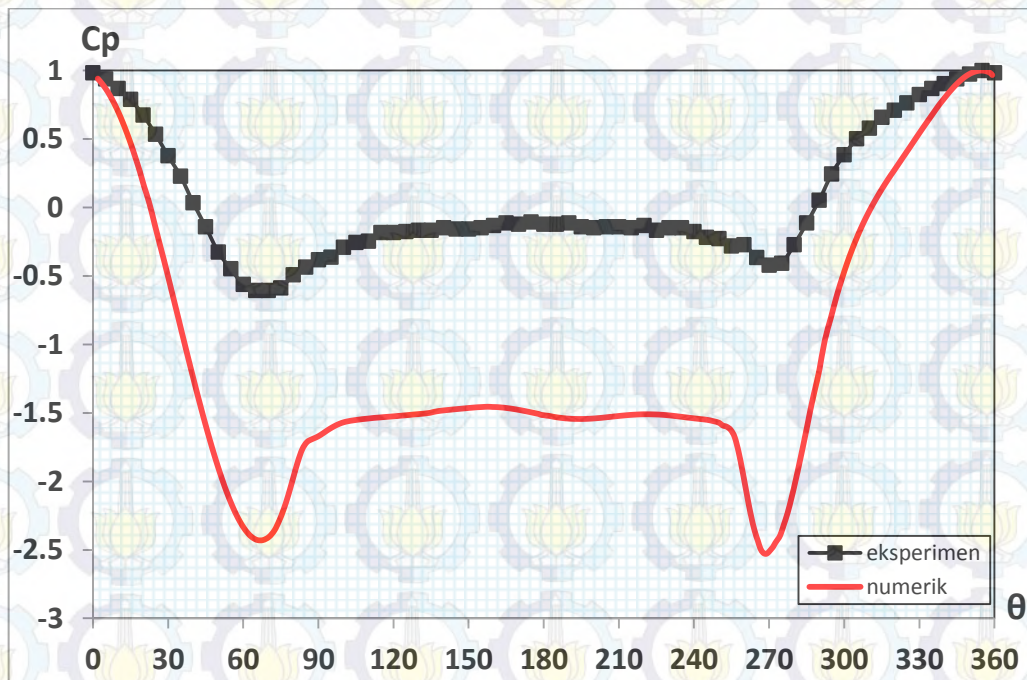


Gambar 4.20. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 4$  dan Variasi  $G/D = 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.20 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada plat datar dekat susunan empat silinder sirkular dengan rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,0$ . Keberadaan kedua silinder *lower silinder-1* dan *silinder-2* yang menyentuh dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder

ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang positif ini recovery menjadi static pressure pada  $x/D= 9$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

**b. Pada  $G/D= 0,1$**

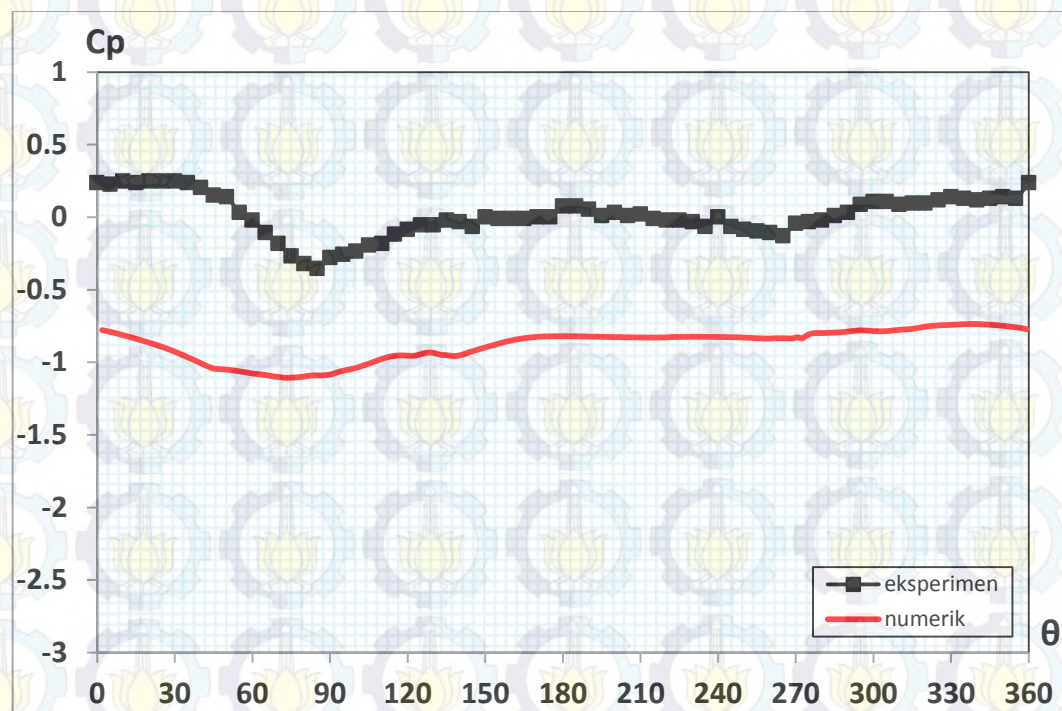


Gambar 4.21. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.21 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,1$ . Dari Gambar 4.21 tampak bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder tidak simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 270^\circ$ . Dengan didekatkan dinding pada silinder *upstream* silinder-1, menyebabkan efek *blockage* dan ini membuat aliran free stream terdefleksi. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi yang tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *outer-side* silinder

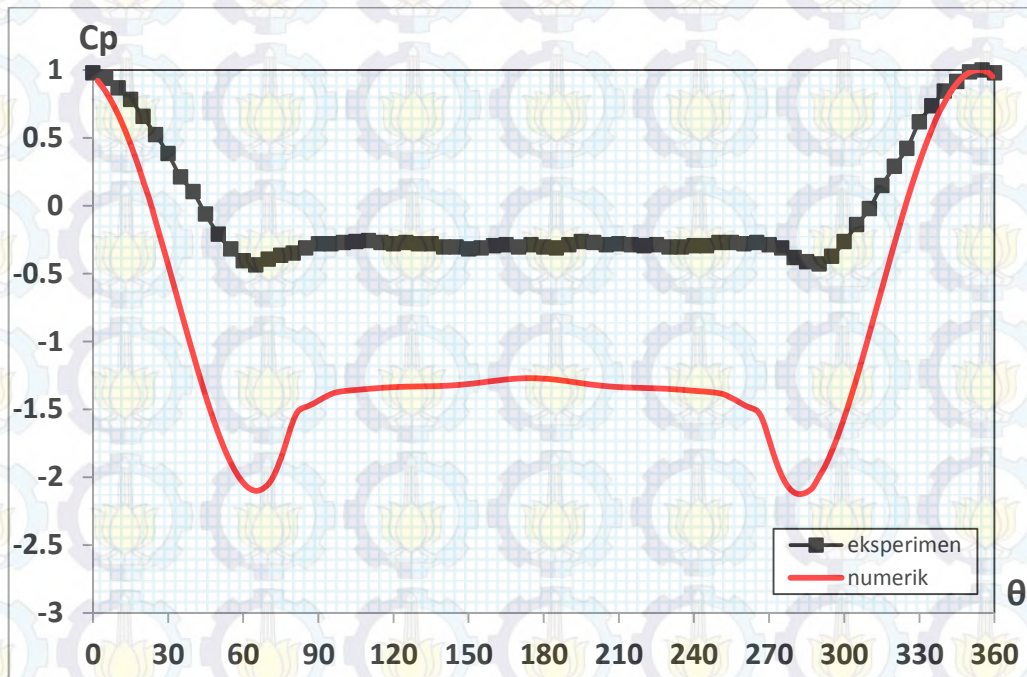
yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Adanya celah yang relatif kecil terbentuk antara *lowside* silinder dengan dinding,  $G/D = 0,1$ , membuat sebagian besar fluida terdefleksi ke *upperside* silinder, dan memberikan momentum tambahan bagi fluida yang mengalir pada *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari separasi terjadi pada  $\theta = 105^\circ$ . Sementara pada celah yang relatif sempit menyebabkan kecepatan aliran meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $(\theta_s) = 250^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata  $(C_{Dp}) = 0,65$  dan koefisien lift  $(C_{Lp}) = 0,27$  untuk silinder-1.

Distribusi koefisien tekanan  $(C_p) = f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.



Gambar 4.22. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan Variasi  $G/D = 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.22 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Dari Gambar 4.22 terlihat ada satu titik pada kontur yang tekanannya maksimum, dan memiliki harga yang positif, yaitu pada  $\theta=30^\circ$ , hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* dari *shear layer* silinder upstream silinder-1 pada upper-side kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,15 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,08 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* tidak terjadi, harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya negatif, hal ini menandakan bahwa pada kontur silinder-2 dilingkupi atau *shield* oleh *shear layer* silinder upstream.

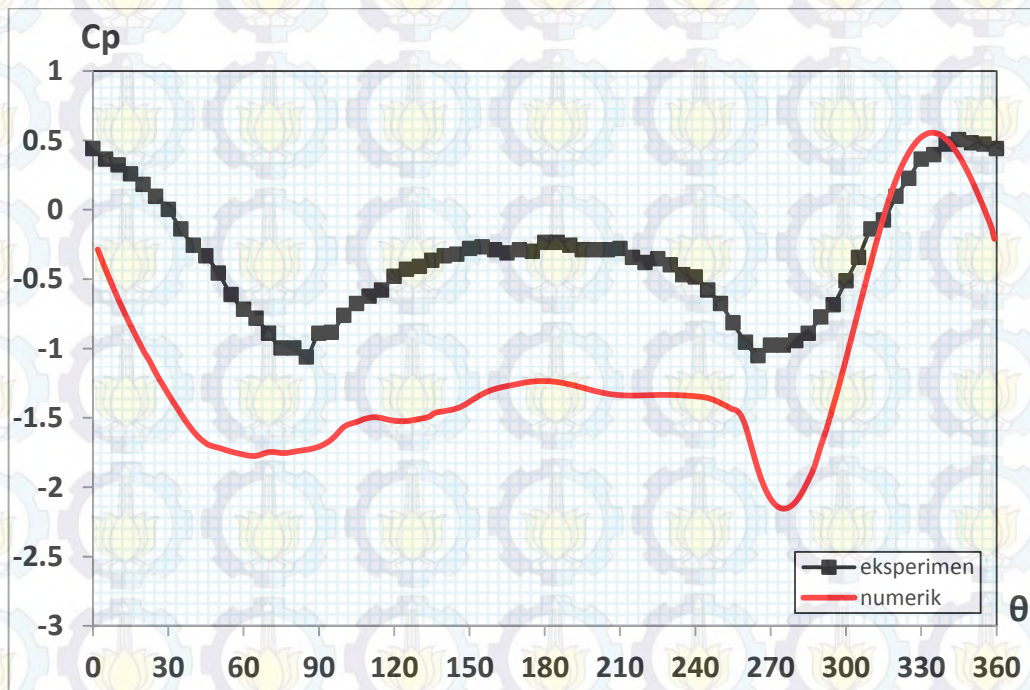


Gambar 4.23. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4,0$  dan Variasi  $G/D=0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.23 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Dari Gambar 4.23 terlihat bahwa distribusi tekanan

pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta = 65^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta = 290^\circ$  pada *lowerside*. Tambahan momentum aliran akibat aliran free stream terdefleksi pada *upperside* silinder-1, membuat terjadinya peningkatan percepatan aliran diantara celah kedua silinder *upstream* ini, dan ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s = 355^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta = 95^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,68 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,05 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

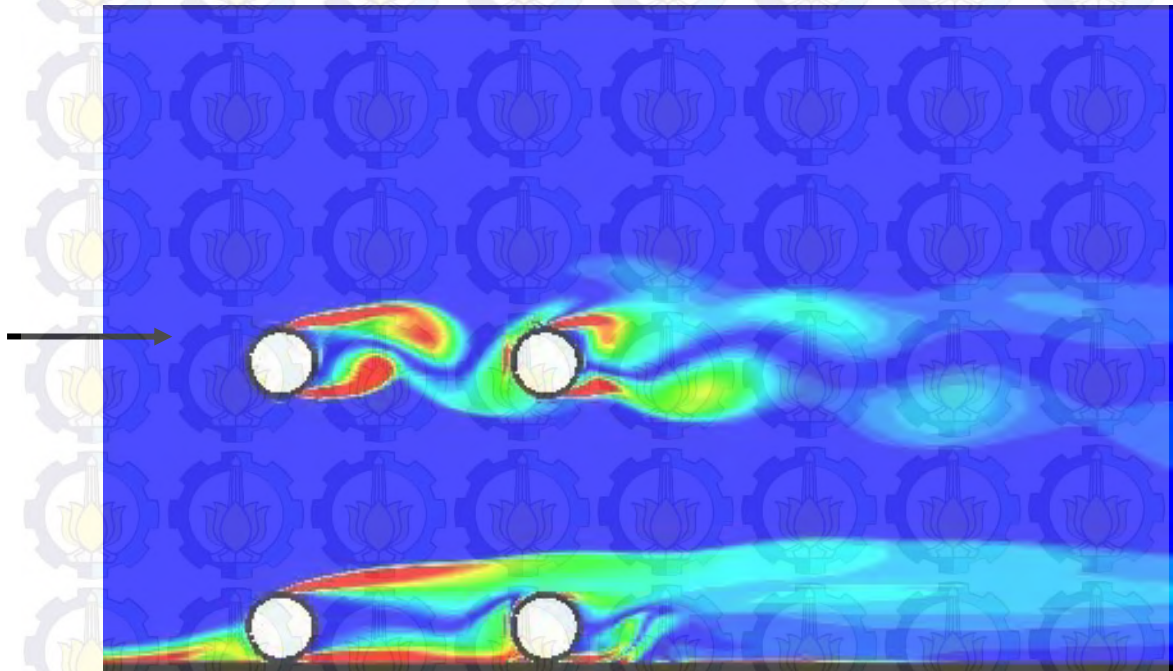


Gambar 4.24. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan Variasi  $G/D = 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS



Gambar 4.24 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Dari Gambar 4.24 terlihat bahwa distribusi tekanan untuk silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum, yaitu pada  $\theta=345^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream* silinder-3. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,37 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,07 untuk silinder-4.

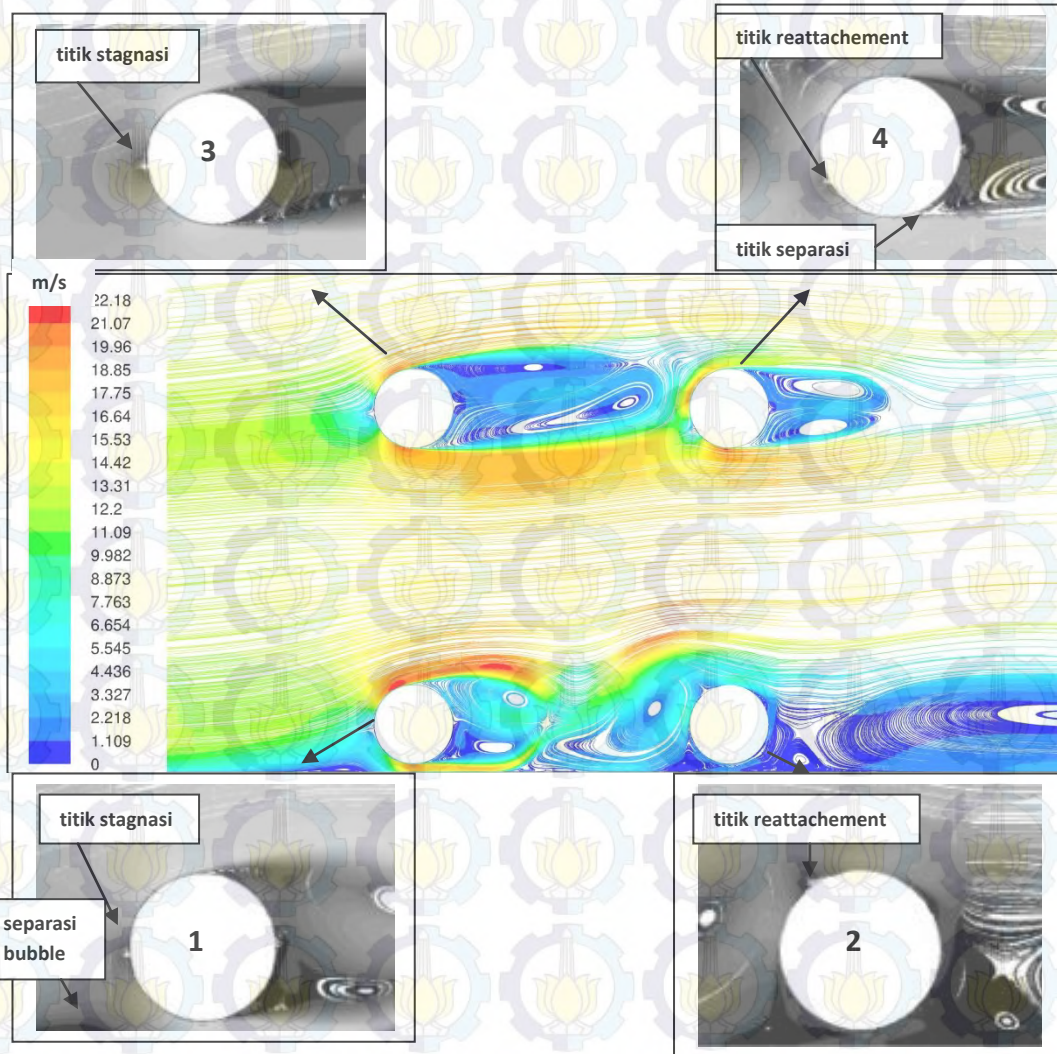
Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian yakni juga berlangsung fenomena *reattachment* dan juga terjadi pada *lower side*.



Gambar 4.25. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$

Gambar 4.25 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Melalui Gambar 4.25 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, belum terbentuk *vortices shed*. Dengan posisi silinder yang mulai ada gap dengan dinding,  $G/D=0,1$ , membuat *outer shear layer* belum mampu membentuk *vortices shed*, sedangkan *inner shear layer* dari silinder-1

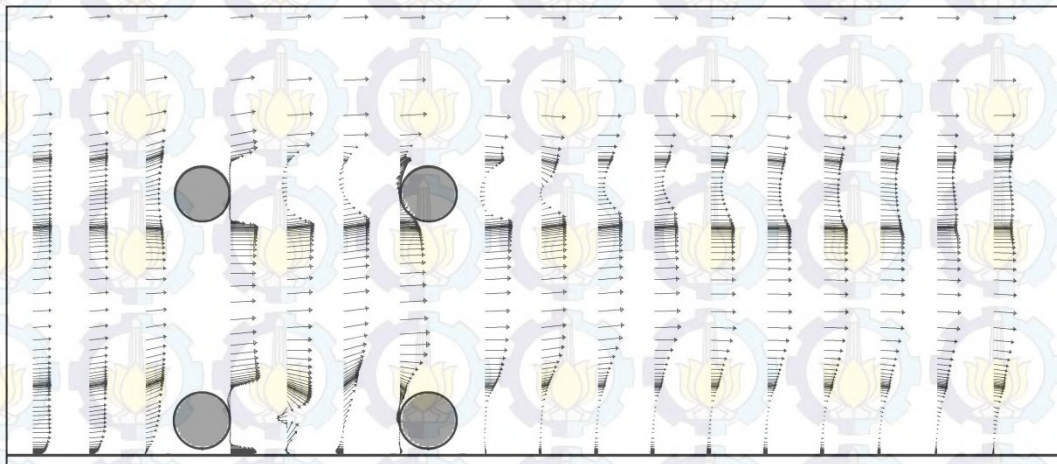
*reattachment* di frontside silinder-2. Sementara pada silinder upper silinder-3 terbentuk *vortices shed*, meskipun belum sempurna. Melalui Gambar 4.25 juga terlihat silinder-4 terbenam dalam wake silinder-3, *free shear layer* dari silinder-3 *impinge* pada kontur silinder-4. Sedangkan di daerah wake silinder-4 belum terbentuk *vortices shed* yang sempurna.



Gambar 4.26. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$ ,  $G/D= 0,1$

Gambar 4.26 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,1$ . Dari Gambar 4.26 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Karena adanya dinding yang diletakkan dekat silinder-1 menimbulkan separasi *bubble* pada *upstream* silinder-1, sehingga aliran free stream terdefleksi ke *upperside* silinder,

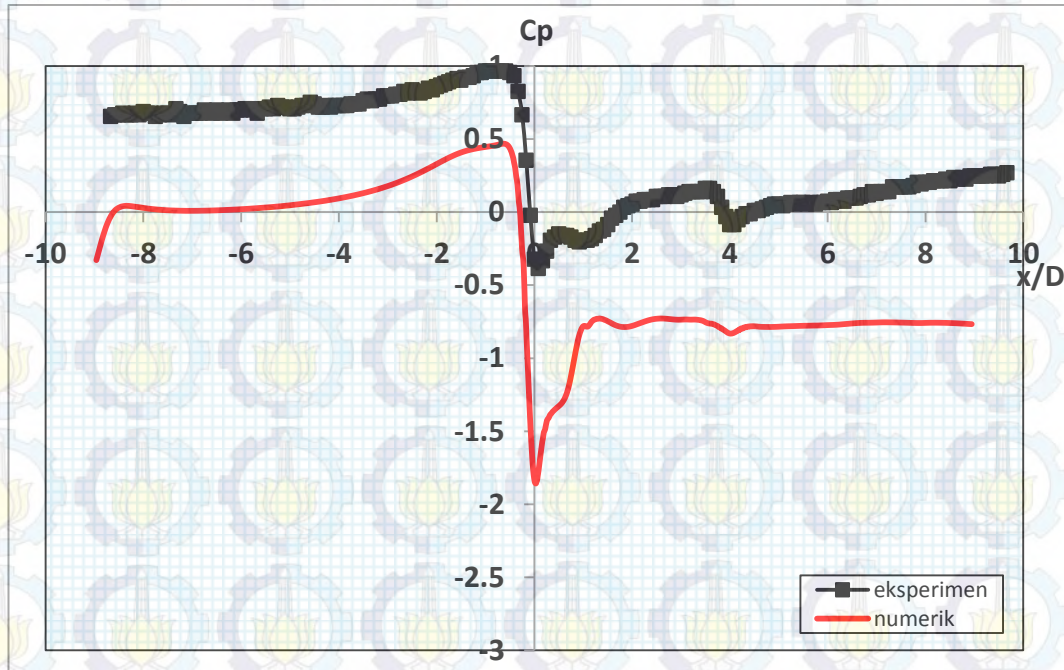
dan ini memberi tambahan momentum terhadap fluida yang mengalir pada celah antara silinder lower dan silinder upper. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lebih cepat, dan pada silinder-3 momentum ini membuat titik stagnasi bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder sedangkan separasi silinder-4 menjadi tertunda. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 *reattachment* pada upper-side silinder-2, bahkan melingkupi silinder-2 seperti yang diperoleh melalui metode numerik. Efek *blockage* pada lowerside silinder-1 ini ditandai juga Bergeraknya titik stagnasi ke *outer-side* dari silinder. Sedangkan celah antara lower-side silinder-1 dan dinding yang masih kecil, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum relatif kecil, ditandai dengan terdefleksinya aliran pada *downstream* silinder.



Gambar 4.27. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,1$

Gambar 4.27 menunjukkan visualisasi aliran berupa profil *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,1$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.27 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -3,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan streamwise, dan hampir pada posisi sekitar  $x/D= -2,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari streamwise. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding menimbulkan *blockage* sehingga terjadi separasi *bubble* di *upstream* silinder-1, ditandai dari adanya vektor *velocity* yang

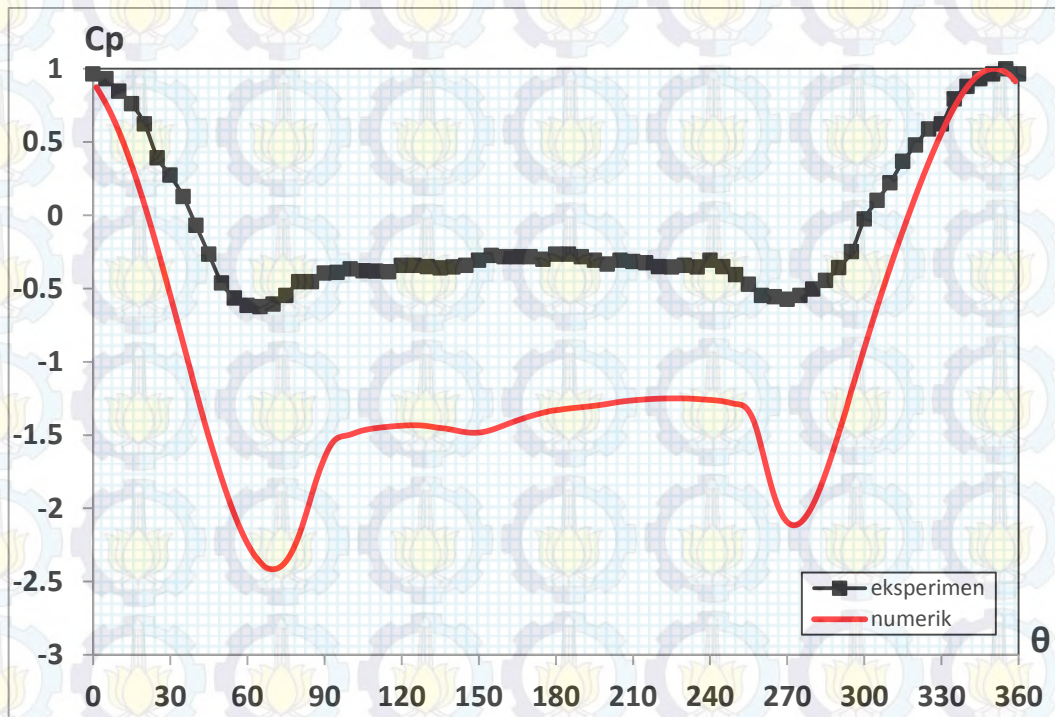
arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor velocity yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D=13,0$ .



Gambar 4.28. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.28 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 9$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

c. Pada  $G/D= 0,2$

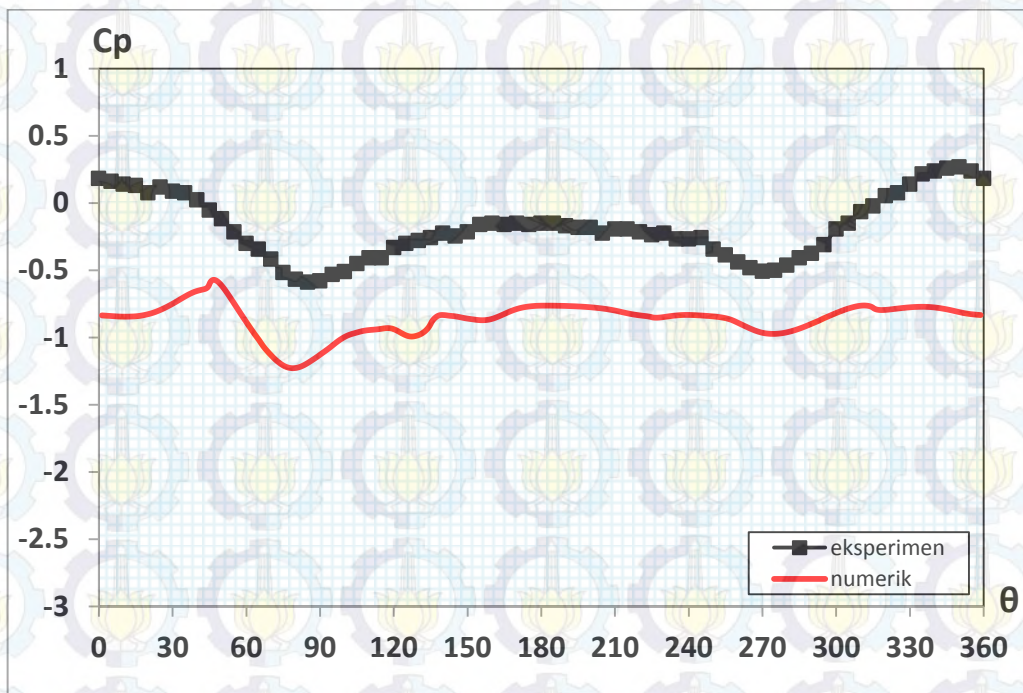


Gambar 4.29. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.29 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$ . Melalui Gambar 4.29 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder tidak simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 270^\circ$ . Dengan didekatkan dinding pada silinder *upstream* silinder-1, menyebabkan efek *blockage* dan ini membuat aliran free stream terdefleksi. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi yang tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Celah yang masih kecil terbentuk antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,2$ , membuat sebagian besar fluida terdefleksi ke *upperside* silinder, dan memberikan momentum tambahan bagi fluida yang mengalir pada *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari separasi terjadi pada  $\theta= 100^\circ$ . Sementara pada celah yang masih

sempit menyebabkan kecepatan aliran meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi ( $\theta_s$ )=  $240^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,70 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,14 untuk silinder-1

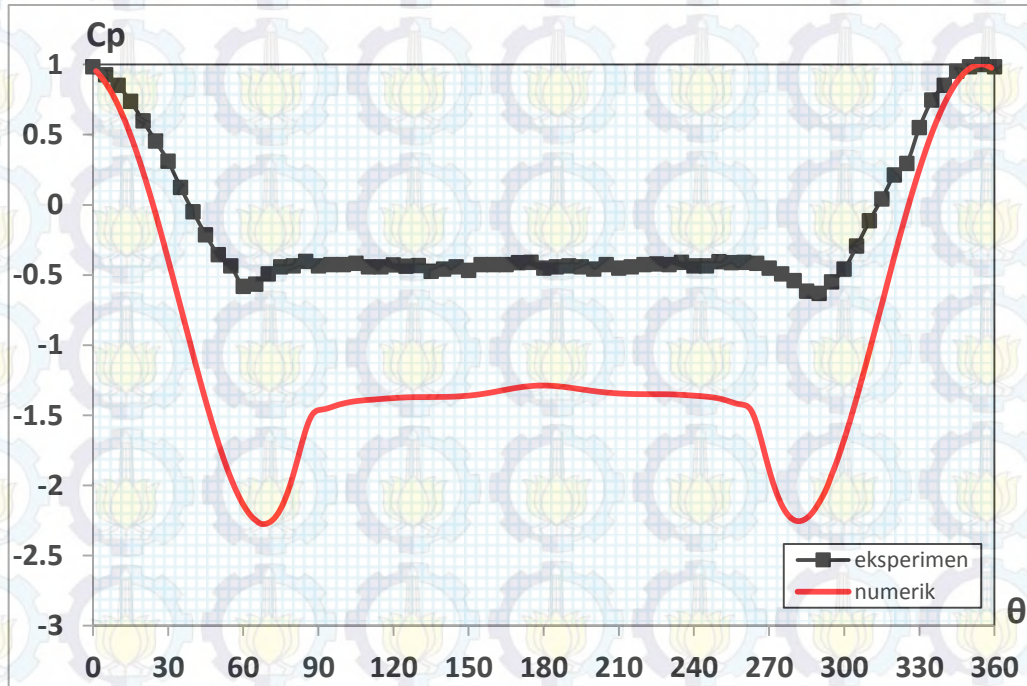
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.



Gambar 4.30. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.30 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.30 terlihat distribusi tekanan dari kontur silinder terdapat satu titik dimana tekanannya maksimum dan berharga positif yang terletak pada  $\theta= 350^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* dari *shear layer* silinder *upstream* pada lower-side kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-

rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,25 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,06 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* tidak terjadi, harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya negatif, hal ini menandakan bahwa pada kontur silinder-2 diselubungi atau dilingkupi oleh *shear layer*.

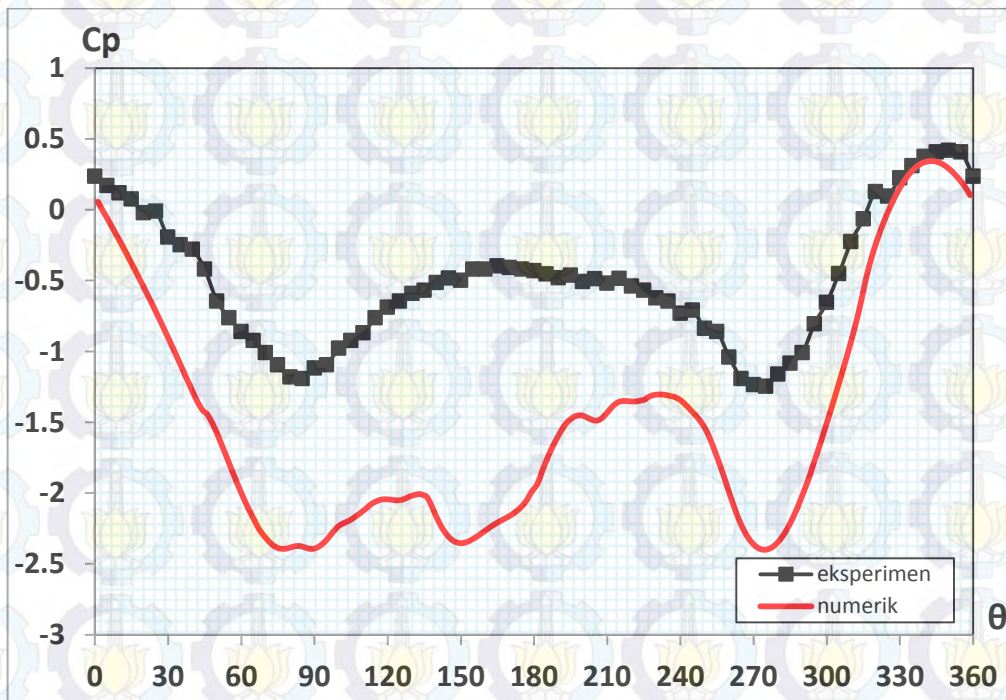


Gambar 4.31. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.31 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.31 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 60^0$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^0$  pada *lowerside*. Tambahan momentum aliran akibat adanya efek *blockage* yang selanjutnya membuat aliran free stream terdefleksi pada *upperside* silinder-1, membuat terjadinya peningkatan percepatan aliran pada celah kedua silinder *upstream* ini, dan ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s= 355^0$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 260^0$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari posisi titik

separasi  $\theta = 85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,75 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,04 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

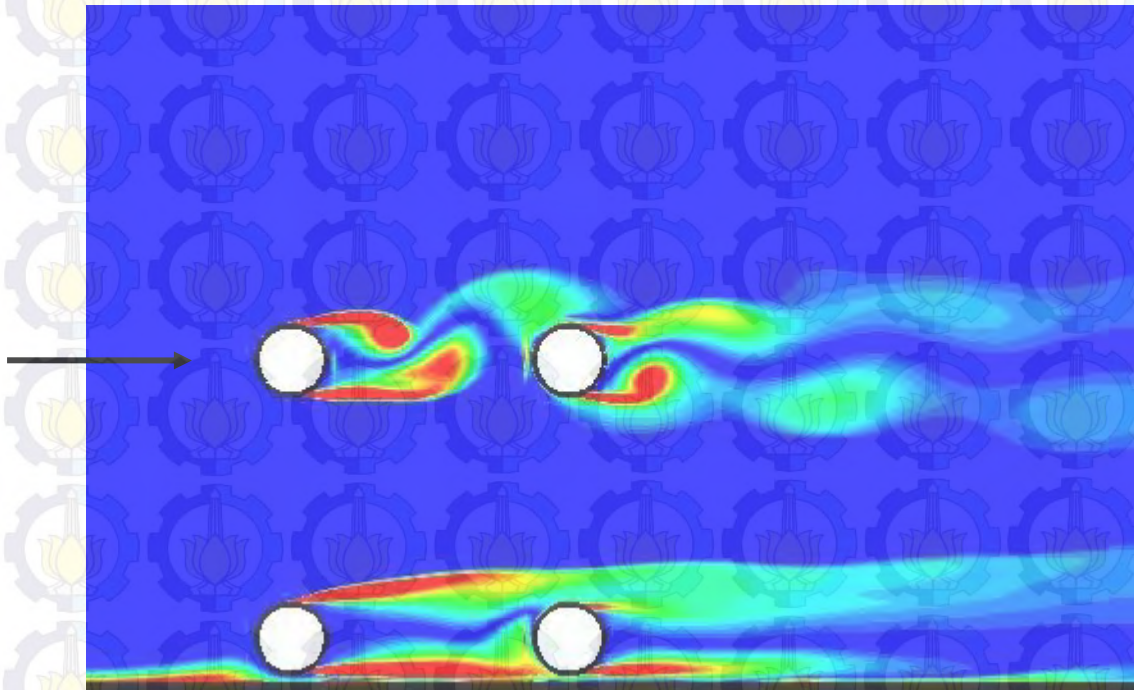


Gambar 4.32. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan Variasi  $G/D = 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.32 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D = 4,0$  dan  $G/D = 0,2$ . Dari Gambar 4.32 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum positif, yaitu pada  $\theta = 350^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,42 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,08 untuk silinder-4.

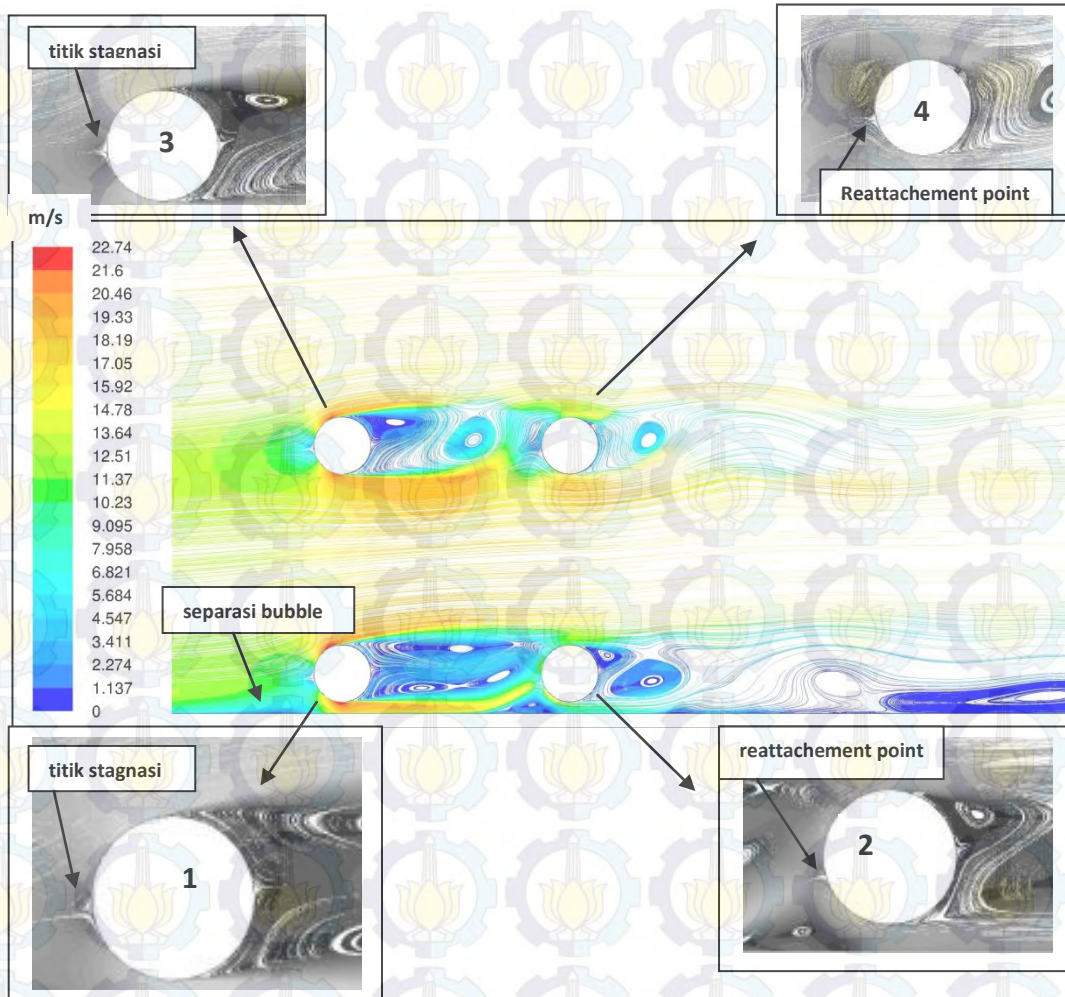


Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung pada *rear-side* kontur silinder.



Gambar 4.33. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,2$

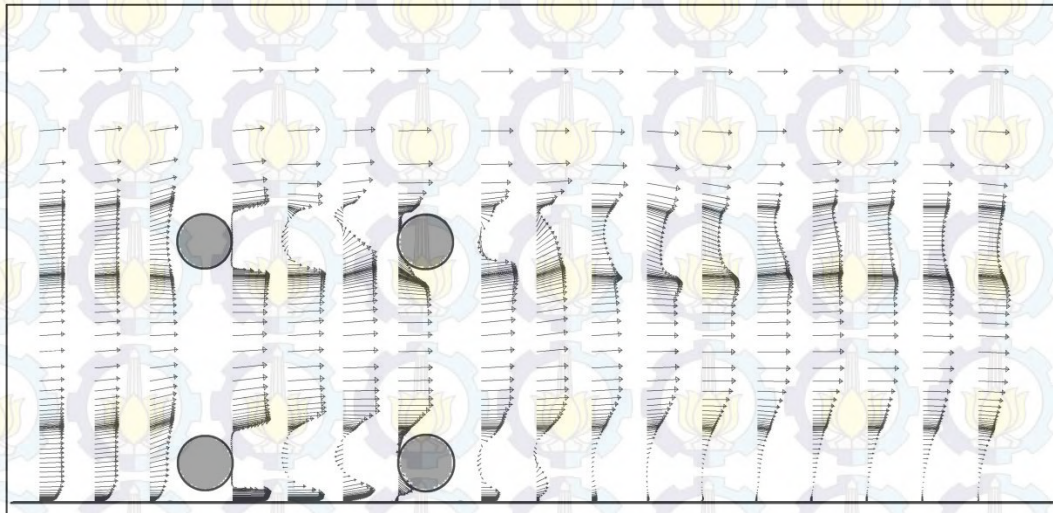
Gambar 4.33 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,2$ . Melalui Gambar 4.33 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, tidak terbentuk *vortices shed*. Gap yang mulai lebar yang dibentuk antara *lowerside* silinder-1 dengan dinding membuat *outer shear layer* silinder-1 *reattachment* pada *lowerside* kontur silinder-2, sedangkan *inner shear layer* masih melingkupi kontur silinder-2. Sementara pada daerah wake kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* yang terbentuk relatif belum sempurna.



Gambar 4.34. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$

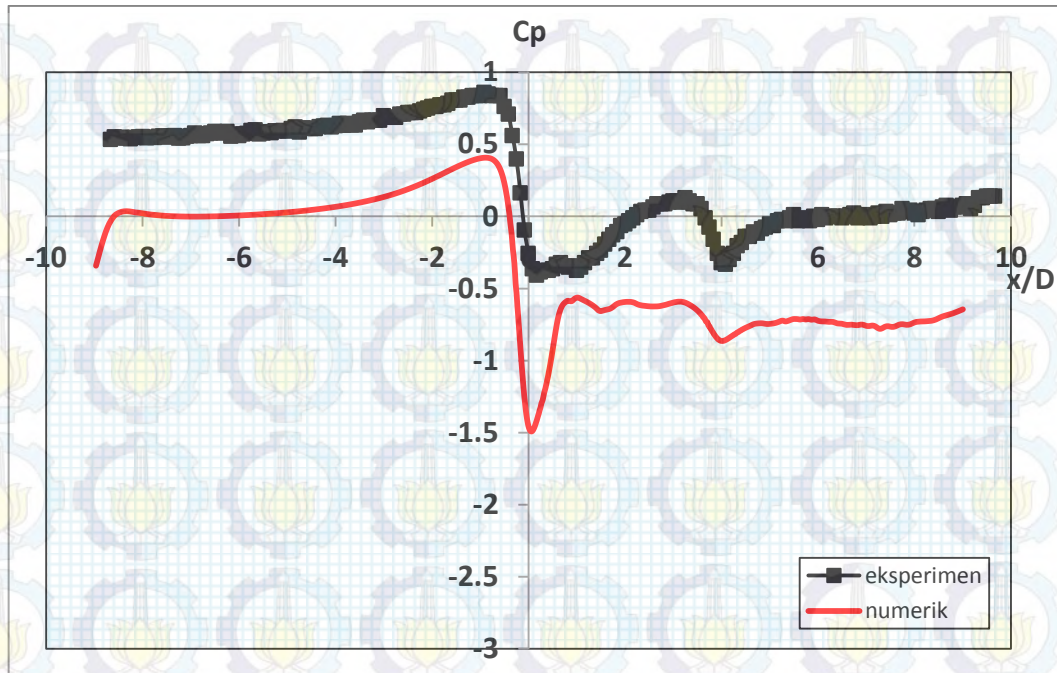
Gambar 4.34 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.34 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Karena adanya dinding yang diletakkan dekat silinder-1 menimbulkan *separasi bubble* pada *upstream* silinder-1, sehingga aliran free stream terdefleksi ke *upperside* silinder, dan ini memberi tambahan momentum terhadap fluida yang mengalir pada celah antara silinder lower dan silinder upper. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lebih cepat, dan pada silinder-3 momentum ini membuat titik stagnasi bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder sedangkan *separasi* silinder-3 menjadi tertunda. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 melingkupi silinder-2. Efek *blockage* pada *lowerside* silinder-1 ini ditandai juga bergesernya titik stagnasi ke *outer-side* dari silinder. Sedangkan celah antara

*lowerside* silinder-1 dan dinding yang relatif mulai besar, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum yang cukup besar, ditandai dengan *outer shear layer* dari silinder upstream reattachment pada *lowerside* silinder-2.



Gambar 4.35. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$

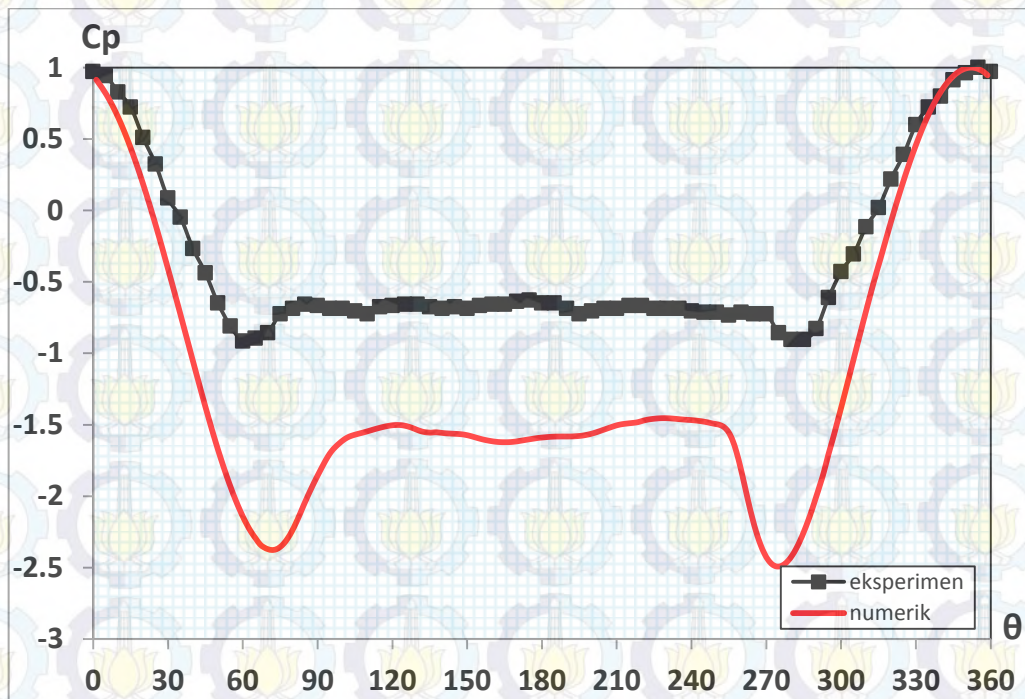
Gambar 4.35 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,2$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.35 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -2,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan streamwise, dan mulai pada posisi sekitar  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari streamwise. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding menimbulkan *blockage* sehingga terjadi separasi *bubble* di *upstream* silinder-1, ditandai dari adanya vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D= 7,0$ .



Gambar 4.36. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.36 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,1$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek blockage pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 6$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

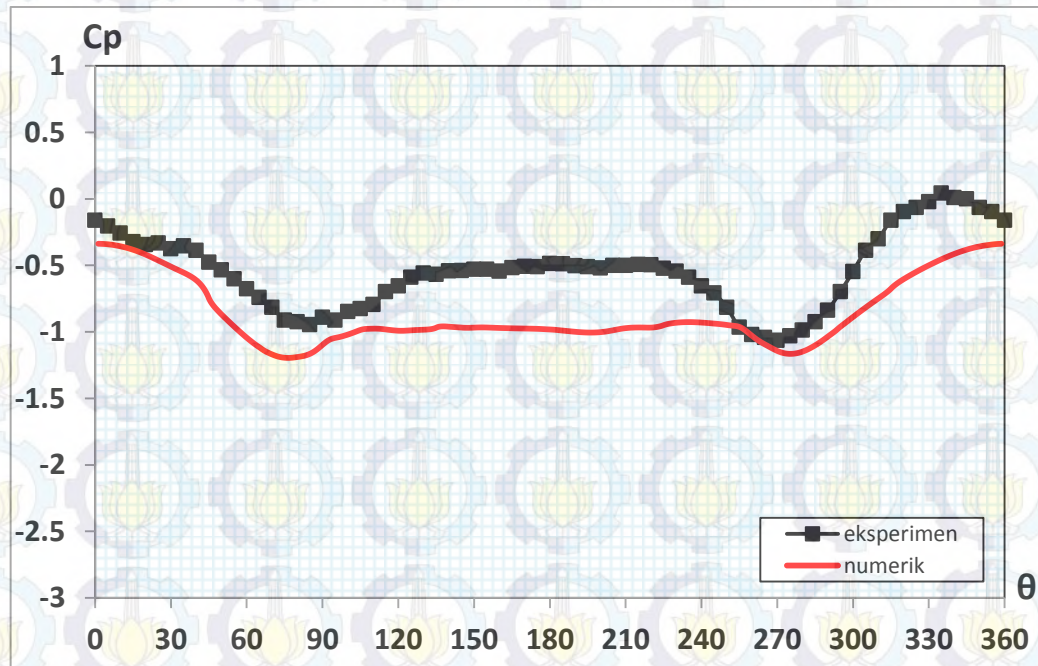
d. Pada  $G/D= 0,3$



Gambar 4.37. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

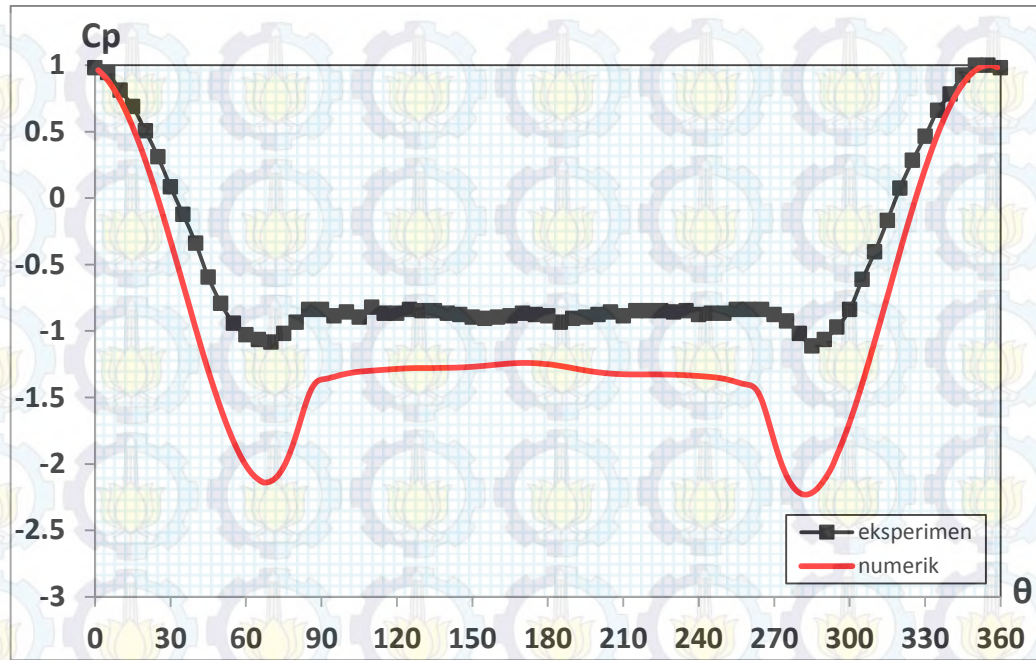
Gambar 4.37 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$ . Melalui Gambar 4.37 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder tidak simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 60^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 280^\circ$ . Celah antara *lowerside* silinder dengan dinding yang relatif mulai besar,  $G/D= 0,3$ , membuat momentum fluida yang terdefleksi ke *upperside* silinder juga mulai berkurang, walaupun titik stagnasi ( $\theta_s$ ) masih pada posisi  $355^\circ$ , sedangkan separasi terjadi pada  $\theta= 85^\circ$ . Sementara pada *lowerside* silinder, momentum alirannya mulai bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi ( $\theta_s$ )=  $270^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,90 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,09 untuk silinder-1.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.



Gambar 4.38. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.38 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.38 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki satu titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 335^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *lowerside* kontur silinder-2, sedangkan pada *upperside* silinder memiliki tekanan berharga negatif. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,26 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,05 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* tidak terjadi, harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya negatif, hal ini menandakan bahwa pada kontur silinder-2 diselubungi atau dilingkupi oleh *shear layer*.

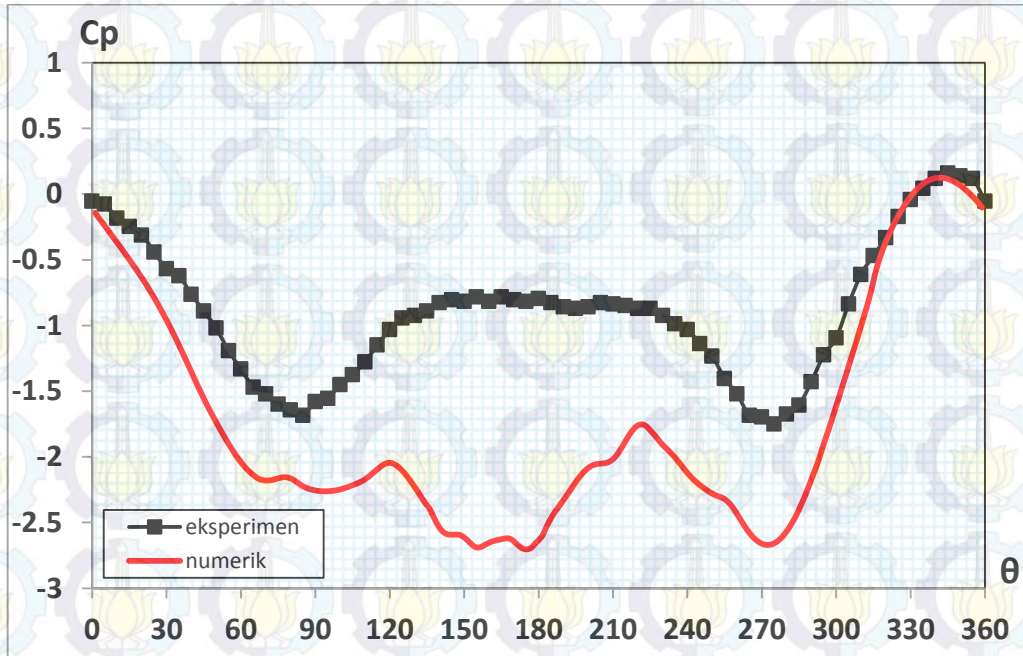


Gambar 4.39. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4,0$  dan Variasi  $G/D=0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.39 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,3$ . Dari Gambar 4.39 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta=70^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta=285^\circ$  pada *lowerside*. Efek blockage yang mulai berkurang, sehingga membuat aliran free stream cenderung mulai tegak lurus terhadap silinder. Ini membuat terjadinya penurunan percepatan aliran pada celah silinder *upstream* ini, dan ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s=355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}=260^\circ$ . Sementara aliran pada *upperside* mulai meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}=85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,01 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,09 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren

yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

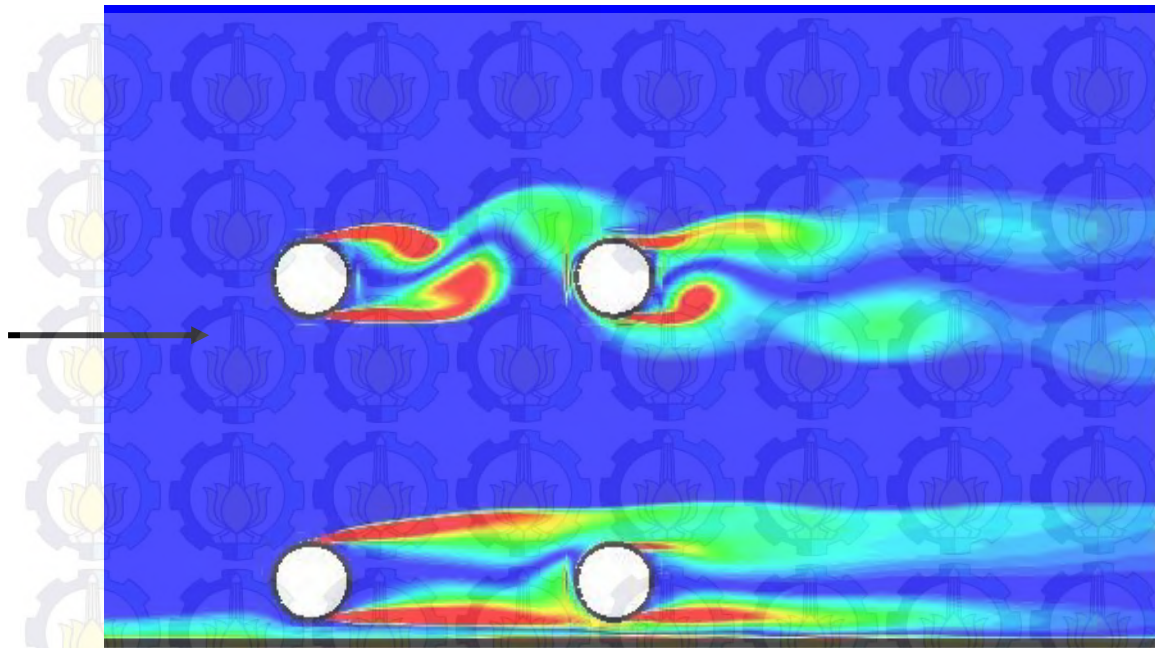


Gambar 4.40. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.40 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.40 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum, yaitu pada  $\theta= 345^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,43 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,10 untuk silinder-4.

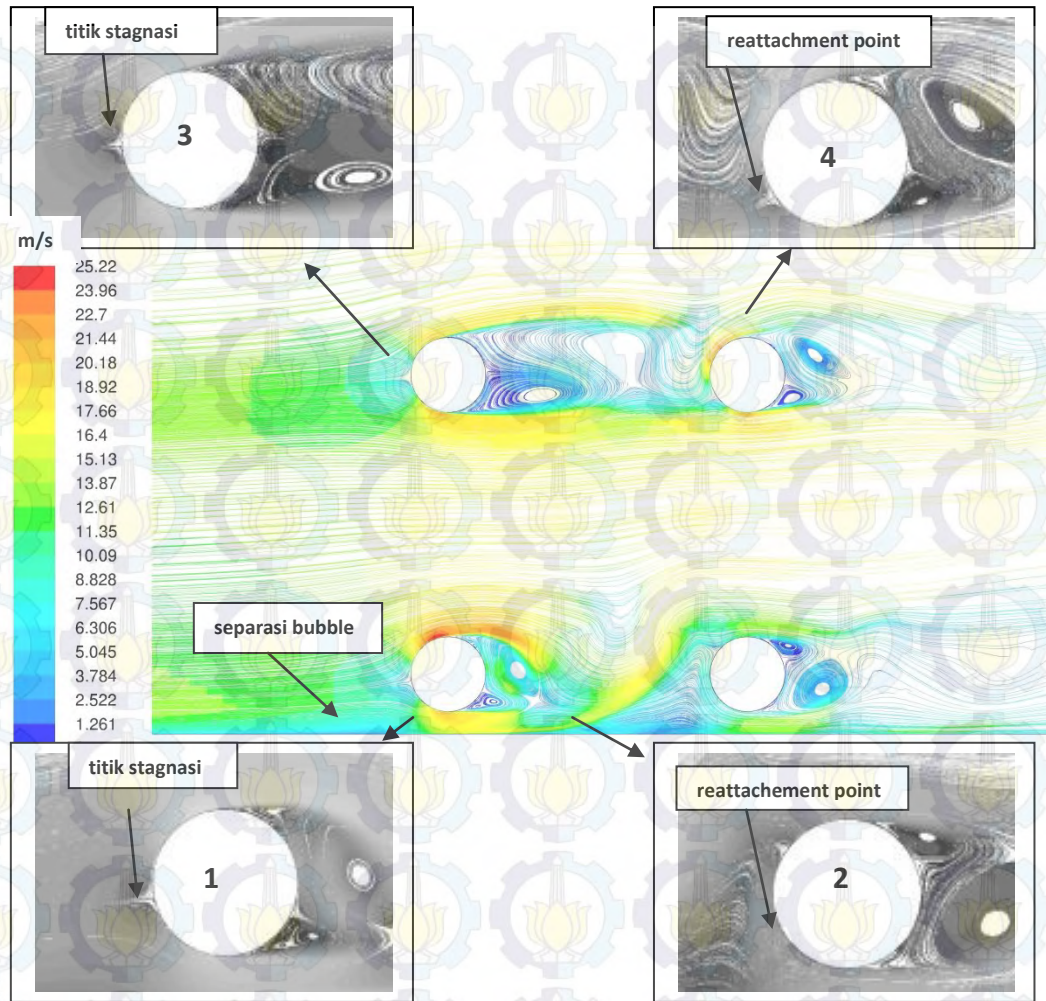
Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung pada *rearside-upper*.





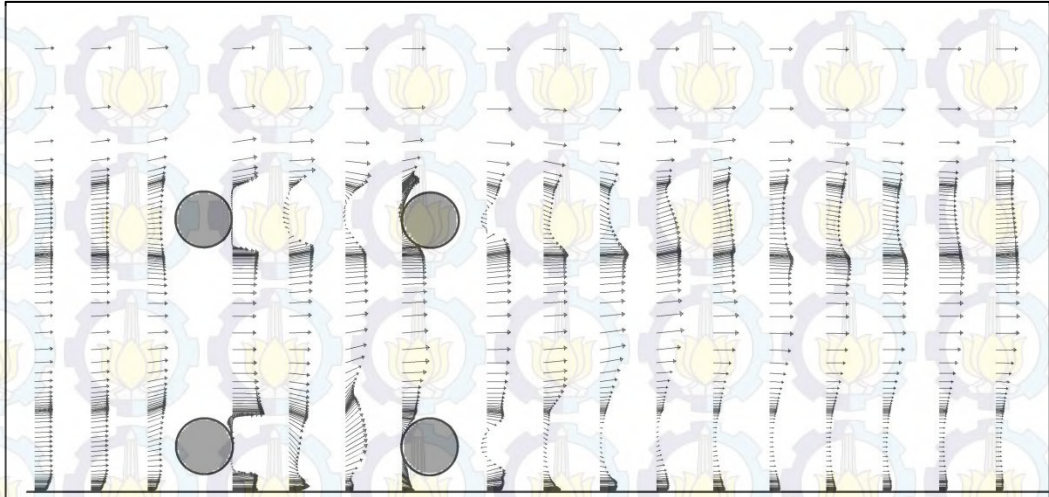
Gambar 4.41. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$

Gambar 4.41 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$ . Melalui Gambar 4.41 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, sudah mulai terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna. Dengan posisi *lowerside* silinder yang relatif lebih lebar dengan dinding membuat *free shear layer* silinder-1 dan silinder-2 mulai membentuk *vortices*. Sementara pada wake silinder upper silinder-3 terbentuk *vortices shed*, dan silinder-4 terbenam dalam wake silinder-3. *Free shear layer* silinder-3 *impinge* pada kontur silinder-4, sementara pada daerah wake silinder-4 juga terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna.



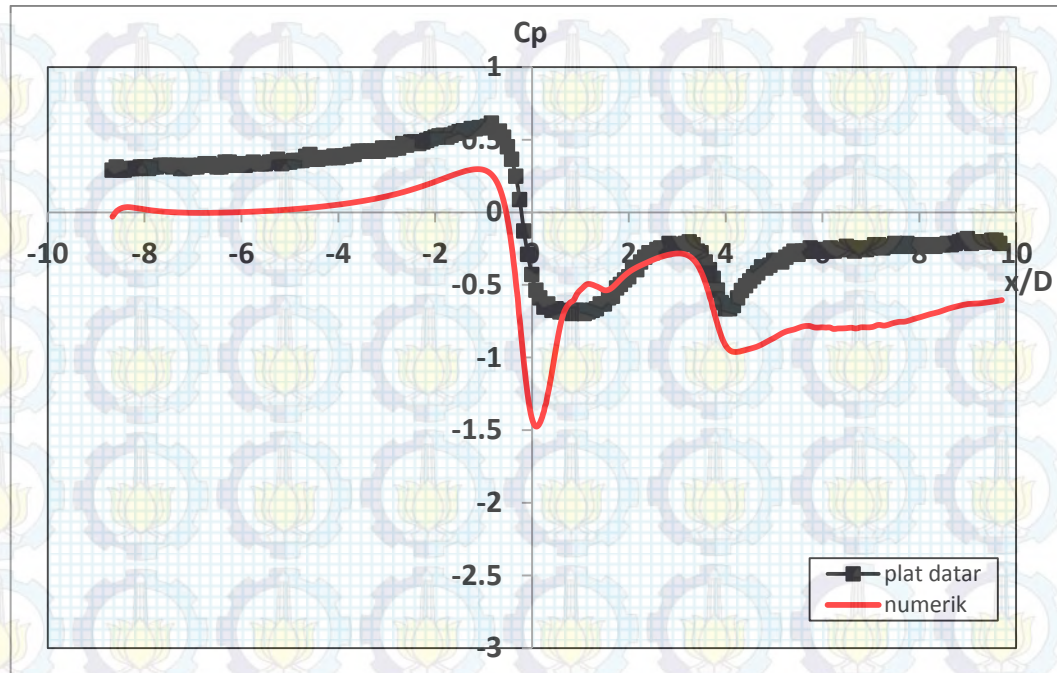
Gambar 4.42. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4$ ,  $G/D= 0,3$

Gambar 4.42 menunjukkan visualisasi velocity pathline pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.42 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Dengan penempatan dinding yang mulai jauh dari silinder,  $G/D= 0,3$ , menyebabkan separasi *bubble* yang terbentuk pada *upstream* silinder-1 mulai mengecil, sehingga aliran free stream yang terdefleksi ke *upperside* silinder juga mulai berkurang. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi pada silinder-3 masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 masih memiliki kecepatan yang tinggi. Sedangkan aliran yang melalui celah antara *lowerside* silinder dan dinding memiliki momentum yang bertambah besar, ditandai dengan *outer shear layer* dari silinder upstream mulai membentuk vortices shed.



Gambar 4.43. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,3$

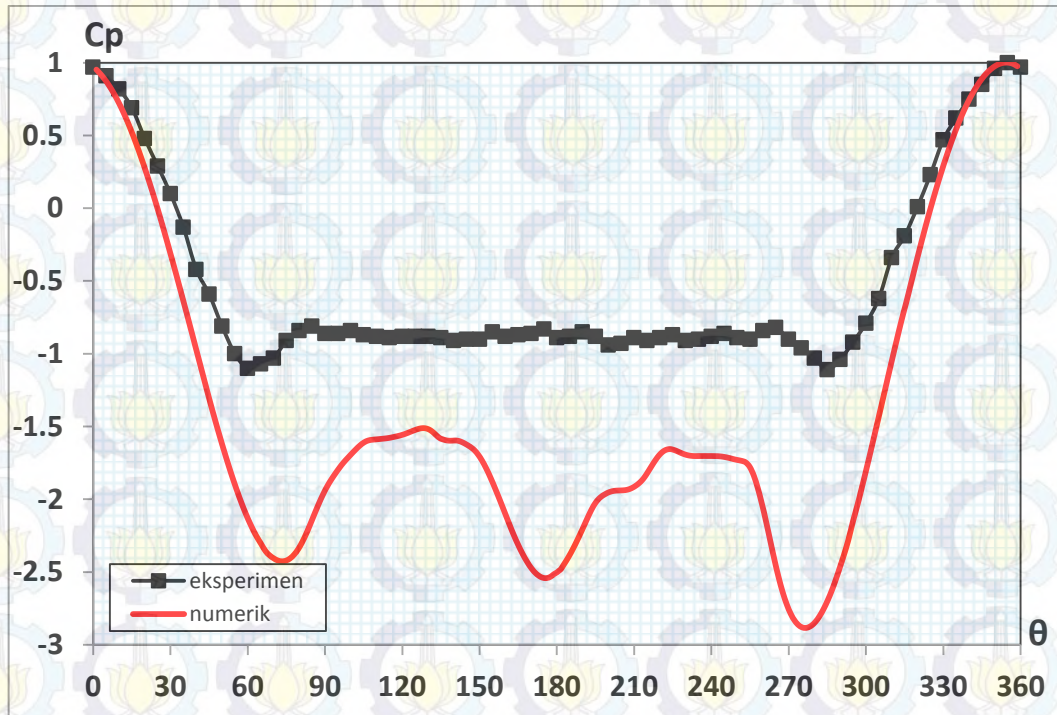
Gambar 4.43 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,3$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D=0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.43 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan *streamwise*, dan mulai pada posisi sekitar  $x/D < 1,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari *streamwise*. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding menimbulkan *blockage* sehingga terjadi separasi *bubble* di *upstream* silinder-1, ditandai dari adanya vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D=6,0$ .



Gambar 4.44. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.44 menunjukkan distribusi koefisien tekanan dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,3$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 6$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

e. Pada  $G/D= 0,4$

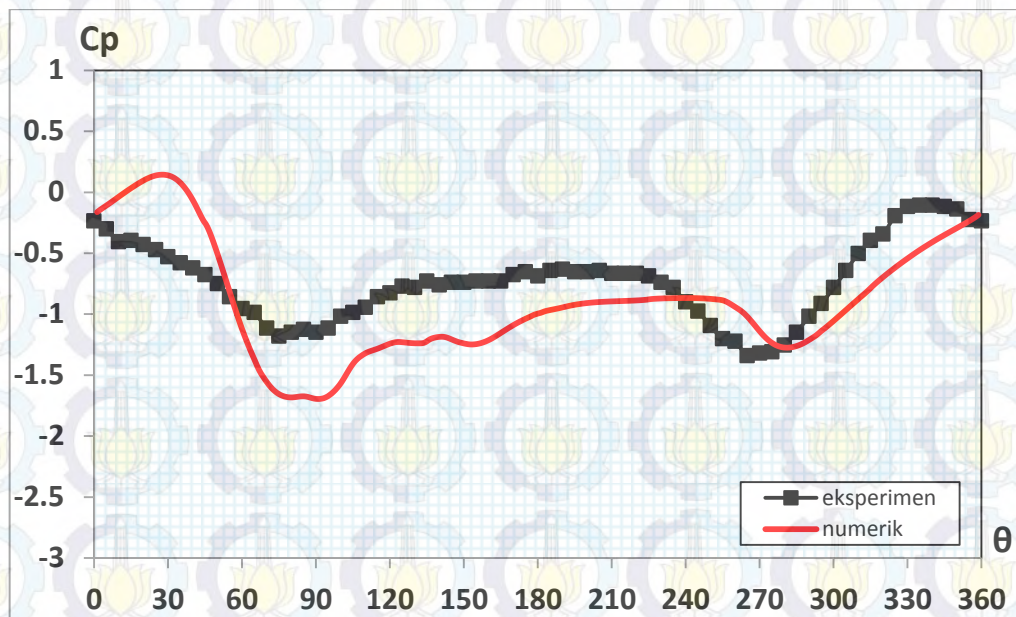


Gambar 4.45. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.45 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Melalui Gambar 4.45 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder relatif lebih simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 285^\circ$ . Dengan penempatan dinding yang mulai menjauhi silinder, menyebabkan efek *blockage* terhadap aliran free stream relatif tidak ada. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi yang tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Celah antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,4$ , yang cukup besar membuat momentum aliran ke *upperside* dan *lowerside* silinder relatif mulai sama. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik separasi yang relatif sama pada *upperside*  $\theta_{Sp}= 85^\circ$  dan *lowerside*  $\theta_{Sp}= 265^\circ$ . Berdasarkan

perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,00 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,07 untuk silinder-1

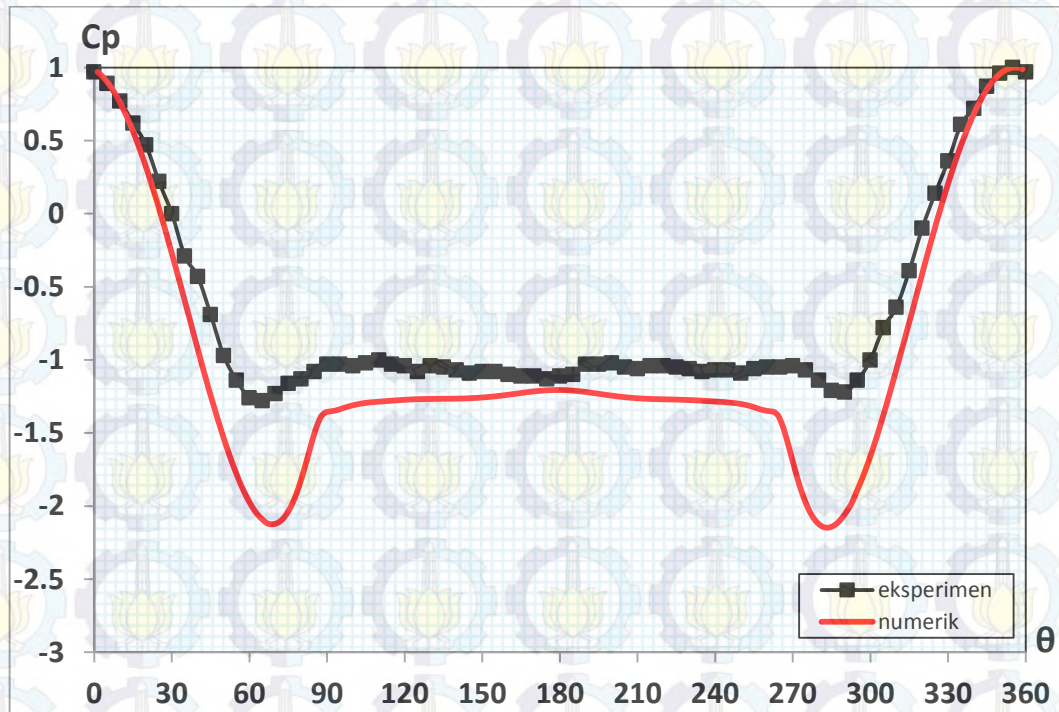
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang kurang sesuai, terutama pada daerah wake.



Gambar 4.46. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.46 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.46 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki satu titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 335^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *lowerside* kontur silinder-2. Sementara distribusi tekanan seluruhnya memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shear layer melingkupi* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,27 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,03 untuk silinder-2.

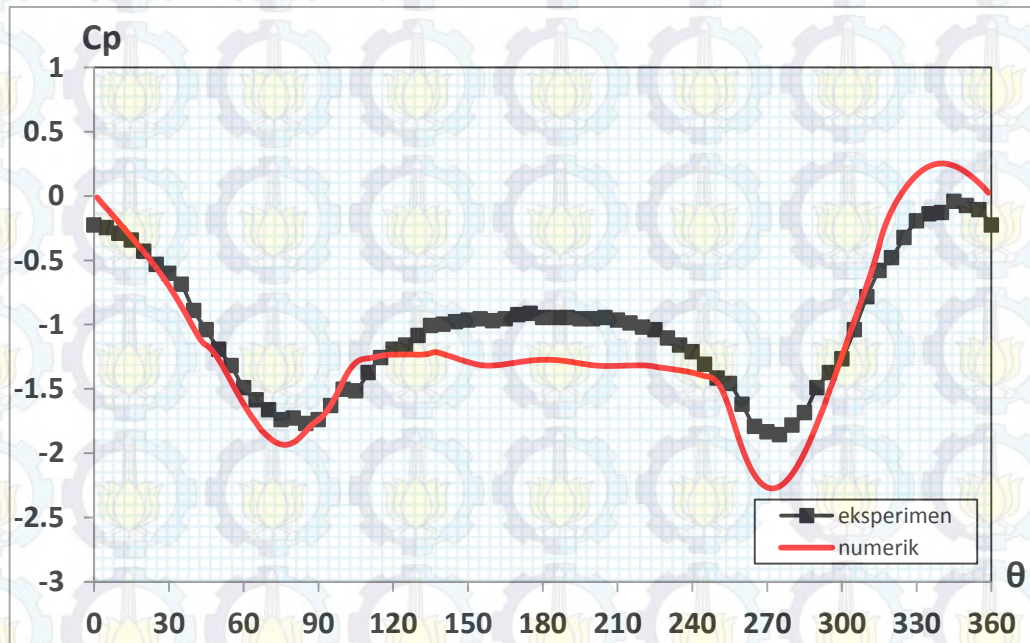
Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* terjadi, yang ditandai dengan harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya positif.



Gambar 4.47. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.47 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.47 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 65^\circ$  pada *upper-side* dan  $\theta= 290^\circ$  pada *lowerside*. Penempatan dinding yang menjauhi silinder mengakibatkan efek *blockage* sudah tidak ada, walaupun posisi titik stagnasi masih terjadi pada  $\theta_s= 355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 270^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta= 95^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,09 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,09 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

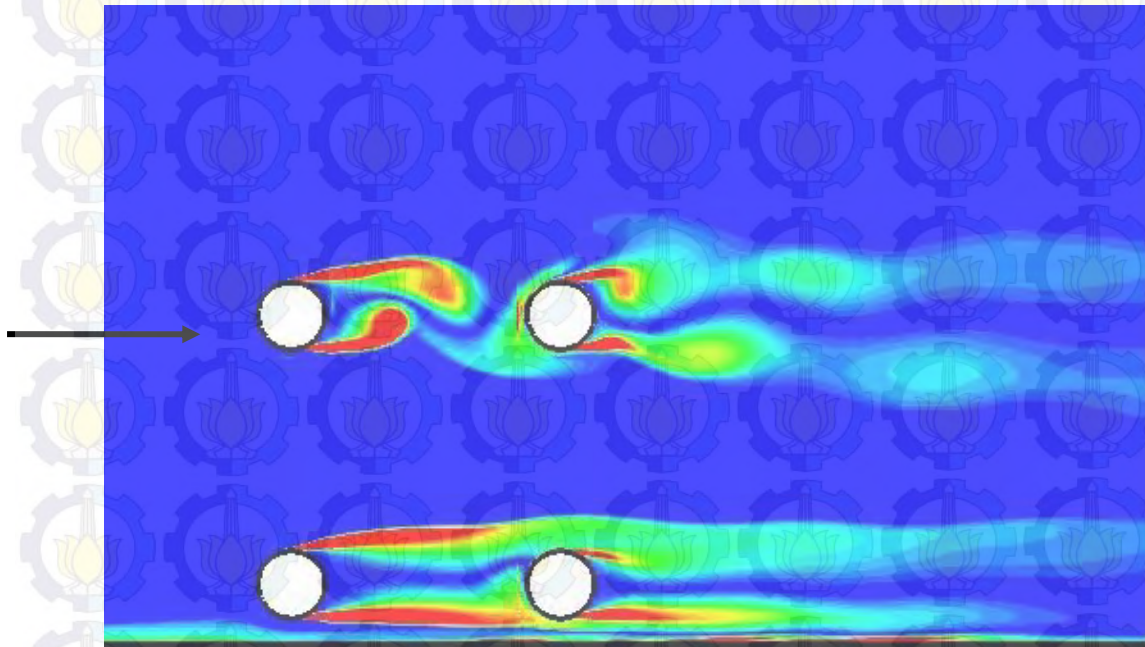


Gambar 4.48. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.48 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.48 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum yaitu pada  $\theta= 345^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Sementara distribusi tekanan untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder seluruhnya dikenai dari *shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,42 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,08 untuk silinder-4.

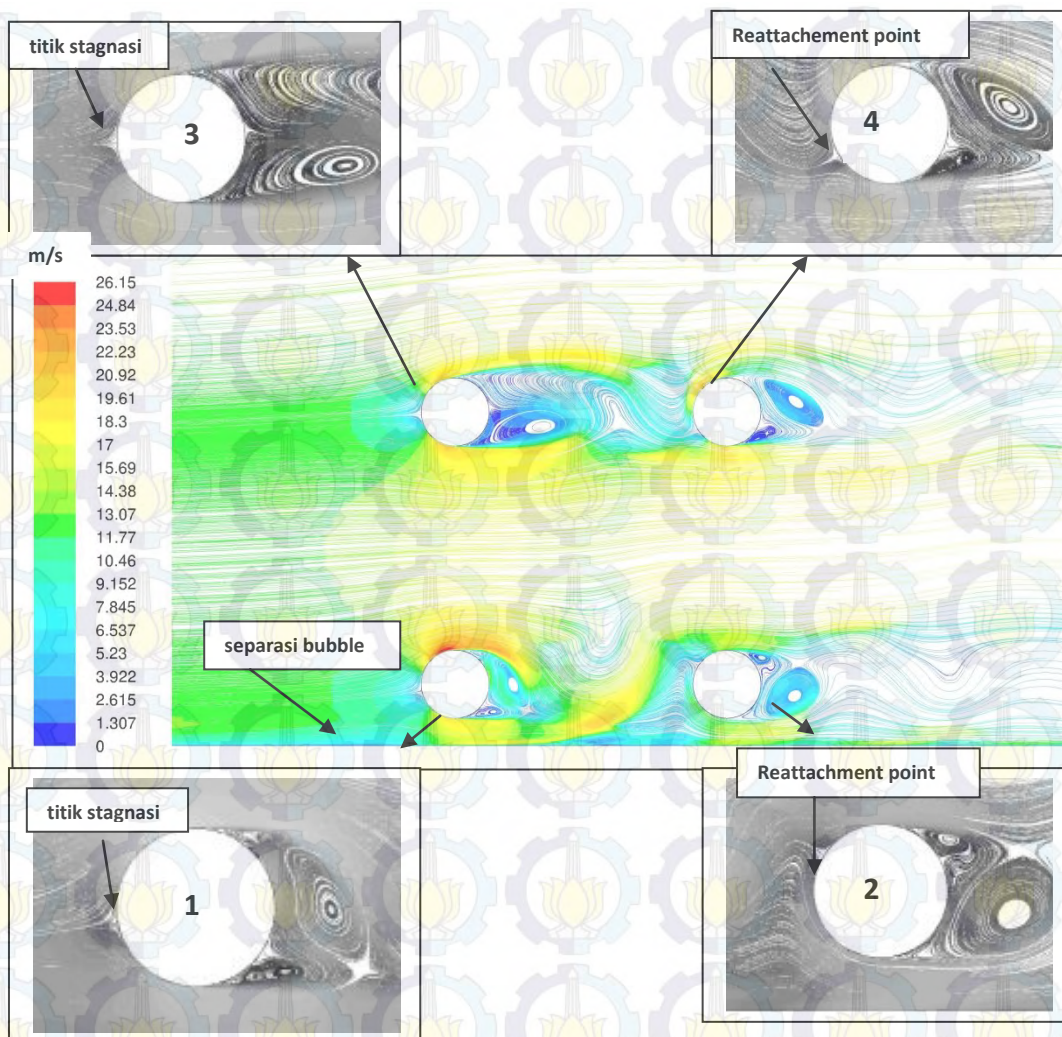


Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung pada *rearside-upper*.



Gambar 4.49. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$

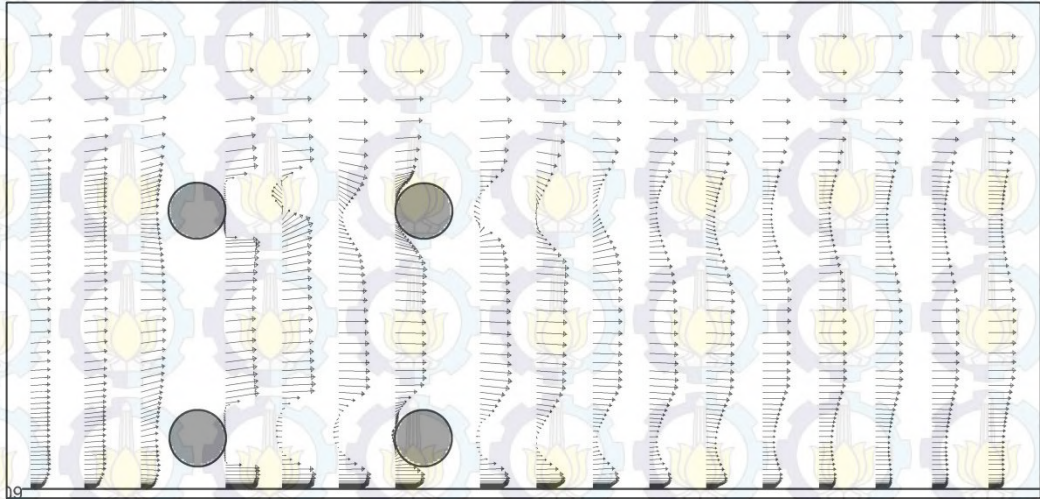
Gambar 4.49 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Melalui Gambar 4.49 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, mulai terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna. Dengan posisi silinder yang relatif lebih jauh dari dinding membuat *free shear layer* dari kedua silinder mulai membentuk *vortices*. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* yang terbentuk belum teratur.



Gambar 4.50. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$ ,  $G/D= 0,4$

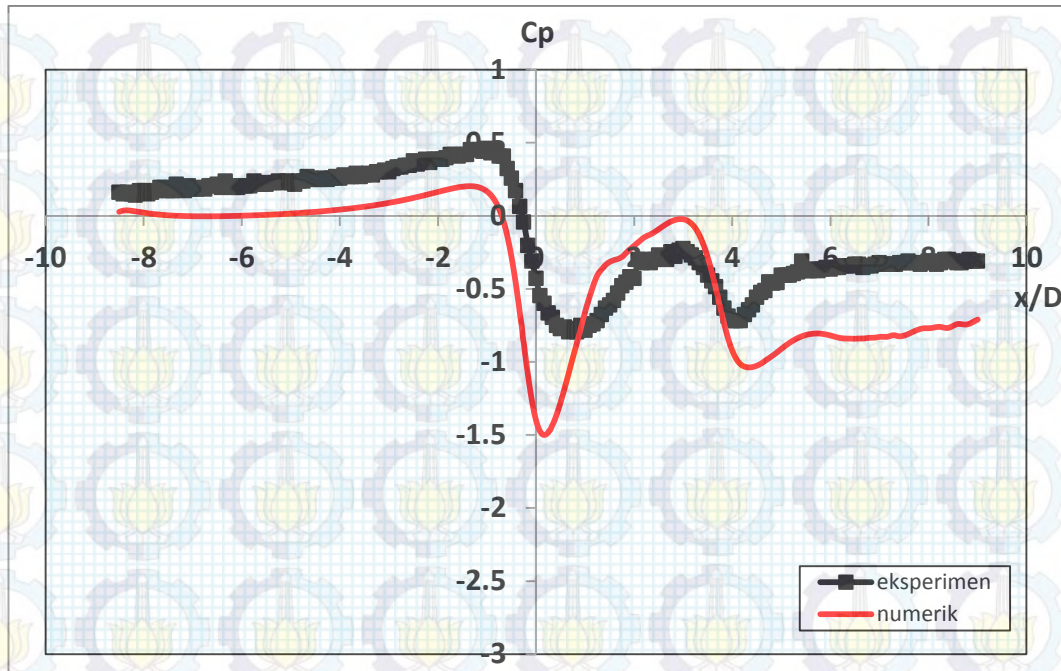
Gambar 4.50 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.50 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Penempatan dinding yang relatif cukup besar terhadap silinder membuat *separasi bubble* yang menimbulkan efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 hampir hilang. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder. Masih adanya efek *blockage* pada *lowerside* silinder-1 ini ditandai juga bergesernya titik stagnasi ke *outer-side* dari silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang relatif besar, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki

momentum yang cukup besar, ditandai dengan *free shear layer* dari silinder upstream membentuk *vortices shed*.



Gambar 4.51. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$

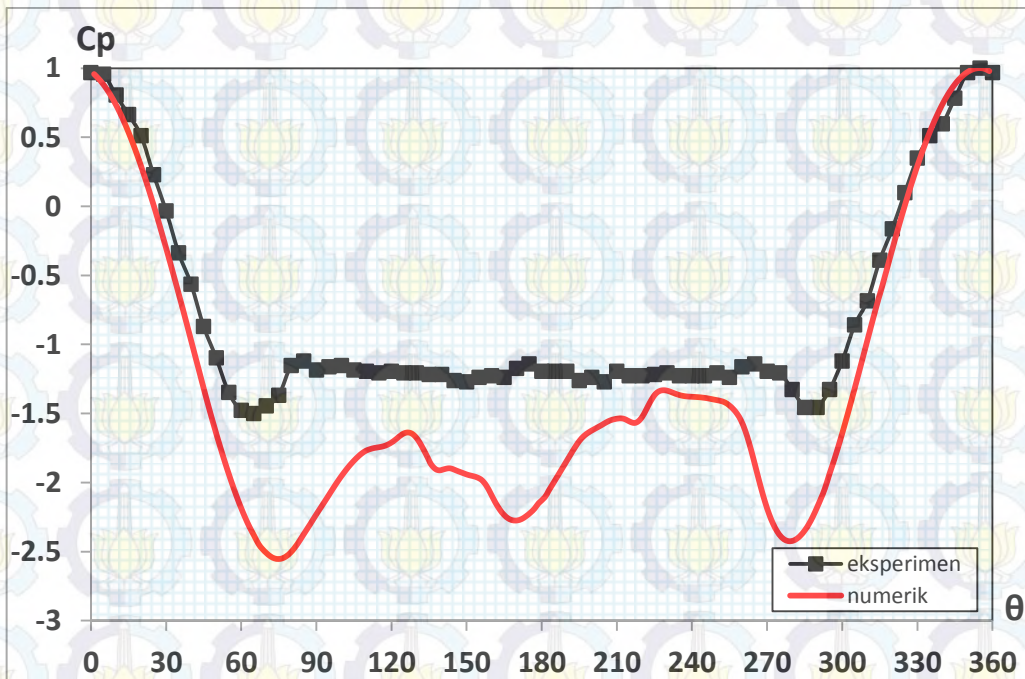
Gambar 4.51 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,4$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.51 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor *free stream* aliran sejajar dengan *streamwise*, hal ini dikarenakan dinding sudah tidak menimbulkan *blockage*. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.52. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.52 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,4$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada upstream silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 6$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

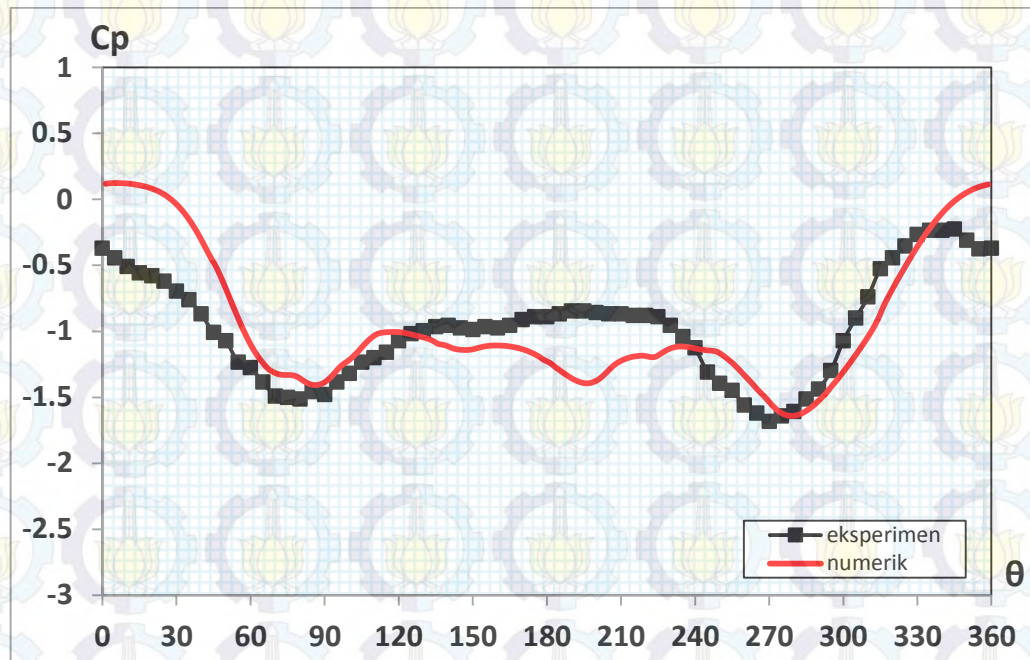
f. Pada  $G/D= 0,5$



Gambar 4.53. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* Silinder-1 dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

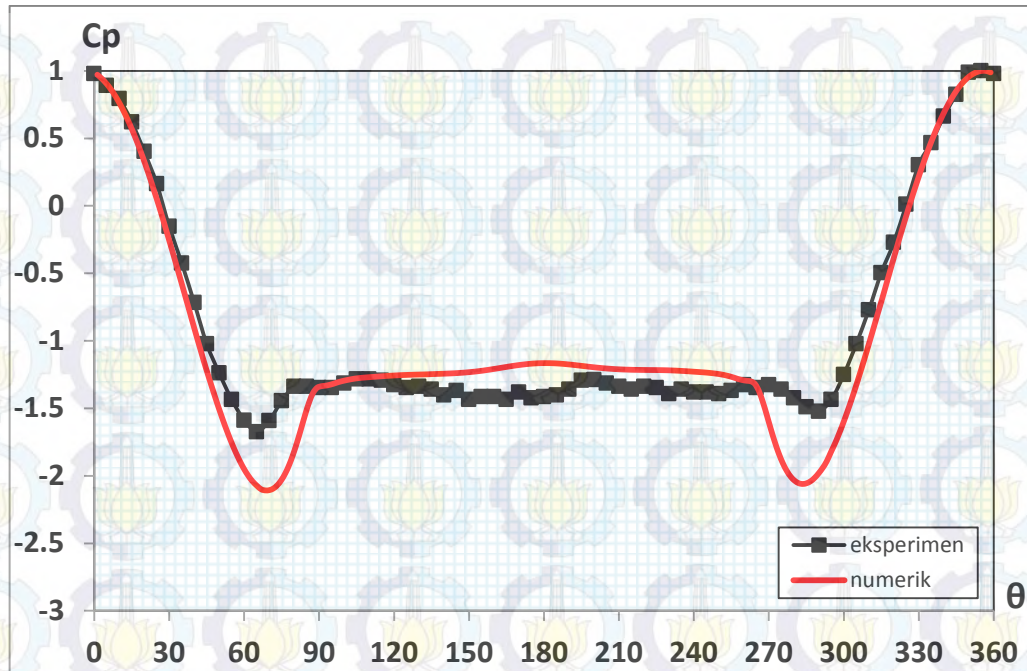
Gambar 4.53 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$ . Melalui Gambar 4.53 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder relatif simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^0$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 285^0$ . Dengan jarak penempatan dinding yang semakin jauh dari silinder, menyebabkan efek *blockage* hampir tidak terjadi. Walaupun demikian posisi titik stagnasi masih berada pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^0$ . Celah yang relatif besar antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,5$ , membuat momentum fluida yang mengalir pada *upperside* dan *lowerside* silinder relatif sama ditandai dari posisi separasi terjadi pada  $\theta_{sp}= 85^0$  dan  $265^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1.18 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,09 untuk silinder-1

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang kurang sesuai, terutama pada daerah wake.



Gambar 4.54. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

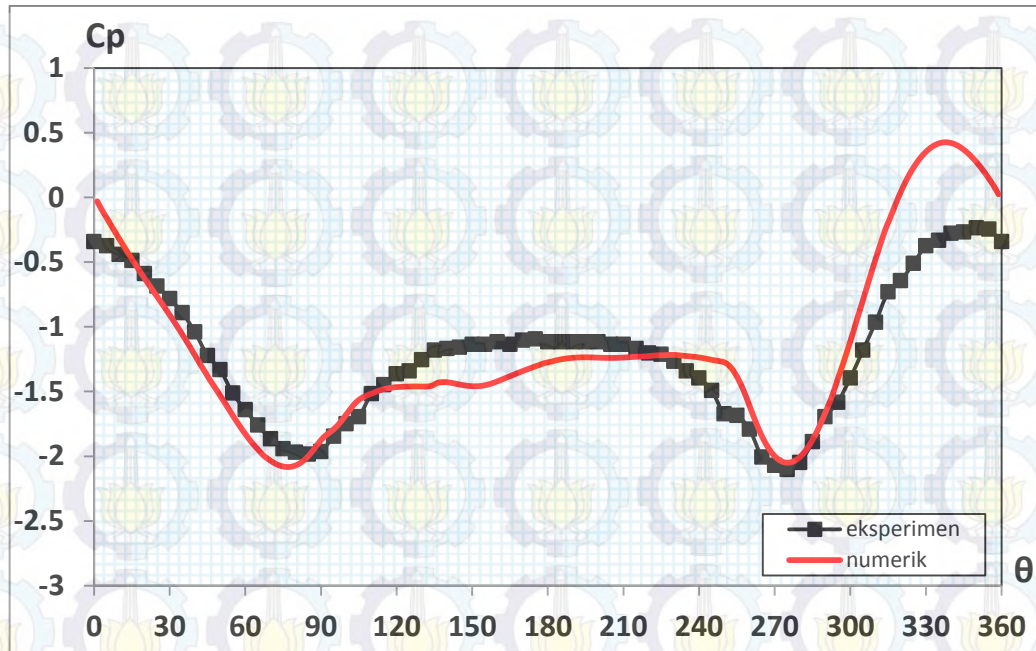
Gambar 4.54 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.54 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki satu titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 345^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *lowerside* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,30 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,05 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* terjadi pada *upperside* kontur silinder. Hal ini dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



Gambar 4.55. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.55 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.55 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini tidak simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 65^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^\circ$  pada *lowerside*. Penempatan dinding pada  $G/D= 0,5$  dari silinder membuat efek *blockage* sudah hampir tidak ada, dan posisi titik stagnasi masih terjadi pada  $\theta_s= 355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 270^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,26 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,11 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

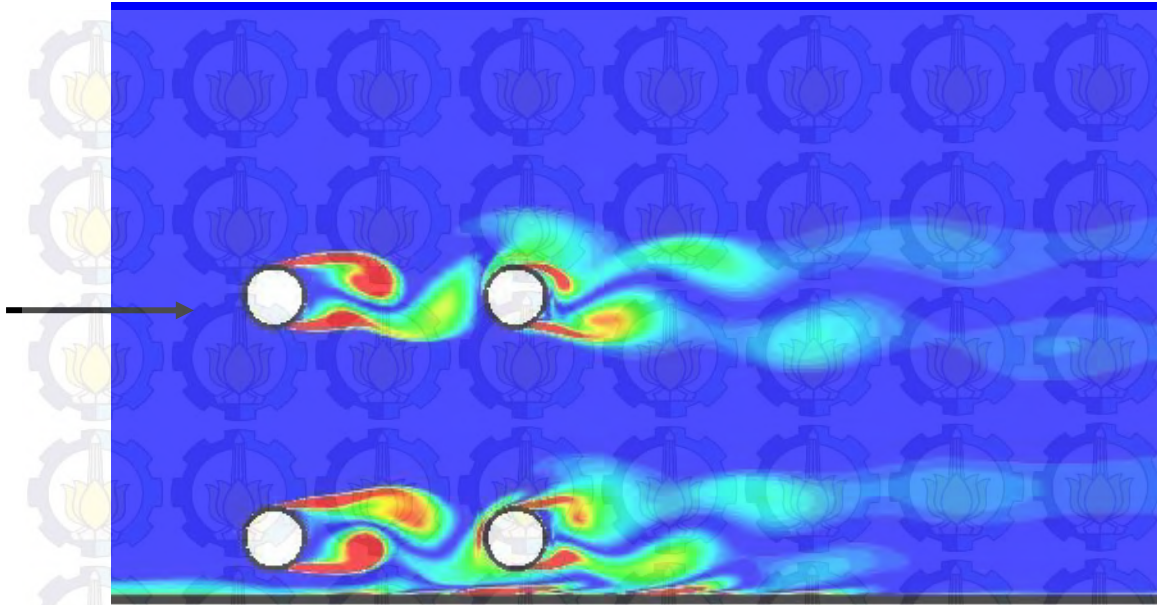


Gambar 4.56. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.56 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.56 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum positif, yaitu pada  $\theta= 350^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Dan distribusi tekanan untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder dilingkupi *free shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,43 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,08 untuk silinder-4.

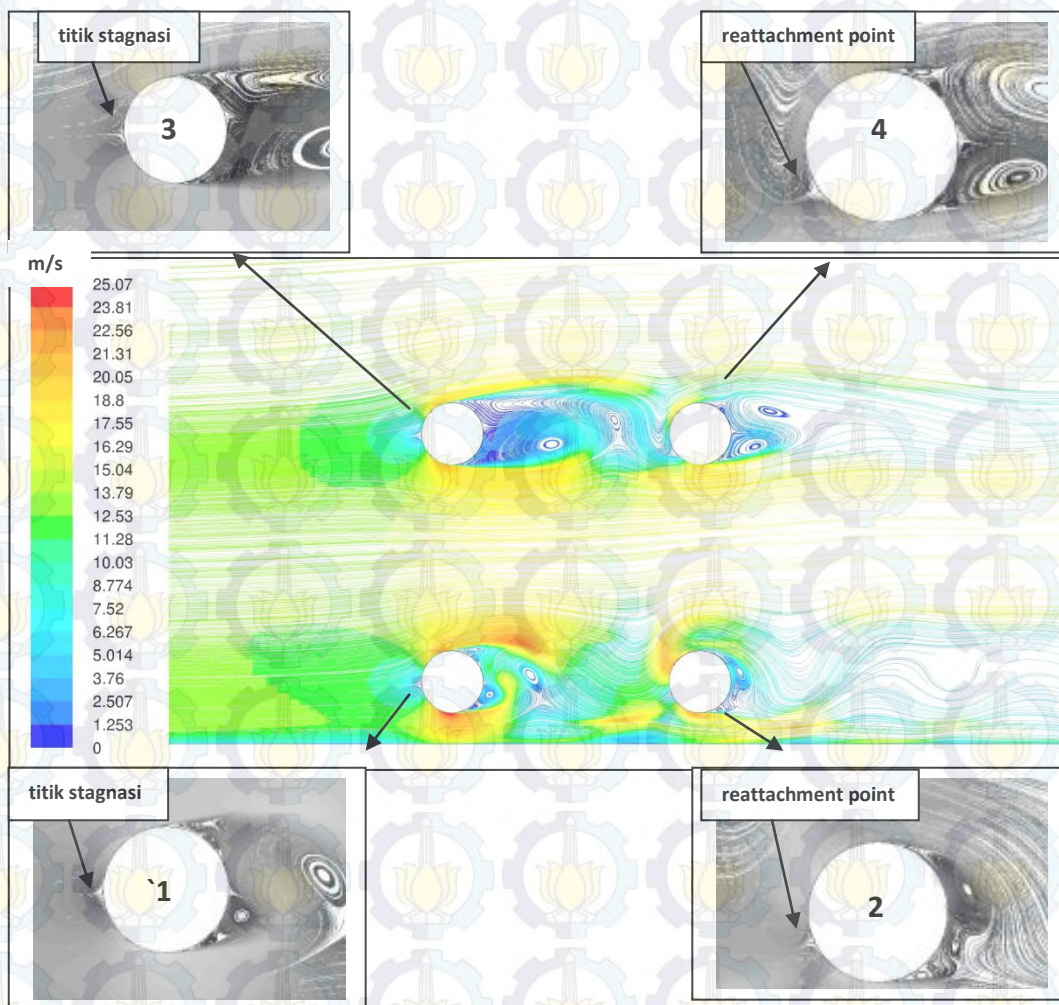
Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian yakni adanya fenomena *reattachment* yang berlangsung pada *lowside* silinder.





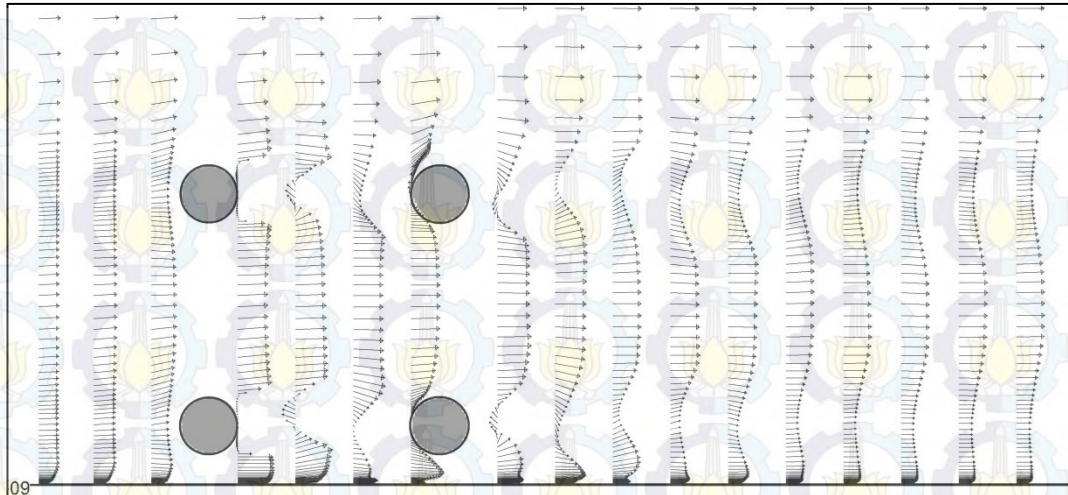
Gambar 4.57. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$

Gambar 4.57 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,0$ . Melalui Gambar 4.57 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, sudah terbentuk *vortices shed* walaupun belum teratur. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* yang terbentuk belum teratur.



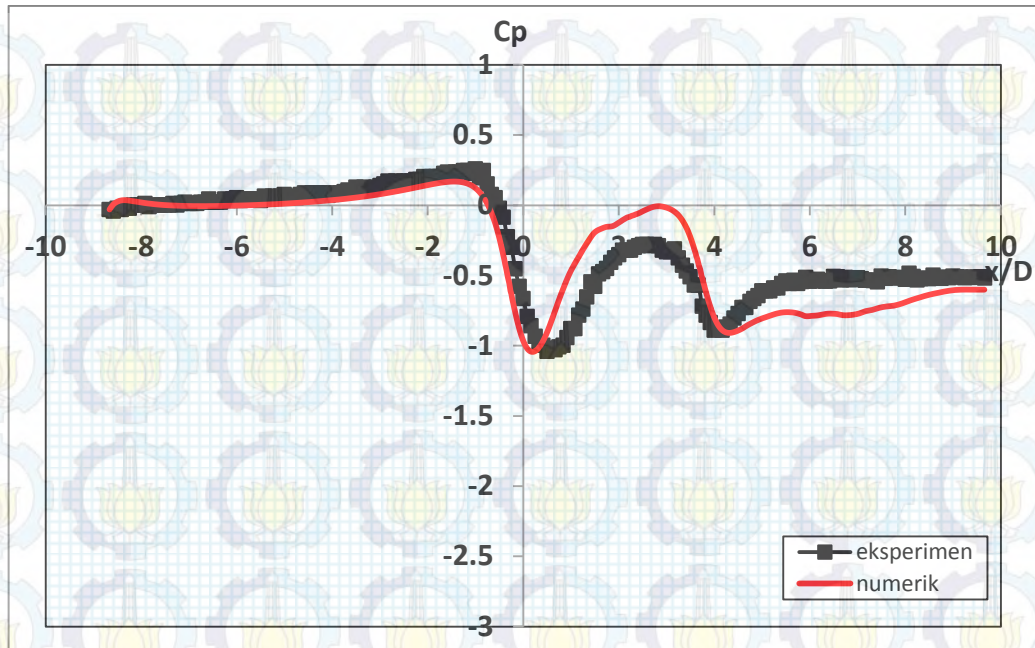
Gambar 4.58. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$ ,  $G/D= 0,5$

Gambar 4.58 menunjukkan visualisasi velocity pathline pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$ . Penempatan dinding yang relatif cukup jauh terhadap silinder membuat separasi *bubble* dan menimbulkan efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 relatif hilang. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder. Masih adanya efek *blockage* pada *lowerside* silinder-1 ini ditandai juga bergesernya titik stagnasi ke *outer-side* dari silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang relatif besar, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum yang cukup besar, ditandai dengan *free shear layer* dari silinder *upstream* membentuk *vortices shed*.



Gambar 4.59. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$

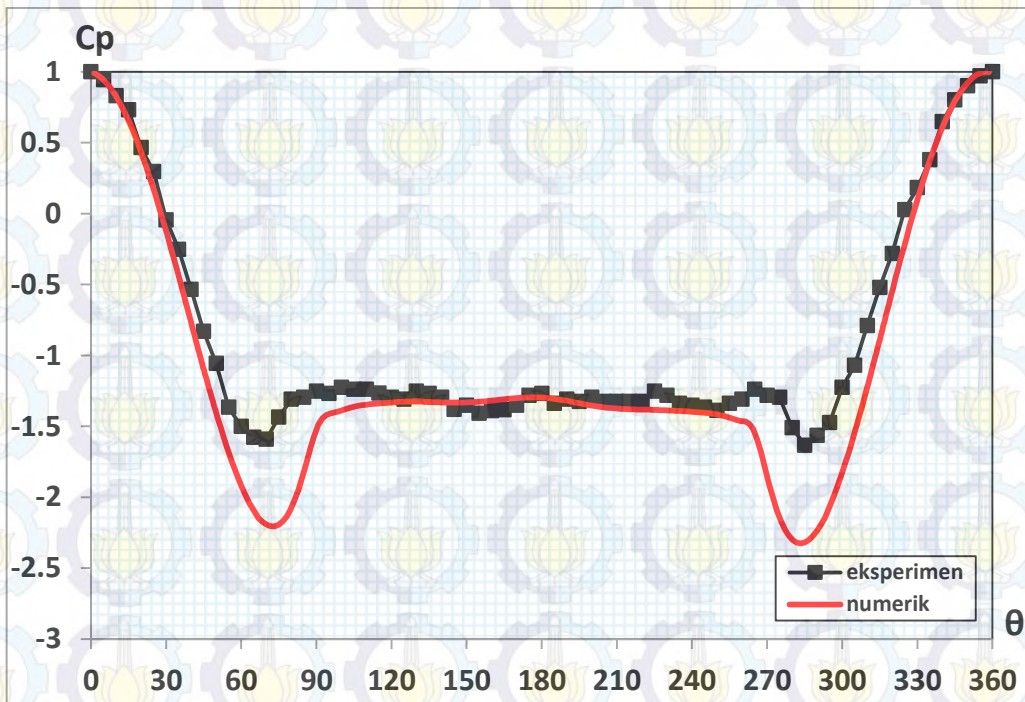
Gambar 4.59 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 0,5$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.59 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran sudah sejajar dengan streamwise, hal ini dikarenakan dinding sudah tidak menimbulkan *blockage*. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.60. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=0,5$  pada bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.60 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=0,5$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 5,0$ .

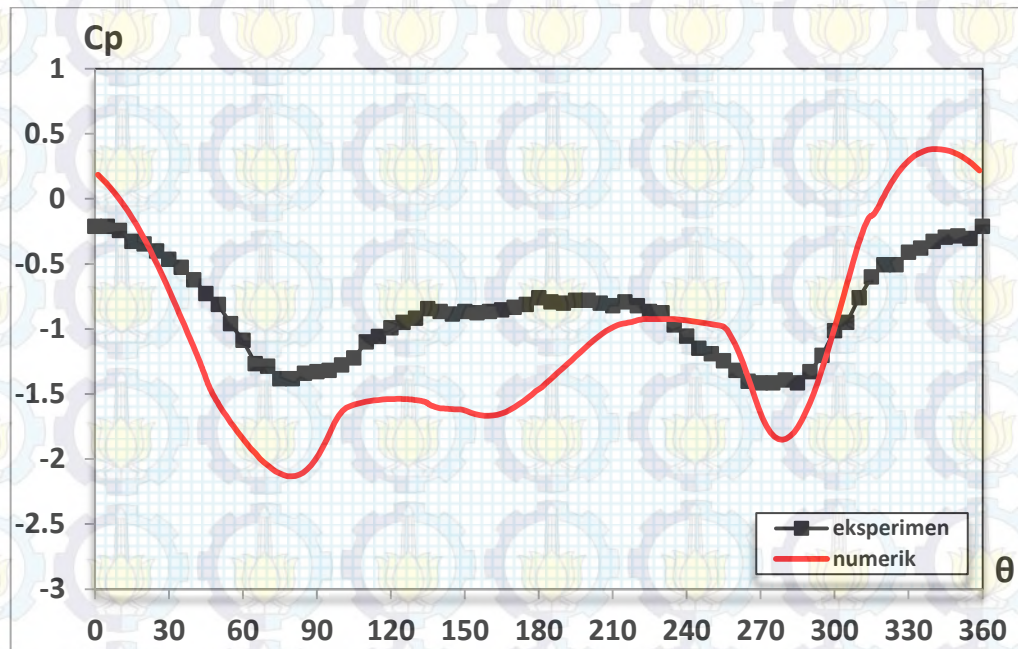
g. Pada  $G/D= 1,0$



Gambar 4.61. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

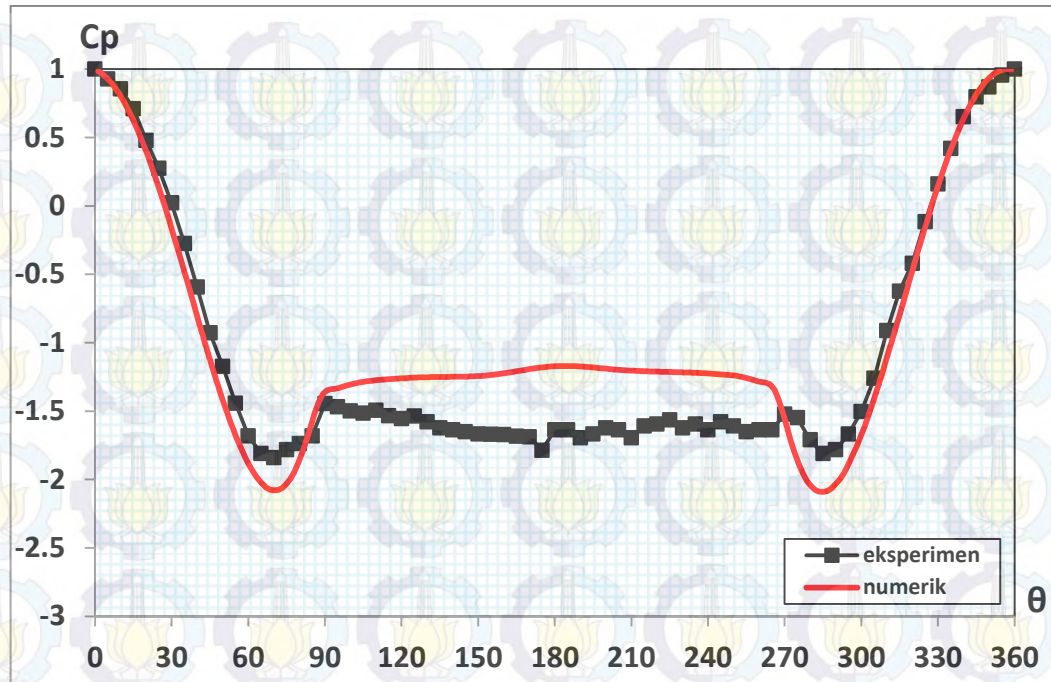
Gambar 4.61 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Melalui Gambar 4.61 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 70^0$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 290^0$ . Ini berarti bahwa aliran yang menuju ke silinder-1 tegak lurus terhadap silinder. Dengan jarak penempatan dinding yang jauh dari silinder, menyebabkan posisi titik stagnasi tepat berada pada *front-side* silinder yaitu  $\theta_s = 360^0$ . Momentum fluida yang mengalir pada *upperside* dan *lowerside* silinder sama ditandai dari masing-masing posisi separasi terjadi pada  $\theta_{sp}= 70^0$  dan  $290^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,25 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,04 untuk silinder-1

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai.



Gambar 4.62. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

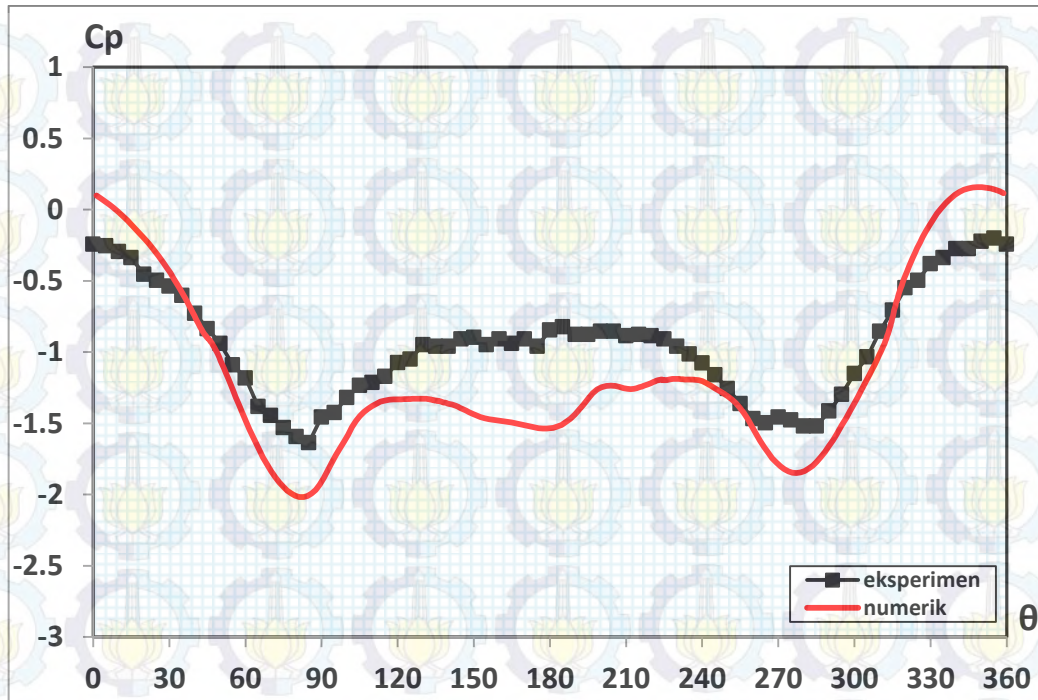
Gambar 4.62 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.62 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki titik dimana tekanan maksimum terletak pada frontside silinder,  $\theta= 360^0$ . Distribusi tekanan memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *free shear layer* mengenai kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,31 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,01 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik masih terjadi fenomena *reattachment*, yang ditandai dengan harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya maksimum pada  $\theta= 350^0$ .



Gambar 4.63. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.63 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.63 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 70^0$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^0$  pada *lowerside*. Penempatan dinding yang jauh dari silinder membuat efek *blockage* sudah tidak ada, dan posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s= 360^0$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 270^0$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 90^0$ . Ini menunjukkan bahwa aliran free stream yang menuju ke silinder-3 searah dengan *streamwise* aliran. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,49 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,04 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai dan sama.

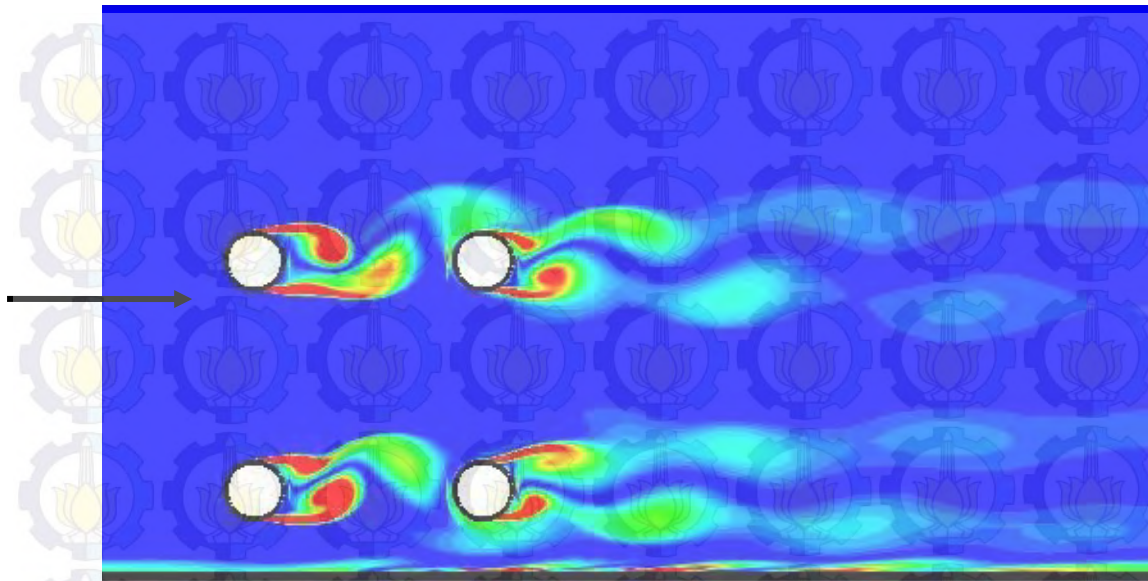


Gambar 4.64. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.64 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.64 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum yaitu pada  $\theta= 355^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Distribusi koefisien tekanan  $C_p$  untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder seluruhnya dilingkupi oleh *free shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,33 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,04 untuk silinder-4.

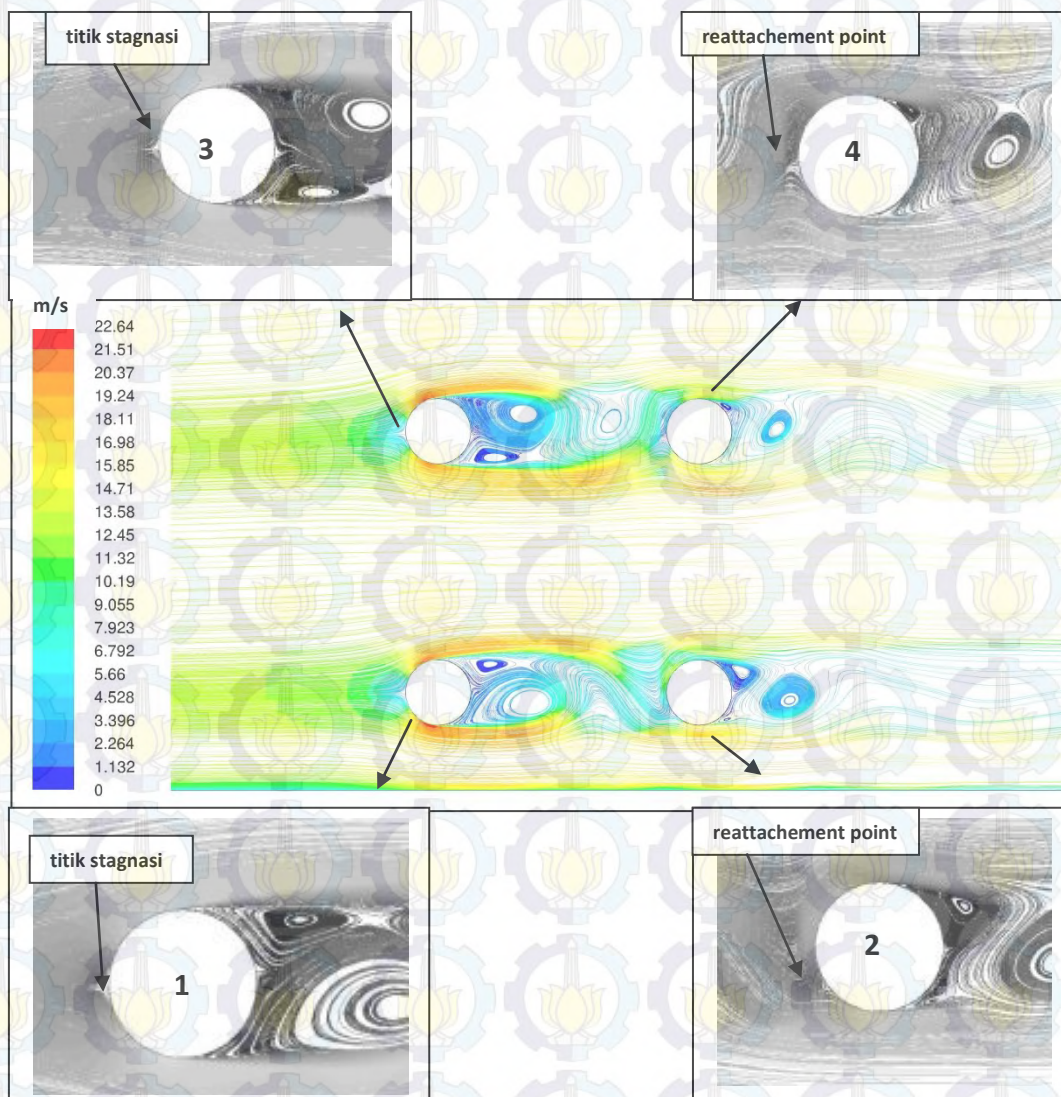
Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* terjadi pada *lowside*.





Gambar 4.65. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$

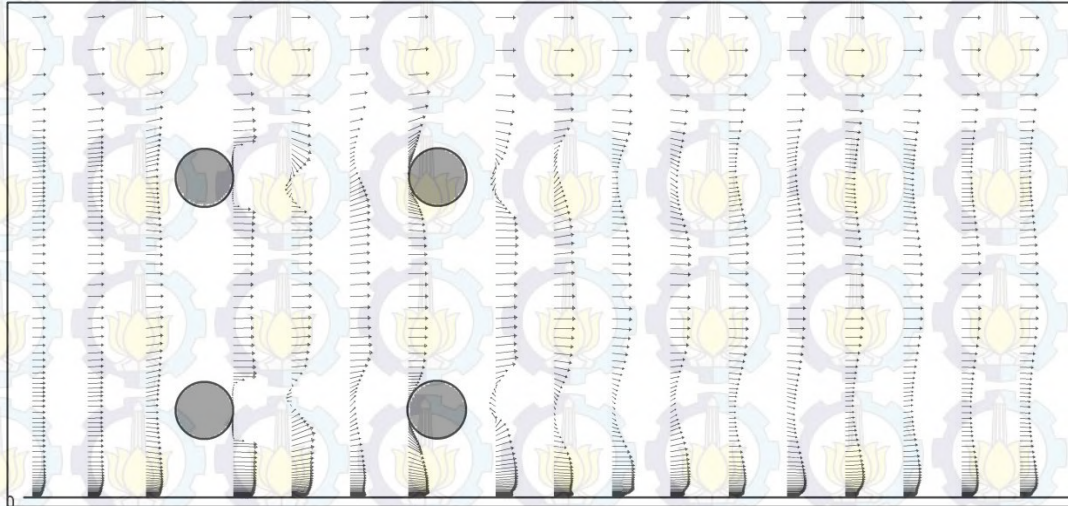
Gambar 4.65 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Melalui Gambar 4.65 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, terbentuk *vortices shed*. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 juga terbentuk *vortices shed*.



Gambar 4.66. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 4,0$ ,  $G/D= 1,0$

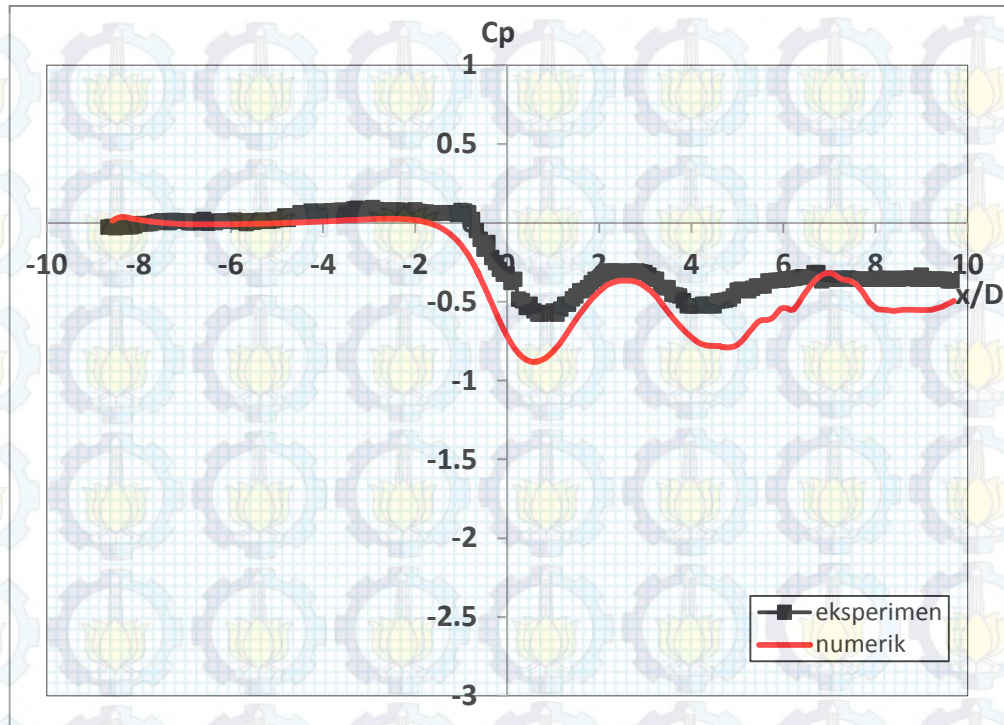
Gambar 4.66 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.66 dapat dilihat visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Penempatan dinding yang jauh,  $G/D= 1,0$  terhadap silinder membuat tidak timbulnya separasi *bubble* sehingga efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 tidak terjadi. Aliran free stream mengalir tegak lurus terhadap silinder *upstream*, hal mana dapat diketahui dari posisi titik stagnasi dari kedua silinder tepat berada pada *front-side* silinder. Sama halnya juga aliran yang mengalir pada celah antara silinder dan pada *upperside* dari silinder-3 juga memiliki momentum yang sama, sehingga distribusi

koefisien tekanan pada kontur *lowside* dan *upperside* juga sama, dengan demikian dinding sudah tidak mempengaruhi aliran pada kedua sisi.



Gambar 4.67. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* yang Melintasi Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$

Gambar 4.67 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 4,0$  dan  $G/D= 1,0$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 3,5$  dan  $x/D= 5,0 \div 14,0$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.67 terlihat evolusi vektor velocity aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran sejajar dengan streamwise, hal ini dikarenakan dengan dinding tidak menimbulkan blockage. Juga pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.68. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D=1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

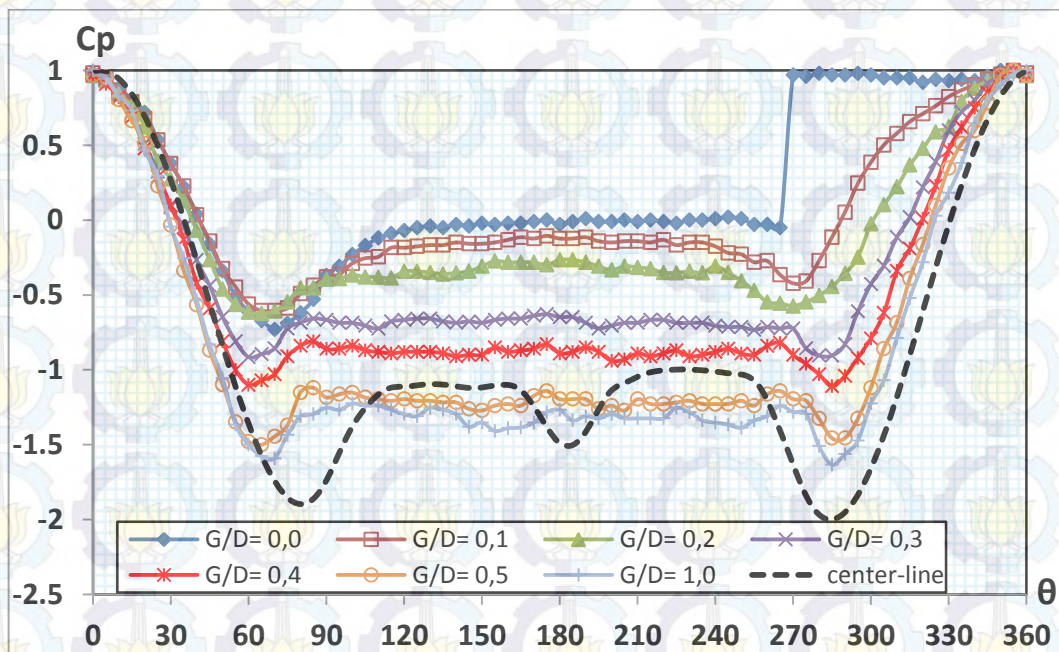
Gambar 4.68 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=4,0$  dan  $G/D=1,0$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding pada posisi ini sudah tidak menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 5$ .

### 3. Perbandingan Hasil dan Analisa Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square ( $L/D=4$ ) Dekat Dinding Dengan Variasi $G/D=0,0 \div 0,5$ dan $1,0$

Berikut ini akan disampaikan analisa perbandingan hasil eksperimen pada susunan empat silinder dengan rasio spasi  $L/D=4,0$  pada variasi rasio gap  $G/D=0,0 \div 0,5$  dengan interval  $0,1$  dan  $1,0$ , dan hasil numerik dengan rasio spasi  $L/D=4,0$  di *center-line* sebagai pembanding. Urut-urutan penyajian meliputi: a) analisa perbandingan distribusi tekanan di kontur silinder dan plat datar; b) analisa perbandingan koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) kontur masing-masing silinder; c) analisa perbandingan bilangan Strouhal; dan d) analisa perbandingan profil kecepatan di daerah wake silinder downstream.

#### a. Perbandingan distribusi koefisien tekanan di kontur silinder dan plat datar pada variasi rasio gap ( $G/D$ )

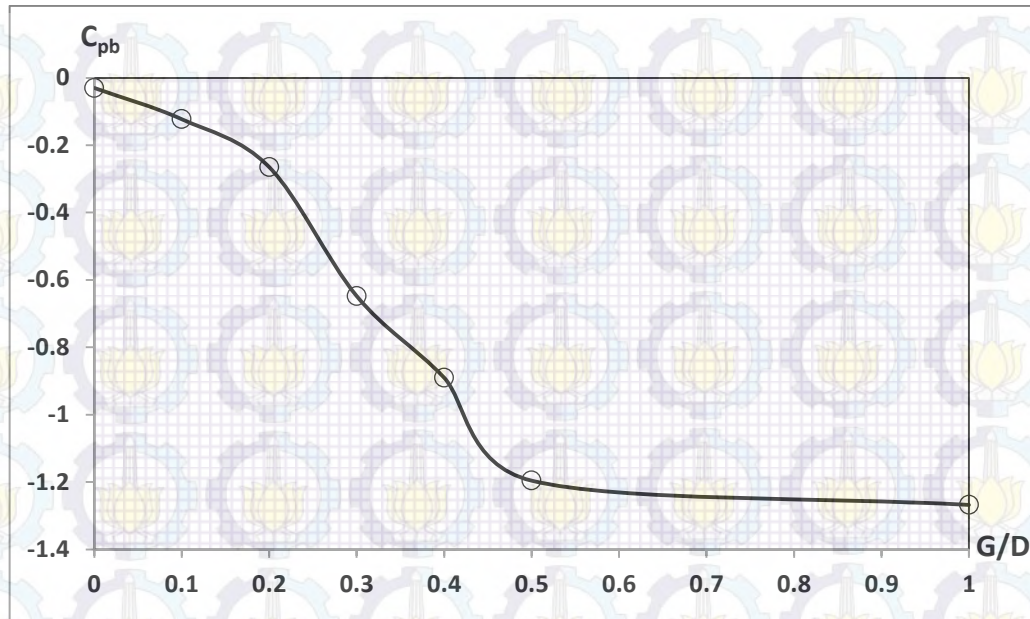
Karakteristik aliran seperti distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) memberikan informasi tentang evolusi tekanan pada masing-masing permukaan kontur silinder dan dinding.



Gambar 4.69. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$  (Eksperimen)

Gambar 4.69 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-1** antara susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di *center-line*. Melalui Gambar 4.69 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) mempengaruhi distribusi tekanan dari kontur silinder, dimana distribusi tekanan kontur silinder tidak simetri ketika rasio  $G/D= 0,0$  atau silinder menyentuh dinding, dan mulai berubah menjadi simetri ketika rasio  $G/D$  meningkat, dan akhirnya simetri ketika rasio  $G/D= 1,0$ . Hal ini ditandai dari titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada **silinder-1** untuk 7 (tujuh) variasi rasio  $G/D$  mulai dari  $0,0 \div 0,5$  dan  $1,0$  masing-masing menunjukkan posisi yang berbeda, dimana pada rasio yang terkecil  $G/D= 0,1$  hingga rasio yang terbesar  $G/D= 1,0$  posisi  $\theta_s$  berpindah dari *outer-side* silinder,  $\theta_s= 355^0$  menuju ke *front-side*  $\theta_s= 360^0$ . Bergesernya titik ini dikarenakan adanya efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 ketika didekatkan pada dinding sehingga sebagian besar momentum fluida akan defleksi ke *upperside* dari silinder. Sementara pada rasio  $G/D= 0,0$ , silinder menyentuh dinding, fluida sama sekali tidak dapat mengalir atau terhenti pada *lowerside*, dan mengakibatkan seluruh momentum fluida terdefleksi ke *upperside* silinder sehingga titik stagnasi terjadi pada  $\theta= 350^0$ . Tetapi pada rasio  $G/D= 1,0$  posisi titik stagnasi tepat berada di depan ( $\theta= 0^0$ ), ini berarti bahwa pada rasio tersebut efek *blockage* sudah tidak terjadi. Berdasarkan perkembangan distribusi tekanan kontur silinder-1 tujuh variasi rasio  $G/D$  dapat dikelompokkan menjadi 3 (tiga), rasio  $G/D \leq 0,2$ , rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,4$ , dan rasio  $G/D \geq 0,5$ .

Melalui gambar tersebut juga terlihat adanya perbedaan nilai tekanan minimum yang terjadi pada masing-masing rasio, dimana nilai tekanan minimum terendah terjadi pada rasio  $G/D \geq 0,5$  dan secara gradual naik ketika rasio ini mengecil, ini menunjukkan bahwa terjadi percepatan atau akselerasi aliran terbesar di silinder pada rasio terbesar. Pada rasio  $G/D= 0,5$  dan  $G/D= 1,0$  nilai tekanan minimum relatif sama, ini berarti mulai rasio  $G/D= 0,5$  efek dinding relatif tidak ada. Dibanding dengan susunan silinder di *center-line*, percepatan aliran pada *upperside* silinder-1 lebih besar dari *lowerside* silinder-1. Hal ini ditandai posisi titik stagnasi ( $\theta_s$ ) yang terjadi pada *inner-side* silinder berkisar  $2^0$ .

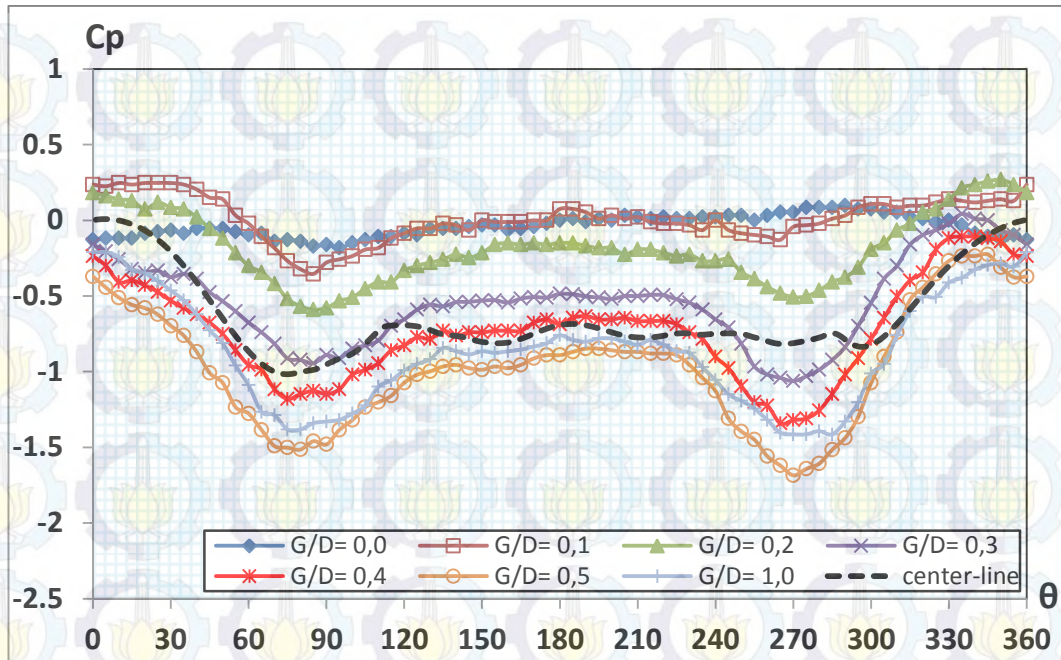


Gambar 4.70. Perbandingan Distribusi Koefisien *Base Pressure* ( $C_{pb}$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.70 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ) pada kontur silinder-1 untuk 7 (tujuh) variasi rasio gap ( $G/D$ ).

Melalui Gambar 4.70 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) juga mempengaruhi harga koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ), dimana pada rasio  $G/D$  terbesar harga dari  $C_{pb}$  terendah, dan koefisien ini mulai meningkat ketika rasio tersebut berkurang.

Penurunan harga  $C_{pb}$  yang cepat terjadi ketika rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$ , setelah itu pada  $G/D= 1,0$  penurunannya relatif kecil atau kurang berarti. Hal ini dikarenakan pada batasan rasio gap pertama tersebut, posisi dari silinder terendam dalam lapis batas dinding. Perubahan harga  $C_{pb}$  ini terkait dengan perubahan titik separasi dari silinder dan perubahan ukuran wake dibelakang silinder. Dengan demikian besaran dari koefisien *base pressure* ini berkaitan secara langsung dengan besaran koefisien drag ( $C_D$ ) dari silinder, dimana apabila besaran  $C_{pb}$  bertambah kecil maka besaran  $C_D$  silinder akan bertambah besar, ataupun sebaliknya besaran  $C_{pb}$  bertambah besar maka besaran  $C_D$  akan bertambah kecil.

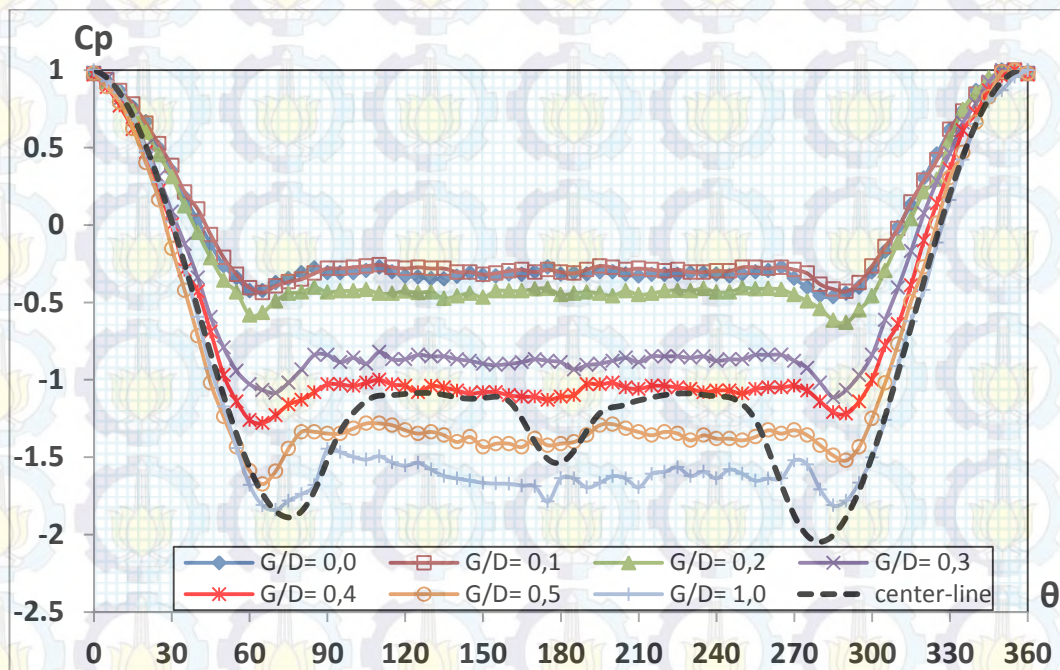


Gambar 4.71. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-2* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$  (Eksperimen)

Gambar 4.71 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-2** antara susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di center-line. Melalui Gambar 4.71 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) berpengaruh terhadap distribusi tekanan yang terjadi pada silinder. Pada rasio  $G/D=0,0$ , distribusi tekanan pada kontur silinder berharga negatif, dan tidak menunjukkan adanya tekanan maksimal. Hal ini menunjukkan bahwa pada rasio ini shear layer dari silinder-1 *shield on* atau melingkupi kontur silinder-2, khususnya pada *upperside* silinder, sementara pada *lowerside* aliran terhenti. Pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , distribusi tekanan kontur silinder-2 menunjukkan adanya satu tekanan maksimal, dimana ini mengindikasikan terjadinya *reattachment* dari *outer shear layer* silinder-1 pada kontur silinder-2. Pada rasio  $G/D=0,1$  posisi *reattachment* terjadi pada *upperside* ( $\theta=30^\circ$ ) kontur, karena *outer shear layer* dari silinder-1 masih memiliki momentum kecil. Sementara pada rasio  $G/D=0,2$  posisi *reattachment* terjadi pada *lowerside* ( $\theta=350^\circ$ ) kontur, karena momentum dari *outer shear layer* silinder-1 sudah cukup besar. Ketika rasio ini bertambah besar,  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$ ,



distribusi tekanan pada kontur silinder-2 menyerupai distribusi tekanan pada kontur silinder tunggal, tetapi tidak simetri. Artinya fenomena stagnasi dan separasi aliran terjadi pada silinder ini. Titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada rasio tersebut masing-masing pada  $335^\circ$ ,  $340^\circ$ , dan  $345^\circ$ . Hal ini menunjukkan *free shear layer* dari silinder-1 *roll-up* pada bagian depan dari silinder-2. Sementara pada rasio  $G/D= 1,0$  distribusi tekanan kontur silinder sama seperti rasio sebelumnya, yaitu menyerupai distribusi tekanan pada kontur silinder tunggal tetapi simetri, dengan titik stagnasi ( $\theta_s$ )=  $360^\circ$ . Hal ini menunjukkan pada rasio ini, efek *blockage* yang terjadi karena peletakan silinder dekat dinding sudah hampir tidak terjadi. Sementara pada susunan empat silinder di center-line, distribusi tekanan pada kontur silinder-2 merupakan kebalikan dari kontur silinder-4.

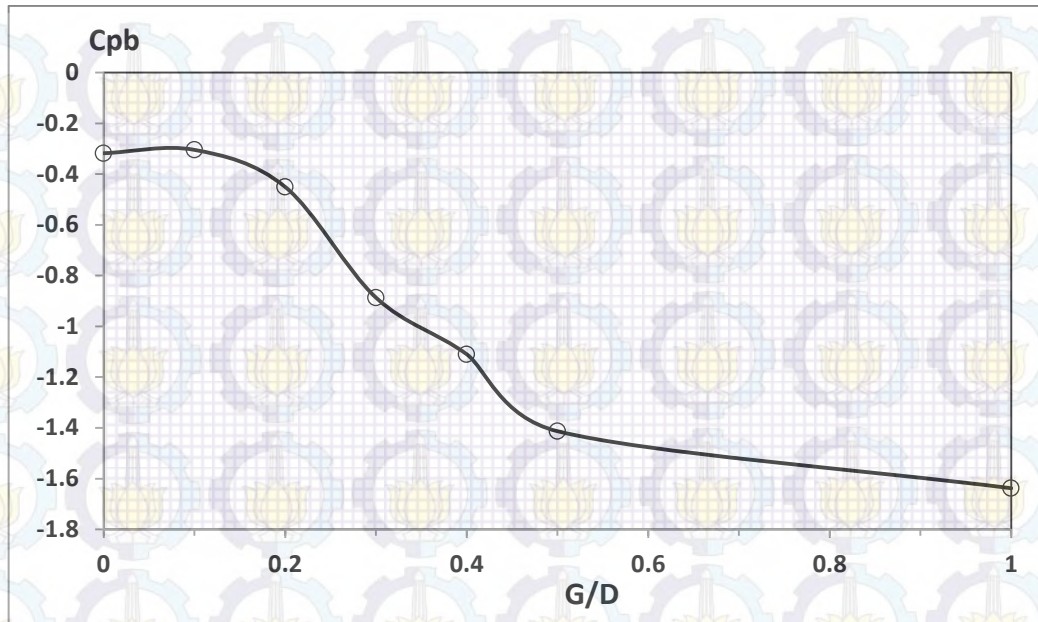


Gambar 4.72. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$  (Eksperimen)

Gambar 4.72 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-3** antara susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di center-line. Melalui Gambar 4.72 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) mempengaruhi distribusi tekanan

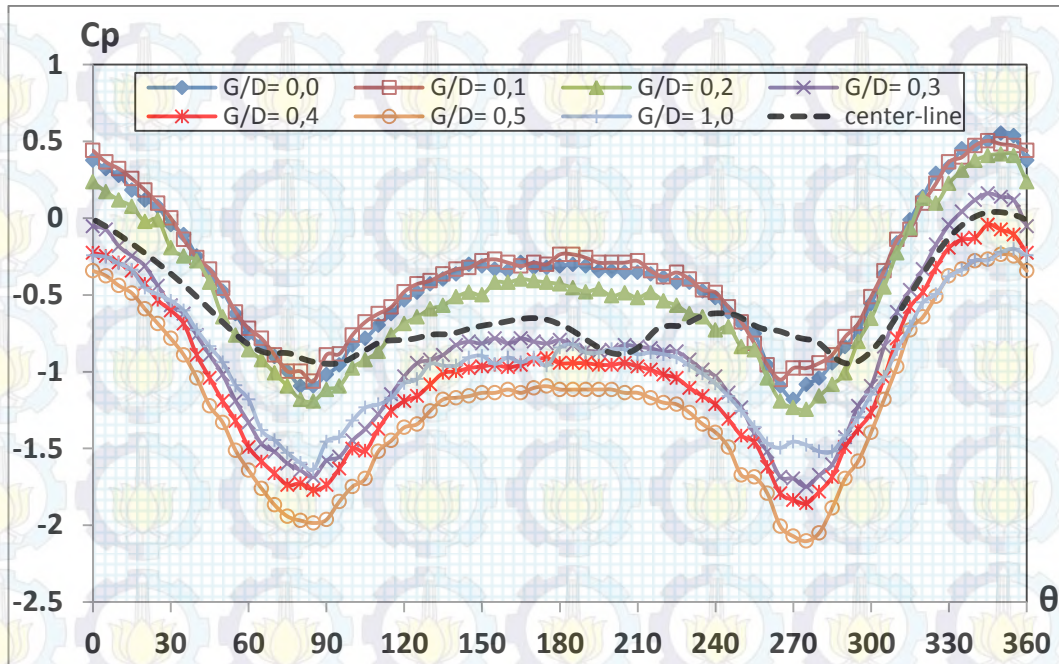
dari kontur silinder. Pada rasio  $G/D= 0,0$ , distribusi tekanan dari kontur relatif tidak simetri, ini ditandai dari posisi titik stagnasi ( $\theta_s$ ) yang berada pada inner-side silinder ( $350^\circ$ ). Sementara pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,5$ , distribusi tekanan dari kontur relatif lebih simetri, ini diketahui melalui posisi titik stagnasi yang berpindah ke front-side silinder ( $355^\circ$ ). Dan pada rasio  $G/D= 1,0$  distribusi tekanan dari kontur menjadi simetri, yang ditandai dengan posisi titik stagnasi berada pada front-side silinder ( $360^\circ$ ). Perubahan posisi titik stagnasi hanya terjadi pada saat silinder menyentuh dinding ( $G/D= 0,0$ ) dan saat silinder jauh dari dinding ( $G/D= 1,0$ ). Pada saat rasio  $G/D= 0,0$ , titik stagnasi berpindah ke inner-side dikarenakan adanya peningkatan momentum aliran yang melalui celah antara dua silinder upstream. Penambahan momentum aliran ini berasal dari seluruh aliran yang terdefleksi ke upper-side silinder-1, ketika silinder menyentuh dinding. Diantara tujuh variasi rasio gap, perbedaan distribusi tekanan yang terbesar terjadi diantara  $G/D= 0,2$  dan  $G/D= 0,3$ .

Melalui gambar tersebut juga terlihat adanya perbedaan nilai tekanan minimum yang terjadi pada masing-masing rasio, dimana nilai tekanan minimum terendah terjadi pada rasio yang terbesar,  $G/D= 1,0$ , dan secara gradual nilai tekanan minimum bertambah besar ketika rasio ini berkurang. Ini menunjukkan bahwa terjadi percepatan atau akselerasi aliran terbesar pada rasio terbesar. Dibanding dengan susunan empat silinder di center-line, distribusi tekanan pada silinder-3 relatif sama.



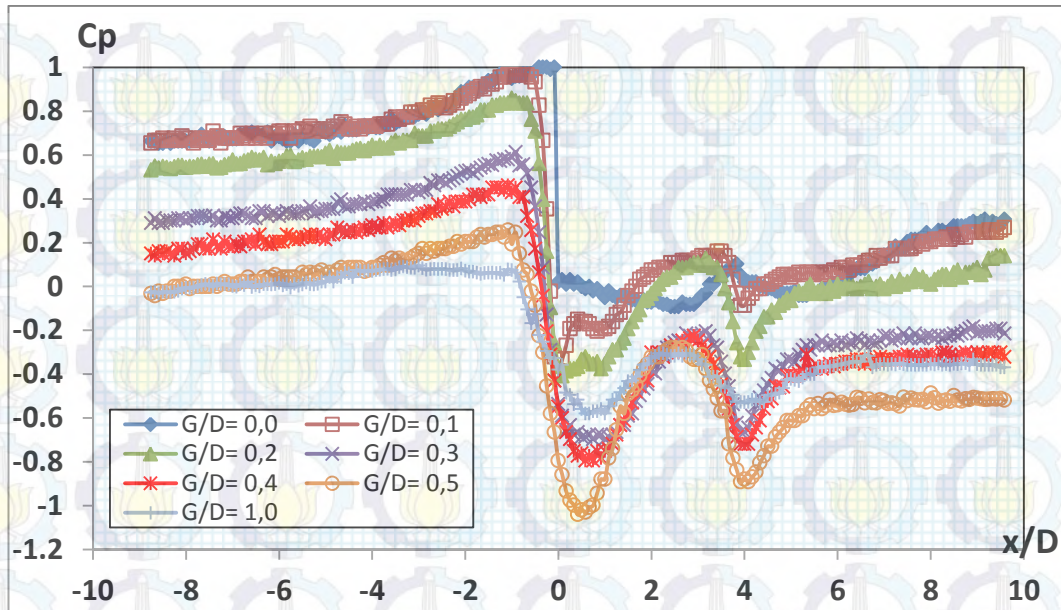
Gambar 4.73. Perbandingan Distribusi Koefisien Base Pressure ( $C_{pb}$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$

Gambar 4.73 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien base pressure ( $C_{pb}$ ) pada kontur silinder-3 untuk 7 (tujuh) variasi rasio gap ( $G/D$ ). Melalui Gambar 4.73 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) juga mempengaruhi harga koefisien base pressure ( $C_{pb}$ ), dimana pada rasio  $G/D$  terbesar harga dari  $C_{pb}$  terendah, dan mulai bertambah ketika rasio tersebut mengecil. Penurunan harga  $C_{pb}$  yang cepat terjadi ketika rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$ , setelah itu pada  $G/D=1,0$  penurunannya relatif kecil atau kurang berarti. Hal ini dikarenakan pada batasan rasio gap yang pertama momentum aliran di celah kedua silinder upstream bertambah dampak dari efek blockage yang ditimbulkan dari adanya dinding yang diletakkan dekat susunan silinder lower. Perubahan harga  $C_{pb}$  ini terkait dengan perubahan titik separasi dari silinder dan perubahan ukuran wake dibelakang silinder. Dengan demikian besaran dari koefisien base pressure ini berkaitan secara langsung dengan besaran koefisien drag ( $C_D$ ) dari silinder, dimana apabila besaran  $C_{pb}$  bertambah kecil maka besaran  $C_D$  silinder akan bertambah besar, ataupun sebaliknya besaran  $C_{pb}$  bertambah besar maka besaran  $C_D$  akan bertambah kecil.



Gambar 4.74. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$  (Eksperimen)

Gambar 4.74 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-4** antara susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di center-line. Melalui Gambar 4.74 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) berpengaruh terhadap distribusi tekanan yang terjadi pada silinder. Pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , distribusi tekanan kontur silinder-4 menunjukkan adanya satu tekanan maksimal, dimana ini mengindikasikan terjadinya reattachment dari inner shear layer silinder-3 pada kontur silinder-4. Pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  posisi reattachment terjadi pada lower-side ( $\theta=350^\circ$ ) kontur, sementara pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$  dan  $G/D=1,0$  distribusi tekanan pada kontur silinder-4 menyerupai distribusi tekanan pada kontur silinder tunggal, tetapi tidak simetri. Artinya fenomena stagnasi dan separasi aliran terjadi pada silinder ini. Titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada rasio tersebut masing-masing pada  $345^\circ$ ,  $350^\circ$ , dan  $355^\circ$ . Hal ini menunjukkan free shear layer dari silinder-3 roll-up pada bagian depan dari silinder-4. Sementara pada susunan empat silinder di center-line, distribusi tekanan pada kontur silinder-4 merupakan kebalikan dari kontur silinder-2.

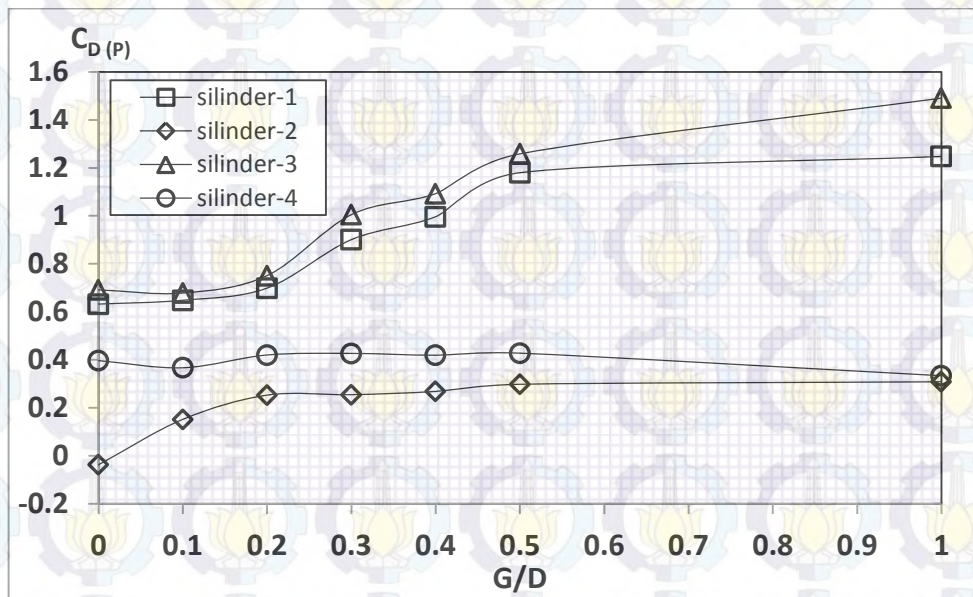


Gambar 4.75. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=4$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$  (Eksperimen)

Gambar 4.75 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **dinding** antara susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ). Pengukuran distribusi koefisien tekanan kontur dinding ini dilakukan sepanjang  $-8,75 \leq x/D \leq 9,6$ , dimana  $x/D=0,0$  adalah posisi peletakan center-line dari silinder upstream. Melalui Gambar 4.75 terlihat bahwa keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** menyebabkan efek blockage pada aliran fluida yang akan melalui celah antar lower-side silinder dan dinding pada semua rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , bahkan pada rasio  $G/D=0,0$  distribusi tekanan terputus karena silinder menyentuh dinding. Hal ini ditunjukkan dari distribusi tekanan yang positif pada upstream silinder ( $x/D < 0$ ) dan distribusi tekanan yang negatif pada downstream silinder ( $x/D > 0$ ). Posisi dan besaran tekanan yang positif ini berpindah kedepan dan mengecil ketika rasio gap ( $G/D$ ) ini meningkat. Sedangkan posisi dan besaran tekanan yang negatif dengan bertambahnya rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  membuat posisinya berpindah kebelakang dan besaran mengecil. Sementara pada rasio  $G/D=1,0$ , posisi dan besarannya terletak antara rasio  $G/D$  0,2 dan 0,3. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada semua rasio gap  $G/D$ , keberadaan silinder lower mempengaruhi aliran fluida yang melalui celah.

Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang negatif ini recover menjadi static pressure. Posisi terjadinya perubahan tekanan negatif menjadi pressure static, yang ditandai dengan tidak berubahnya besaran tekanan tersebut, menunjukkan posisi reattachment dari aliran pada dinding. Jadi terbentuknya recirculation region pada downstream silinder juga terjadi ketika silinder didekatkan pada dinding. Ini akan membuat aliran yang terdefleksi setelah melewati celah akan reattachment pada dinding. Melalui Gambar 4.75 terlihat juga bahwa rasio  $G/D$  juga berpengaruh terhadap posisi perubahan static pressure. Secara umum, pada batasan rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , bertambahnya rasio  $G/D$  membuat posisi perubahan menjadi static pressure menjadi semakin awal. Khususnya pada pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 1,0$  perbedaan posisi perubahan menjadi static pressure relatif kecil, atau dapat dikatakan lambat yaitu sekitar  $x/D \geq 5,3$ , berarti recirculation region yang terbentuk pada downstream silinder relatif kecil dan membuat aliran lebih cepat reattachment pada dinding. Sedangkan pada rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , perubahan posisi menjadi pressure static lebih cepat.

**b. Perbandingan koefisien drag rata-rata ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift rata-rata ( $C_{Lp}$ ) pada variasi rasio gap ( $G/D$ )**

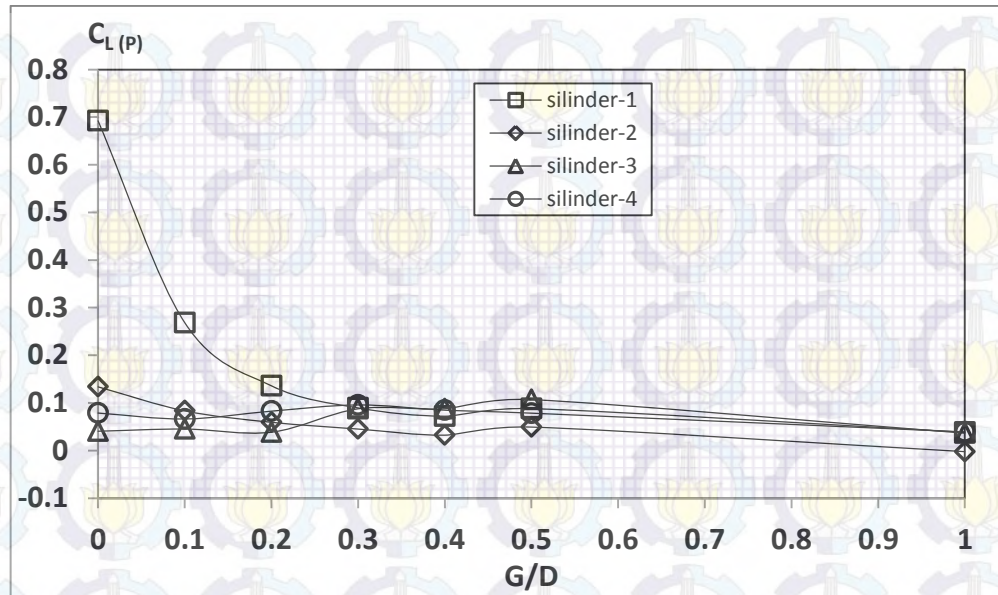


Gambar 4.76. Variasi  $C_{Dp}$  terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D= 4,0$  Dekat Dinding pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.76 menunjukkan pengaruh rasio gap ( $G/D$ ) terhadap koefisien pressure drag ( $C_{Dp}$ ) dari setiap silinder. Melalui Gambar 4.76 terlihat bahwa peningkatan rasio gap ( $G/D$ ) menyebabkan kenaikan dari besaran koefisien pressure drag ( $C_{Dp}$ ), terutama pada rasio gap  $0 \leq G/D \leq 0,5$ . Setelah itu pada rasio gap  $G/D = 1,0$ , besaran  $C_{Dp}$  relatif tetap dibandingkan dengan rasio  $G/D$  sebelumnya. Hal ini dikarenakan pada batasan rasio yang pertama, silinder-1 dan silinder-2 yang masing-masing berada di posisi silinder lower dalam susunan empat silinder sirkular terendam dalam lapis batas. Hasil ini sesuai dengan penelitian Zdravkovich (1985) yang mendapatkan bahwa perubahan besaran koefisien drag lebih ditentukan oleh posisi silinder dalam lapis batas yang dibentuk oleh dinding. Untuk silinder yang terendam dalam lapis batas dinding ( $\delta$ ), besaran koefisien drag akan mengalami kenaikan yang relatif tajam. Setelah rasio  $G/D > G/\delta$ , besaran koefisien pressure drag ini relatif tetap, artinya tidak terjadi perubahan yang berarti pada koefisien tersebut.

Sedangkan pada silinder-3, besaran  $C_{Dp}$  juga dipengaruhi oleh bertambahnya rasio gap  $G/D$  ini. Pada rasio gap  $0 \leq G/D \leq 0,5$ , terjadi peningkatan yang tajam pada koefisien ini, dan ketika pada posisi rasio gap  $G/D > \delta$ , kenaikan besaran ini relatif lebih tinggi dibanding pada silinder-1. Hal ini sesuai dengan pendapat Zdravkovich (1987), bahwa susunan dua silinder sirkular side-by-side pada  $T/D = 4,0$  dan susunan dua silinder sirkular tandem pada  $L/D = 4,0$  sudah tidak terjadi interferensi antara silinder lower terhadap silinder upper. Sementara besaran  $C_{Dp}$  pada silinder-4 relatif sama, perubahannya relatif kecil, ketika rasio gap  $G/D$  berubah.

Selanjutnya besaran koefisien pressure drag antara silinder upstream, silinder-1 dan silinder-3, rata-rata lebih besar dibanding silinder downstream, silinder-2 dan silinder-4, pada semua rasio gap  $G/D$  menunjukkan bahwa pada rasio  $L/D = 4,0$  silinder downstream terbenam pada daerah wake dari silinder upstream, dan vortices shed yang terbentuk pada daerah wake silinder upstream menabrak atau *impinge* pada silinder downstream. Hasil yang serupa juga diperoleh oleh Igarashi (1981) yang meneliti susunan 2 silinder sirkular secara tandem dan Lam, et al. (2003b) yang meneliti tentang aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular di center-line.



Gambar 4.77. Variasi  $C_{Lp}$  terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D=4,0$  Dekat Dinding pada  $Re=5,3 \times 10^4$

Gambar 4.77 menunjukkan pengaruh variasi rasio gap ( $G/D$ ) terhadap koefisien pressure lift ( $C_{Lp}$ ) setiap silinder. Melalui Gambar 4.77 terlihat bahwa perubahan rasio gap  $G/D$  berpengaruh terhadap besaran koefisien pressure lift ( $C_{Lp}$ ), dimana dengan bertambahnya rasio  $G/D$  besaran  $C_{Lp}$  mengalami penurunan. Penurunan  $C_{Lp}$  yang relatif besar berlangsung pada silinder-1 ketika rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$ , tetapi ketika rasio  $G/D > 0,5$  maka penurunannya  $C_{Lp}$  relatif kecil, atau tidak terjadi perubahan. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan meningkatnya rasio gap maka distribusi tekanan dikontur upper-side dan lower-side silinder akan berubah menjadi lebih simetri, sehingga gaya lift yang timbul pada silinder tersebut semakin kecil. Hasil ini sama seperti yang didapatkan oleh Zdravkovich (1985), bahwa kenaikan yang tajam pada koefisien ini terjadi ketika rasio gap  $G/D < 0,55$  atau pada saat silinder terendam dalam lapis batas dinding. Sedangkan besaran  $C_{Lp}$  silinder-2, pada tujuh variasi rasio  $G/D$  penurunan harganya relatif lebih kecil dibanding silinder-1, dan pada rasio  $G/D=0,0$  harganya jauh lebih kecil. Sementara silinder-3, dan silinder-4 pada tujuh variasi  $G/D$  harga  $C_{Lp}$  relatif tetap, artinya perubahan besaran  $C_{Lp}$  kecil sekali.

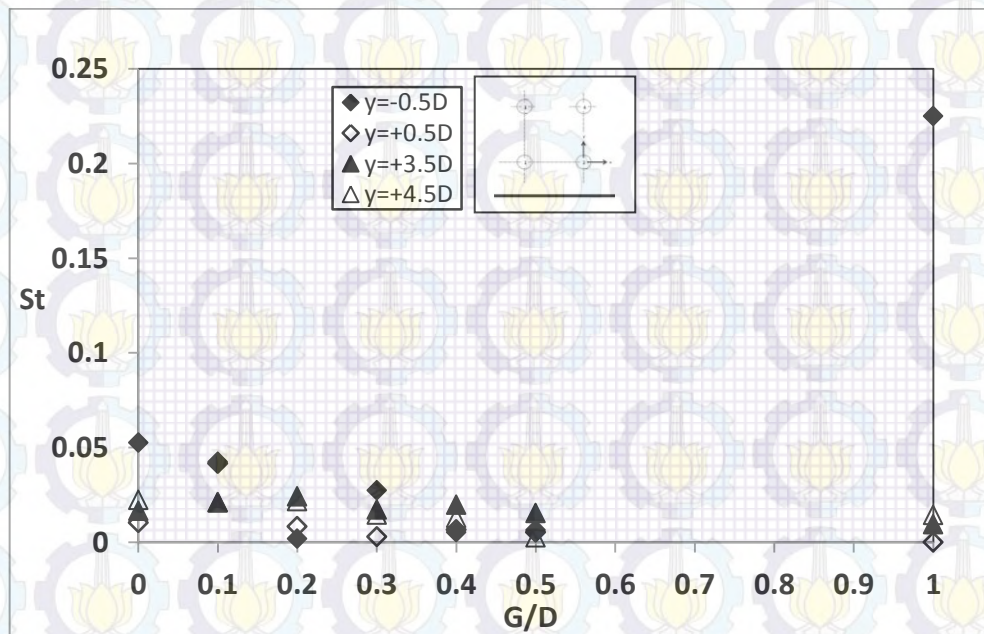
Sedangkan harga  $C_{Lp}$  pada seluruh variasi rasio gap  $G/D$  antara silinder downstream, khususnya silinder-4, lebih besar dibanding dengan silinder



upstream, silinder-3. Hasil yang sama juga diperoleh oleh Lam et al. (2003b), bahwa pada rasio  $L/D$  yang besar ( $L/D > 4,0$ ) harga  $C_{Lp}$  silinder downstream lebih besar dari silinder upstream, karena silinder downstream terbenam pada daerah wake silinder upstream dan vortices shed yang terbentuk di daerah wake silinder upstream mengenai atau *impinge* pada silinder downstream. Tetapi harga  $C_{Lp}$  antara silinder downstream, khususnya silinder-2, lebih kecil dibanding dengan silinder upstream, silinder-1. Hasil yang serupa diperoleh oleh Harichandan dan Roy (2012), melalui metode numerik untuk susunan dua silinder secara tandem dekat dinding, bahwa harga koefisien lift untuk silinder downstream lebih kecil dari silinder upstream, karena efek tegangan geser dinding diterima oleh silinder upstream.

### c. Perbandingan bilangan Strouhal ( $St$ ) pada variasi rasio gap ( $G/D$ )

Pengukuran bilangan Strouhal dilakukan untuk memberi gambaran tentang frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake dari silinder downstream silinder-2 dan silinder-4, ketika susunan empat silinder ditempatkan secara bervariasi jaraknya terhadap dinding.



Gambar 4.78. Variasi  $St$  terhadap Rasio Gap  $G/D$  dari Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D = 4,0$  Dekat Dinding pada Posisi Pengukuran  $x = 3,5D$ ; dan 4 (empat) Variasi  $y$ , dengan  $Re = 5,3 \times 10^4$

Posisi penempatan alat ukur pada jarak  $x = 3,5D$  dan  $y = -0,5D$ ,  $y = +0,5D$ ,  $y = +3,5D$  dan  $y = +4,5D$ , dimana  $x, y$  adalah sumbu koordinat titik pusat silinder-2. Penempatan alat ukur sejauh  $3,5 D$  dari titik pusat silinder downstream silinder-2 arah horisontal (sumbu  $x$ ) sama seperti yang dilakukan Sakamoto (1990), sementara arah vertikal (sumbu  $y$ ) pada sisi upper dan sisi lower silinder ini sama seperti yang dilakukan Choi dan Lee (2000).

Gambar 4.78 menunjukkan pengaruh variasi rasio gap ( $G/D$ ) terhadap bilangan Strouhal di daerah wake silinder downstream, silinder-2 dan silinder-4. Melalui Gambar 4.78 terlihat bahwa bilangan Strouhal pada sisi upper dan sisi lower silinder-2 menunjukkan hasil yang tidak identik, dimana pada sisi lower terlihat dengan bertambahnya rasio  $G/D$  terjadi penurunan bilangan Strouhal, yaitu pada  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  dan mengalami kenaikan pada  $G/D = 0,3$  setelah itu cenderung konstan pada  $0,3 < G/D \leq 0,5$ , dan bilangan Strouhal ini mencapai maksimum ketika  $G/D = 1,0$ . Sedangkan pengukuran pada sisi upper terlihat dengan bertambahnya rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,1$  terjadi kenaikan pada bilangan Strouhal, setelah itu menurun pada rasio gap  $0,1 < G/D \leq 0,3$ , dan cenderung konstan ketika rasio gap  $0,3 < G/D \leq 1,0$ . Terjadinya perbedaan nilai yang cukup tinggi diantara kedua posisi pengukuran, terutama pada rasio gap  $G/D = 0,0$ , kemungkinan dikarenakan oleh kesulitan menempatkan hot-wire pada posisi tersebut. Dapat disimpulkan pada batasan rasio  $G/D$  yang kecil  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , bertambahnya rasio membuat frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-2 meningkat, sedangkan pada rasio  $0,3 < G/D \leq 0,5$  frekuensi vortex shedding cenderung tetap, dan pada rasio yang besar  $G/D = 1,0$  frekuensi vortex sheddingnya juga besar.

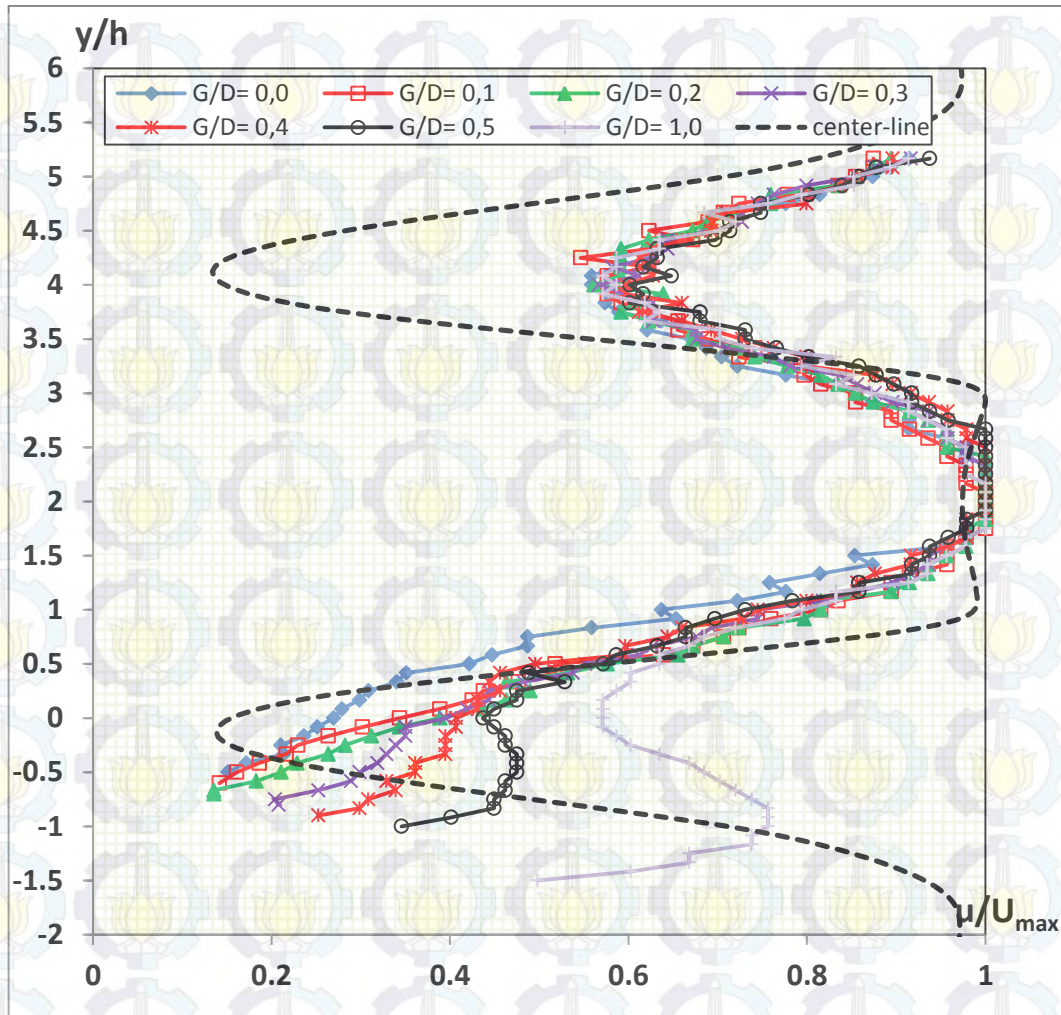
Sementara pengukuran pada sisi upper dan sisi lower silinder-4 ( $y = +3,5D$  dan  $y = +4,5D$ ) menunjukkan hasil yang cenderung lebih identik, artinya frekuensi vortex yang terjadi di daerah wake antara sisi upper dan sisi lower silinder-4 relatif sama pada semua variasi rasio  $G/D$ . Jika diamati pada Gambar 4.78 frekuensi vortex yang terjadi di daerah wake silinder-4, menunjukkan dengan bertambahnya rasio  $G/D$  bilangan Strouhal cenderung menurun. Ini berarti kenaikan rasio gap  $G/D$  mempengaruhi frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-4. Hasil yang serupa juga diperoleh oleh Angrili dan

Bergamaschi (1982) yang mengukur pada bilangan Reynolds dibawah subcritical dan tebal lapis batas dinding ( $\delta$ )= 0,25 diameter silinder, menunjukkan bahwa frekuensi vortex shedding meningkat ketika rasio gap diturunkan, atau silinder semakin didekatkan ke dinding. Sementara Bearman dan Zdravkovich (1978) pada tebal lapis batas dinding ( $\delta$ )= 0,8 diameter silinder mendapatkan dibawah rasio gap kritis ( $G/D= 0,3$ ) vortex shedding tertahan, sedangkan diatas rasio tersebut bilangan Strouhal cenderung konstan.

Variasi perbedaan maksimum bilangan Strouhal terkait dengan bertambahnya rasio gap, di daerah wake silinder-2 masing-masing ( $y= \pm 0,5D$ ) adalah: 114.1% dan 298%, khususnya pada rasio  $G/D= 1,0$ . Sedangkan pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$  variasi perbedaan maksimum adalah 13,1% dan 1,7%. Ini menunjukkan bahwa frekuensi vortex shedding di daerah wake silinder-2 sangat besar dipengaruhi oleh dinding, terutama pada rasio gap  $G/D= 1,0$ . Sementara di daerah wake silinder-4 masing-masing ( $y= +3,5D$  dan  $y= +4,5D$ ) untuk semua variasi rasio  $G/D$  adalah: 1.5% dan 7.5%. Ini menunjukkan bahwa frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-4 relatif tidak dipengaruhi oleh perubahan jarak terhadap dinding atau rasio  $G/D$ . Variasi perbedaan ini relatif mendekati hasil yang diperoleh oleh Choi dan Lee (2000) sebesar 6% dan Bearman dan Zdravkovich (1978) sebesar 5%.

#### **d. Perbandingan profil kecepatan ( $u/U_{max}$ ) di daerah wake pada variasi rasio gap ( $G/D$ )**

Gambar 4.79 menunjukkan profil kecepatan di daerah wake silinder downstream dari susunan empat silinder dekat dinding dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di center-line. Pengukuran dilakukan di daerah wake silinder downstream dengan arah horisontal (sumbu  $x$ ) dari titik pusat silinder  $x= 3,5D$ , dan arah vertikal (sumbu  $y$ ) sepanjang ketinggian mulai dari permukaan plat datar sampai  $y= 7,0D$ . Titik O (0,0) adalah posisi penempatan titik pusat silinder downstream silinder-2 untuk semua rasio  $G/D$ .



Gambar 4.79. Variasi Profil Kecepatan terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular In-Line Square  $L/D= 4,0$  Dekat Dinding pada  $Re= 5,3 \times 10^4$  pada Posisi Pengukuran  $x= 3.5D$  (Eksperimen)

Melalui Gambar 4.79 terlihat profil kecepatan yang tidak simetri, karena dengan adanya dinding yang ditempatkan dekat silinder lower membuat nilai kecepatan minimum di daerah wake silinder downstream menjadi berbeda, dimana mempengaruhi profil kecepatan di daerah wake dari silinder downstream silinder-2, tetapi tidak mempengaruhi profil kecepatan di daerah wake dari silinder downstream silinder-4.

Di daerah wake silinder-2, pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  nilai kecepatan minimumnya terendah dan relatif sama. Selanjutnya dengan bertambah besar rasio  $G/D$  nilai kecepatan minimumnya mulai meningkat, dan pada rasio  $G/D= 1,0$  nilai kecepatan minimum pada daerah wake silinder downstream silinder-2 dan silinder

downstream silinder-4 relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa pada rasio gap kecil keberadaan silinder lower menghalangi aliran yang melalui celah antara silinder dengan dinding, dan mulai berkurang pada rasio gap menengah, dan akhirnya bebas pada rasio gap yang besar. Ditinjau dari profil kecepatan aliran di lower-side silinder-2 dekat dinding menunjukkan nilai yang sama pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , selanjutnya mulai meningkat pada rasio gap yang bertambah besar, dan mencapai maksimal pada rasio  $G/D = 1,0$ . Ini berarti pada rasio gap yang kecil, momentum aliran yang melalui celah rendah dan belum dapat mengatasi shear stress dinding, sementara pada rasio  $G/D \geq 0,3$  momentum aliran tersebut mulai meningkat sehingga dapat mengatasi shear stress dari dinding. Sedangkan profil kecepatan di upper-side silinder-2 menunjukkan nilai yang relatif sama untuk semua variasi rasio  $G/D$ .

Sementara profil kecepatan di daerah wake silinder downstream silinder-4 relatif sama pada semua variasi rasio  $G/D$ . Ditinjau dari profil kecepatan di lower-side dan upper-side silinder-4 untuk semua variasi rasio  $G/D$  tidak berbeda. Ini berarti keberadaan dinding yang ditempatkan dekat silinder lower tidak mempengaruhi kecepatan aliran di daerah wake silinder-4.

Melalui Gambar 4.79 juga terlihat profil kecepatan dari susunan empat silinder di center-line yang pengamatannya dilakukan pada posisi yang sama,  $x = 3,5 D$ . Tampak profil kecepatan di daerah wake silinder downstream silinder-2 dan silinder-4 untuk susunan ini simetri. Jika dibandingkan dengan profil kecepatan dari susunan empat silinder dekat dinding menunjukkan hasil yang berbeda, terutama pada profil kecepatan silinder-2, yang dengan adanya dinding akan menurunkan kecepatan aliran di lower-side silinder. Selain itu efek blockage yang ditimbulkan dari keberadaan dinding di dekat silinder lower, menyebabkan sebagian besar fluida defleksi ke upper-side silinder, dan ini menambah momentum aliran pada celah silinder lower dan silinder upper. Hal ini ditunjukkan dari nilai kecepatan di daerah wake silinder-4 yang lebih besar pada semua rasio  $G/D$  dibanding silinder-4 dari susunan di center-line, terutama pada lower-side silinder.

### 4.3. Data dan Pembahasan Karakteristik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square ( $L/D= 2,7$ )

Rasio spasi ini dipilih untuk mengkaji karakteristik aliran yang melintasi susunan empat silinder dekat dinding, setelah rasio spasi  $L/D= 4,0$  disampaikan pada sub sebelumnya. Hal ini dilakukan karena berdasarkan penelitian Lam dan Fang (1995) untuk susunan empat silinder di *center-line* dengan rasio spasi ini, terjadi perubahan yang besar pada koefisien tekanan dan karakteristik *drag* dan *lift* pada *downstream cylinder*.

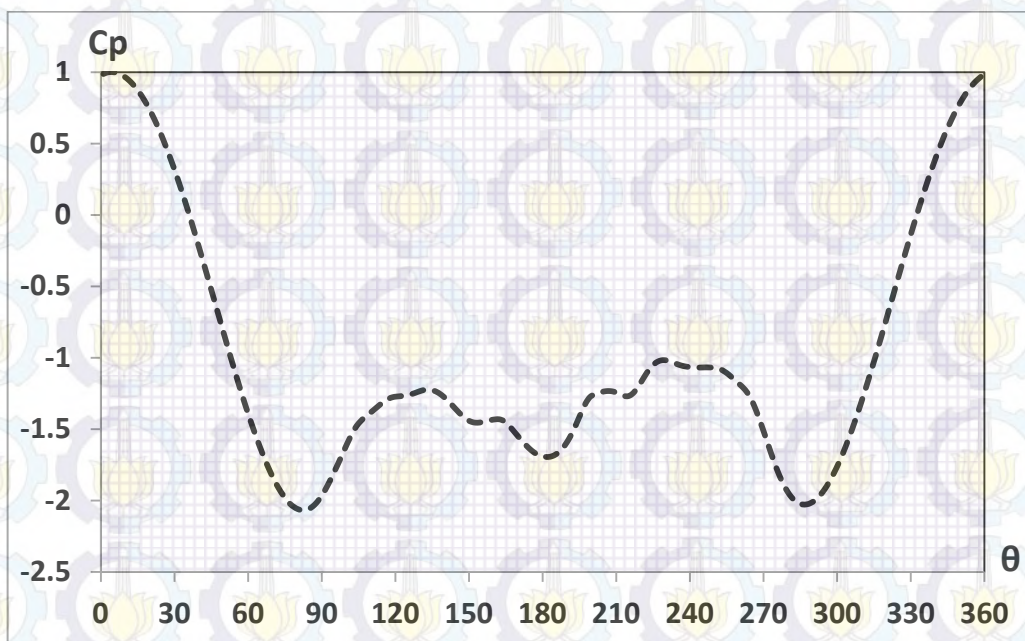
Perubahan parameter di atas dikarenakan terjadinya perubahan pola aliran yang terjadi disekeliling susunan silinder. Dari pola aliran *free oscillations of shear layer* dimana susunan 4 silinder *in line* ( $\alpha= 0^0$ ) dengan  $L/D \geq 4,0$  menyerupai dengan pola aliran pada susunan 2 silinder secara tandem. Silinder *downstream* terbenam oleh *wake* dari silinder *upstream* dan dilanggar oleh *vortices*, sehingga *vortex* yang terbentuk jauh lebih pendek, dan dua *vortices* turbulen akan terbentuk dibagian belakang silinder. Akibatnya gaya drag yang terjadi pada silinder *upstream* lebih besar dari pada silinder *downstream*, tetapi disisi lain gaya fluktuasi yang terjadi pada silinder *downstream* lebih besar dari pada silinder *upstream* silinder.

Apabila rasio  $L/D$  diperkecil  $2,1 < L/D < 3,0$ , maka pola aliran disekitar susunan 4 silinder *in line* ini akan menyerupai pola aliran susunan 2 silinder secara *side by side*, dimana *free shear layer* dari silinder *upstream* akan menyentuh atau *reattach* pada silinder *downstream*, sehingga *wake vortices* hanya terbentuk dibelakang silinder *downstream*. Fenomena ini akan membuat nilai gaya fluktuasi pada silinder *upstream* dan *downstream* menjadi turun, sementara frekuensi *vortex shedding* dari silinder *upstream* mendekati nol. Pola aliran ini disebut sebagai *reattachment of shear layer or shielding flow*.

#### 1. Center-line

Berikut ini akan disajikan data tentang distribusi tekanan dari kontur setiap silinder pada susunan empat silinder *in-line equispaced* dengan rasio spasi  $L/D= 2,7$  di *center-line*, hasil perhitungan koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) berdasarkan distribusi tekanan, dan visualisasi aliran berupa *vorticity contour*,

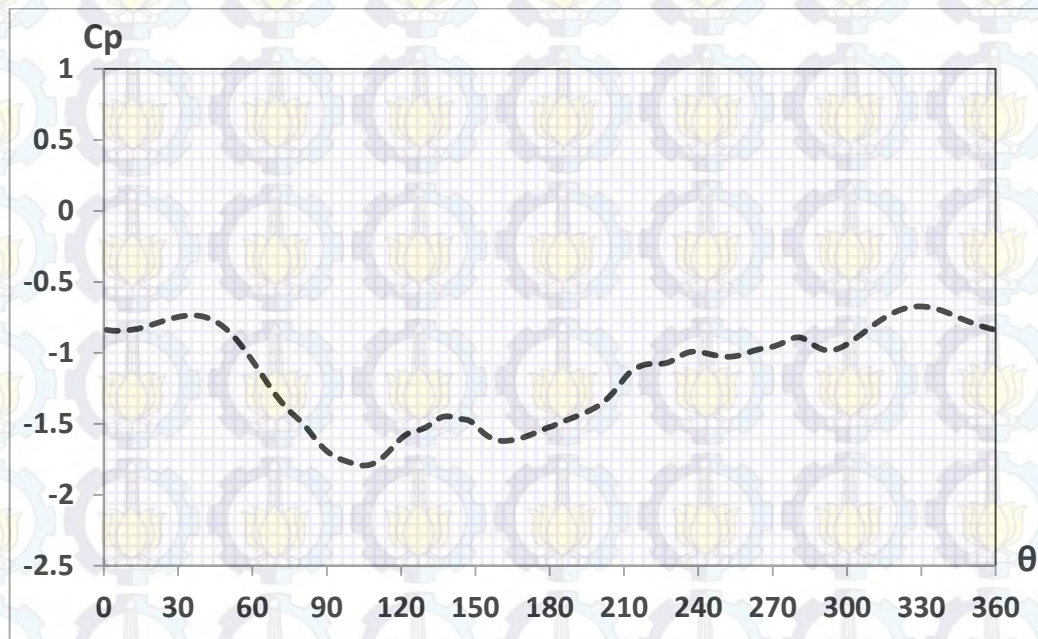
velocity pathline, dan profil kecepatan *upstream* ( $x/D = -1,0$ ) silinder *upstream*, diantara susunan silinder ( $x/D = 1,35$ ) dan daerah wake silinder *downstream* ( $x/D = 6,2$ ) yang keseluruhannya diperoleh melalui metode simulasi numerik. Koordinat di atas,  $x/D = 0,0$  adalah titik pusat silinder *upstream*, tetapi apabila diukur dari titik pusat silinder *downstream*,  $x/D = 6,2$  sama dengan  $x/D = 3,5$ . Data-data ini disampaikan untuk mengetahui karakteristik aliran pada susunan empat silinder dengan rasio spasi  $L/D = 2,7$  di *center-line*.



Gambar 4.80. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 2,7$  di *Centerline* pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.80 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D = 2,7$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.80 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada *upperside* dan *lowerside* silinder relatif tidak simetri, dimana pada *upperside* karena membentuk gap dengan *lowerside* silinder-3 sehingga aliran mengalami percepatan dibanding dengan pada *lowerside*. Hal ini ditunjukkan dari perbedaan posisi tekanan minimum, dimana pada *upperside* silinder terjadi pada  $\theta = 82^\circ$  sedangkan pada *lowerside* silinder terjadi pada  $\theta = 286^\circ$ . Kondisi ini juga

membuat titik stagnasi silinder-1 bergerak ke *inner-side* silinder,  $\theta_s = 4^\circ$  dari *front-side*. Percepatan aliran pada *upper-side* silinder juga menyebabkan mundurnya posisi titik separasi  $\theta_{Sp} = 119^\circ$ , dan pada *lower-side* silinder yang posisi titik separasinya terjadi pada  $\theta_{Sp} = 249^\circ$ . Dengan menggunakan data distribusi tekanan ini, dihitung harga koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) pada silinder-1 dan diperoleh 1,16, sementara harga koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,02.

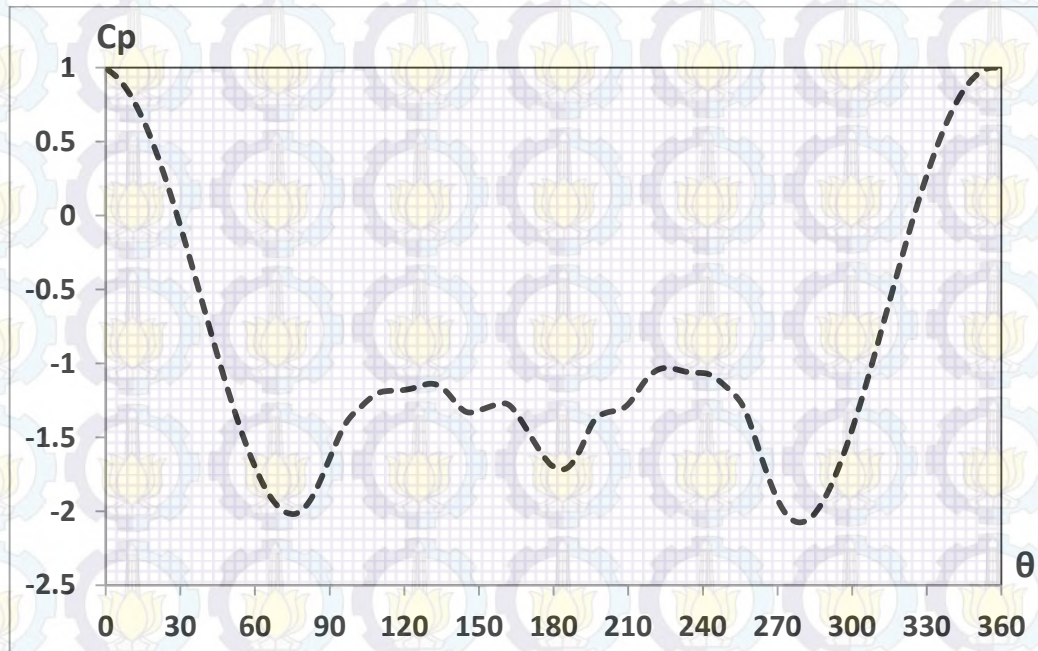


Gambar 4.81. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-2* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 2,7$  di *Centerline* pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.81 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D = 2,7$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.81 dapat diketahui bahwa distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder ini memiliki harga yang negatif, baik pada *upper-side* dan *lower-side* silinder, sementara pada *rear-side* silinder terjadi kenaikan tekanan yang menunjukkan terjadinya fenomena separasi pada daerah wake. Harga  $C_p$  negatif menunjukkan bahwa kontur silinder-2 terutama pada *front-side* silinder ini terkena atau *impinge* dari vortex yang terbentuk pada



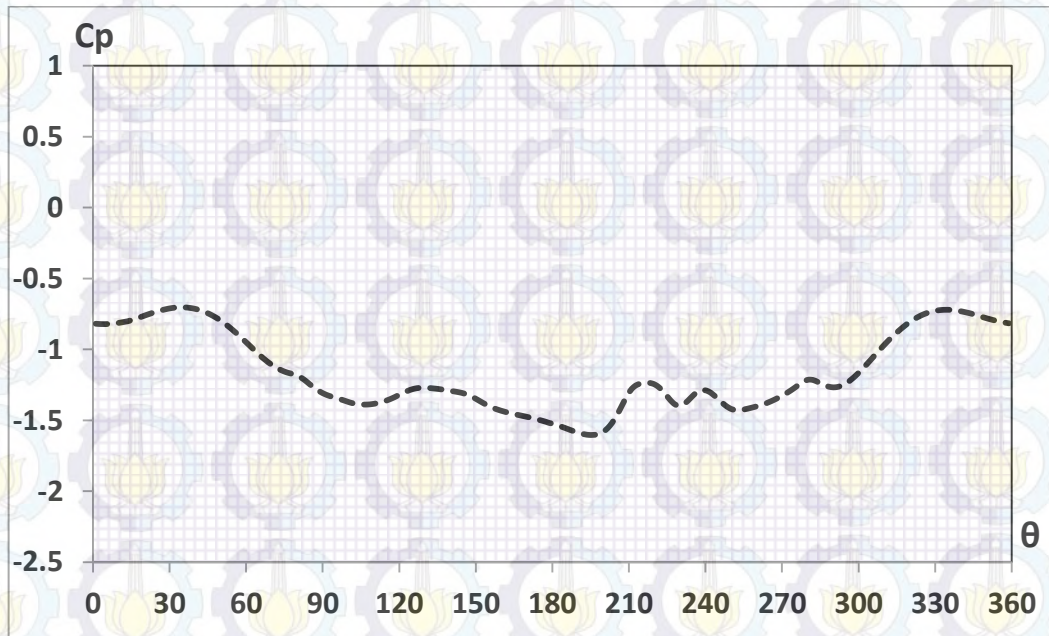
silinder *upstream*. Hal ini juga ditunjukkan dari nilai koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) silinder-2 adalah 0,59, sementara nilai koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,41.



Gambar 4.82. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  di *Centerline* pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

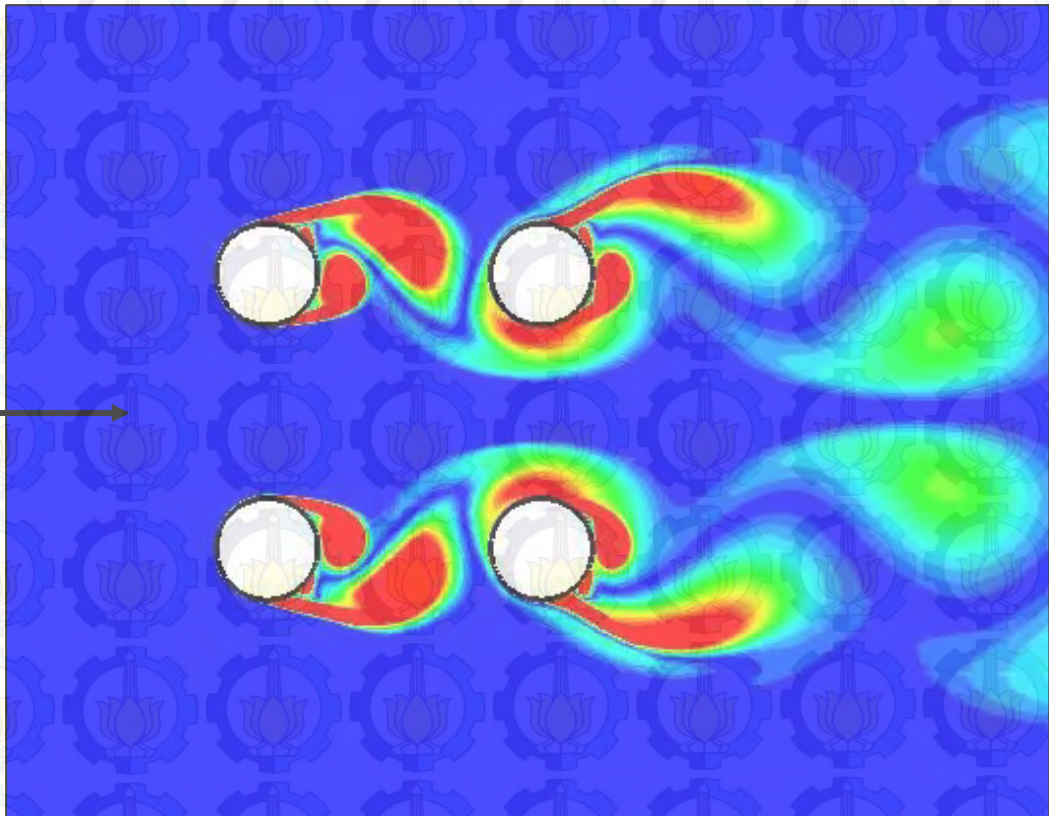
Gambar 4.82 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D= 2,7$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.82 dapat diketahui bahwa distribusi tekanan pada *upperside* dan *lowerside* silinder relatif tidak simetri, dimana pada *lowerside* karena membentuk gap dengan *upperside* silinder-1 sehingga aliran mengalami percepatan dibanding dengan pada *upperside*. Hal ini ditunjukkan dari perbedaan posisi tekanan minimum, dimana pada *upperside* silinder terjadi pada  $\theta= 76^\circ$  sedangkan pada *lowerside* silinder terjadi pada  $\theta= 278^\circ$ . Kondisi ini juga membuat titik stagnasi silinder-3 bergerak ke *inner-side* silinder,  $\theta_s= 356^\circ$  dari *front-side*. Percepatan aliran pada *lowerside* silinder juga menyebabkan mundurnya posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 244^\circ$ , dan pada *upperside* silinder yang posisi titik separasinya terjadi pada  $\theta_{sp}= 113^\circ$ . Dengan menggunakan data distribusi

tekanan ini, dihitung harga koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) pada silinder-3 dan diperoleh 1,13, sementara harga koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,08.



Gambar 4.83. Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  di *Centerline* pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Simulasi Numerik 3D-URANS

Gambar 4.83 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan 4 silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D= 2,7$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.83 dapat diketahui bahwa distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder ini memiliki harga yang negatif, baik pada *upperside* dan *lowerside* silinder, sementara pada *rear-side* silinder terjadi kenaikan tekanan yang menunjukkan terjadinya fenomena separasi pada daerah wake. Harga  $C_p$  negatif menunjukkan bahwa kontur silinder-4 terutama pada *front-side* silinder ini terkena atau *impinge* dari vortex yang terbentuk pada silinder *upstream*. Hal ini juga ditunjukkan dari nilai koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) silinder-4 adalah 0,58, sementara nilai koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,064.

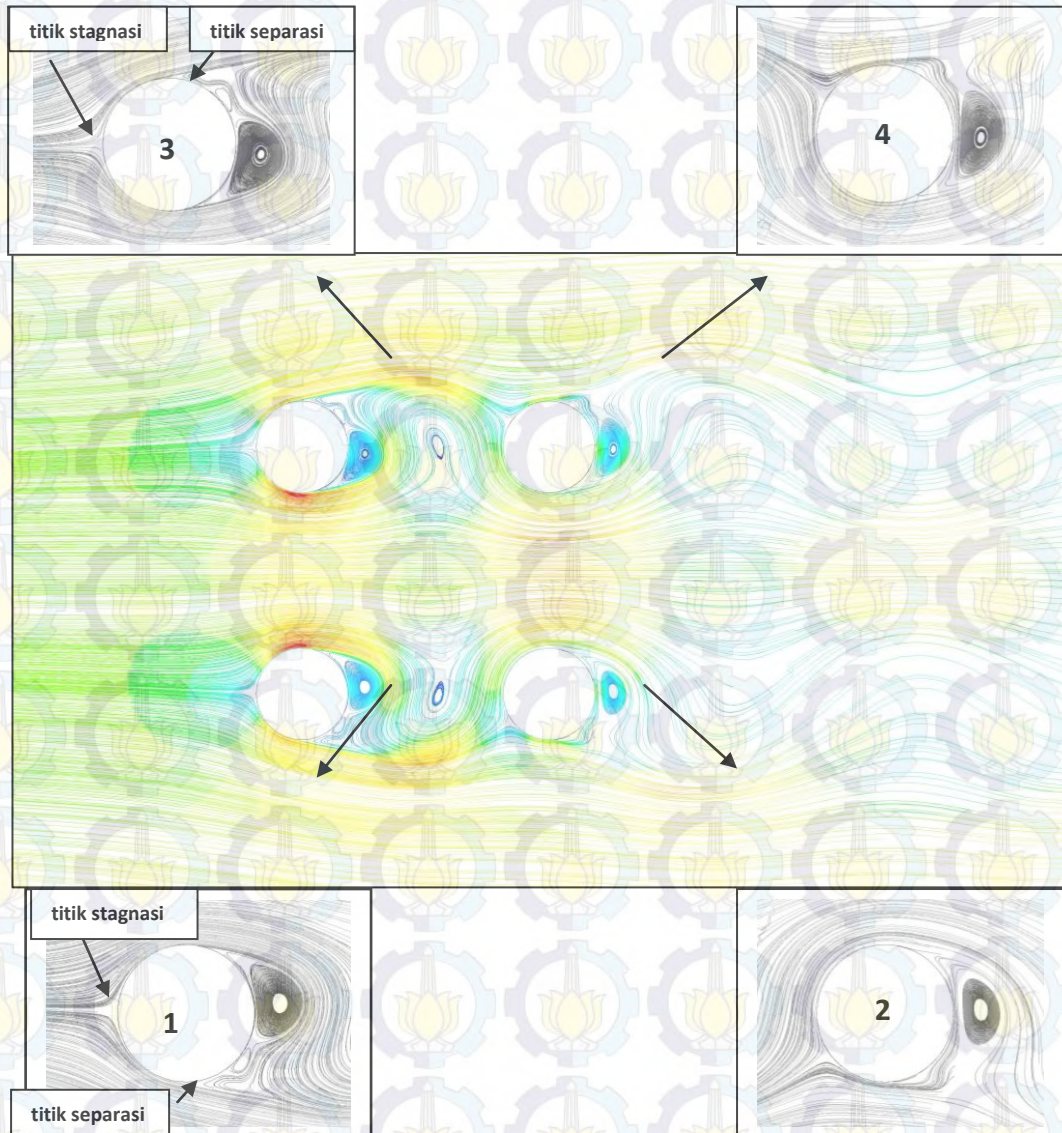


Gambar 4.84. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  di *Centerline*

Gambar 4.84 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  di *center-line*. Melalui Gambar 4.84 terlihat bahwa silinder *downstream* terbenam pada wake dari silinder *upstream*. *Free shear layer* dari silinder *upstream* membentuk *vortices shed* di daerah wake, dan “mengenai” atau *impinge* pada silinder *downstream*, juga pada daerah wake dari silinder *downstream* terbentuk *vortices shed*. Dengan demikian pola aliran yang terbentuk pada susunan ini adalah *vortex shedding flow pattern*.

Selain itu *vortices shed* yang terjadi di daerah wake silinder *upstream* dan silinder *downstream* terdefleksi dari *stream wise*. Dari gambar tersebut juga terlihat bahwa *vortices shed* yang terbentuk pada silinder *upstream* lebih besar dari silinder *downstream*, dan *vortices shed* yang terbentuk pada silinder-silinder *lower* anti-phase dengan silinder-silinder *upper*. Sehingga susunan silinder pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  di *center-line* rejim interferensi alirannya masuk dalam kategori campuran antara *proximity* dan *wake interference* (Zdravkovich, 1987), karena

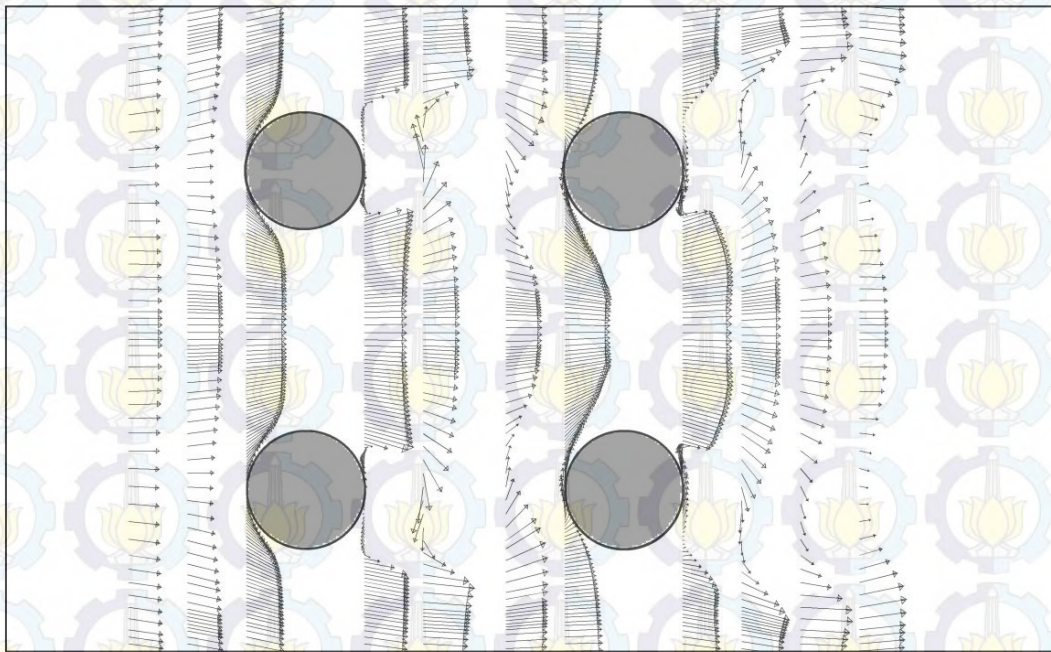
pada rasio spasi ini terjadi interaksi aliran antara silinder lower dan silinder upper dari silinder *upstream*, artinya aliran gap disekitar silinder lower silinder-1 masih dipengaruhi oleh keberadaan silinder upper silinder-3 ataupun sebaliknya. Dan pada rasio spasi ini juga perilaku aliran silinder *upstream* dipengaruhi oleh silinder *downstream*, maupun sebaliknya.



Gambar 4.85. Visualisasi *Velocity Pathline* pada Rasio  $L/D= 2,7$  di *Centerline*

Gambar 4.85 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  di *center-line*. Dari Gambar 4.85 dapat dilihat posisi titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada silinder *upstream* silinder-1 dan silinder-3, dan titik

separasi ( $\theta_{Sp}$ ) yang terjadi pada kedua silinder tersebut. Melalui visualisasi ini juga terlihat adanya perbedaan akselerasi aliran yang terjadi pada *upper-side* dan *lower-side* silinder *upstream* silinder-1 dan silinder-3. Momentum aliran yang lebih besar pada celah antara silinder-1 dan silinder-3 menyebabkan titik stagnasi bergerak menuju ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder, dan tekanan minimum dan separasi pada sisi celah dari silinder *upstream* menjadi tertunda.



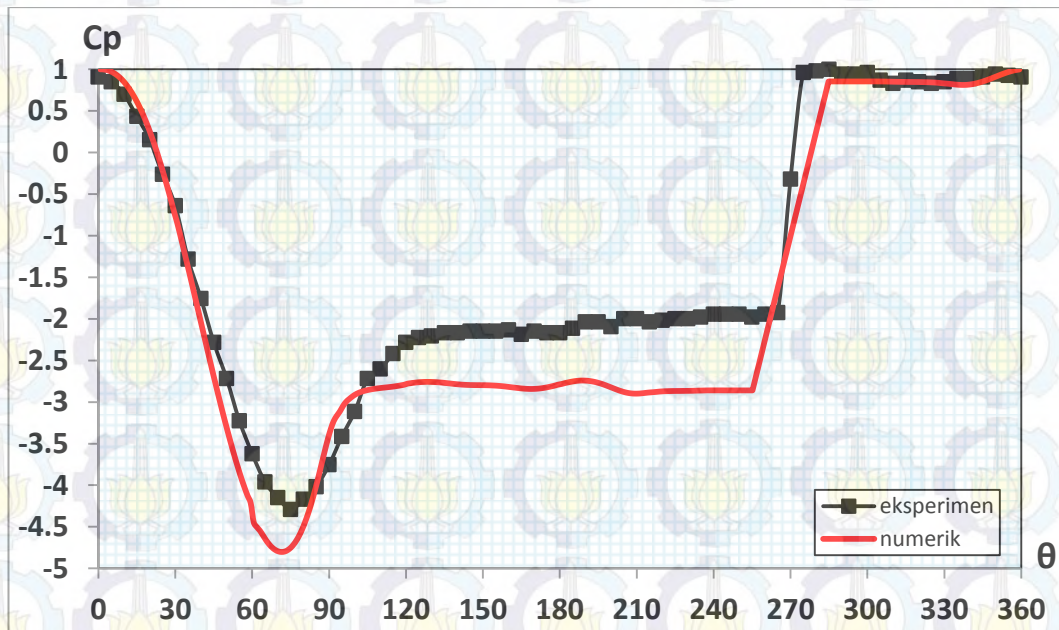
Gambar 4.86. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square*  $L/D=2,7$  di *Centerline*

Gambar 4.86 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* pada susunan 4 silinder *in-line square*  $L/D=2,7$  di *center-line*, di posisi  $x/D=-0,5 \div -1,5$ ,  $x/D=0,5 \div 2,2$  dan  $x/D=3,2 \div 4,7$ , dimana  $x/D=0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.86 terlihat bahwa aliran free stream yang akan melintasi susunan silinder *upstream* (silinder-1 dan silinder-3) sejajar dengan *streamwise* ( $\alpha=0^0$ ), artinya aliran free stream tidak terdefleksi ketika akan melintasi susunan. Juga melalui visualisasi *velocity vector*, ini ditunjukkan evolusi kecepatan fluida ketika mengalir diantara susunan empat silinder, dan setelah melalui susunan empat silinder untuk memperkuat informasi tentang orientasi aliran free stream mengalir pada susunan silinder.

## 2. Dekat dinding

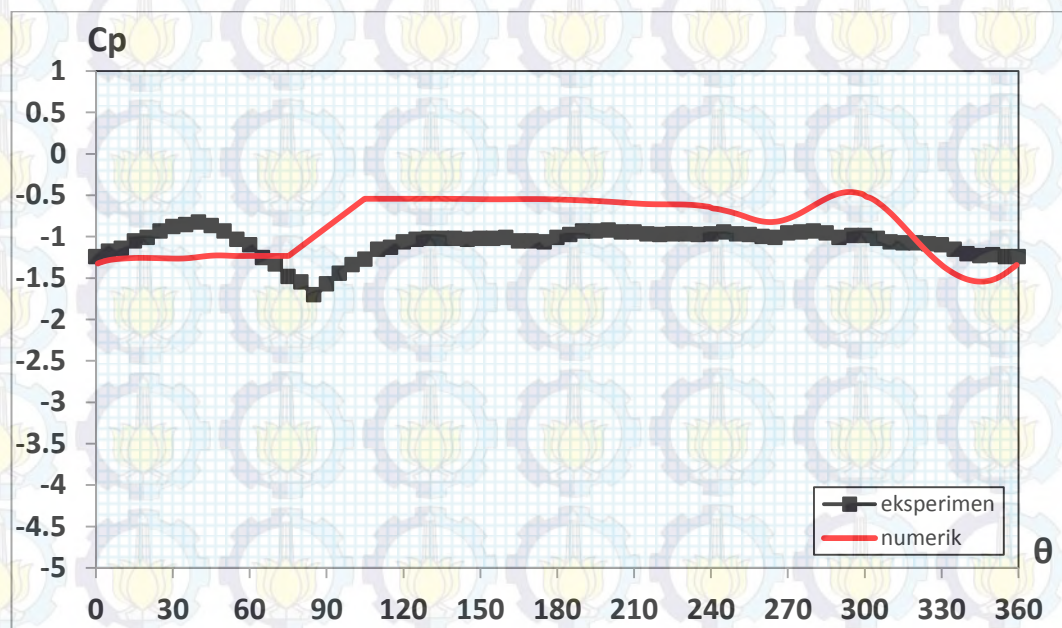
Berikut ini akan disajikan data kuantitatif dan kualitatif ketika aliran melintasi susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio spasi  $L/D = 2,7$  di dekat dinding, dengan rasio gap  $G/D = 0,0 \div 0,5$  dengan interval 0,1 dan 1,0. Data-data tersebut meliputi: distribusi tekanan dari kontur setiap silinder dan dinding, hasil perhitungan koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) berdasarkan distribusi tekanan, dan visualisasi aliran berupa *vorticity contour*, *velocity pathline*, dan profil kecepatan *upstream* ( $x/D = -3,0$ ) silinder *upstream*, diantara susunan silinder ( $x/D = 0,5 \div 1,35$ ) dan daerah wake silinder *downstream* ( $x/D = 3,7 \div 12,7$ ) yang diperoleh melalui metode eksperimen dan metode simulasi numerik. Data-data ini disampaikan untuk menjelaskan karakteristik aliran pada susunan empat silinder dengan konfigurasi *in-line square* di dekat dinding.

### a. Pada $G/D = 0,0$ (silinder menyentuh dinding)



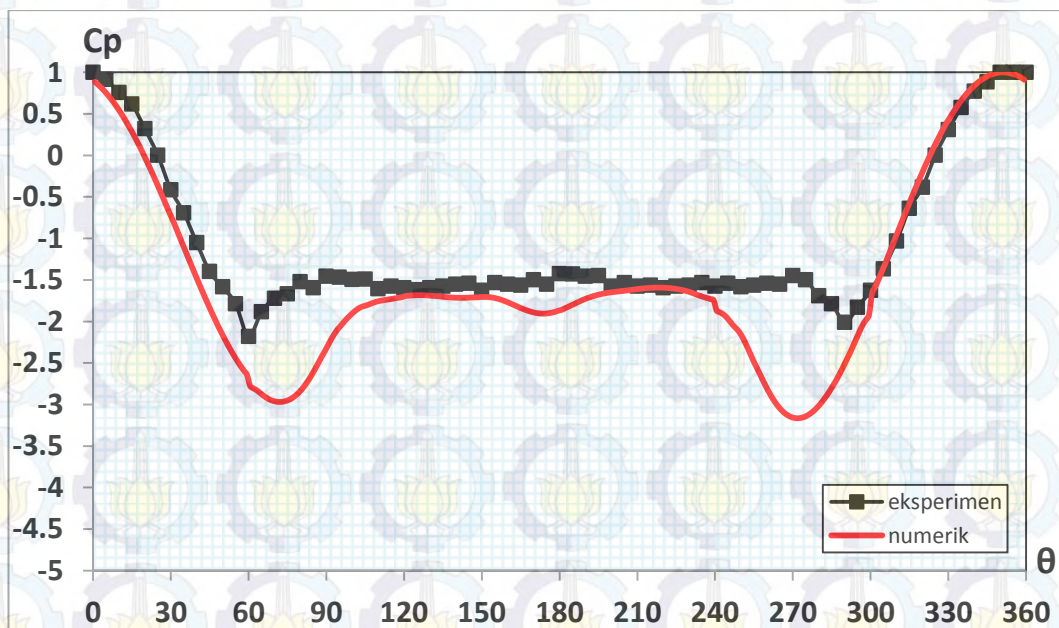
Gambar 4.87. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D = 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.87 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,0$  (silinder menyentuh dinding). Melalui Gambar 4.87 dapat diketahui ketika rasio  $G/D=0,0$ , aliran pada *lowerside* terhenti karena silinder menyentuh dinding sehingga harga  $C_p=0$  terjadi pada sudut  $\theta=270^\circ$ . Sementara pada *upperside* silinder fluida mendapat tambahan momentum akibat efek *blockage*, sehingga aliran mengalami percepatan, hal mana dapat dilihat dari posisi tekanan minimum pada  $\theta=75^\circ$ , dan separasi pada  $\theta=125^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ )= 2,01 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 2,00 untuk silinder-1. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-1 yang diperoleh melalui metode numerik jika dibandingkan dengan metode eksperimen memiliki tren yang sesuai. Hanya akselerasi aliran pada *upperside* silinder metode numerik lebih besar, hal mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



Gambar 4.88. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D=0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

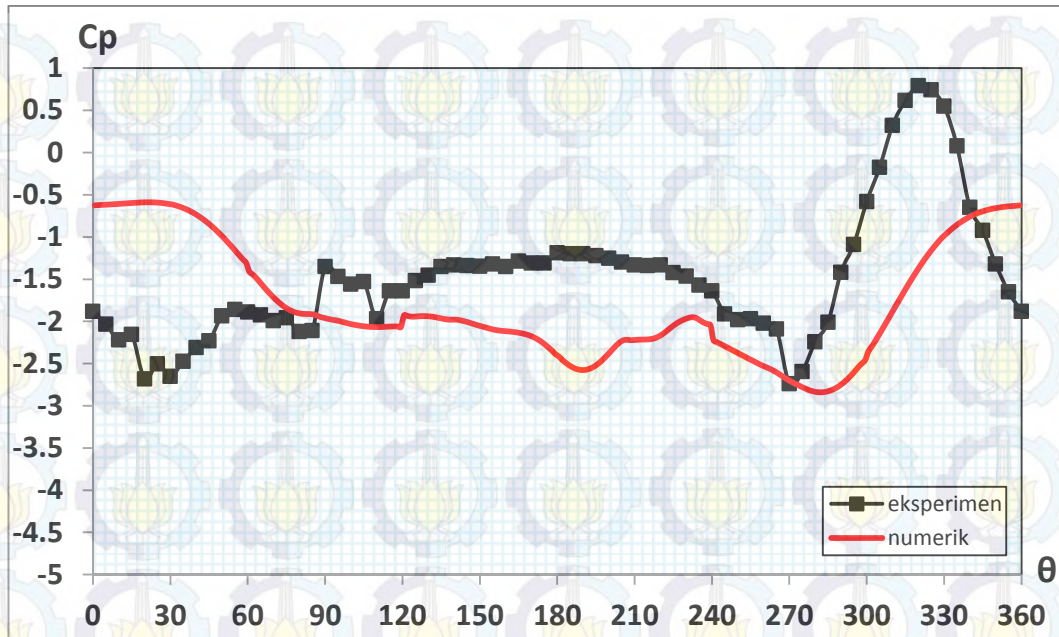
Gambar 4.88 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.88 dapat diketahui distribusi koefisien tekanan  $C_p$  memiliki harga yang negatif, terutama pada *upperside* silinder. Ini menunjukkan bahwa kontur *upperside* silinder-2 ini dilindungi atau *shield on* oleh *inner shear layer* dari silinder *upstream*. Sedangkan pada *lowerside* silinder aliran berhenti karena posisi silinder menyentuh dinding. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = -0,08 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,18 untuk silinder-2. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  yang diperoleh melalui metode numerik jika dibandingkan dengan metode eksperimen memiliki tren yang mirip. Walaupun dari hasil numerik tampak pada *frontside* silinder terjadi fenomena *reattachment*, hal mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



Gambar 4.89. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

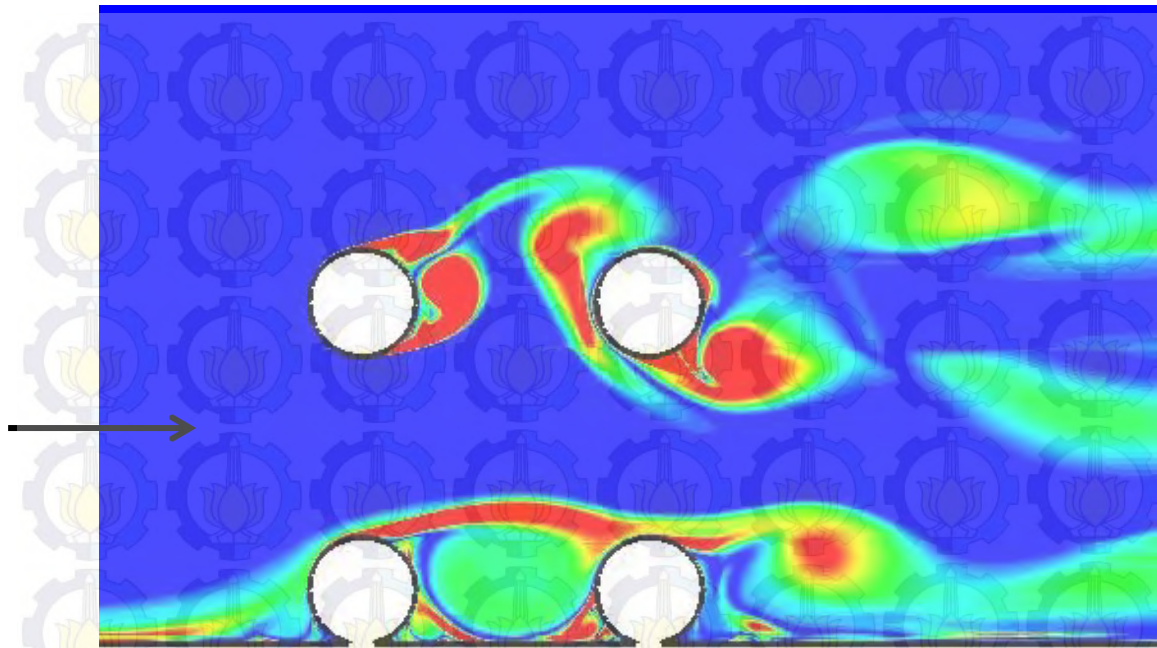


Gambar 4.89 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.89 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder relatif tidak simetri. Hal ini dapat diketahui dari posisi tekanan minimum *upperside* silinder terjadi pada  $\theta= 60^0$ , sementara pada *lowerside* terjadi pada  $\theta= 290^0$ . Ini dikarenakan adanya penambahan momentum aliran dampak efek *blockage* dari silinder lower dengan dinding, sehingga momentum aliran pada *lowerside* silinder mengalami peningkatan percepatan dibanding *upperside*, dan menyebabkan titik stagnasi pada silinder bergerak ke *inner-side* dan terjadi pada  $\theta_s= 350^0$ . Juga membuat titik separasi pada *lowerside* mundur menjadi  $\theta_{sp}= 270^0$  dibanding dengan *upperside* yang terjadi lebih awal pada  $\theta_{sp}= 80^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,30 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,14 untuk silinder-3. Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode numerik dibanding dengan metode eksperimen memiliki tren yang relatif sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi. Hal mana dikarenakan asumsi yang diambil dari metode ini adalah bahwa aliran turbulen sejak awal, sehingga ketika melintasi silinder terjadi peningkatan kecepatan.



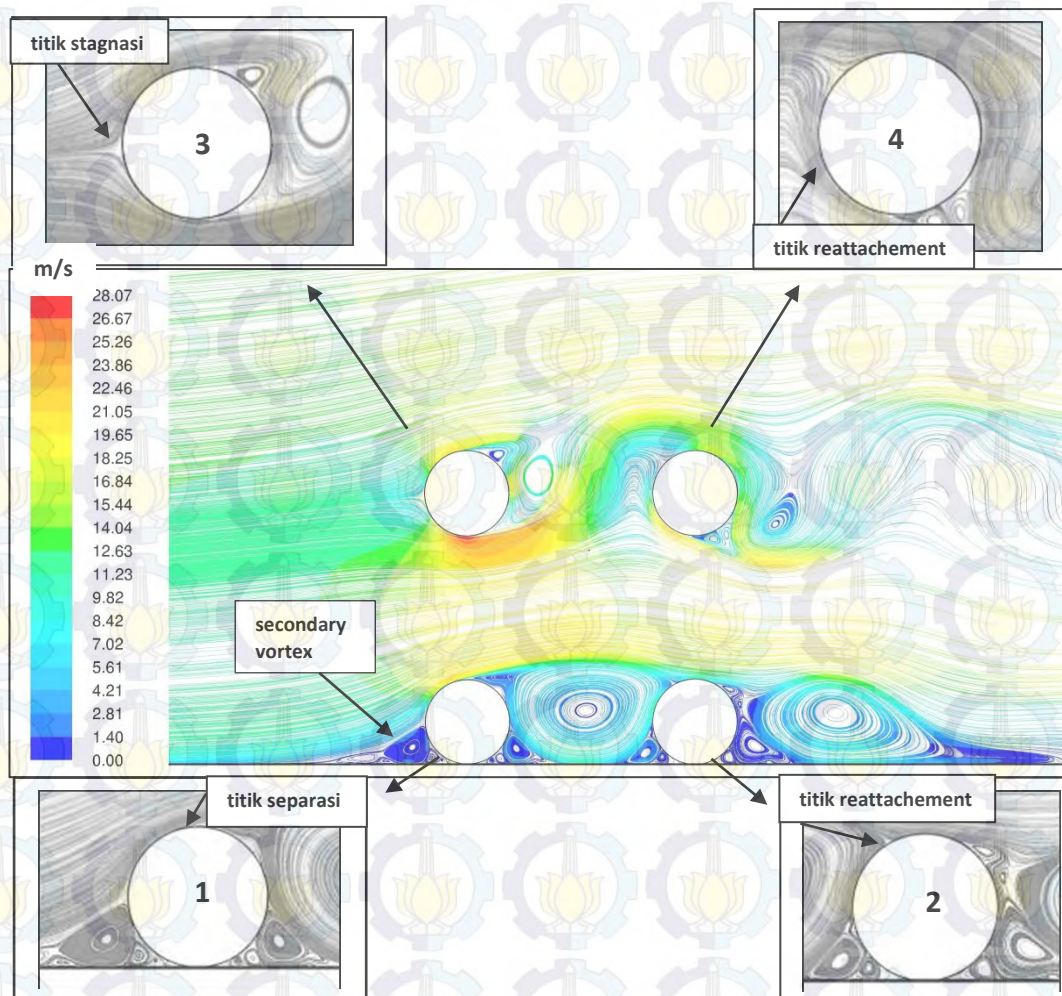
Gambar 4.90. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.90 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.90 terlihat bahwa distribusi tekanan silinder tersebut tidak simetri, dan pada *lowside* silinder tepatnya pada  $\theta= 320^\circ$  mempunyai nilai tekanan maksimum, yang berarti bahwa pada kontur silinder tersebut terjadi *reattachment* dari *inner shear layer* silinder *upstream*. Sementara *outer shear layer* silinder *upstream* melingkupi *upperside* silinder, yang ditandai dari distribusinya yang memiliki nilai negatif. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,15 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,26 untuk silinder-4. Dibandingkan dengan distribusi tekanan yang diperoleh melalui metode numerik terdapat perbedaan posisi *reattachment* yang terjadi lebih awal pada *lowside* yang  $\theta= 350^\circ$ , dan pada *upperside* juga terjadi *reattachment* dari *outer shear layer* pada  $\theta= 30^\circ$ .



Gambar 4.91. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$

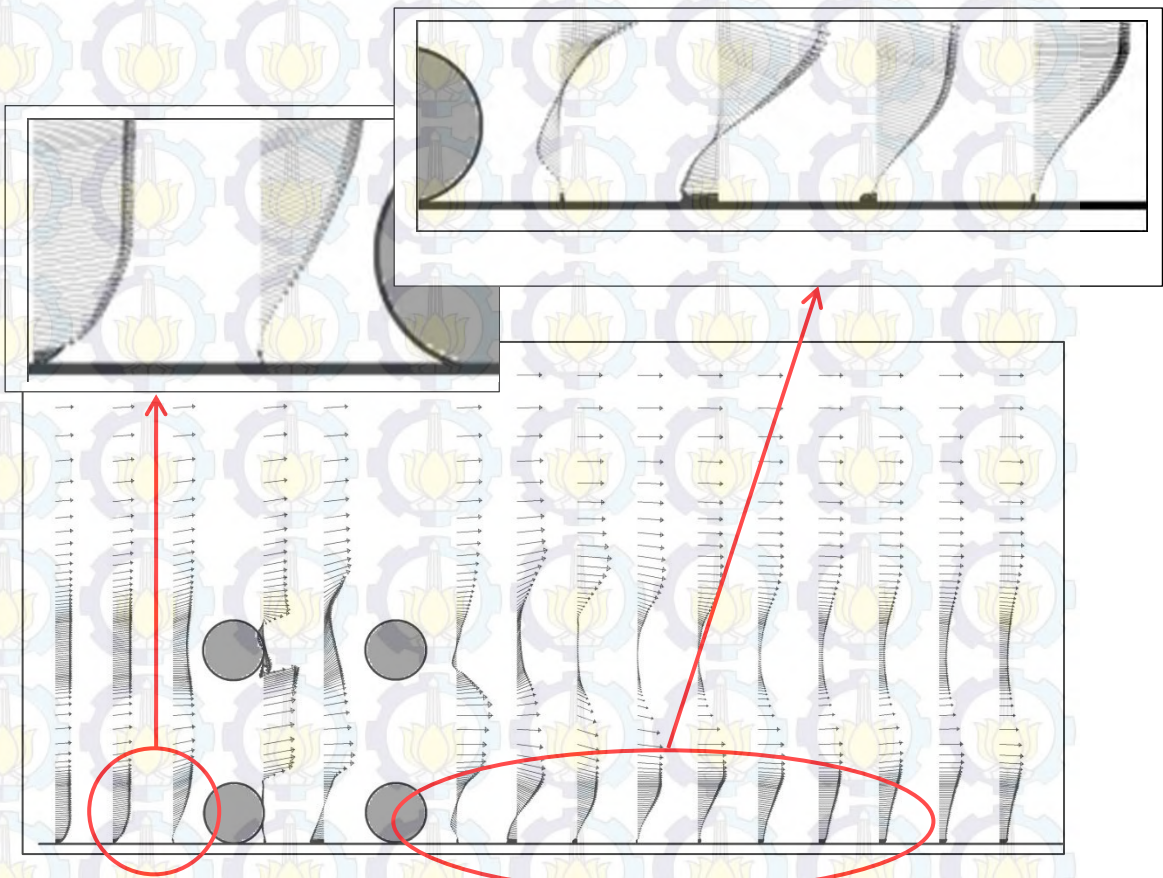
Gambar 4.91 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$ . Melalui Gambar 4.91 terlihat bahwa tidak terbentuk *vortices shed* pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2. Dengan posisi silinder menyentuh dinding membuat tidak terdapat *outer shear layer*, sedangkan *inner shear layer* dari silinder-1 melingkupi silinder-2. Sementara pada kedua silinder upper terlihat bahwa silinder-4 terbenam oleh wake dari silinder-3, *free shear layer* dari silinder-3 *impinge* pada kontur silinder-4. Pada silinder-3 sudah terbentuk *vortices shed*, sementara pada silinder-4 belum terbentuk *vortices shed* yang sempurna. Selain itu *vortices shed* yang terbentuk pada daerah wake silinder-3 terdefleksi dari arah *stream wise*. Hal ini menunjukkan adanya interferensi silinder-4 terhadap silinder-3, artinya keberadaan silinder-4 berpengaruh terhadap aliran disekitar silinder-3.



Gambar 4.92. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,0$

Gambar 4.92 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$ . Dari Gambar 4.92 dapat diketahui visualisasi aliran pada masing-masing silinder. Tampak pada *lowside* silinder-1, karena silinder menyentuh dinding sehingga membuat aliran terhenti dan membentuk *secondary vortex*, yang akhirnya semua fluida terdefleksi pada *upperside*. Ini menyebabkan momentum aliran pada celah antara kedua silinder *lower* dan *upper* menjadi bertambah. Peningkatan akselerasi aliran pada *upperside* silinder-1 mempercepat transisi dari laminar menjadi turbulen, dan membuat separasi tertunda. Dengan momentum aliran yang besar membuat *inner shear layer* dari silinder-1 mampu melingkupi *upperside* kontur silinder-2, hal mana sesuai dengan distribusi tekanan silinder-2 yang bernilai negatif.

Momentum aliran yang besar pada celah antara kedua silinder *lower* dan *upper* juga membuat akselerasi aliran pada *lowerside* silinder-3, sehingga titik stagnasi bergerak ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder, dan posisi tekanan minimum dan separasi pada *lowerside* menjadi tertunda. *Inner shear layer* dari silinder-3 yang begitu kuat membuat aliran terdefleksi ke atas dan *reattachment* pada *lowerside* kontur silinder-4, sedangkan *outer shear layer* menjadi tertahan dan membuat posisi tekanan minimum dan separasi pada *upperside* terjadi lebih awal.

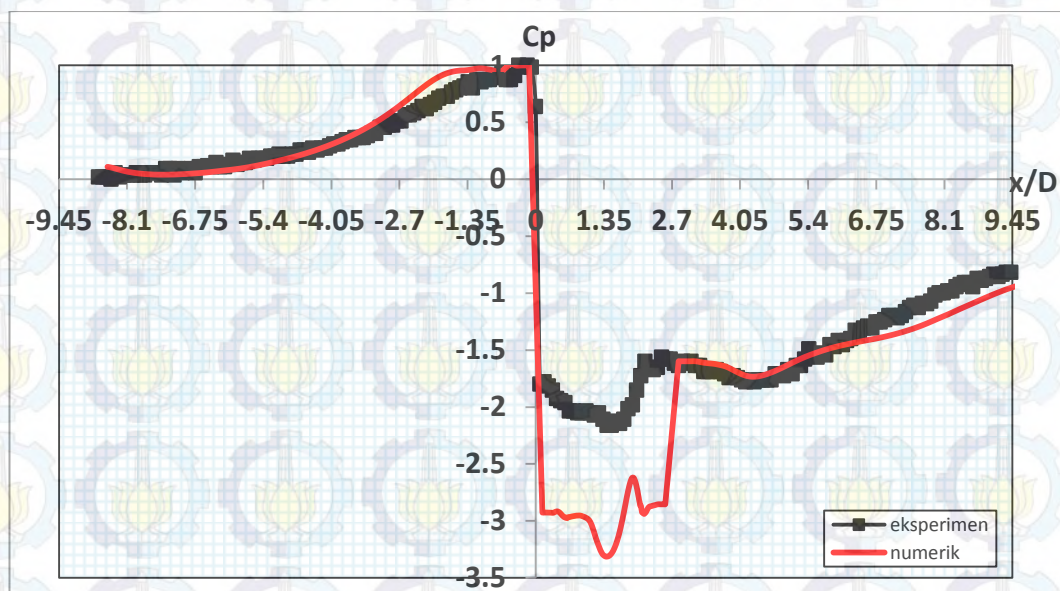


Gambar 4.93. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$

Gambar 4.93 menunjukkan visualisasi aliran berupa profil *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,0$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.93 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -3,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan *streamwise*, dan mulai pada posisi

sekitar  $x/D = -2,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari *streamwise*. Hal ini dikarenakan dengan silinder menyentuh dinding menimbulkan *blockage*, yang ditandai dari adanya vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream.

Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Momentum aliran yang besar di gap, sehingga membuat *inner shear layer* dari silinder-2 akhirnya menyentuh dinding, dan ini berlangsung pada posisi sekitar  $x/D = 7,0$ .

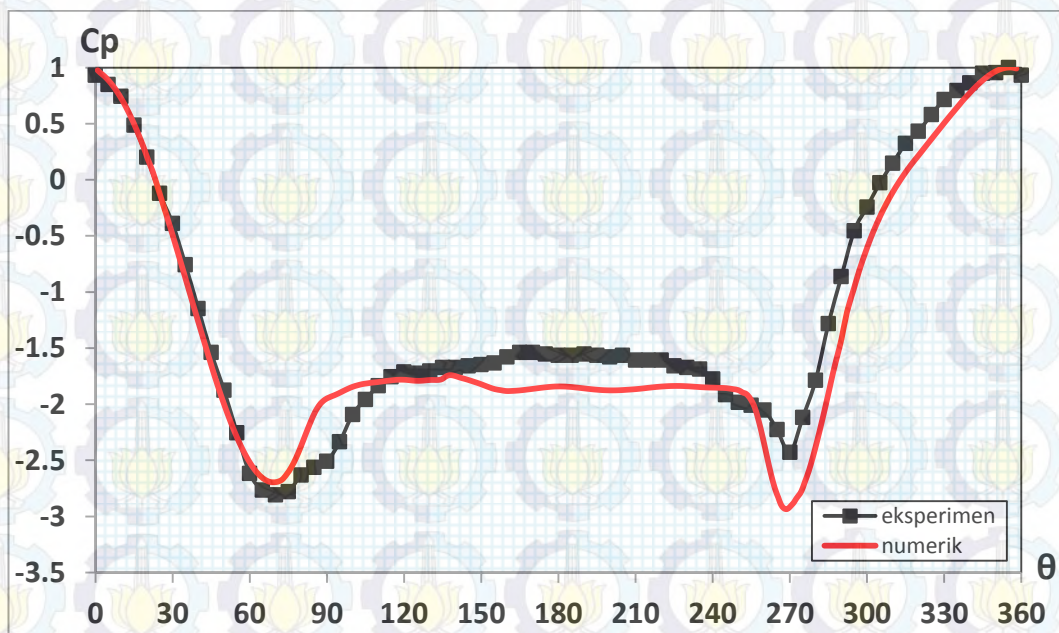


Gambar 4.94. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D = 0,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.94 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada plat datar dekat susunan empat silinder sirkular dengan rasio  $L/D = 2,7$  dan  $G/D = 0,0$ . Keberadaan silinder *lower silinder-1* dan *silinder-2* yang menyentuh dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran

fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang positif ini recovery menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 9,0$  dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

**b. Pada  $G/D= 0,1$**

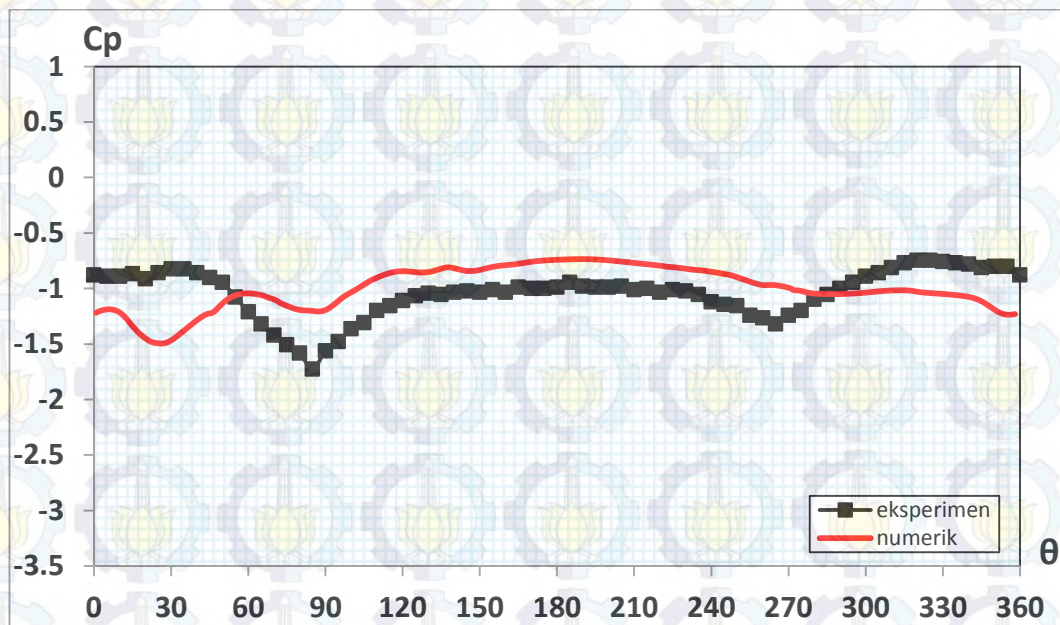


Gambar 4.95. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.95 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$ . Dari Gambar 4.95 tampak bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder tidak simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 270^\circ$ . Dengan posisi silinder-1 terhadap dinding sebesar  $G/D= 0,1$ , menyebabkan efek *blockage* dan membuat aliran free stream terdefleksi. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi yang tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *lowerside* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Adanya celah yang relatif kecil terbentuk antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,1$ , membuat sebagian besar fluida terdefleksi ke

*upperside* silinder. Hal ini memberikan momentum tambahan bagi fluida yang mengalir pada *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari separasi terjadi pada  $\theta = 105^\circ$ . Sementara pada celah yang relatif sempit menyebabkan kecepatan aliran meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $(\theta_s) = 250^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata  $(C_{Dp}) = 1,54$  dan koefisien lift  $(C_{Lp}) = 0,73$  untuk silinder-1.

Distribusi koefisien tekanan  $(C_p) = f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.

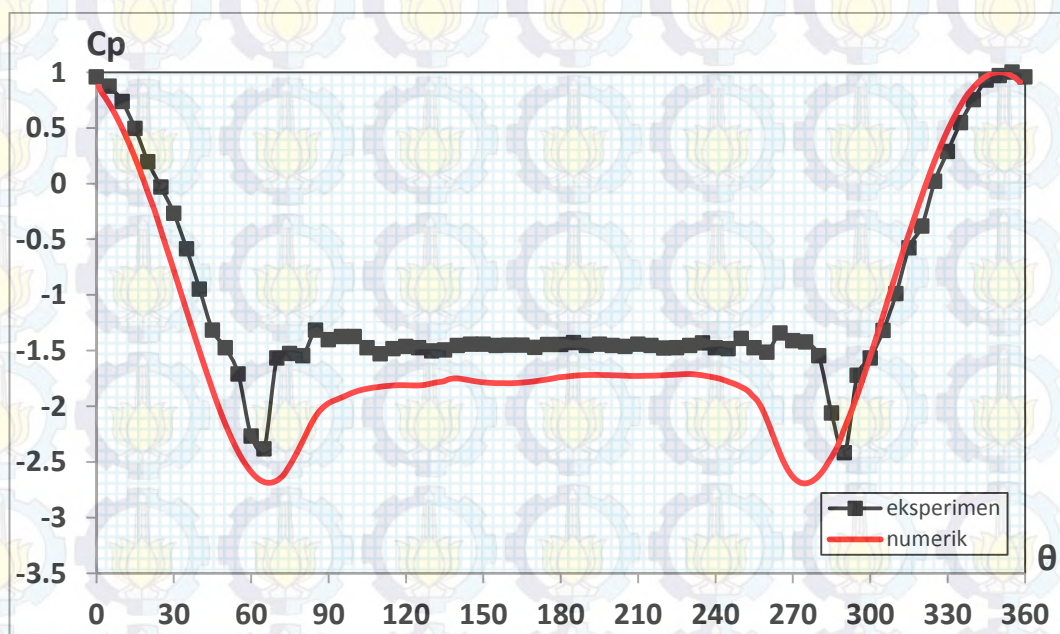


Gambar 4.96. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D = 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.96 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D = 2,7$  dan  $G/D = 0,1$ . Dari Gambar 4.96 terlihat ada dua titik pada kontur yang tekanannya maksimum, yaitu pada  $\theta = 30^\circ$  dan  $\theta = 315^\circ$ , hal ini menandakan



terjadinya fenomena *reattachment point* pada *upper* dan *lower* kontur silinder-2. Sedangkan harga distribusi koefisien tekanannya keseluruhannya negatif, menunjukkan bahwa kontur silinder-2 dilingkupi oleh *shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,14 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,17 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* tidak terjadi, harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya negatif, hal ini menandakan bahwa pada kontur silinder-2 dilingkupi atau shield oleh *shear layer* silinder upstream.

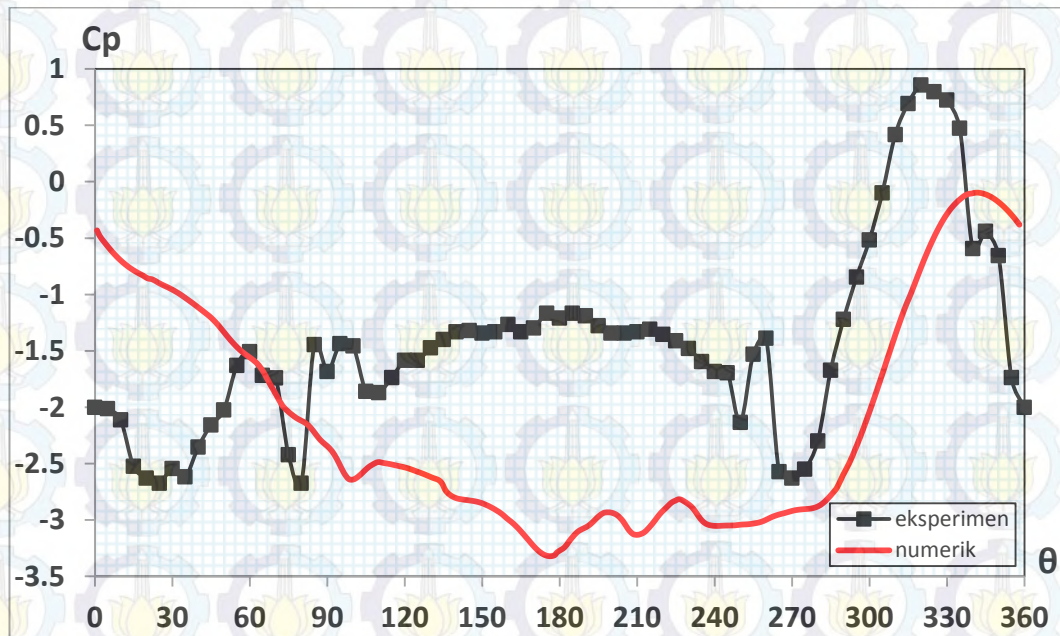


Gambar 4.97. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2.7$  dan Variasi  $G/D= 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.97 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$ . Dari Gambar 4.97 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 65^0$  pada *upper* dan  $\theta= 290^0$  pada *lower*. Tambahan momentum aliran akibat adanya efek *blockage* di *upstream* silinder-1 membuat aliran free stream terdefleksi pada *upper* silinder-1. Hal ini membuat

terjadinya peningkatan percepatan aliran pada celah dua silinder *upstream* ini, dan ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s = 355^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta = 95^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,18 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,18 untuk silinder-3.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) =  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.

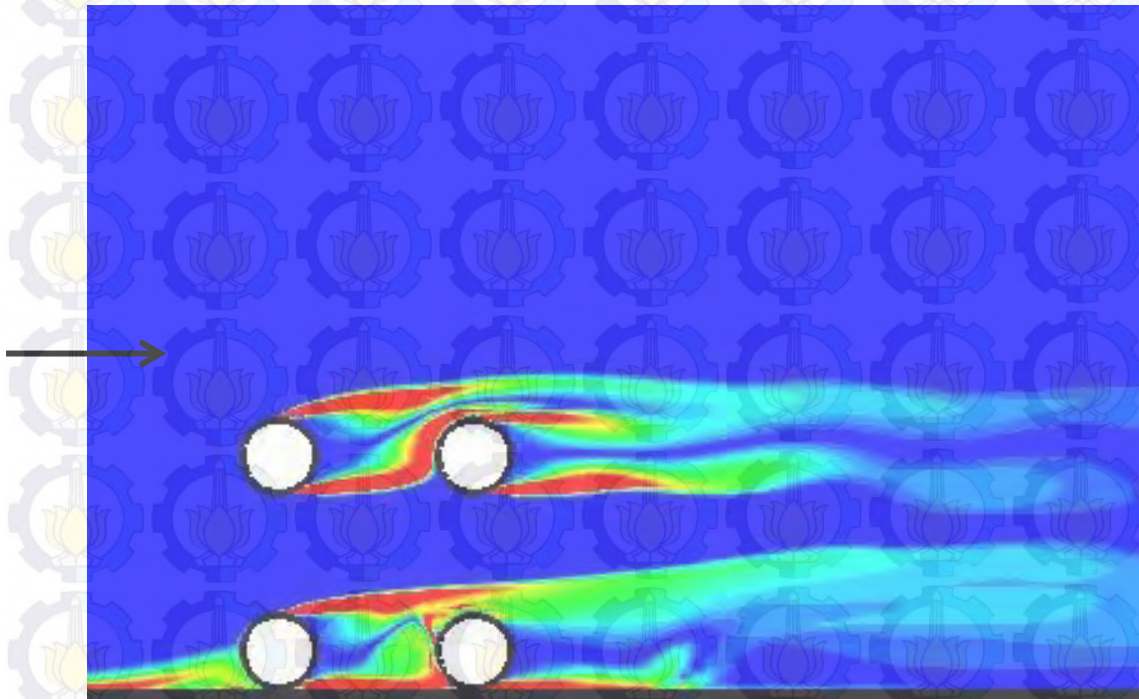


Gambar 4.98. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D = 0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.98 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D = 2,7$  dan  $G/D = 0,1$ . Dari Gambar 4.98 terlihat bahwa distribusi tekanan untuk silinder-4 tidak simetri, dan memiliki satu harga tekanan maksimum, yaitu pada  $\theta = 325^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi

*reattachment* dari *inner shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,12 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) = 0,60 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian yakni juga berlangsung fenomena *reattachment* dan juga terjadi pada *lowerside*.

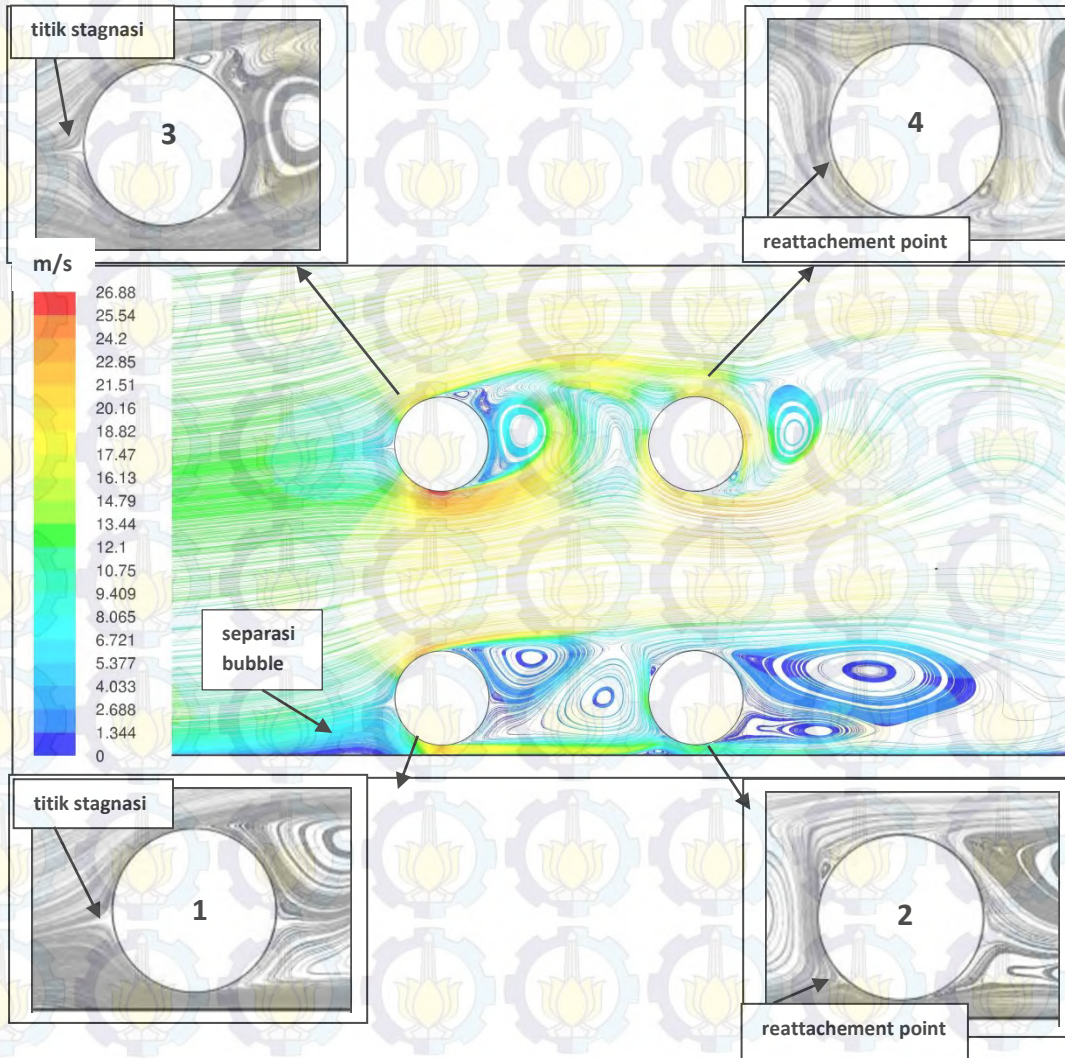


Gambar 4.99. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$

Gambar 4.99 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$ . Melalui Gambar 4.99 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, belum terbentuk *vortices shed*. Dengan posisi silinder dan dinding yang terdapat gap tetapi kecil,  $G/D= 0,1$ , membuat *outer shear layer* belum mampu membentuk *vortices shed*, sedangkan *inner shear layer* dari silinder-1 *shield on* di *upperside* silinder-2.

Sementara pada silinder upper silinder-3 belum terbentuk *vortices shed* yang sempurna, *outer shear layer* dari silinder-3 *reattachment* pada *upperside* kontur silinder-4, sedangkan *inner shear layer* *impinge* pada *lowerside* kontur

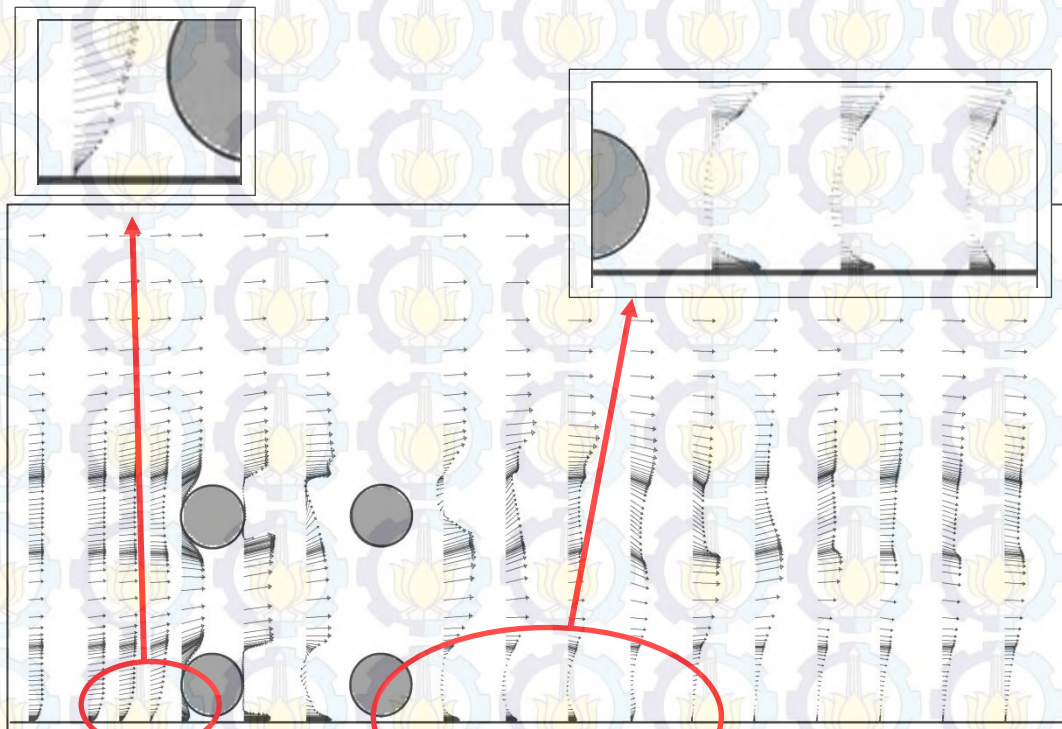
silinder-4. Sedangkan di daerah wake silinder-4 belum terbentuk *vortices shed* yang sempurna.



Gambar 4.100. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,1$

Gambar 4.100 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$ . Dari Gambar 4.100, karena adanya dinding yang diletakkan dekat silinder-1 menimbulkan separasi *bubble* pada *upstream* silinder-1, sehingga aliran free stream terdefleksi ke *upperside* silinder, dan ini memberi tambahan momentum terhadap fluida yang mengalir pada celah antara silinder lower dan silinder upper. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lebih cepat, dan pada silinder-3 momentum ini membuat titik stagnasi bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside*

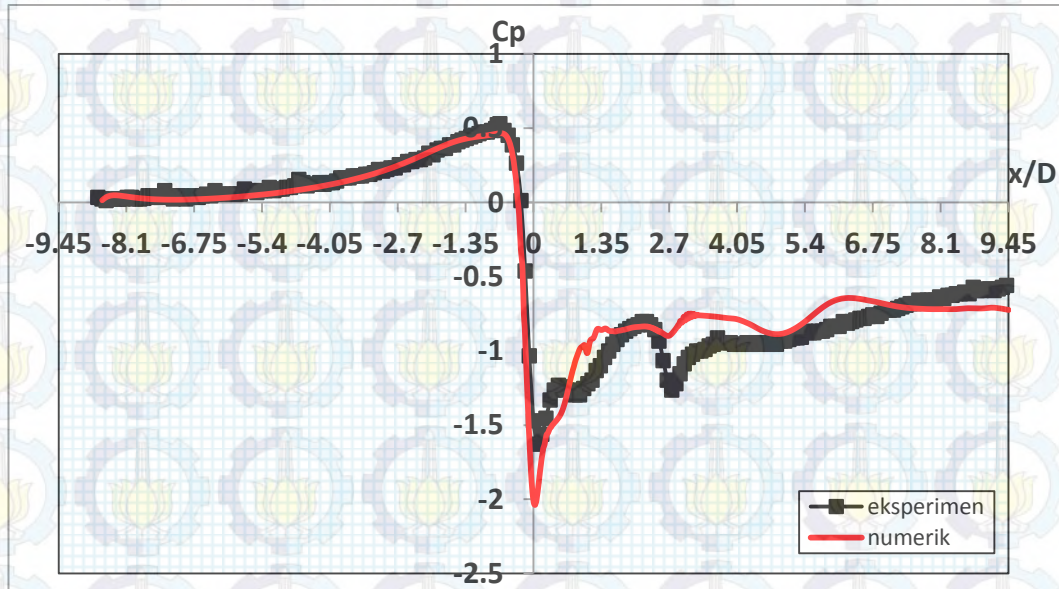
silinder, sedangkan separasi silinder-4 menjadi tertunda. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 melingkupi silinder-2 seperti yang diperoleh melalui metode numerik. Efek *blockage* pada *lowerside* silinder-1 ini ditandai juga bergesernya titik stagnasi ke *outer-side* dari silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang masih kecil, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum relatif kecil, ditandai dengan terdefleksinya aliran pada downstream silinder.



Gambar 4.101. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$

Gambar 4.101 menunjukkan visualisasi aliran berupa profil *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,1$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.101 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -2,0$  vektor free stream aliran masih sejajar dengan *streamwise*, dan hampir pada posisi sekitar  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran terdefleksi dari *streamwise*. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding menimbulkan *blockage*, ditandai dari adanya

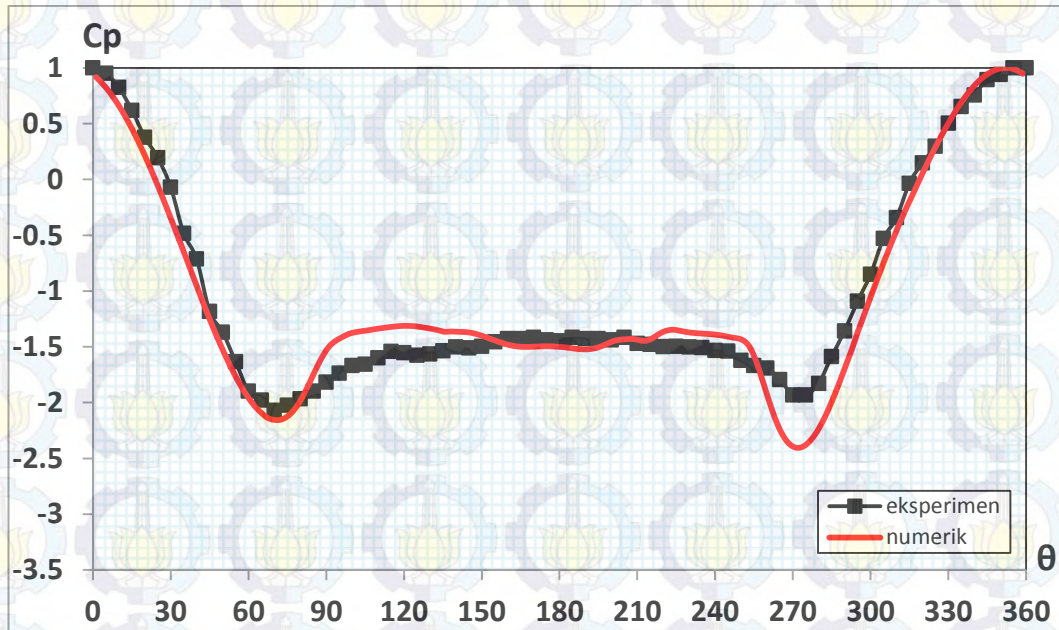
vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region*, ditandai dengan vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D=6,0$ .



Gambar 4.102. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D=0,1$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.102 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,1$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 8,0$  dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

c. Pada  $G/D= 0,2$

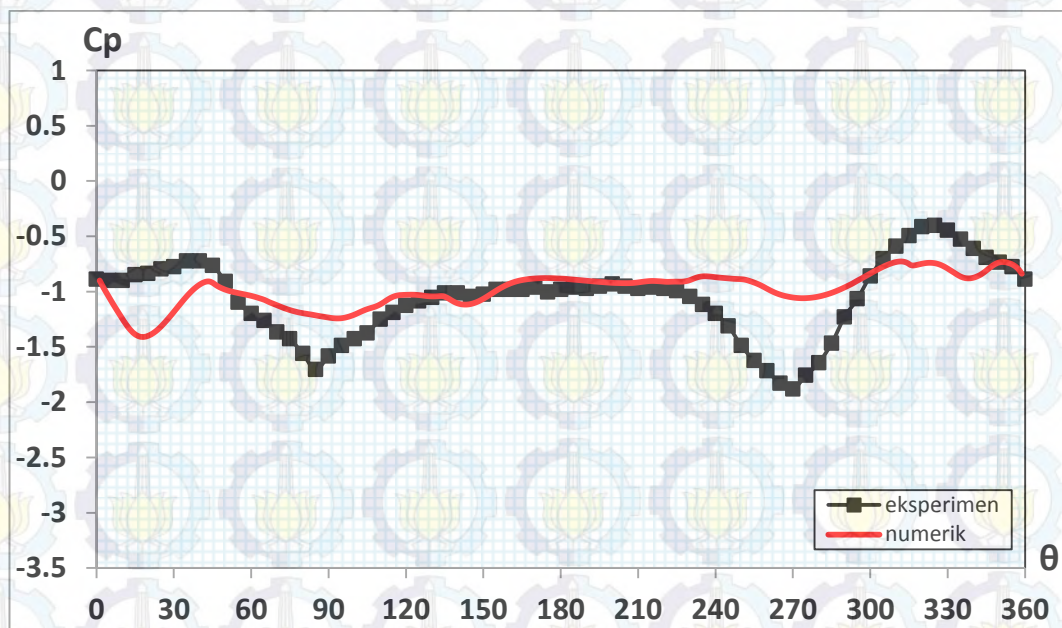


Gambar 4.103. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.103 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Melalui Gambar 4.103 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder tidak simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 270^\circ$ . Dengan rasio  $G/D= 0,2$  dinding dengan silinder-1, menyebabkan efek *blockage* dan ini membuat aliran free stream terdefleksi. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi yang tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Celah yang kecil terbentuk antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,2$ , membuat sebagian besar fluida masih terdefleksi ke *upperside* silinder, dan memberikan momentum tambahan bagi fluida yang mengalir pada *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari separasi terjadi pada  $\theta= 100^\circ$ . Sementara pada celah yang masih sempit menyebabkan kecepatan aliran meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik

separasi ( $\theta_s$ )=  $240^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,43 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,31 untuk silinder-1

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.

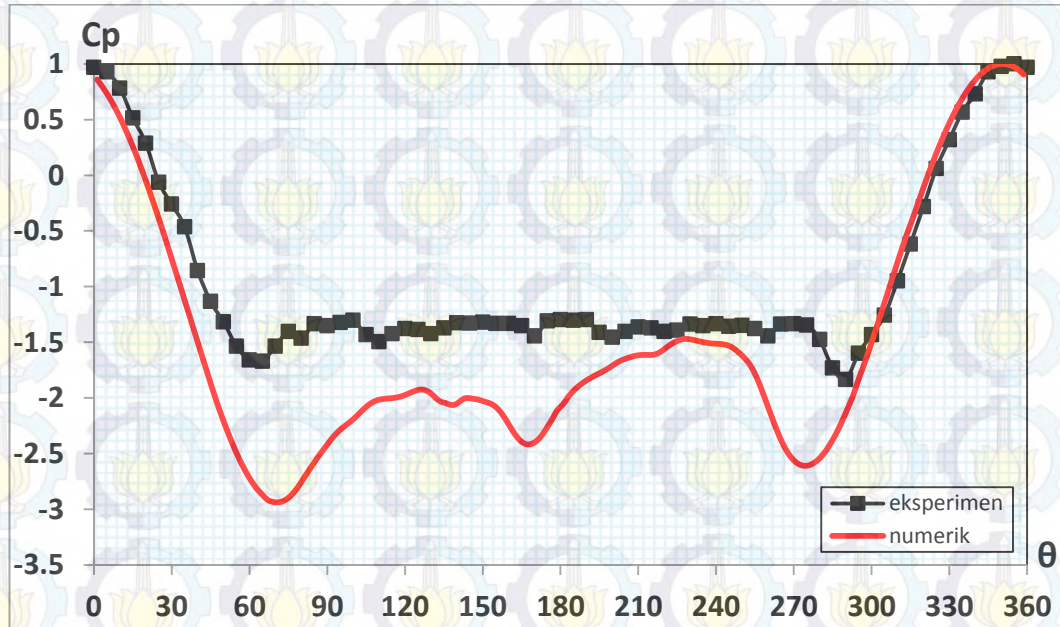


Gambar 4.104. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.104 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.104 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki dua titik tekanan maksimum, masing-masing terletak pada  $\theta= 35^\circ$  dan  $\theta= 320^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *upperside* dan *lowerside* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,24 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,03 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* tidak terjadi, harga distribusi



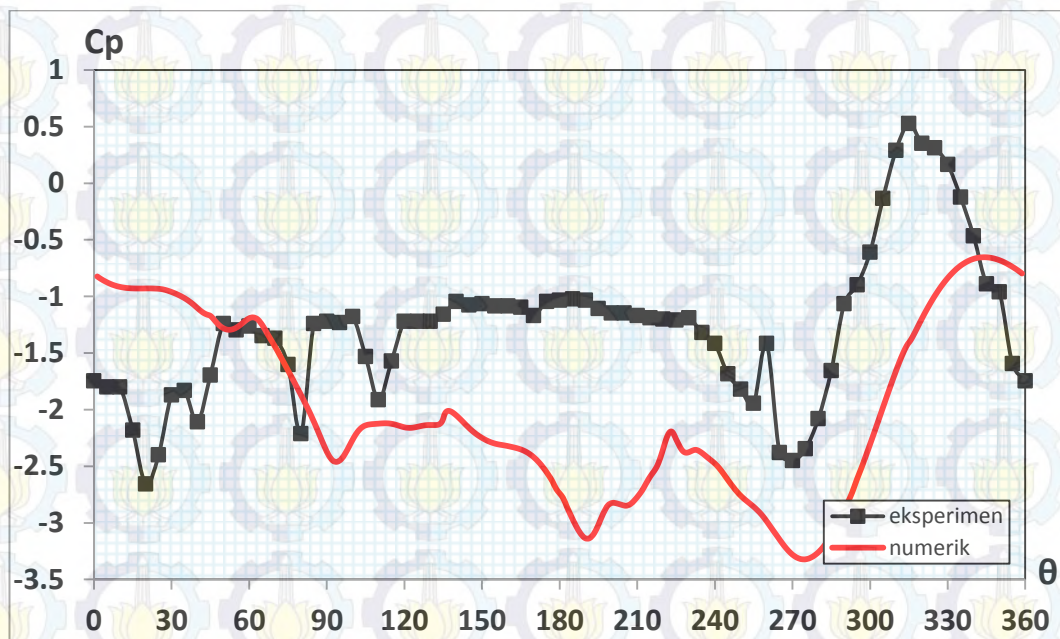
koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya negatif, hal ini menandakan bahwa pada kontur silinder-2 diselubungi atau dilingkupi oleh *shear layer*.



Gambar 4.105. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* Silinder-3 dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.105 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.105 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 60^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^\circ$  pada *lowerside*. Tambahan momentum aliran akibat efek *blockage* yang masih membuat aliran free stream terdefleksi pada *upperside* silinder-1. Hal ini membuat terjadinya peningkatan percepatan aliran pada celah dua silinder *upstream* ini, dan ini ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s= 355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 260^\circ$  dari silinder-3. Sementara akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta= 85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,20 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,09 untuk silinder-3.

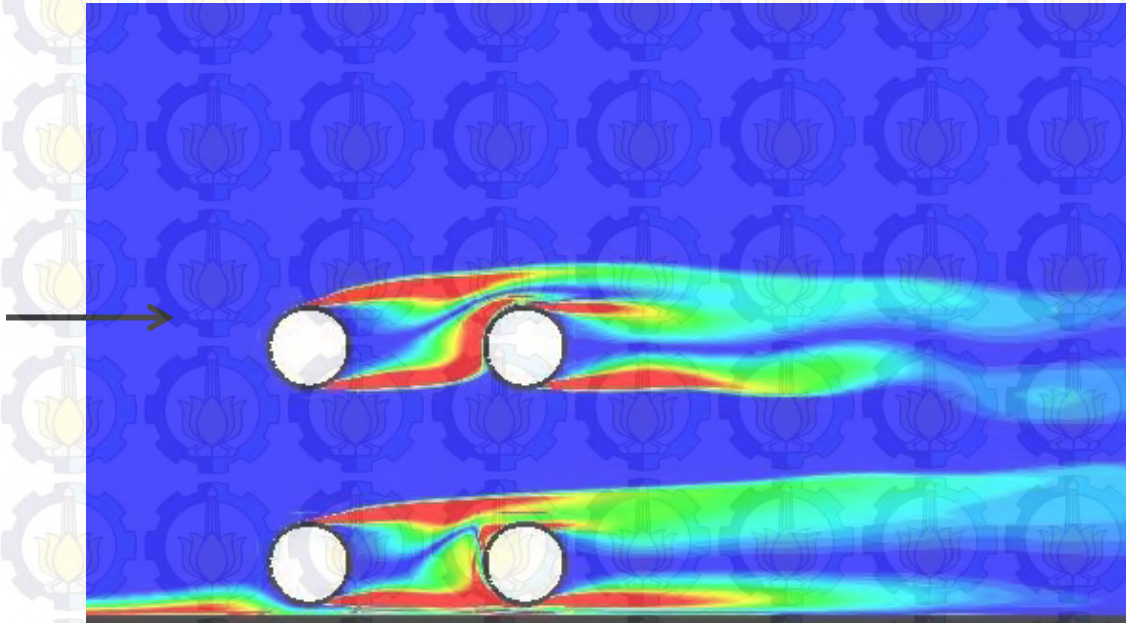
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini terbalik dari eksperimen.



Gambar 4.106. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

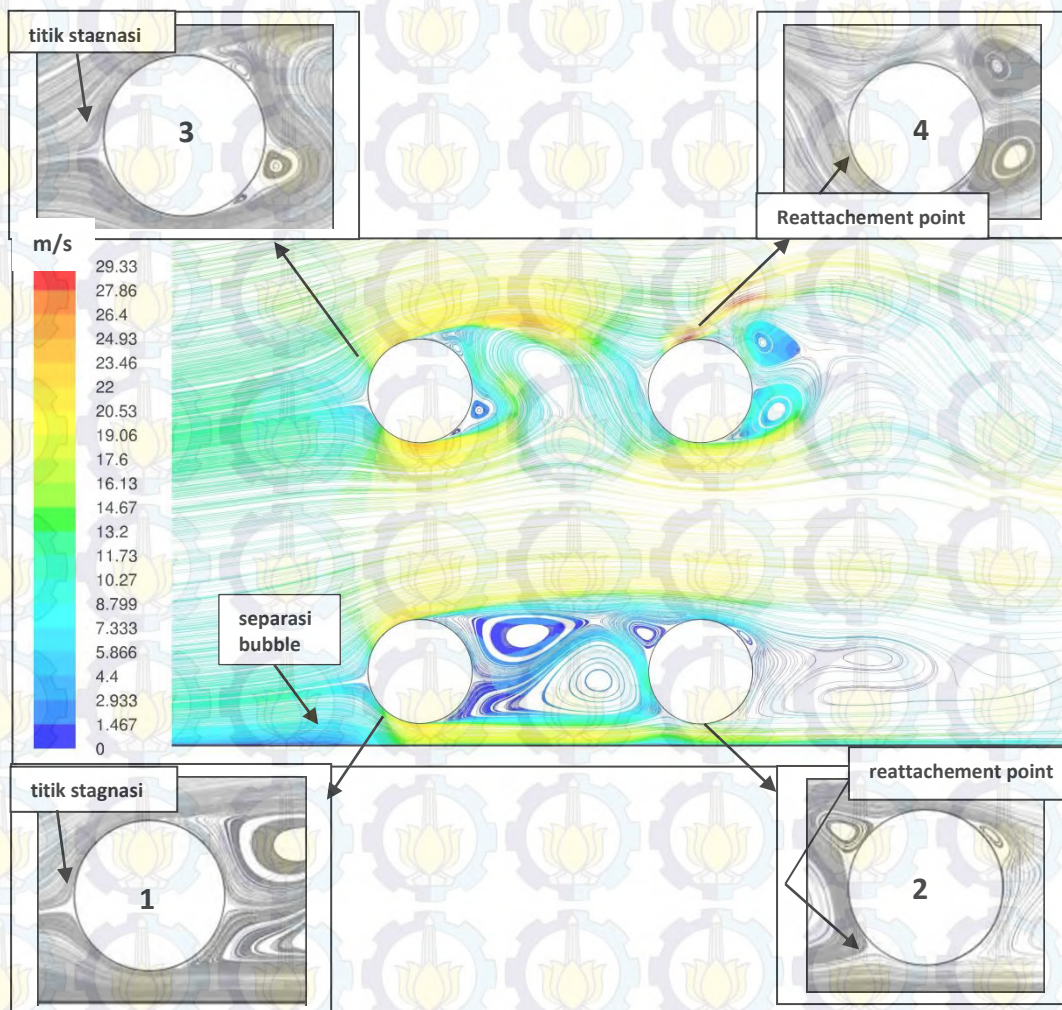
Gambar 4.106 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.106 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 tidak simetri, dan memiliki satu harga tekanan maksimum positif, yaitu pada  $\theta= 315^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *inner shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,01 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,26 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* terjadi lebih awal pada *lowerside* kontur.



Gambar 4.107. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$

Gambar 4.107 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Melalui Gambar 4.107 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, tidak terbentuk *vortices shed*. Gap yang mulai lebar yang dibentuk antara *lowerside* silinder-1 dengan dinding membuat *outer shear layer* silinder-1 *reattachment* pada *lowerside* kontur silinder-2, sedangkan *inner shear layer* masih melingkupi kontur silinder-2. Sementara pada daerah wake kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* yang terbentuk relatif belum sempurna khususnya pada silinder-4.

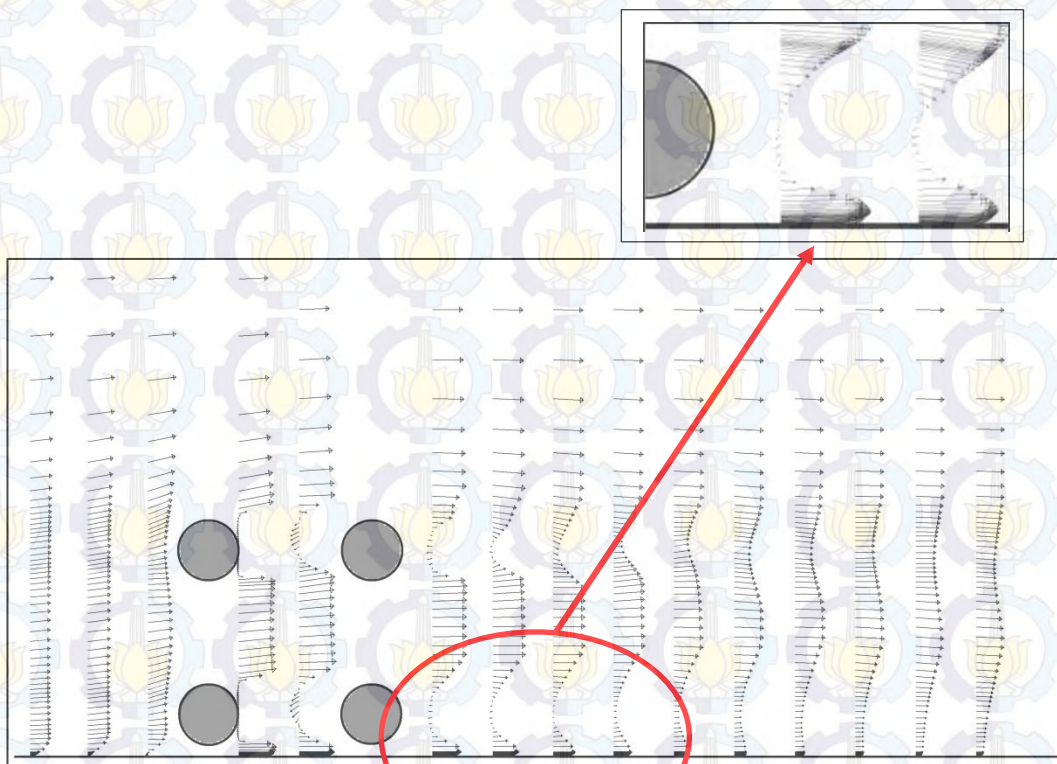


Gambar 4.108. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,2$

Gambar 4.108 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$ . Dari Gambar 4.108 dapat dilihat adanya pengaruh dinding yang diletakkan dekat silinder-1 relatif sudah berkurang, karena *separasi bubble* yang terjadi pada *upstream* silinder-1 hampir tidak ada. Sehingga aliran free stream terdefleksi ke *upperside* silinder juga mulai berkurang, dan ini memberi tambahan momentum terhadap fluida yang mengalir pada celah antara silinder lower dan dinding. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 melingkupi silinder-2. Walaupun efek *blockage* pada *lowerside* silinder-1 sudah berkurang, tetapi titik stagnasi masih ke *outerside* dari silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang

relatif mulai besar, ditandai dengan *outer shear layer* dari silinder-1 *reattachment* pada *lowerside* silinder-2.

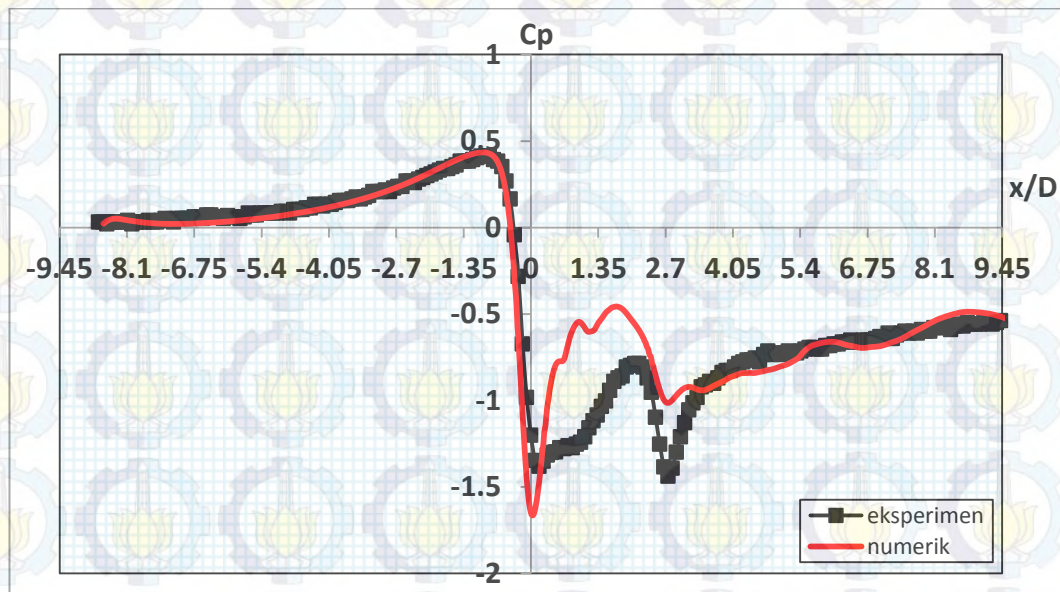
Sementara pada silinder upper, silinder-3 dan silinder-4, berkurangnya momentum aliran di gap membuat percepatan aliran pada *lowerside* silinder-3 menurun. Disisi lain mulai terjadi peningkatan percepatan aliran pada *upperside* silinder-3, hal ini ditunjukkan dari posisi separasi pada *upperside* yang terjadi lebih mundur. Walaupun demikian titik stagnasi pada silinder-3 masih terjadi pada *lowerside* silinder.



Gambar 4.109. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$

Gambar 4.109 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,2$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.109 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran tetap sejajar dengan streamwise, yang berarti vektor free

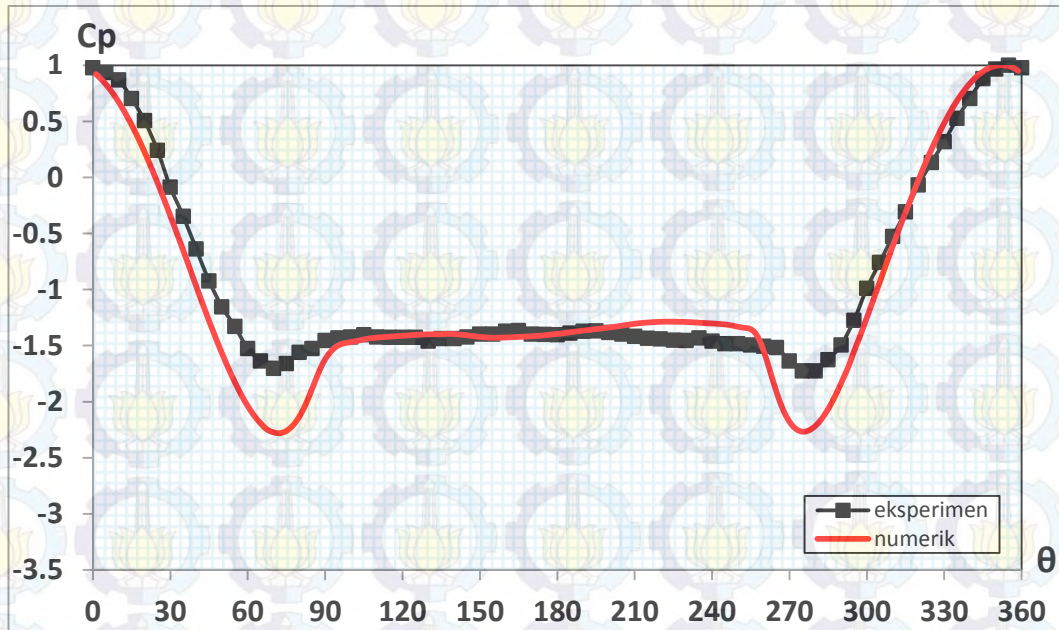
stream aliran tidak terdefleksi dari streamwise. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun dengan adanya dinding sudah tidak menimbulkan *blockage* terhadap free stream aliran. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region* mulai berkurang, ditandai dengan vektor velocity yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D=5,0$ .



Gambar 4.110. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D=0,2$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.110 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,2$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 8,0$  dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

d. Pada  $G/D= 0,3$

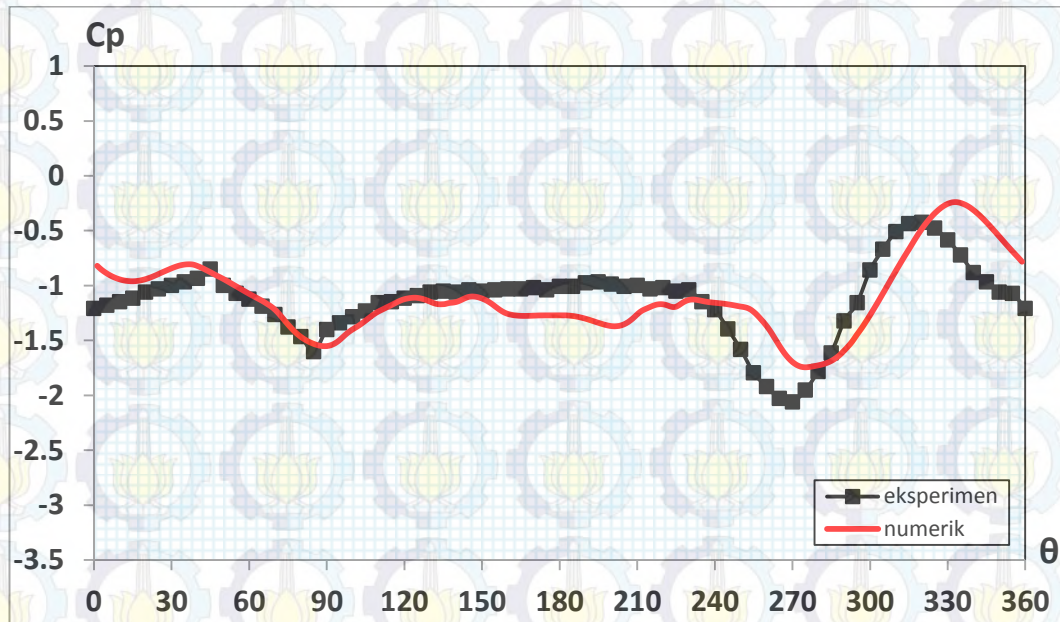


Gambar 4.111. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.111 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Melalui Gambar 4.111 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder relatif simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 270^\circ$ . Celah antara *lowerside* silinder dengan dinding yang relatif mulai besar,  $G/D= 0,3$ , membuat fluida yang terdefleksi ke *upperside* silinder juga mulai berkurang, walaupun titik stagnasi ( $\theta_s$ ) masih pada posisi  $355^\circ$ , sedangkan separasi terjadi pada  $\theta= 85^\circ$ . Sementara pada *lowerside* silinder, kecepatan alirannya juga mulai berkurang, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi ( $\theta_s$ )=  $270^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,37 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,11 untuk silinder-1.

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik

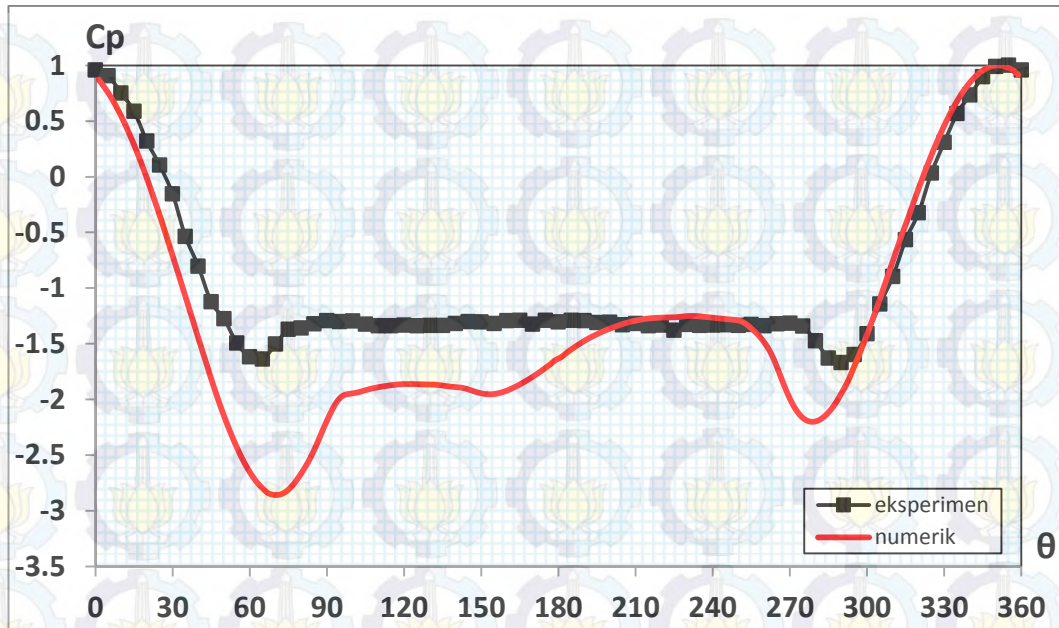
memiliki tren yang sesuai, hanya akselerasi aliran pada silinder yang dihasilkan metode numerik lebih besar.



Gambar 4.112. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.112 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder downstream silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.112 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki dua titik maksimum, dan titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 40^\circ$  dan  $\theta= 315^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *upper* dan *lower* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,12 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,08 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terdapat kesesuaian, dimana fenomena *reattachment* terjadi, harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya relatif sama dengan yang didapat melalui metode eksperimen.

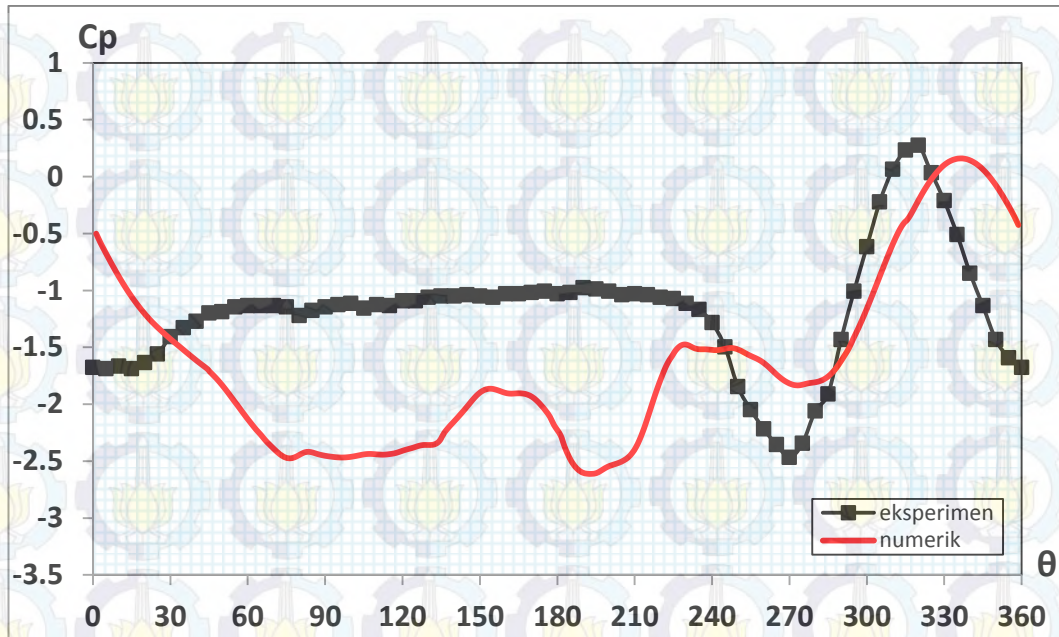




Gambar 4.113. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.113 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.113 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini belum simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 60^0$  pada *upperside* dan  $\theta= 295^0$  pada *lowerside*. Efek *blockage* di *upstream* silinder-1 hampir tidak ada, sehingga membuat aliran free stream sejajar streamwise terhadap silinder. Ini membuat terjadinya penurunan percepatan aliran pada celah dua silinder *upstream* ini, dan ditunjukkan dari posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s= 355^0$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 260^0$ . Sementara aliran pada *upperside* mulai meningkat, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 85^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,18 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,08 untuk silinder-3.

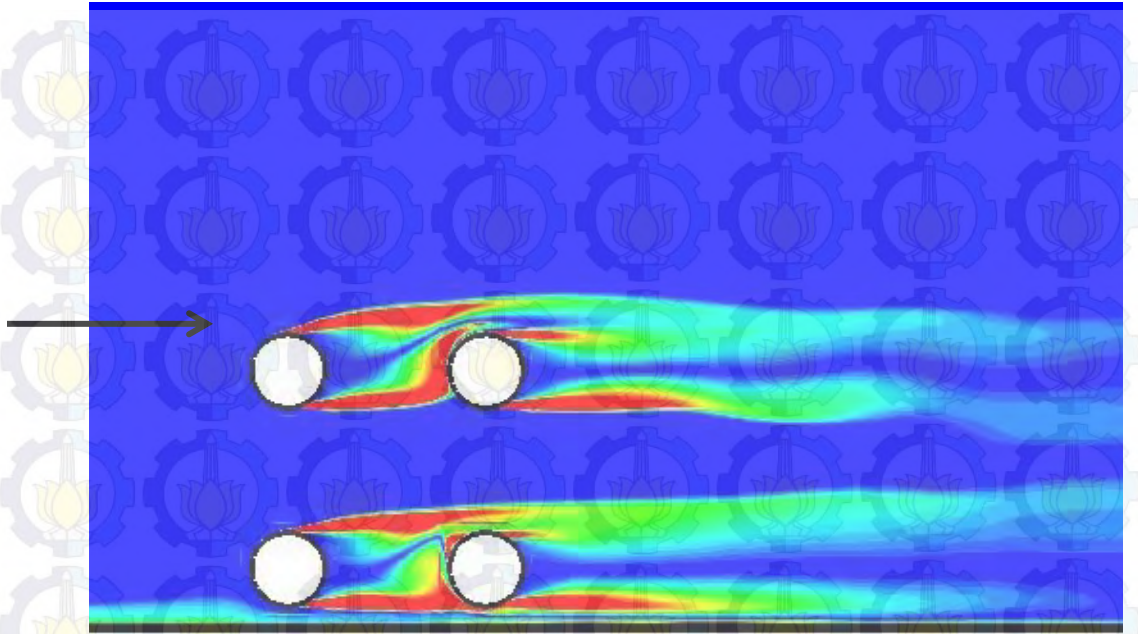
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.



Gambar 4.114. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

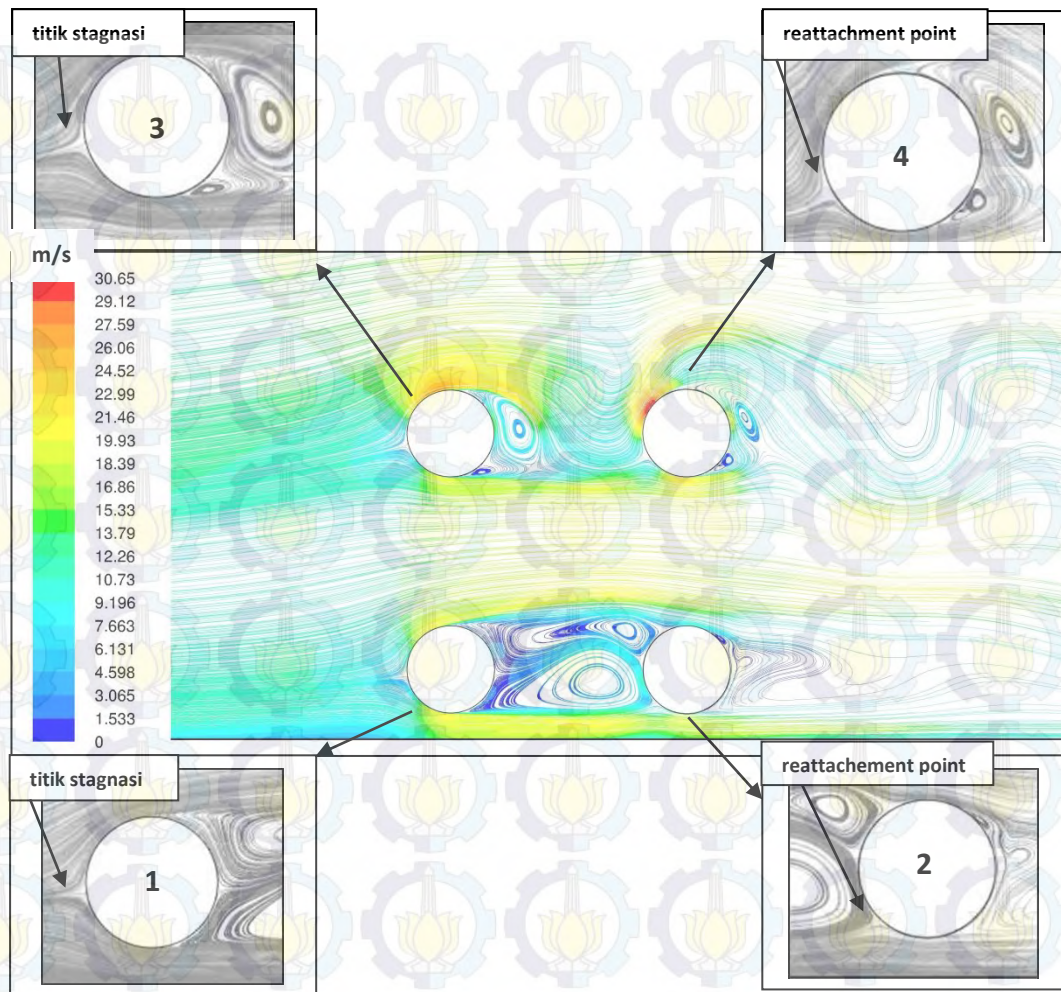
Gambar 4.114 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.114 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 tidak simetri dan memiliki satu harga tekanan maksimum, yaitu pada  $\theta= 315^0$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,02 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,10 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung lebih awal.



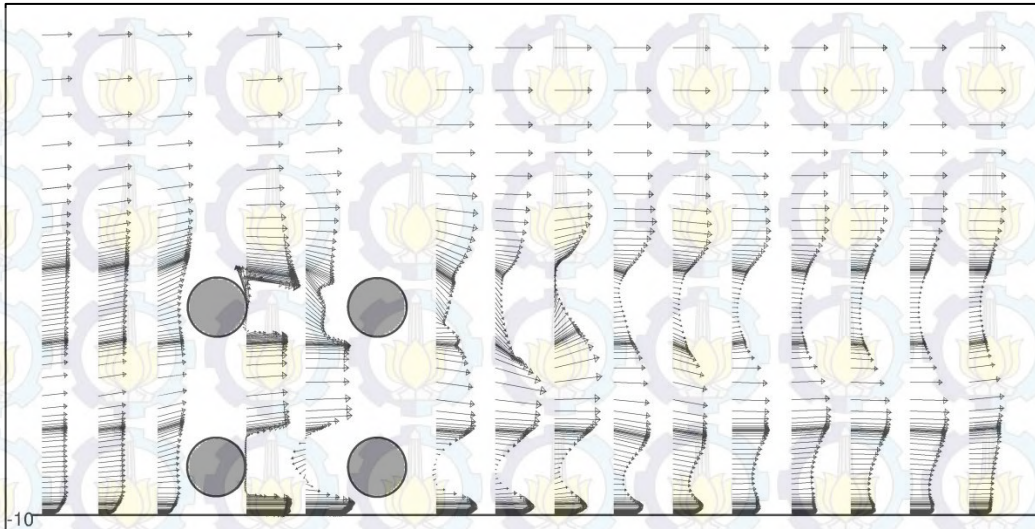
Gambar 4.115. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$

Gambar 4.115 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Melalui Gambar 4.115 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, belum terbentuk *vortices shed*. Dengan posisi *lowerside* silinder yang cukup lebar dengan dinding membuat *free shear layer* silinder-1 *reattachment* di kontur *front-side* silinder-2. Sementara pada silinder upper silinder-3 *inner shear layer reattachment* pada *lowerside* silinder-4, sedangkan *outer shear layer* membentuk *vortices shed impinge* pada kontur *upperside* silinder-4. Sedangkan pada daerah wake silinder-4 terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna.



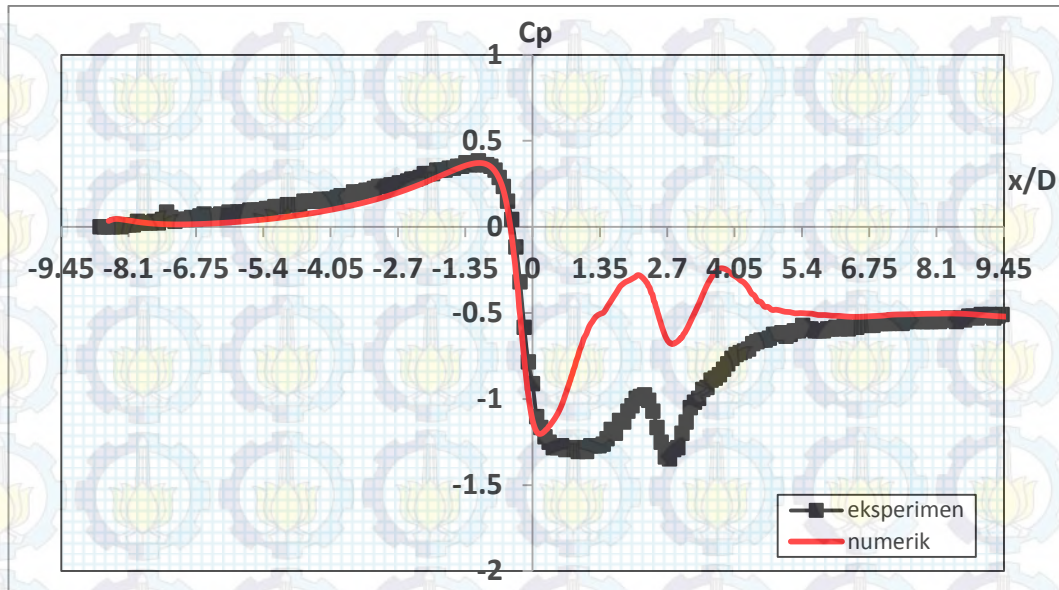
Gambar 4.116. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,3$

Gambar 4.116 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Dari Gambar 4.116 dapat dilihat penempatan dinding yang mulai jauh dari silinder,  $G/D= 0,3$ , menyebabkan separasi *bubble* yang terbentuk pada upstream silinder-1 sudah hilang, sehingga aliran free stream yang terdefleksi ke *upperside* silinder-1 juga mulai berkurang. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi pada silinder-3 masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *front-side* silinder. Sementara *inner shear layer* dari silinder-1 masih memiliki kecepatan yang tinggi. Sedangkan aliran yang melalui celah antara *lowerside* silinder dan dinding memiliki momentum yang bertambah besar, ditandai dengan *outer shear layer* dari silinder upstream mulai membentuk *vortices shed*.



Gambar 4.117. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$

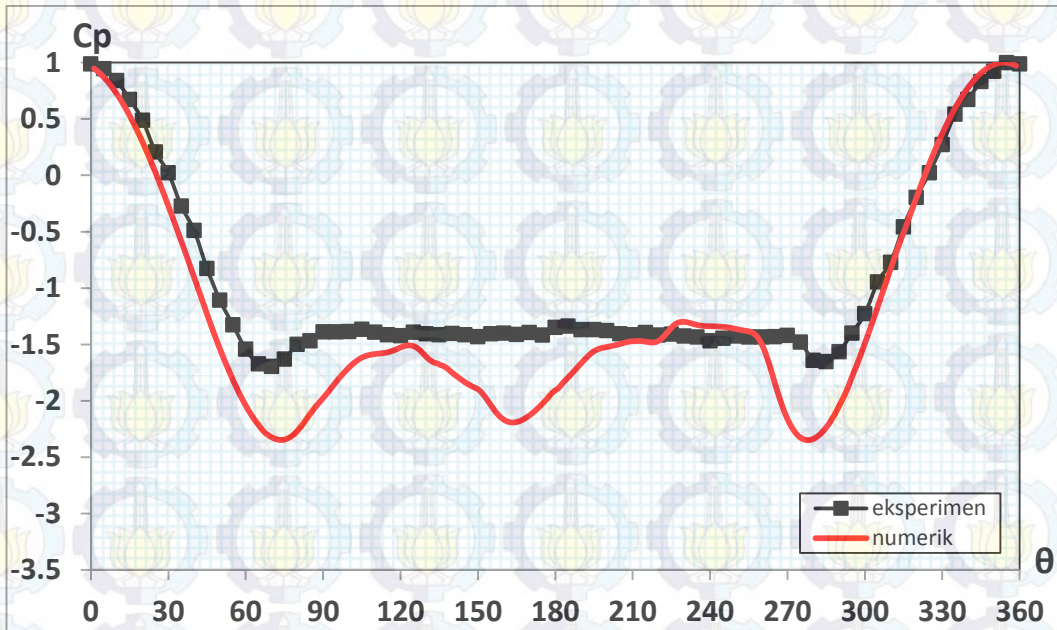
Gambar 4.117 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$  dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.117 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran sudah sejajar dengan *streamwise*, sehingga vektor free stream aliran tidak terdefleksi dari *streamwise*. Hal ini dikarenakan dengan adanya dinding sudah tidak menimbulkan efek *blockage*, ditandai dari tidak adanya vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 terlihat fenomena *recirculation region* yang semakin kecil, ditandai dengan vektor *velocity* yang arahnya berlawanan dengan arah free stream, dan ini berlangsung sampai pada posisi sekitar  $x/D= 4,0$ .



Gambar 4.118. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,3$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.118 menunjukkan distribusi koefisien tekanan dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,3$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 5,5$ , dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

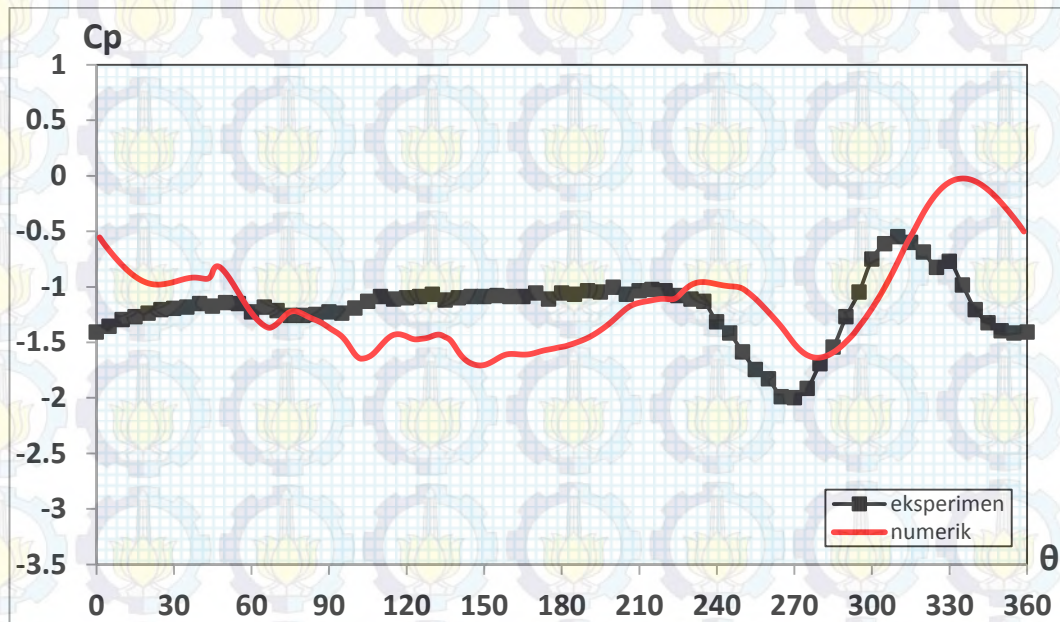
e. Pada  $G/D= 0,4$



Gambar 4.119. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.119 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Melalui Gambar 4.119 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder relatif lebih simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 285^\circ$ . Dengan penempatan dinding yang semakin menjauhi silinder, menyebabkan efek *blockage* terhadap aliran free stream semakin melemah. Walaupun demikian posisi titik stagnasi tidak berada pada *front-side* silinder, tetapi pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Celah antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,4$ , yang cukup besar membuat momentum aliran ke *upperside* dan *lowerside* silinder relatif mulai sama. Hal ini ditunjukkan dari posisi titik separasi yang relatif sama pada *upperside*  $\theta_{Sp}= 90^\circ$  dan *lowerside*  $\theta_{Sp}= 270^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,34 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,08 untuk silinder-1

Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, hanya berbeda pada daerah wake.

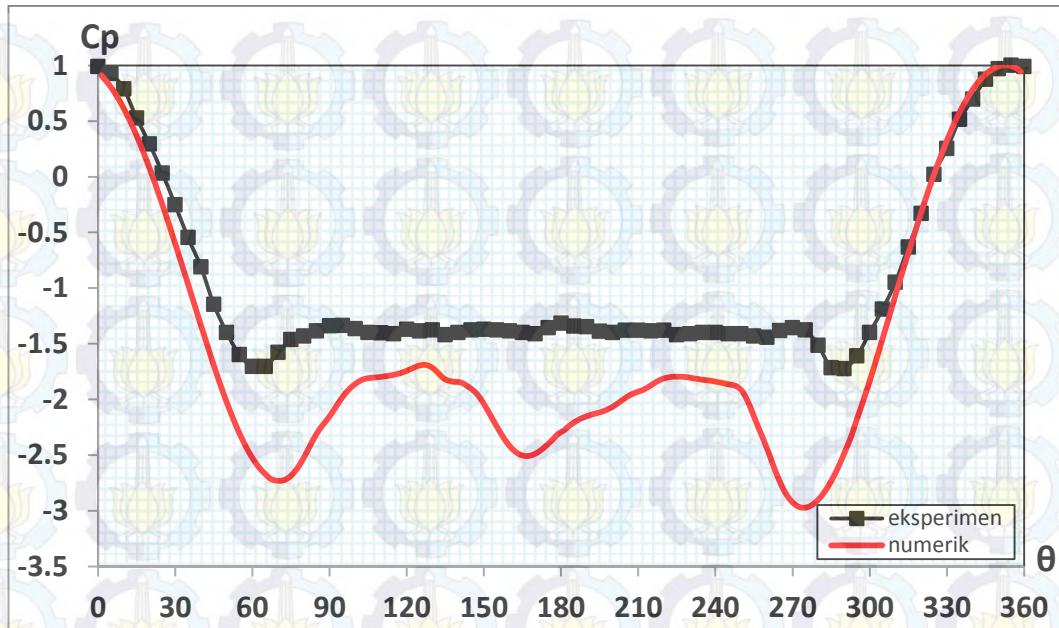


Gambar 4.120. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.120 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.120 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder tidak simetri, dan ada satu titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 305^\circ$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *lowerside* kontur silinder-2. Sementara distribusi tekanan seluruhnya memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shear layer melingkupi* kontur silinder-2.

Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = -0,02 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,10 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik fenomena *reattachment* juga terjadi, tetapi terjadi lebih awal.

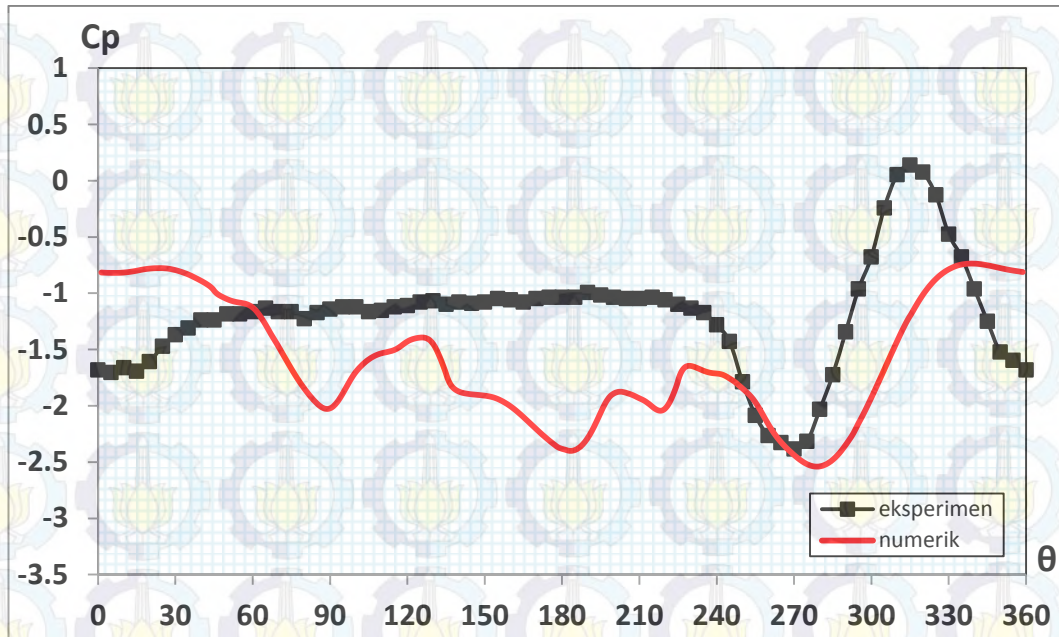




Gambar 4.121. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.121 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.121 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif lebih simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 65^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^\circ$  pada *lowerside*. Penempatan dinding yang menjauhi silinder membuat efek *blockage* semakin melemah, walaupun posisi titik stagnasi masih terjadi pada  $\theta_s= 355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{Sp}= 270^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta= 95^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,21 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,09 untuk silinder-3.

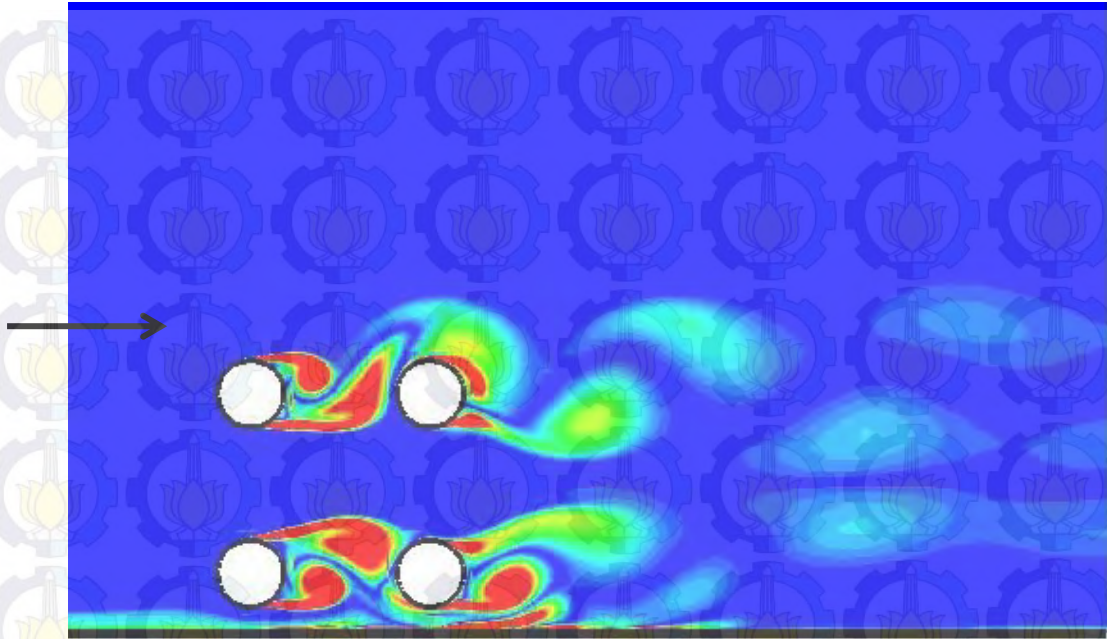
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.



Gambar 4.122. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

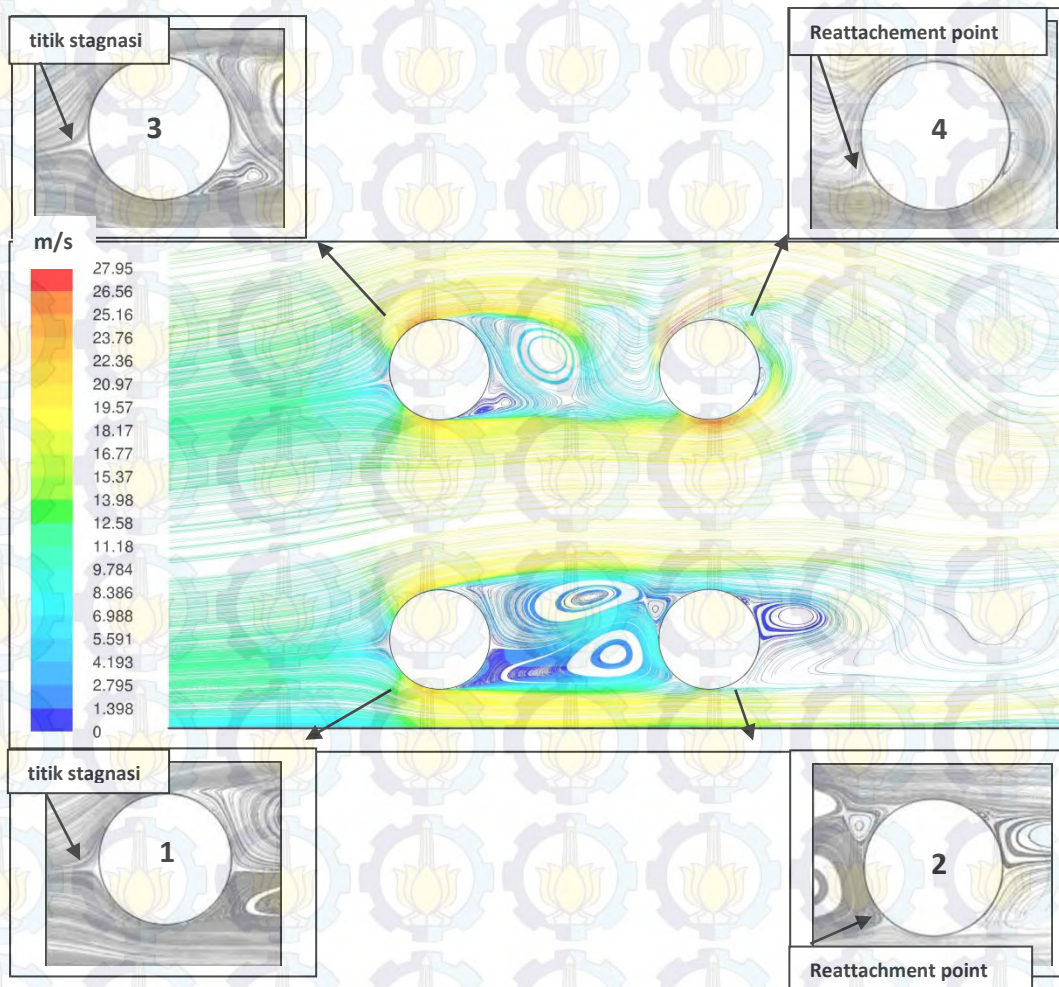
Gambar 4.122 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari gambar 4.122 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum yaitu pada  $\theta= 315^0$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream*. Sementara distribusi tekanan untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder seluruhnya dilingkupi dari *shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,00 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,09 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, terdapat kesesuaian walaupun fenomena *reattachment* berlangsung lebih awal.



Gambar 4.123. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$

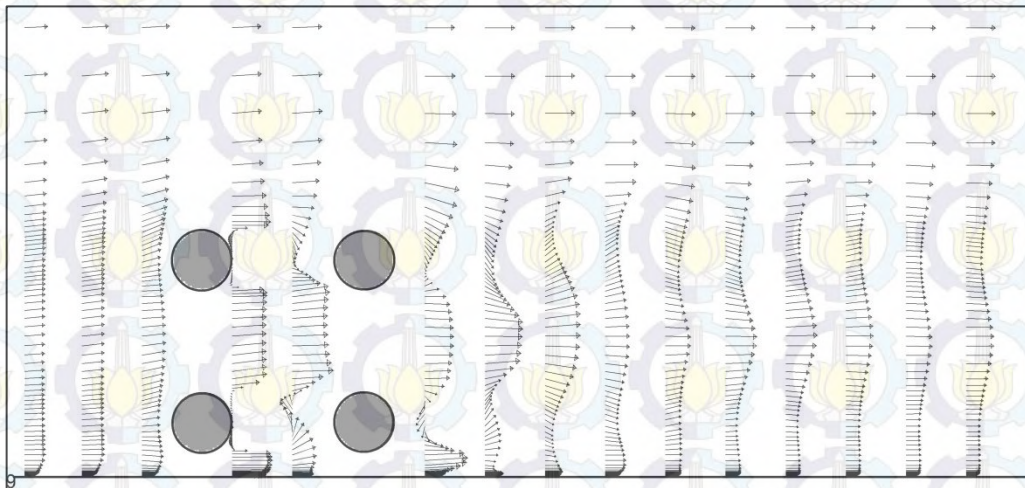
Gambar 4.123 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Melalui Gambar 4.123 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, mulai terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna. Dengan posisi silinder yang relatif lebih jauh dari dinding membuat *free shear layer* dari kedua silinder mulai membentuk *vortice*. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* yang terbentuk belum teratur.



Gambar 4.124: Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,4$

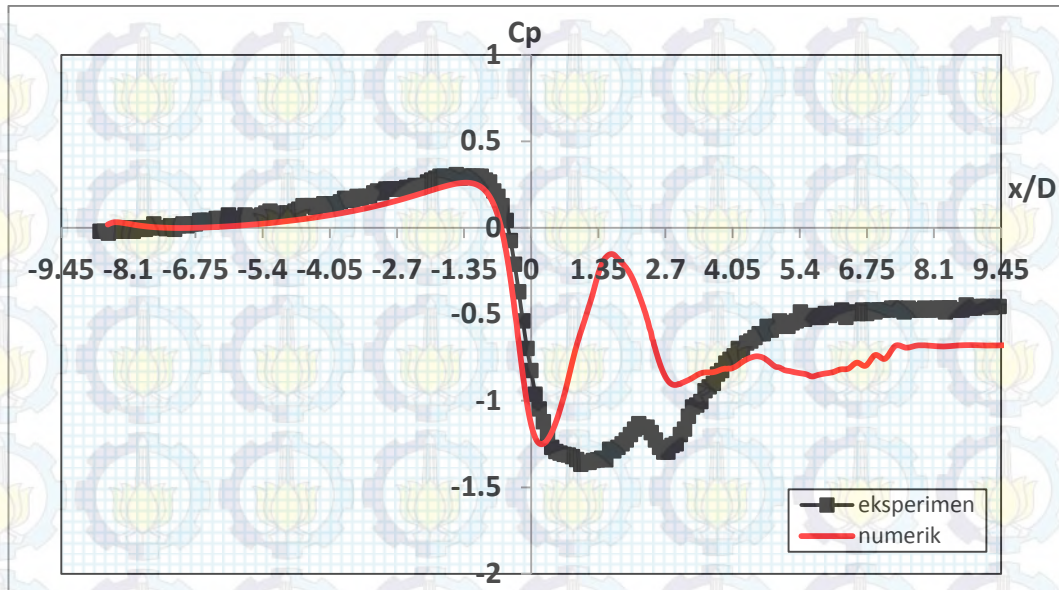
Gambar 4.124 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$ . Dari Gambar 4.124 dapat dilihat penempatan dinding yang relatif cukup jauh terhadap silinder membuat separasi *bubble* dan menimbulkan efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 hilang. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *frontside* silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang relatif besar, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum yang cukup besar, ditandai dengan *free shear layer* dari silinder *upstream* membentuk *vortices shed*.

Sementara pada silinder upper, silinder-3 dan silinder-4, berkurangnya momentum aliran di gap antara silinder-1 dan silinder-3 membuat percepatan aliran pada *lowerside* silinder-3 menurun. Disisi lain mulai terjadi peningkatan percepatan aliran pada *upperside* silinder-3, hal ini ditunjukkan dari posisi separasi pada *upperside* yang terjadi lebih mundur. Walaupun demikian titik stagnasi pada silinder-3 masih terjadi pada *lowerside* silinder.



Gambar 4.125. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$

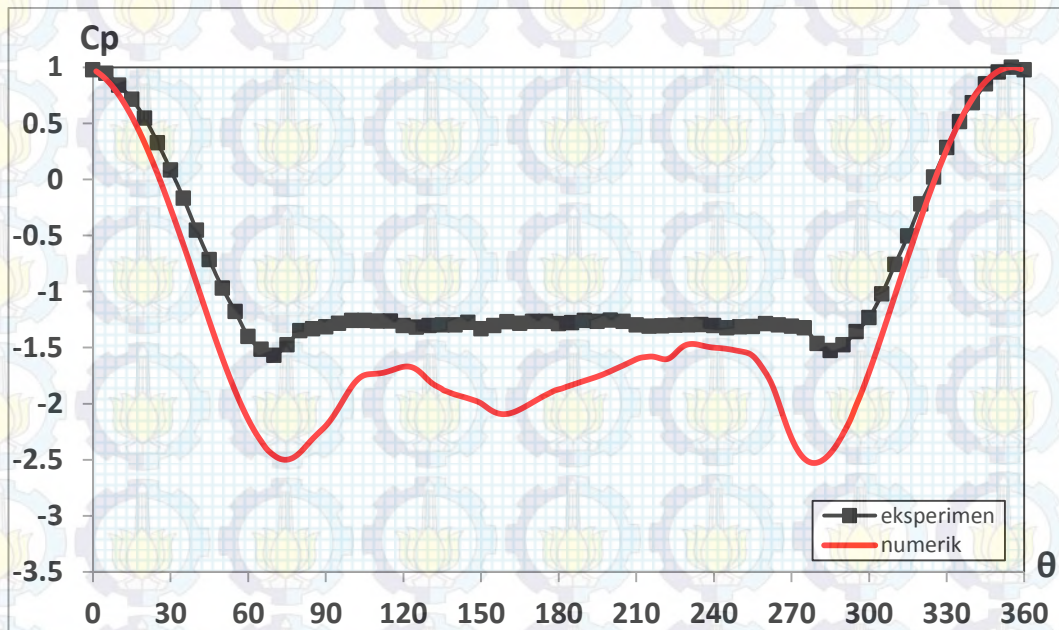
Gambar 4.125 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,4$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui gambar 4.125 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran sejajar dengan streamwise, hal ini dikarenakan dinding sudah tidak menimbulkan *blockage*. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.126. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D=0,4$  pada Bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.126 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,4$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi *static pressure* pada  $x/D \geq 5,5$  dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

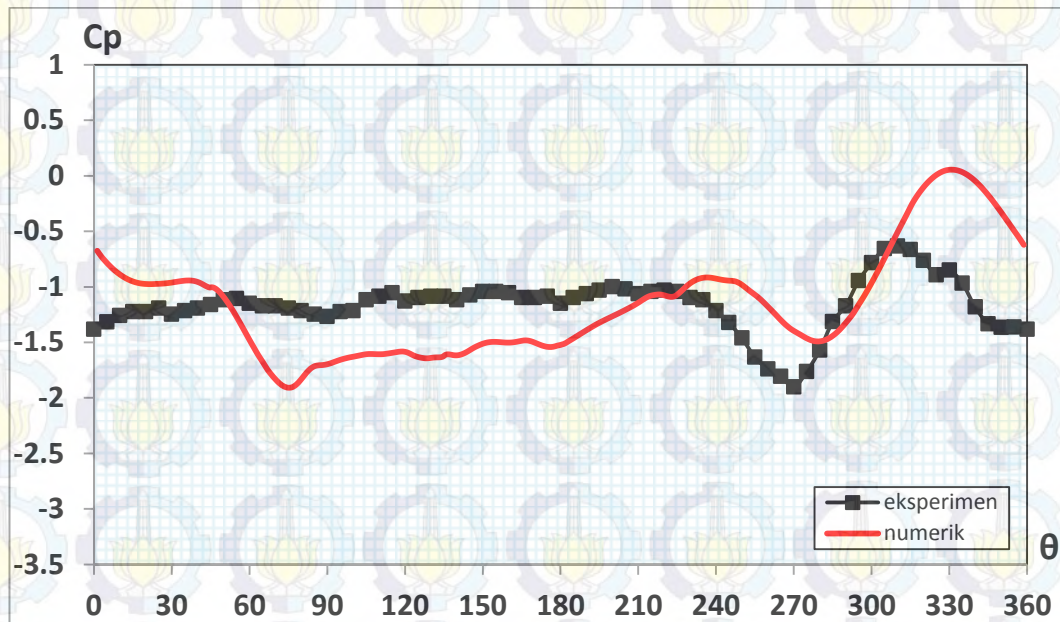
f. Pada  $G/D= 0,5$



Gambar 4.127. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.127 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$ . Melalui Gambar 4.127 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder relatif simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 65^\circ$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 285^\circ$ . Dengan jarak penempatan silinder yang semakin jauh dari dinding, maka efek *blockage* semakin melemah. Walaupun demikian posisi titik stagnasi masih berada pada *outer-side* silinder yaitu  $\theta_s = 355^\circ$ . Celah yang relatif besar antara *lowerside* silinder dengan dinding,  $G/D= 0,5$ , membuat momentum fluida yang mengalir pada *upperside* dan *lowerside* silinder relatif sama ditandai dari posisi separasi terjadi pada  $\theta_{sp}= 85^\circ$  dan  $265^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1.26 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,05 untuk silinder-1.

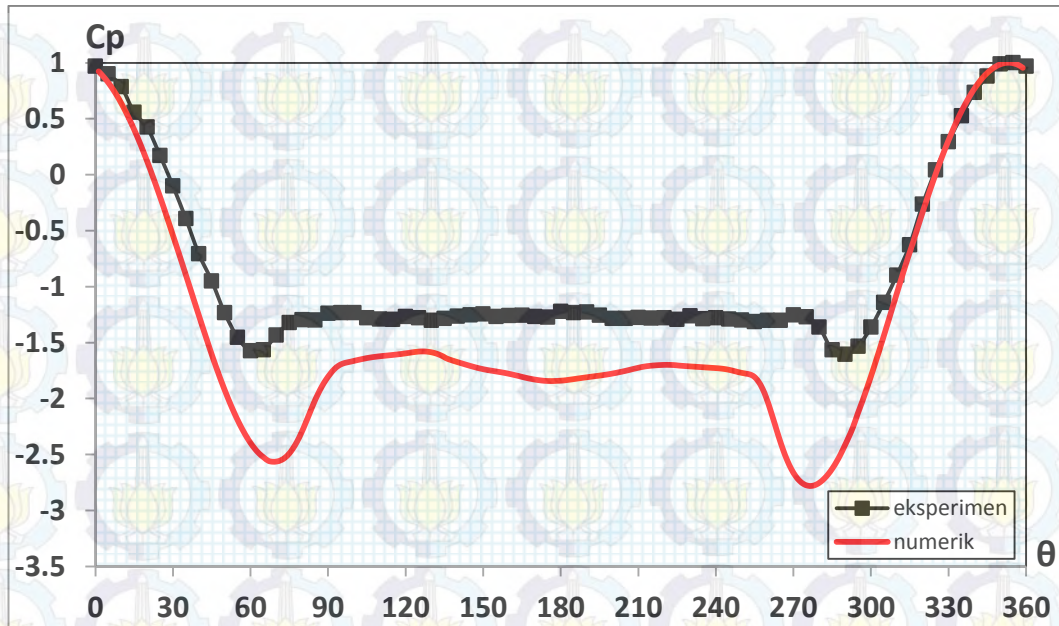
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang kurang sesuai, terutama pada daerah wake.



Gambar 4.128. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.128 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.128 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki satu titik maksimum dimana harga tekanan maksimum terletak  $\theta= 305^0$ . Hal ini menandakan terjadinya fenomena *reattachment point* pada *lowerside* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = -0,03 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,06 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi fenomena *reattachment* tetapi berlangsung lebih awal.

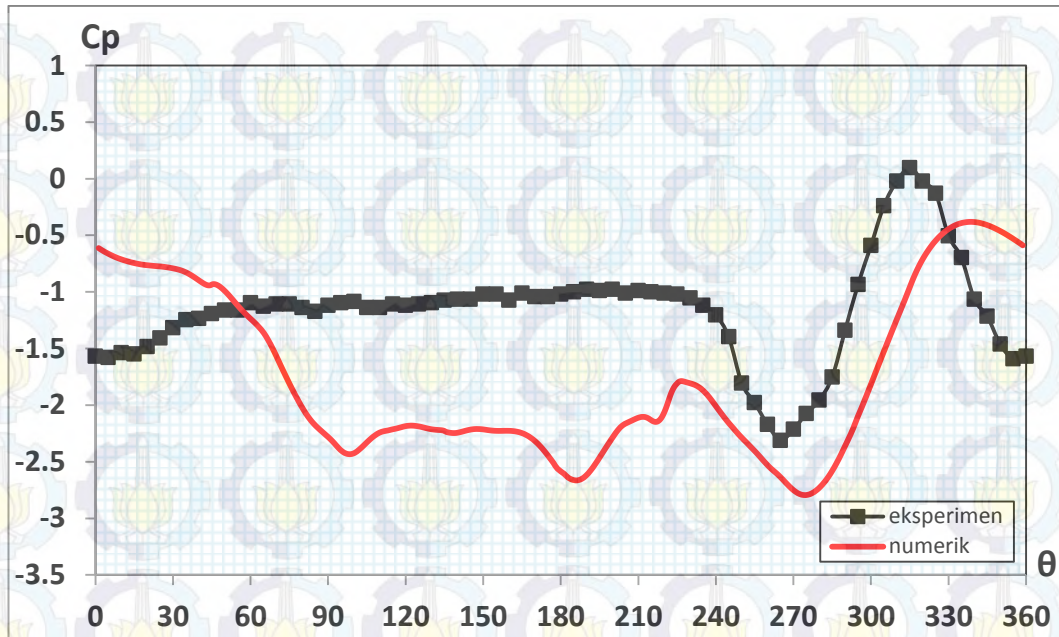




Gambar 4.129. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.129 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.129 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini belum simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 65^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta= 290^\circ$  pada *lowerside*. Penempatan silinder yang menjauhi dinding membuat efek *blockage* sudah semakin melemah. Walaupun demikian posisi titik stagnasi masih terjadi pada  $\theta_s= 355^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 270^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 85^\circ$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,16 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,06 untuk silinder-3.

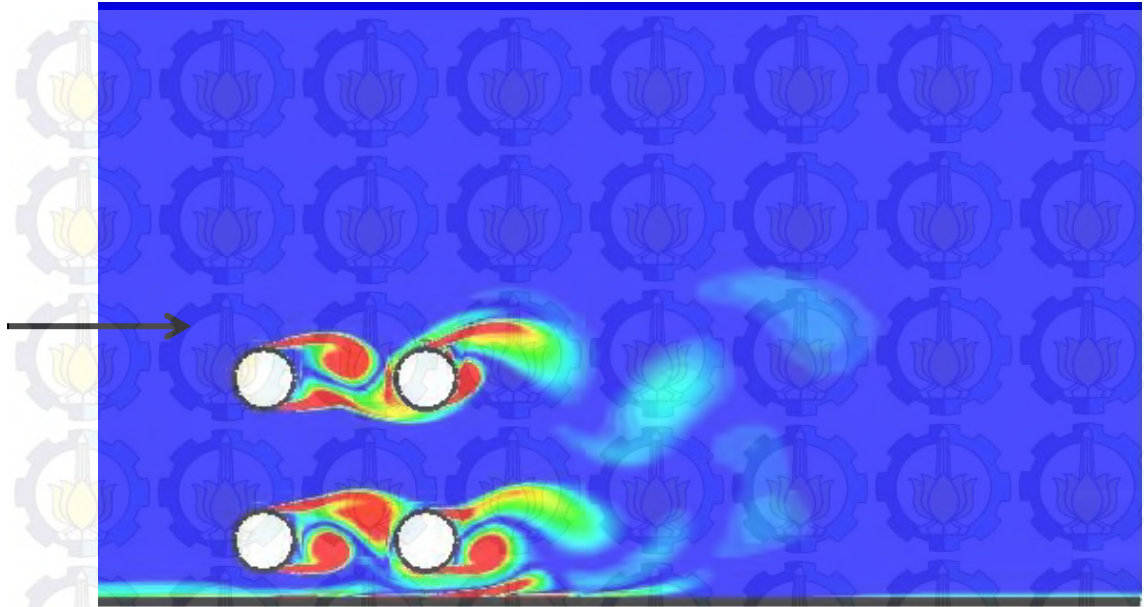
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai, meskipun akselerasi yang terjadi pada *upperside* dan *lowerside* silinder yang diperoleh metode numerik ini jauh lebih tinggi.



Gambar 4.130. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 0,5$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

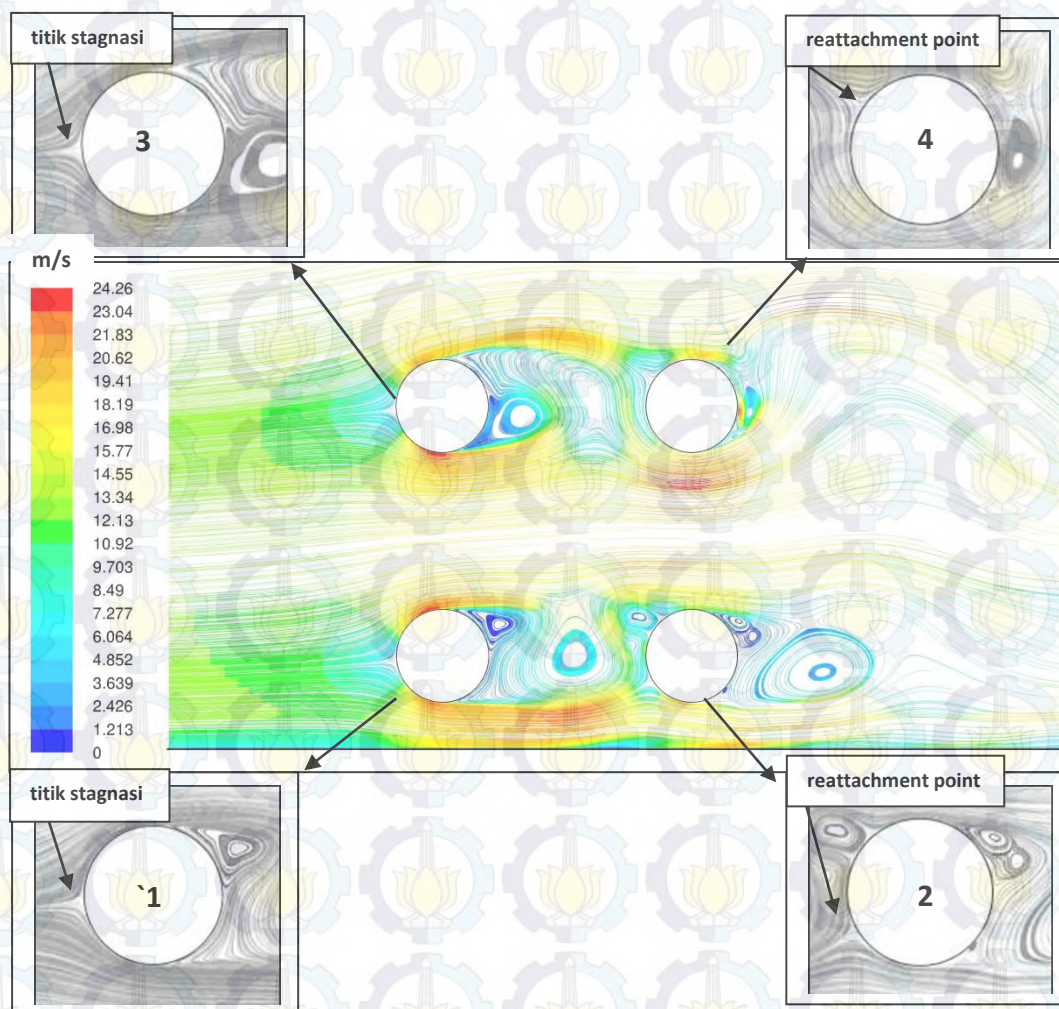
Gambar 4.130 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$ . Dari Gambar 4.130 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum positif, yaitu pada  $\theta= 315^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder upstream. Distribusi tekanan untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, dan ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder seluruhnya dilingkupi dari *shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,00 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,08 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung pada lebih awal.



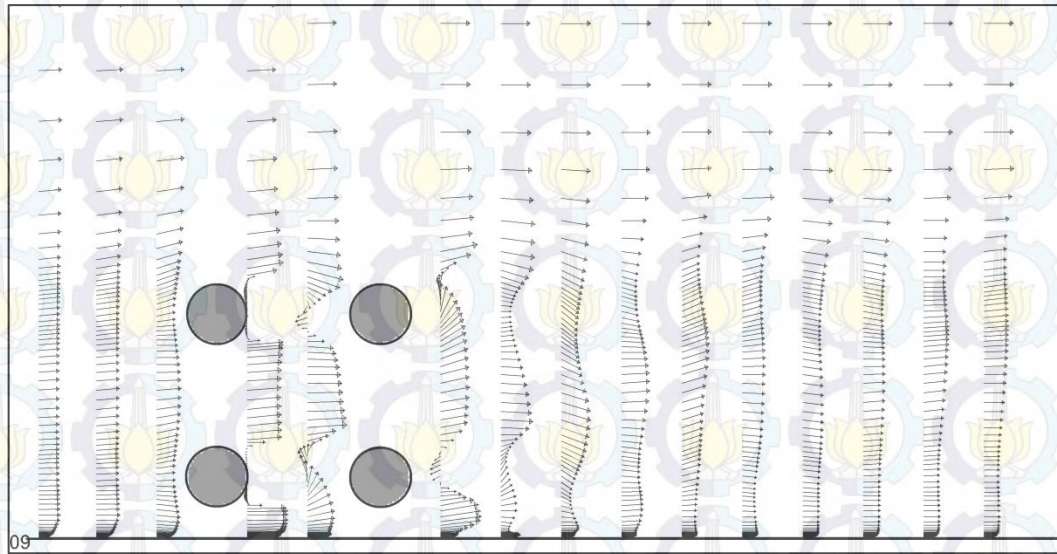
Gambar 4.131. Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,5$

Gambar 4.131 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,5$ . Melalui Gambar 4.131 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, sudah terbentuk *vortices shed* walaupun belum teratur. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 terbentuk *vortices shed*, walaupun *vortices shed* dari silinder-4 yang terbentuk belum teratur.



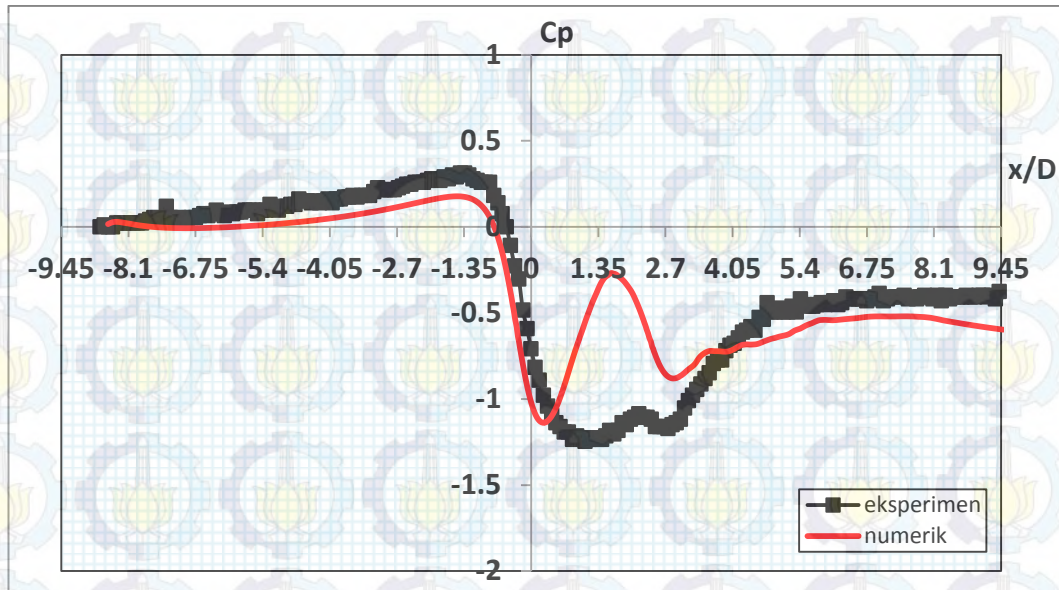
Gambar 4.132. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 0,5$

Gambar 4.132 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$ . Penempatan silinder yang relatif cukup jauh,  $G/D= 0,5$  terhadap dinding membuat separasi *bubble* dan dampak yang ditimbulkan yaitu efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 semakin melemah. Akibatnya perubahan aliran dari laminar ke turbulen menjadi lambat, walaupun titik stagnasi masih bergeser ke *inner-side* menjauhi *front-side* silinder. Sedangkan celah antara *lowerside* silinder-1 dan dinding yang relatif besar, membuat aliran yang melalui celah tersebut memiliki momentum yang cukup besar, ditandai dengan *free shear layer* dari silinder *upstream* membentuk *vortices shed*.



Gambar 4.133. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada Susunan 4 Silinder *In-Line Square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$

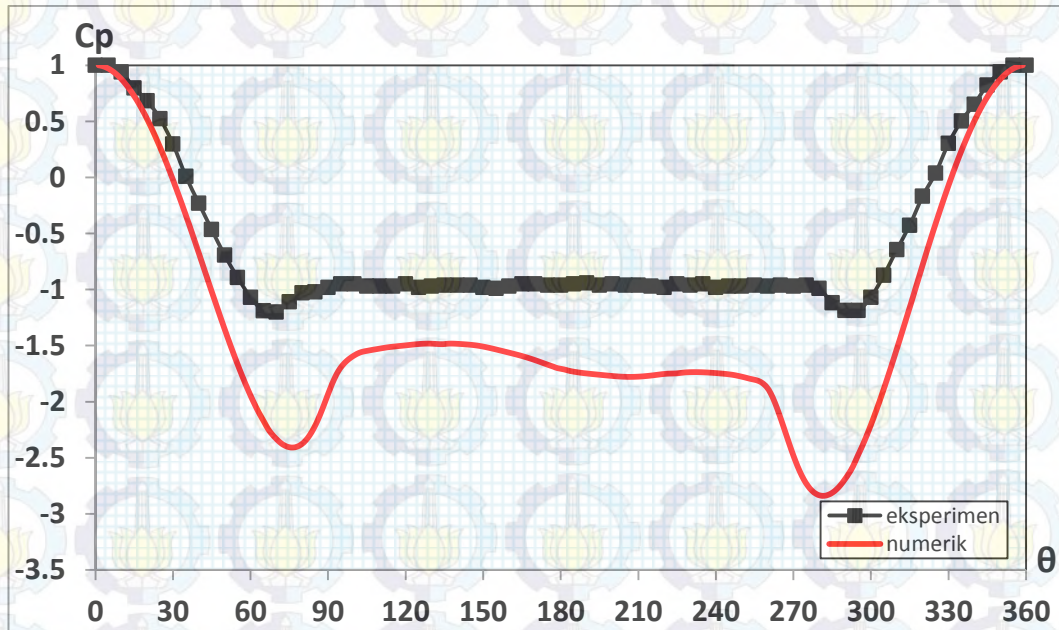
Gambar 4.133 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 0,5$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.133 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor *free stream* aliran sudah sejajar dengan *streamwise*, hal ini dikarenakan dinding sudah tidak menimbulkan *blockage*. Juga terlihat pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.134. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D=0,5$  pada bilangan Reynolds  $Re=5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.134 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=0,5$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 4,5$ .

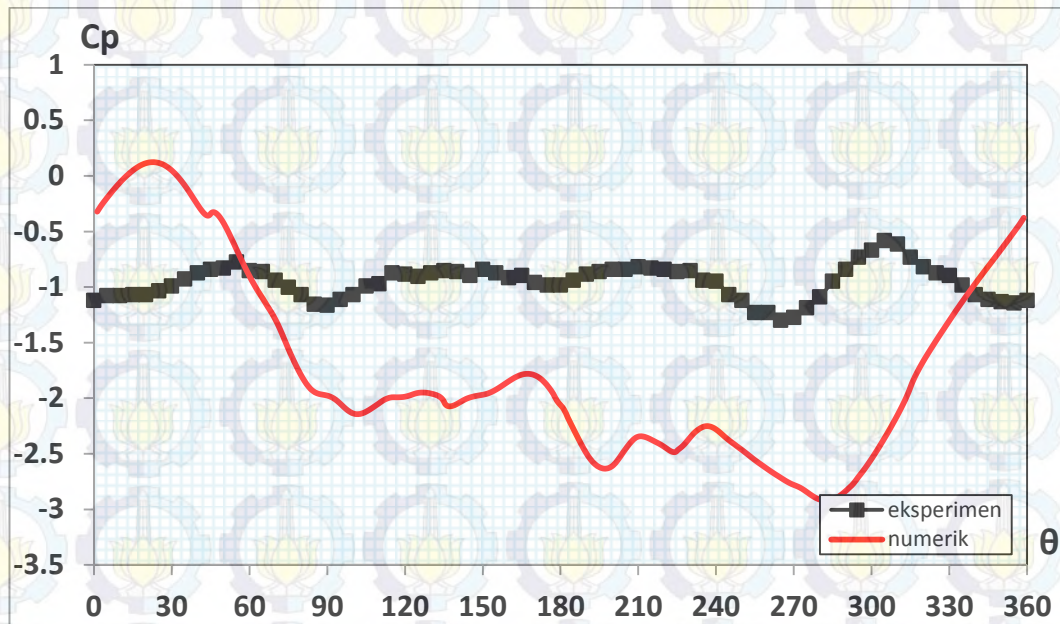
g. Pada  $G/D= 1,0$



Gambar 4.135. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-1** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.135 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-1 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$ . Melalui Gambar 4.135 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder simetri. Hal ini ditunjukkan dari posisi tekanan minimum pada *upperside*  $\theta= 70^0$ , sementara pada *lowerside*  $\theta= 290^0$ . Ini berarti bahwa aliran yang menuju ke silinder-1 tegak lurus terhadap silinder. Dengan jarak penempatan silinder terhadap dinding sebesar  $G/D= 1,0$  menyebabkan efek *blockage* pada *upstream* silinder sudah tidak ada, dan posisi titik stagnasi tepat berada pada *front-side* silinder yaitu  $\theta_s = 360^0$ . Momentum fluida yang mengalir pada *upperside* dan *lowerside* silinder sama ditandai dari masing-masing posisi separasi terjadi pada  $\theta_{sp}= 70^0$  dan  $290^0$ . Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 1,06 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,01 untuk silinder-1

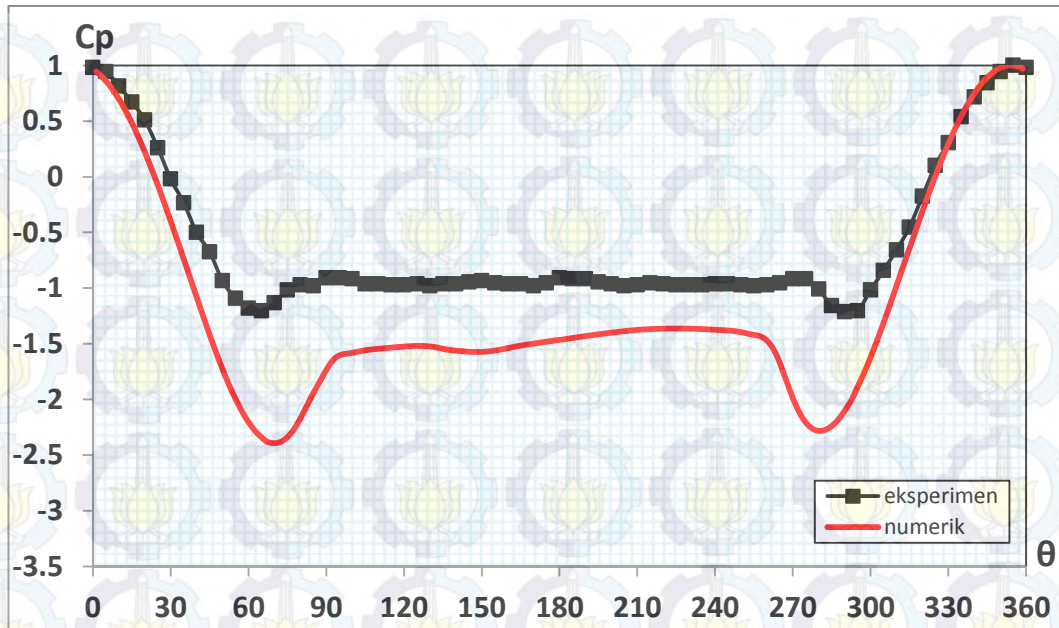
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada *upstream* silinder-1 yang diperoleh melalui metode eksperimen jika dibandingkan dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai.



Gambar 4.136. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-2** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.136 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-2 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.136 terlihat bahwa distribusi tekanan dari kontur silinder memiliki satu titik dimana tekanan maksimum terletak  $\theta= 305^\circ$ . Distribusi tekanan memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shear layer melingkupi* kontur silinder-2. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = -0,04 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,01 untuk silinder-2. Sementara dengan metode numerik terjadi sebaliknya, fenomena *reattachment* terjadi, yang ditandai dengan harga distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) nya positif.

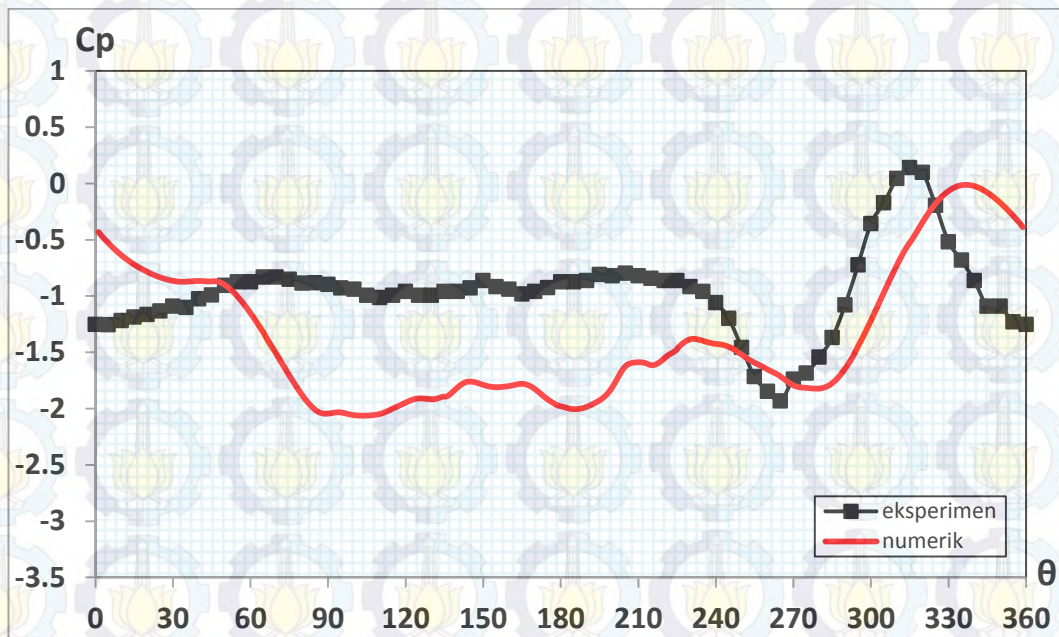




Gambar 4.137. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream* **Silinder-3** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

Gambar 4.137 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *upstream* silinder-3 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari gambar 4.137 terlihat bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder ini relatif simetri, hal mana ditunjukkan dari posisi tekanan minimum  $\theta= 60^\circ$  pada *upperside* dan  $\theta= 300^\circ$  pada *lowerside*. Penempatan silinder terhadap dinding pada  $G/D= 1,0$  membuat efek *blockage* sudah tidak ada, dan posisi titik stagnasi terjadi pada  $\theta_s= 360^\circ$  dan titik separasi  $\theta_{sp}= 270^\circ$ . Sementara akselerasi aliran pada *upperside* bertambah, hal mana ditunjukkan dari posisi titik separasi  $\theta_{sp}= 90^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa aliran yang menuju ke silinder-3 sejajar *streamwise* terhadap silinder. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,99 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= 0,05 untuk silinder-3.

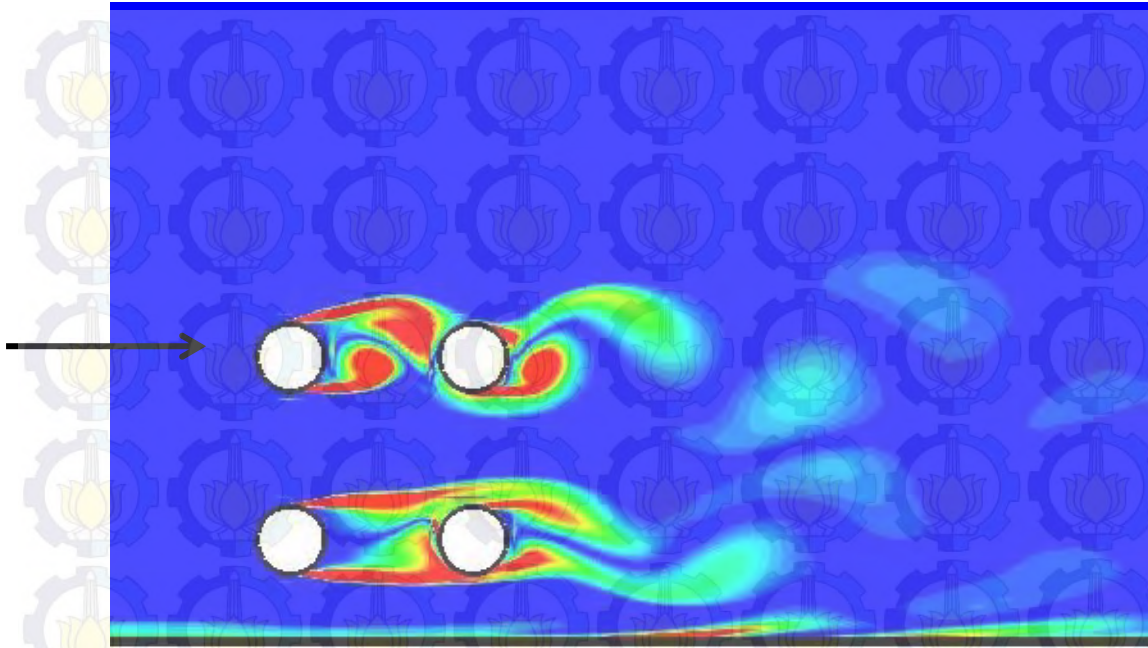
Distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ )=  $f(\theta)$  pada silinder-3 yang diperoleh melalui metode eksperimen dibanding dengan metode numerik memiliki tren yang sesuai dan sama.



Gambar 4.138. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream* **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

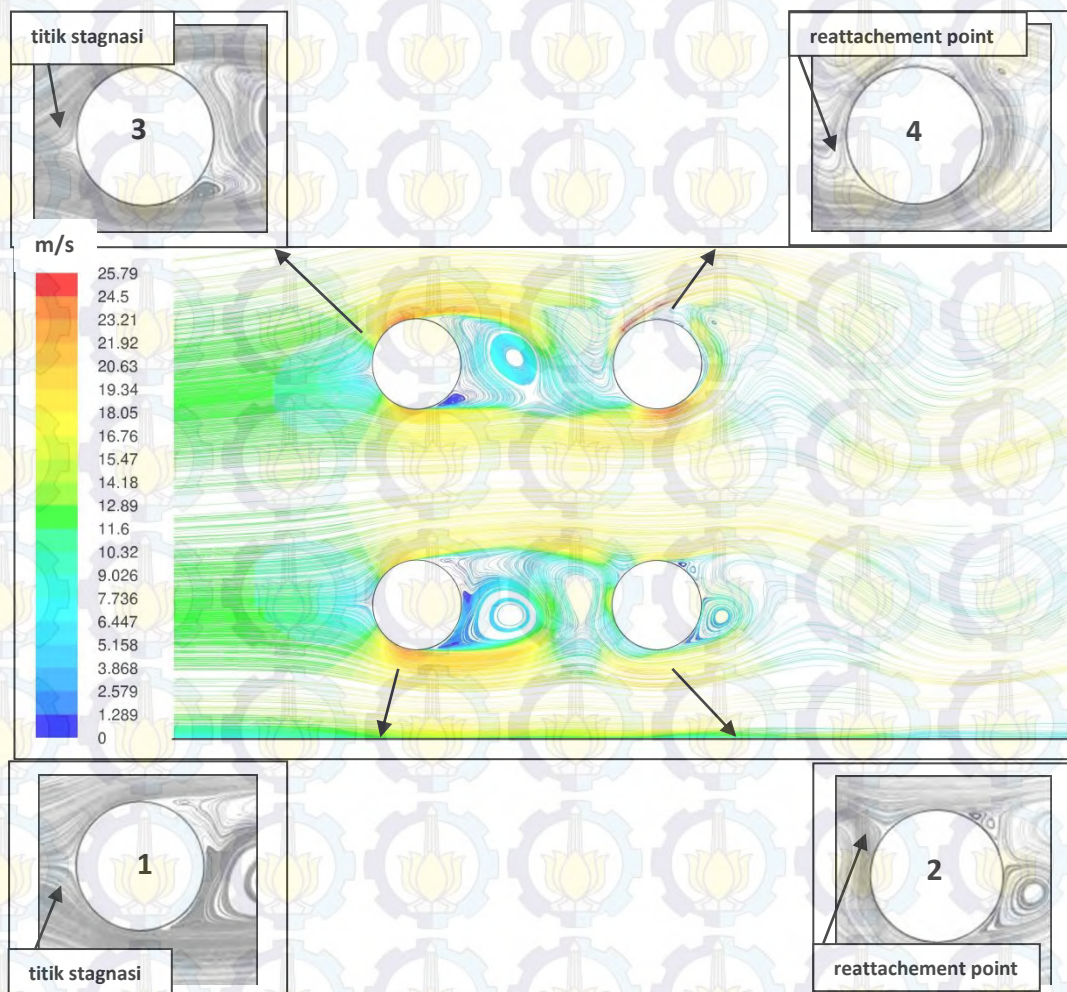
Gambar 4.138 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder *downstream* silinder-4 dari susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.138 terlihat bahwa distribusi tekanan kontur silinder-4 memiliki satu harga tekanan maksimum yaitu pada  $\theta= 315^\circ$ . Ini menunjukkan bahwa pada kontur *lowerside* terjadi *reattachment* dari *shear layer* silinder upstream. Distribusi koefisien tekanan  $C_p$  untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder seluruhnya dilingkupi dari *shear layer*. Berdasarkan perhitungan diperoleh harga koefisien drag pressure rata-rata ( $C_{Dp}$ ) = 0,07 dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ )= -0,06 untuk silinder-4.

Dibandingkan dengan distribusi koefisien tekanan yang diperoleh melalui metode numerik, kurang terdapat kesesuaian yakni fenomena *reattachment* berlangsung lebih awal.



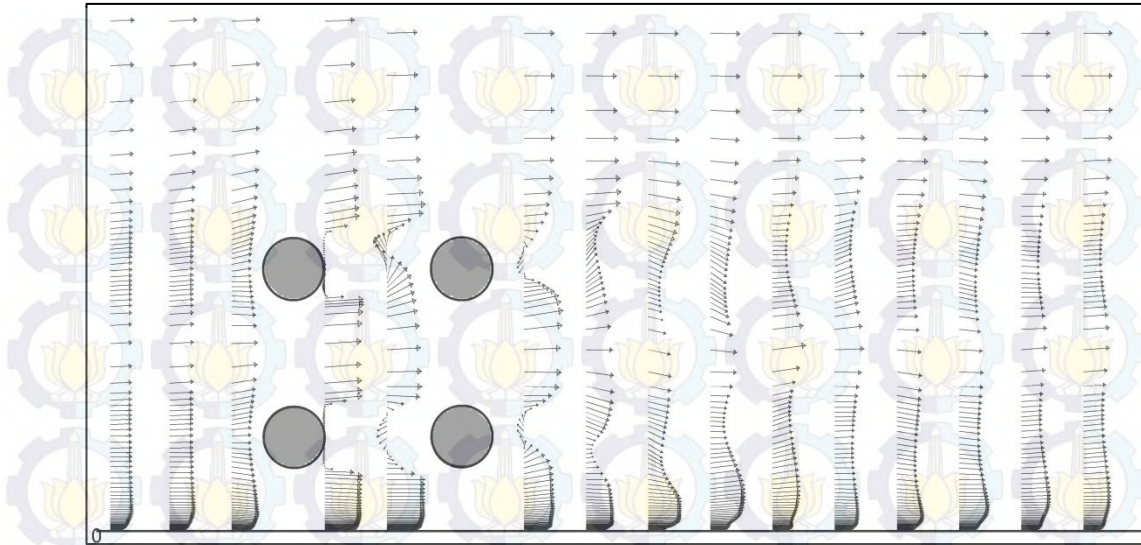
Gambar 4.139: Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=1,0$

Gambar 4.139 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio  $L/D=2,7$  dan  $G/D=1,0$ . Melalui Gambar 4.139 terlihat bahwa pada daerah wake dari kedua silinder lower, silinder-1 dan silinder-2, belum terbentuk *vortices shed*. Sementara pada kedua silinder upper, silinder-3 dan silinder-4 juga terbentuk *vortices shed*, meskipun pada daerah wake silinder-4 tidak sempurna.



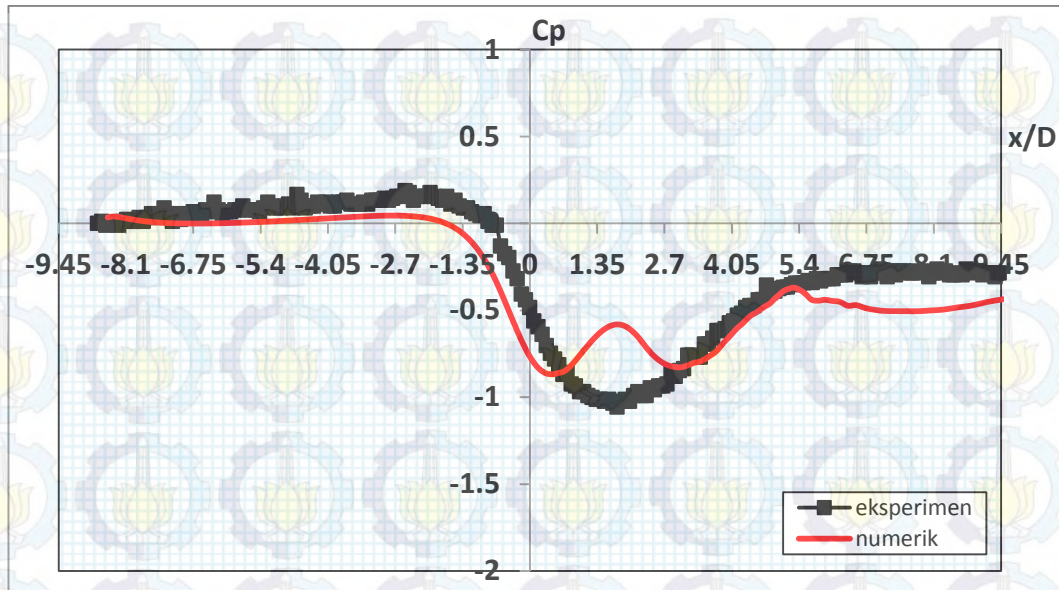
Gambar 4.140. Visualisasi *Velocity Pathline* pada  $L/D= 2,7$ ,  $G/D= 1,0$

Gambar 4.140 menunjukkan visualisasi *velocity pathline* pada susunan empat silinder dekat dinding dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$ . Dari Gambar 4.140 dapat dilihat penempatan silinder pada  $G/D= 1,0$  terhadap dinding membuat tidak timbulnya separasi *bubble* sehingga efek *blockage* pada *upstream* silinder-1 tidak terjadi. Aliran free stream mengalir sejajar streamwise terhadap silinder *upstream*, hal mana dapat diketahui dari posisi titik stagnasi dari kedua silinder tepat berada pada *front-side* silinder. Sama halnya juga aliran yang mengalir pada celah antara silinder dan pada *upperside* dari silinder-3 juga memiliki momentum yang sama, sehingga distribusi koefisien tekanan pada kontur *lowerside* dan *upperside* juga sama, dengan demikian dinding sudah tidak mempengaruhi aliran pada kedua sisi.



Gambar 4.141. Visualisasi Aliran berupa *Velocity Vector* pada susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$

Gambar 4.141 menunjukkan visualisasi aliran berupa *velocity vector* melintasi susunan 4 silinder *in-line square* pada  $L/D= 2,7$  dan  $G/D= 1,0$  dengan posisi  $x/D= -1,0 \div -3,0$ ,  $x/D= 0,5 \div 1,35$  dan  $x/D= 3,7 \div 12,7$ , dimana  $x/D= 0$  adalah *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.141 terlihat evolusi vektor *velocity* aliran ketika akan melintasi susunan silinder-1, pada posisi  $x/D= -1,0$  vektor free stream aliran sejajar dengan streamwise, hal ini dikarenakan dengan dinding tidak menimbulkan *blockage*. Juga pada bagian wake silinder-2 tidak terlihat fenomena *recirculation region*.



Gambar 4.142. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D= 1,0$  pada Bilangan Reynolds  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Eksperimen dan Numerik 3D-URANS

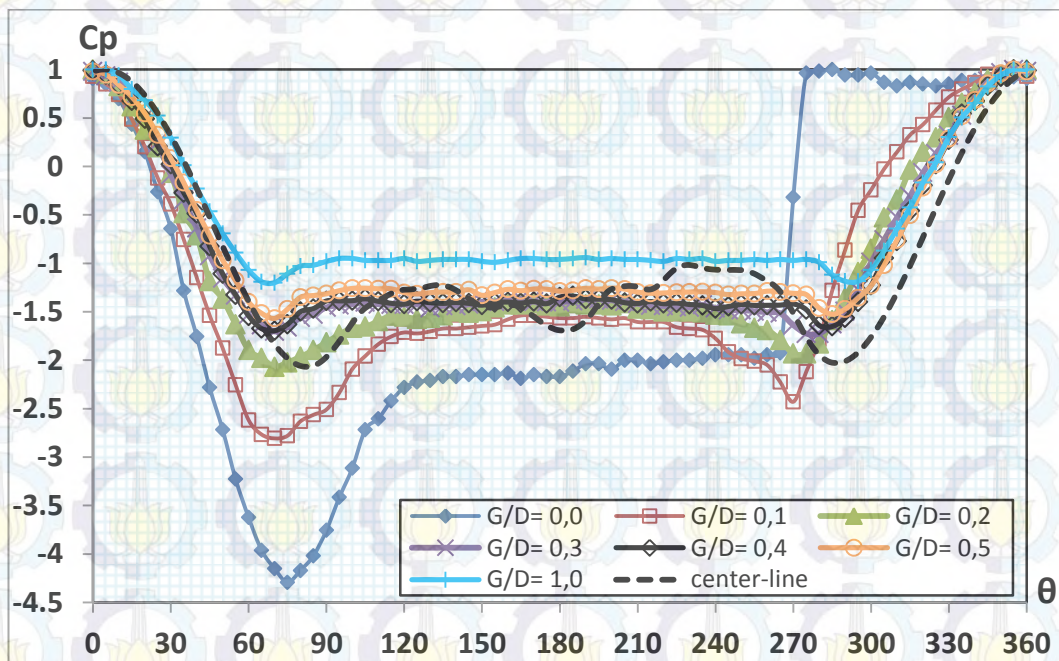
Gambar 4.142 menunjukkan distribusi koefisien tekanan pada dinding dekat susunan empat silinder dengan rasio  $L/D= 2,7$  dan  $G/D=1,0$ . Keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** yang dekat dinding pada posisi ini sudah tidak menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* silinder dan dinding. Hal mana ditunjukkan dengan harga tekanan yang positif pada *upstream* silinder, sementara pada *downstream* silinder, ditunjukkan dari dua nilai tekanan minimum pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan ini recover menjadi static pressure pada  $x/D \geq 4,5$ .

### 3. Perbandingan Hasil dan Analisa Susunan Empat Silinder Sirkular In-line Square ( $L/D=2,7$ ) Dekat Dinding Dengan Variasi $G/D=0,0 \div 0,5$ dan $1,0$ )

Berikutnya akan disampaikan analisa perbandingan hasil eksperimen pada susunan empat silinder dengan rasio spasi  $L/D=2,7$  pada variasi rasio gap  $G/D=0,0 \div 0,5$  dengan interval  $0,1$  dan  $1,0$ , dan hasil simulasi pada rasio spasi  $L/D=2,7$  di center-line. Urut-urutan penyajian meliputi: a) analisa perbandingan distribusi tekanan di kontur silinder dan plat datar; b) analisa perbandingan koefisien drag ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift ( $C_{Lp}$ ) kontur masing-masing silinder; c) analisa perbandingan bilangan Strouhal; dan d) analisa perbandingan profil kecepatan di daerah wake silinder downstream.

#### a. Perbandingan distribusi koefisien tekanan di kontur silinder dan plat datar pada variasi rasio gap ( $G/D$ )

Karakteristik aliran seperti distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) memberikan informasi tentang evolusi tekanan pada masing-masing permukaan kontur silinder dan dinding.



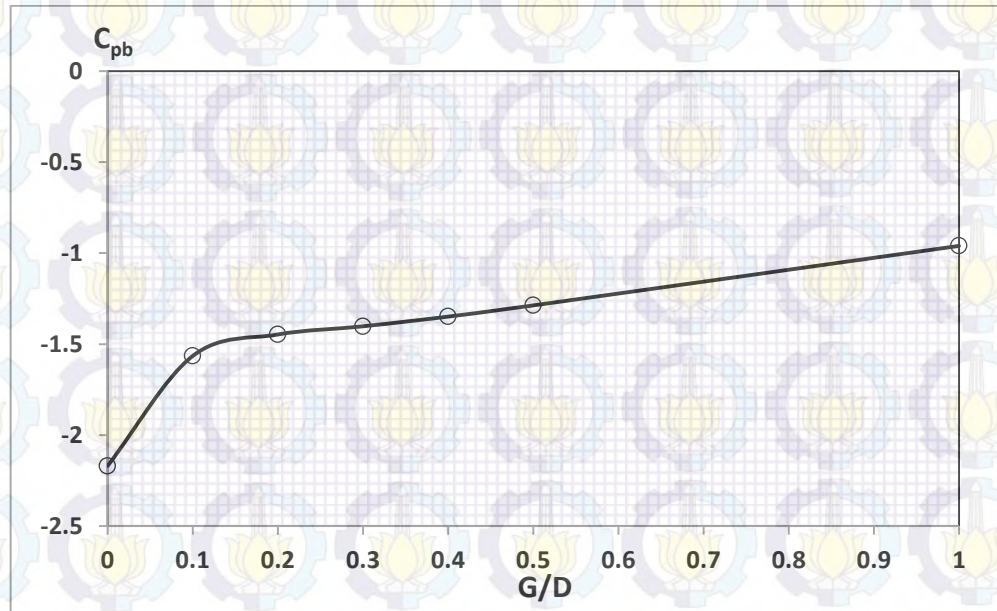
Gambar 4.143. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.143 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-1** antara susunan empat silinder dekat dinding pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di *center-line*. Melalui Gambar 4.143 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) mempengaruhi distribusi tekanan dari kontur silinder, dimana distribusi tekanan kontur silinder tidak simetri ketika rasio  $G/D= 0,0$  atau silinder menyentuh dinding, dan mulai berubah menjadi simetri ketika rasio  $G/D$  meningkat, dan akhirnya simetri ketika rasio  $G/D= 1,0$ . Hal ini ditandai dari titik stagnasi ( $\theta_s$ ) pada **silinder-1** untuk 7 (tujuh) variasi rasio  $G/D$  mulai dari  $0,0 \div 0,5$  dan  $1,0$  masing-masing menunjukkan posisi yang berbeda, dimana pada rasio yang terkecil  $G/D= 0,1$  hingga rasio yang terbesar  $G/D= 1,0$  posisi  $\theta_s$  berpindah dari *outer-side*  $\theta_s= 355^0$  menuju ke *front-side* silinder,  $\theta_s= 360^0$ . Bergesernya titik ini dikarenakan adanya efek *blockage* pada *upstream silinder-1* ketika silinder didekatkan pada dinding, dan ini membuat sebagian besar momentum fluida akan terdefleksi ke *upperside* dari silinder. Sementara pada rasio  $G/D= 0,0$  atau silinder menyentuh dinding, fluida sama sekali tidak dapat mengalir atau terhenti pada *lowerside*, mengakibatkan seluruh momentum fluida terdefleksi ke *upperside* silinder sehingga titik stagnasi terjadi pada  $\theta= 350^0$ . Tetapi pada rasio  $G/D= 1,0$  posisi titik stagnasi tepat berada di depan ( $\theta= 0^0$ ), ini berarti bahwa pada rasio tersebut efek *blockage* sudah tidak terjadi.

Melalui gambar tersebut juga terlihat adanya perbedaan nilai tekanan minimum yang terjadi pada masing-masing rasio, dimana nilai tekanan minimum terendah terjadi pada rasio yang terkecil,  $G/D= 0,0$ , dan secara gradual bertambah ketika rasio ini meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi percepatan atau akselerasi aliran terbesar di silinder pada rasio terkecil. Peningkatan nilai tekanan minimum terbesar terjadi pada rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , sementara pada rasio gap  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$  nilai tekanan minimumnya relatif tetap. Dan baru meningkat kembali pada rasio gap  $G/D \geq 1,0$ . Ini berarti efek *blockage* dari dinding relatif sudah semakin melemah ketika rasio gap  $G/D \geq 0,3$ , sehingga tidak terjadi percepatan aliran pada *upperside* silinder.



Dibanding dengan susunan di *center-line*, percepatan aliran pada *upperside* silinder lebih besar dari *lowerside* silinder. Hal ini ditandai posisi titik stagnasi ( $\theta_s$ ) yang terjadi pada *inner-side* silinder.

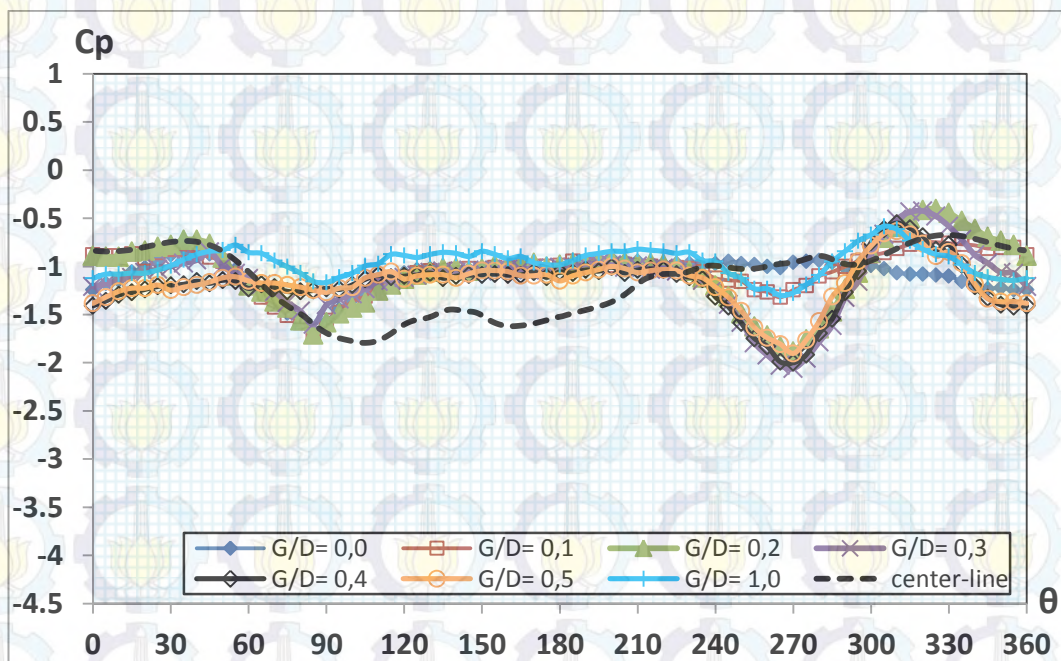


Gambar 4.144. Perbandingan Distribusi Koefisien *Base Pressure* ( $C_{pb}$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.144 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ) pada kontur **silinder-1** untuk 7 (tujuh) variasi rasio gap ( $G/D$ ). Melalui Gambar 4.144 terlihat bahwa rasio  $G/D$  juga mempengaruhi harga koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ), dimana pada rasio terkecil harga dari  $C_{pb}$  terendah, dan mulai meningkat ketika rasio tersebut bertambah besar. Peningkatan harga  $C_{pb}$  yang terbesar terjadi ketika rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,1$ , setelah itu pada rasio  $0,2 \leq G/D \leq 1,0$  juga terjadi peningkatan harga  $C_{pb}$  walaupun relatif kecil. Hal ini menunjukkan adanya interferensi dari silinder disekitarnya terhadap silinder-1, sehingga tetap terjadi peningkatan harga  $C_{pb}$  ini walaupun relatif kecil ketika silinder sudah tidak terendam dalam lapis batas. Karena menurut penelitian Zdravkovich (1985) pada silinder tunggal dekat dinding, bahwa selama posisi dari silinder terendam dalam lapis batas dinding maka akan berpengaruh terhadap

harga  $C_{pb}$ , dan harga  $C_{pb}$  relatif tetap ketika silinder sudah tidak terendam dalam lapis batas dinding.

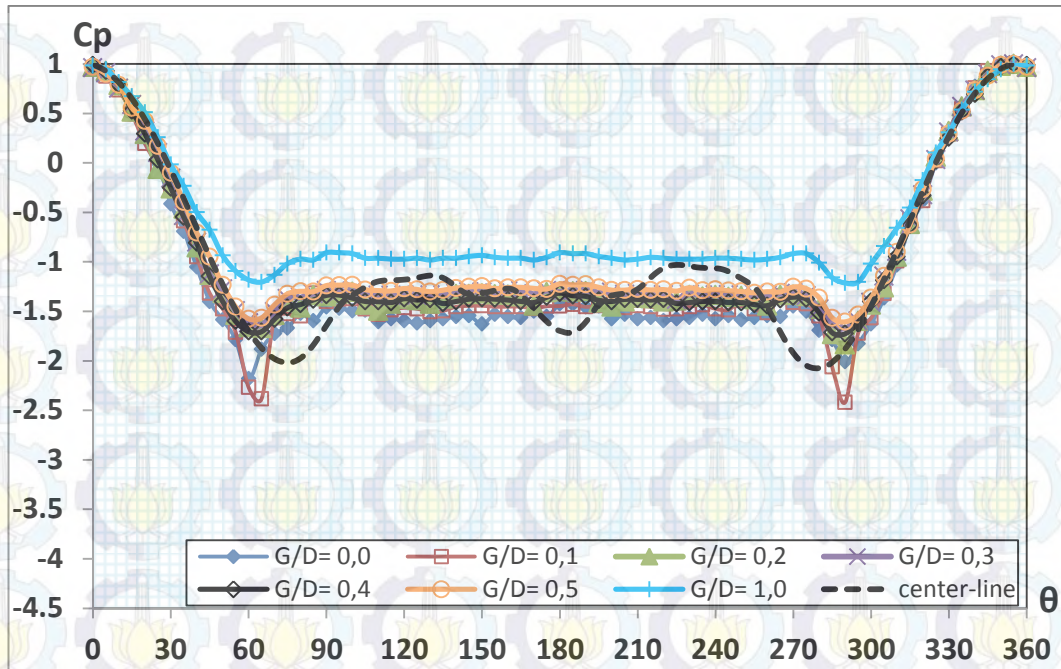
Perubahan harga  $C_{pb}$  ini terkait dengan perubahan titik separasi dari silinder dan perubahan ukuran wake dibelakang silinder. Dengan demikian besaran dari koefisien base pressure ini berkaitan secara langsung dengan besaran koefisien drag ( $C_D$ ) dari silinder, dimana apabila besaran  $C_{pb}$  bertambah kecil maka besaran  $C_D$  silinder akan bertambah besar, ataupun sebaliknya besaran  $C_{pb}$  bertambah besar maka besaran  $C_D$  akan bertambah kecil.



Gambar 4.145. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-2* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.145 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-2** antara susunan empat silinder dekat dinding pada  $L/D=2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di *center-line*. Melalui Gambar 4.145 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) berpengaruh terhadap distribusi tekanan yang terjadi pada **silinder-2**. Pada rasio  $G/D=0,0$ , distribusi tekanan pada kontur silinder berharga negatif, dan terdapat satu tekanan maksimal. Hal ini menunjukkan bahwa pada rasio ini *inner shear layer* dari

silinder *upstream* reattachment pada kontur **silinder-2**, terutama pada *upperside* silinder, sementara pada *lowerside* aliran terhenti. Pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$  distribusi tekanan kontur **silinder-2** menunjukkan adanya dua tekanan maksimal, dimana ini mengindikasikan terjadinya *reattachment* dari *free shear layer* silinder *upstream* pada kontur silinder-2. Pada batasan rasio tersebut, dengan bertambah besarnya rasio  $G/D$  posisi *reattachment* pada *lowerside* kontur silinder terjadi semakin mundur. Hal ini menunjukkan bahwa dengan bertambah besarnya rasio  $G/D$ , momentum aliran di gap nya bertambah besar sehingga *outer shear layer* dari silinder *upstream* posisi *reattachment* pada kontur silinder-2 bergerak ke *lower-side*. Sedangkan pada *upperside* kontur silinder-2 posisi *reattachment* terjadi mundur, ketika rasio  $G/D$  bertambah besar. Hal ini berarti terjadi peningkatan percepatan pada *inner shear layer* silinder *upstream* sehingga menyebabkan posisi *reattachment* pada *upperside* kontur silinder-2 bergerak menjauhi *front-side*. Peningkatan percepatan ini dikarenakan adanya interferensi dari silinder sekitarnya. Selanjutnya pada rasio  $0,4 \leq G/D \leq 1,0$  distribusi tekanan kontur silinder-2 kembali menunjukkan adanya satu tekanan maksimal, tetapi ini berlangsung pada kontur *lowerside* silinder. Dengan semakin besarnya rasio gap membuat *inner shear layer* dari silinder *upstream* *shield on* atau melingkupi kontur *upperside* silinder, sementara *outer shear layer* dari silinder *upstream* reattachment pada kontur *lowerside* silinder.

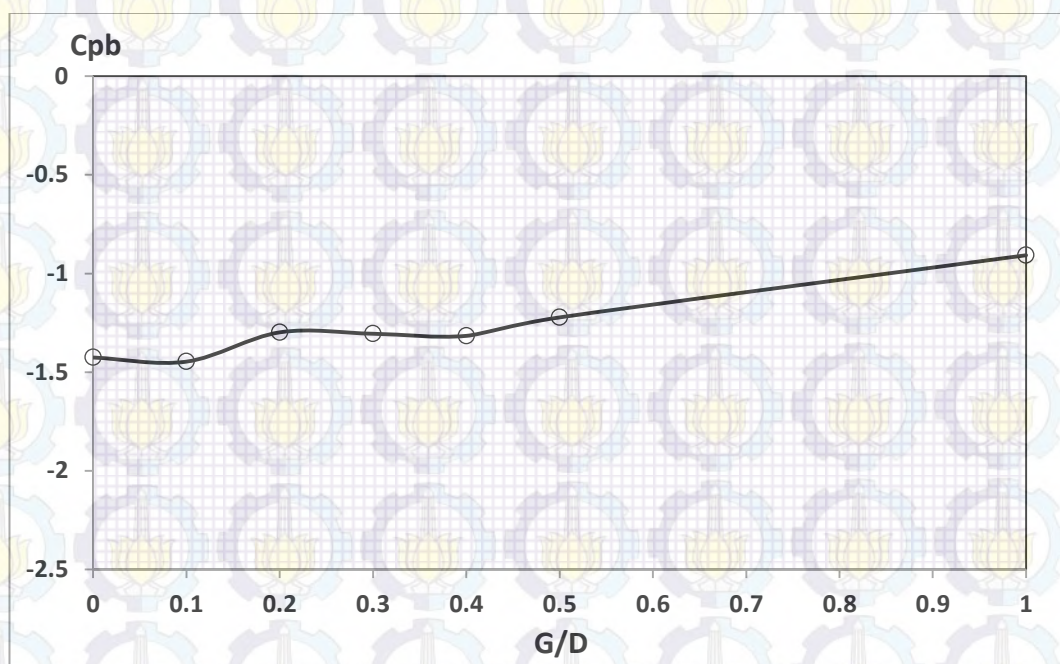


Gambar 4.146. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.146 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-3** antara susunan empat silinder dekat dinding pada  $L/D= 2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di *center-line*. Melalui Gambar 4.146 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) mempengaruhi distribusi tekanan dari kontur silinder, sehingga distribusi tekanan dari kontur relatif tidak simetri, ini ditandai dari posisi titik stagnasi ( $\theta_s$ ) yang berada pada *inner-side* silinder,  $\theta_s = 350^\circ$ . Sementara pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,5$ , distribusi tekanan dari kontur relatif lebih simetri, ini diketahui melalui posisi titik stagnasi yang berpindah ke *front-side* silinder  $\theta_s= 355^\circ$ . Dan pada rasio  $G/D= 1,0$  distribusi tekanan dari kontur menjadi simetri, yang ditandai dengan posisi titik stagnasi berada pada *front-side* silinder  $\theta_s= 360^\circ$ . Perubahan posisi titik stagnasi hanya terjadi pada saat silinder menyentuh dinding ( $G/D= 0,0$ ) dan saat silinder jauh dari dinding ( $G/D= 1,0$ ). Pada saat rasio  $G/D= 0,0$ , titik stagnasi berpindah ke *inner-side* dikarenakan adanya peningkatan momentum aliran yang melalui celah antara dua silinder *upstream*. Penambahan momentum aliran ini berasal dari seluruh

aliran yang terdefleksi ke *upper-side* silinder-1, ketika silinder menyentuh dinding.

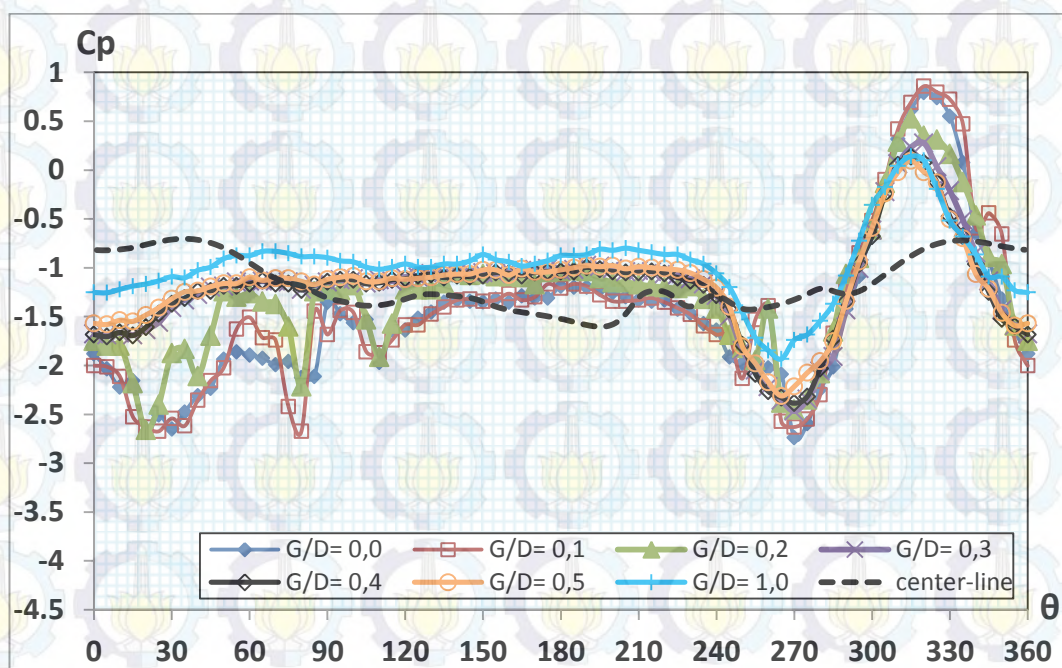
Melalui gambar tersebut juga terlihat adanya perbedaan nilai tekanan minimum yang terjadi pada masing-masing rasio, dimana nilai tekanan minimum terendah terjadi pada rasio  $G/D = 0,1$ . Hal ini menunjukkan bahwa terjadi percepatan atau akselerasi aliran terbesar pada rasio ini, karena adanya tambahan momentum yang berasal dari aliran yang terdefleksi. Sementara pada rasio  $0,2 \leq G/D \leq 0,5$  perubahan pada nilai tekanan minimum ini relatif kecil. Berarti pada batasan rasio ini tidak terjadi perubahan percepatan aliran pada *upper-side* maupun *lower-side* kontur silinder. Selanjutnya mulai terjadi penurunan percepatan aliran ini lagi pada rasio gap  $G/D = 1,0$ . Dibanding dengan susunan empat silinder di *center-line*, distribusi tekanan pada silinder-3 merupakan kebalikan dari distribusi tekanan silinder-1.



Gambar 4.147. Perbandingan Distribusi Koefisien Base Pressure ( $C_{pb}$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.147 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien *base pressure* ( $C_{pb}$ ) pada kontur silinder-3 untuk 7 (tujuh) variasi rasio gap ( $G/D$ ).

Melalui Gambar 4.147 terlihat bahwa rasio gap ( $G/D$ ) juga mempengaruhi harga koefisien base pressure ( $C_{pb}$ ), dimana pada rasio  $G/D$  terkecil harga dari  $C_{pb}$  terendah, dan mulai bertambah ketika rasio tersebut meningkat. Peningkatan harga  $C_{pb}$  yang cepat terjadi ketika rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , setelah itu pada  $G/D \geq 0,3$  peningkatannya relatif kecil atau kurang berarti. Hal ini dikarenakan adanya interferensi dari silinder lain disekitarnya. Perubahan harga  $C_{pb}$  ini terkait dengan perubahan titik separasi dari silinder dan perubahan ukuran wake dibelakang silinder. Dengan demikian besaran dari koefisien base pressure ini berkaitan secara langsung dengan besaran koefisien drag ( $C_D$ ) dari silinder, dimana apabila besaran  $C_{pb}$  bertambah kecil maka besaran  $C_D$  silinder akan bertambah besar, ataupun sebaliknya besaran  $C_{pb}$  bertambah besar maka besaran  $C_D$  akan bertambah kecil.

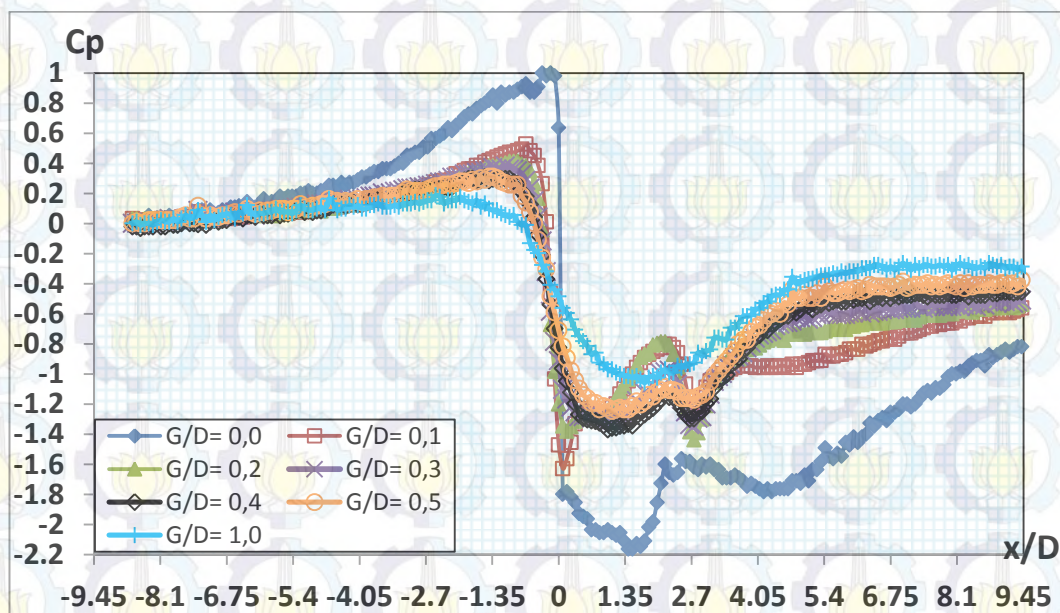


Gambar 4.148. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Kontur Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.148 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **silinder-4** antara susunan empat silinder dekat dinding pada  $L/D= 2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di *center-line*.

Melalui Gambar 4.148 terlihat bahwa distribusi tekanan yang terjadi pada kontur silinder tidak simetri. Pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , distribusi tekanan kontur silinder-4 menunjukkan adanya satu tekanan maksimal, dimana ini mengindikasikan terjadinya *reattachment* dari *inner shear layer* silinder *upstream* pada *lowerside* kontur silinder-4. Posisi *reattachment* pada kontur silinder-4 ini akan berpindah ke *outer-side* dari  $\theta = 320^\circ$  menjadi  $\theta = 310^\circ$  dengan meningkatnya rasio  $G/D$ . Hal ini dikarenakan pada rasio  $G/D$  yang kecil, aliran di gap mendapat tambahan momentum dari aliran yang terdefleksi. Selain itu karena rasio spasi  $L/D$  yang kecil, sehingga membuat aliran di gap semakin terdefleksi. Ini berarti terjadi interferensi aliran pada silinder-4 dari silinder disekitarnya.

Sementara pada susunan empat silinder di *center-line*, distribusi tekanan pada kontur silinder-4 merupakan kebalikan dari kontur silinder-2.



Gambar 4.149. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** Dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan  $L/D = 2,7$  dan Variasi  $G/D$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Gambar 4.149 menunjukkan perbandingan distribusi koefisien tekanan ( $C_p$ ) kontur **dinding** antara susunan empat silinder dekat dinding pada  $L/D = 2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ). Pengukuran distribusi koefisien tekanan kontur dinding ini dilakukan sepanjang  $-8,75 \leq x/D \leq 9,6$ , dimana  $x/D = 0,0$  adalah posisi peletakan *center-line* dari silinder *upstream*. Melalui Gambar 4.149 terlihat

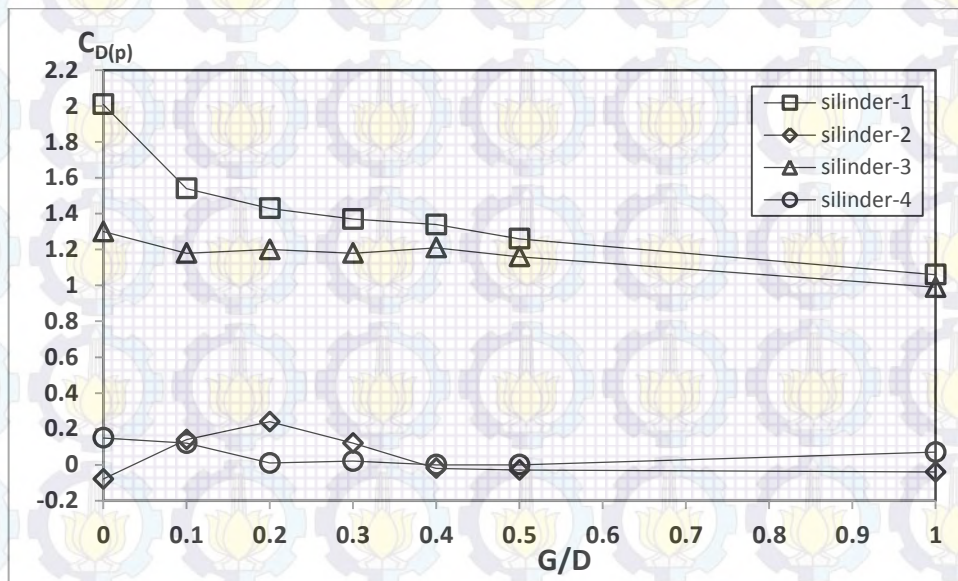
bahwa keberadaan silinder lower **silinder-1** dan **silinder-2** menyebabkan efek *blockage* pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* dari silinder dan dinding pada semua rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , bahkan pada rasio  $G/D= 0,0$  distribusi tekanan terputus karena silinder menyentuh dinding, Hal ini ditunjukkan dari distribusi tekanan yang positif pada *upstream* silinder ( $x/D < 0$ ), dan distribusi tekanan yang negatif pada *downstream* silinder ( $x/D > 0$ ).

Posisi dan besaran tekanan yang positif ini berpindah kedepan dan mengecil ketika rasio gap ( $G/D$ ) ini meningkat. Sedangkan posisi dan besaran tekanan yang negatif dengan bertambahnya rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  membuat posisinya berpindah kebelakang dan besaran mengecil. Sementara pada rasio  $G/D= 1,0$ , besarnya tekanan negatif menjadi satu. Hal ini menunjukkan pada rasio tersebut tidak terjadi perbedaan tekanan ketika aliran akan melintasi silinder-2, karena rasio spasi  $L/D$  yang relatif dekat. Berarti terjadi interferensi aliran silinder-2 dari silinder disekitarnya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada semua rasio gap  $G/D$ , keberadaan silinder lower mempengaruhi aliran fluida yang melalui celah.

Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang negatif ini recover menjadi static pressure. Posisi terjadinya perubahan tekanan negatif menjadi pressure static, yang ditandai dengan sudah tidak berubahnya besaran tekanan tersebut, menunjukkan posisi *reattachment* dari aliran pada dinding. Jadi terbentuknya *recirculation region* pada *downstream* silinder juga terjadi ketika silinder didekatkan pada dinding. Ini akan membuat aliran yang terdefleksi setelah melewati celah akan *reattachment* pada dinding. Melalui Gambar 4.149 terlihat bahwa rasio  $G/D$  juga berpengaruh terhadap posisi perubahan static pressure. Secara umum, pada batasan rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , bertambahnya rasio  $G/D$  membuat posisi perubahan menjadi static pressure menjadi semakin awal. Khususnya pada pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 1,0$  perbedaan posisi perubahan menjadi static pressure relatif kecil, atau dapat dikatakan lambat yaitu sekitar  $x/D \geq 5,3$ , berarti *recirculation region* yang terbentuk pada *downstream* silinder relatif kecil dan membuat aliran lebih cepat *reattachment* pada dinding. Sedangkan pada rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , perubahan posisi menjadi pressure static lebih lama.



**b. Perbandingan koefisien drag rata-rata ( $C_{Dp}$ ) dan koefisien lift rata-rata ( $C_{Lp}$ ) pada variasi rasio gap ( $G/D$ )**

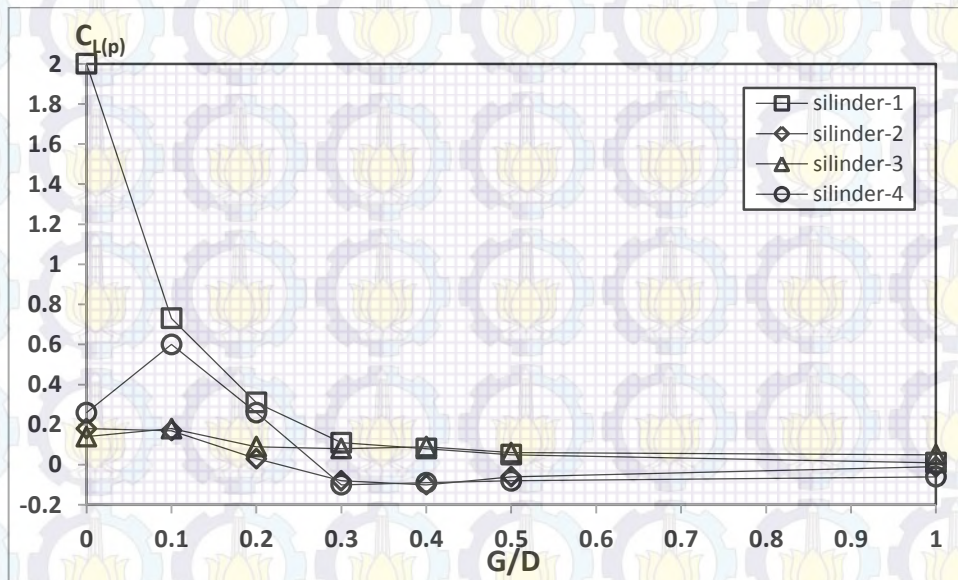


Gambar 4.150. Variasi  $C_{D(p)}$  terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D= 2,7$  Dekat Dinding pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.150 menunjukkan pengaruh rasio gap ( $G/D$ ) terhadap koefisien pressure drag ( $C_{Dp}$ ) dari setiap silinder. Melalui Gambar 4.150 terlihat pada silinder-1 bahwa meningkatnya rasio gap ( $G/D$ ) menyebabkan penurunan dari besaran koefisien pressure drag ( $C_{Dp}$ ). Penurunan terbesar pada rasio gap  $0 \leq G/D \leq 0,1$ , hal ini dikarenakan adanya dinding yang diletakkan dekat silinder sehingga menimbulkan efek blockage. Ini juga ditunjukkan dengan nilai koefisien base pressure yang naik tajam pada rasio tersebut. Sementara pada  $G/D \geq 0,2$  penurunannya relatif kecil, hal mana menunjukkan sudah berkurangnya pengaruh dinding.

Sedangkan pada silinder-2 terjadi kenaikan koefisien drag terutama pada  $0 \leq G/D \leq 0,2$ , dan pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,4$  terjadi penurunan koefisien drag. Pada rasio  $G/D > 0,5$  relatif tidak terjadi perubahan koefisien drag. Sedangkan pada silinder-3, besaran  $C_{Dp}$  juga dipengaruhi oleh bertambahnya rasio gap  $G/D$  ini. Pada rasio gap  $0 \leq G/D \leq 0,1$ , terjadi penurunan yang tajam pada koefisien ini, dan ketika pada posisi rasio gap  $0,2 \leq G/D \leq 0,4$  koefisien drag ini relatif tetap, dan mulai menurun lagi ketika rasio  $G/D > 0,4$ .

Sementara pada silinder-4 besaran koefisien drag mengalami penurunan pada rasio  $0 \leq G/D \leq 0,2$ , dan pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 1,0$  besaran dari koefisien ini meningkat.



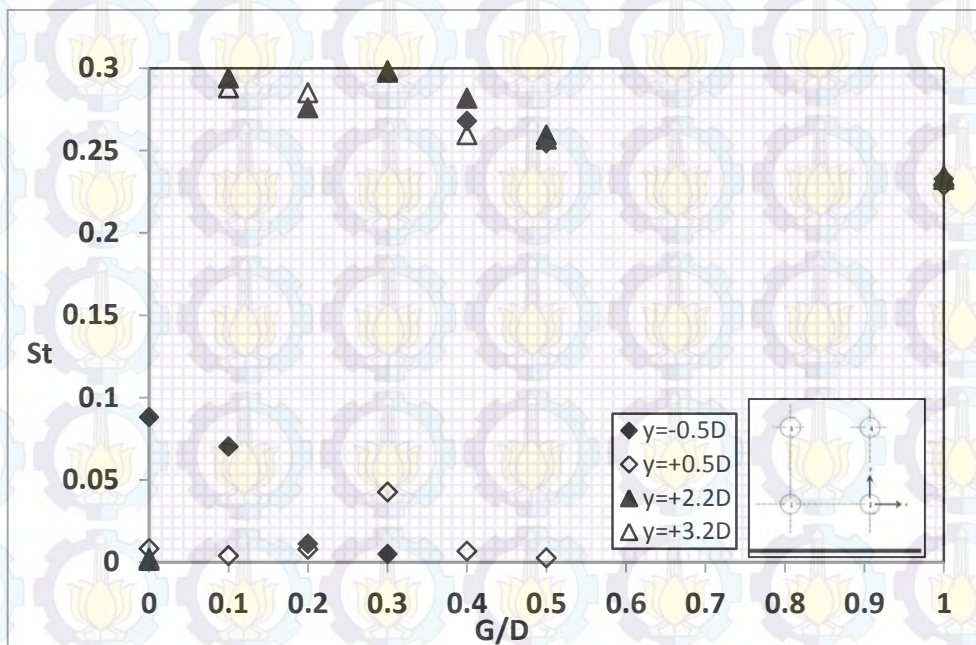
Gambar 4.151. Variasi  $C_{L(p)}$  terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D= 2,7$  Dekat Dinding pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.151 menunjukkan pengaruh variasi rasio gap ( $G/D$ ) terhadap koefisien pressure lift ( $C_{Lp}$ ) setiap silinder. Melalui Gambar 4.151 terlihat bahwa perubahan rasio gap  $G/D$  berpengaruh terhadap besaran koefisien pressure lift ( $C_{Lp}$ ) dimana dengan meningkatnya rasio  $G/D$  besaran  $C_{Lp}$  mengalami penurunan. Hal ini terjadi pada silinder-1, silinder-2 dan silinder-3, karena dengan meningkatnya rasio gap maka distribusi tekanan dikontur upper-side dan lower-side silinder akan berubah menjadi lebih simetri, sehingga tidak timbul gaya lift pada silinder tersebut.

Sedangkan pada silinder-4 pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,1$  terjadi kenaikan koefisien lift, selanjutnya pada rasio  $G/D > 0,1$  terjadi penurunan besaran koefisien lift. Penurunan koefisien lift yang tajam terjadi pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$ .

### c. Perbandingan bilangan Strouhal (St) pada variasi rasio gap (G/D)

Pengukuran bilangan Strouhal dilakukan untuk memberi gambaran tentang frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake dari silinder downstream silinder-2 dan silinder-4, ketika susunan empat silinder ditempatkan secara bervariasi jaraknya terhadap dinding. Posisi penempatan alat ukur pada jarak  $x=3,5D$  dan  $y= -0,5D$ ,  $y= +0,5D$ ,  $y= +3,5D$  dan  $y= +4,5D$ , dimana  $x,y$  adalah sumbu koordinat titik pusat silinder-2. Penempatan alat ukur sejauh  $3,5 D$  dari titik pusat silinder downstream silinder-2 arah horisontal (sumbu  $x$ ) sama seperti yang dilakukan Sakamoto (1990), sementara arah vertikal (sumbu  $y$ ) pada sisi upper dan sisi lower silinder ini sama seperti yang dilakukan Choi dan Lee (2000).



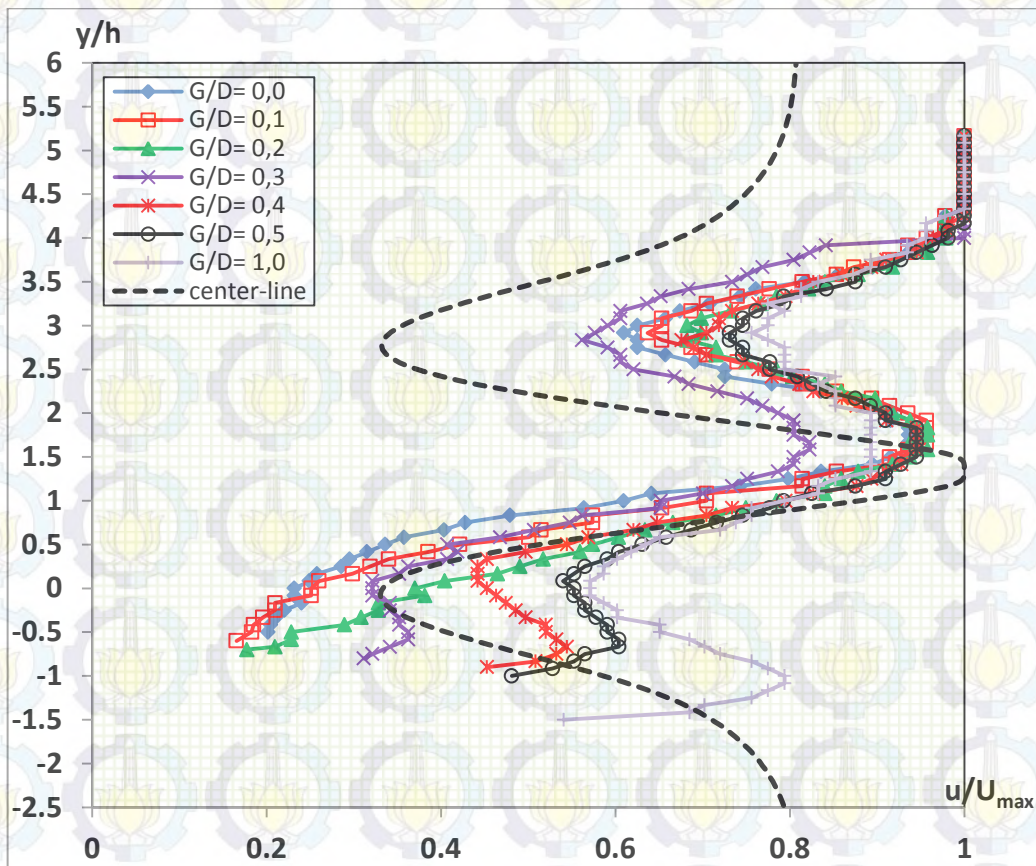
Gambar 4.152. Variasi St terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada *Downstream* Silinder-2 dan Silinder-4 pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D= 2,7$  Dekat Dinding pada Posisi Pengukuran  $x= 3,5D$ ;  $y= \pm 0,5D$ ;  $y= +2,2D$  dan  $y= +3,2D$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$

Gambar 4.152 menunjukkan pengaruh variasi rasio gap ( $G/D$ ) terhadap bilangan Strouhal di daerah wake silinder downstream, silinder-2 dan silinder-4. Melalui Gambar 4.152 terlihat bahwa bilangan Strouhal pada sisi upper dan sisi lower silinder-2 menunjukkan hasil yang tidak identik, dimana pada sisi upper terlihat dengan bertambahnya rasio  $G/D$  relatif bilangan Strouhal tidak berubah, yaitu pada  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  tetapi mengalami kenaikan pada  $G/D= 0,3$ . Sedangkan

pengukuran pada sisi lower terlihat dengan bertambahnya rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,3$  terjadi penurunan pada bilangan Strouhal, setelah itu meningkat pada rasio gap  $G/D > 0,4$  dan cenderung menurun ketika rasio gap  $0,4 < G/D \leq 1,0$ . Terjadinya perbedaan nilai yang cukup tinggi diantara kedua posisi pengukuran, terutama pada rasio gap  $G/D = 0,0$ , kemungkinan dikarenakan oleh kesulitan menempatkan hot-wire pada posisi tersebut. Dapat disimpulkan pada batasan rasio  $G/D$  yang kecil  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , bertambahnya rasio membuat frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-2 relatif tetap, sedangkan pada rasio  $0,4 \leq G/D \leq 0,5$  frekuensi vortex shedding cenderung tetap, dan pada rasio yang besar  $G/D = 0,3$  terjadi frekuensi vortex sheddingnya yang besar.

Sementara pengukuran pada sisi upper dan sisi lower silinder-4 ( $y = +2,2D$  dan  $y = +3,2D$ ) menunjukkan hasil yang cenderung lebih identik, artinya frekuensi vortex yang terjadi di daerah wake antara sisi upper dan sisi lower silinder-4 relatif sama pada semua variasi rasio  $G/D$ . Jika diamati pada gambar 4.152 frekuensi vortex yang terjadi di daerah wake silinder-4, menunjukkan dengan bertambahnya rasio  $G/D$  bilangan Strouhal cenderung menurun. Ini berarti kenaikan rasio gap  $G/D$  mempengaruhi frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-4. Hasil yang serupa juga diperoleh oleh Angrili dan Bergamaschi (1982) yang mengukur pada bilangan Reynolds dibawah subcritical dan tebal lapis batas dinding ( $\delta$ ) = 0,25 diameter silinder, menunjukkan bahwa frekuensi vortex shedding meningkat ketika rasio gap diturunkan, atau silinder semakin didekatkan ke dinding. Sementara Bearman dan Zdravkovich (1978) pada tebal lapis batas dinding ( $\delta$ ) = 0,8 diameter silinder mendapatkan dibawah rasio gap kritis ( $G/D = 0,3$ ) vortex shedding tertahan, sedangkan diatas rasio tersebut bilangan Strouhal cenderung konstan.

d. Perbandingan rasio profil kecepatan ( $u/U_{max}$ ) pada variasi rasio gap ( $G/D$ )



Gambar 4.153. Variasi Profil Kecepatan terhadap Rasio Gap  $G/D$  pada Susunan 4 Silinder Sirkular *In-Line Square*  $L/D= 2,7$  Dekat Dinding pada  $Re= 5,3 \times 10^4$  pada Posisi Pengukuran  $x= 3.5D$

Gambar 4.153 menunjukkan profil kecepatan di daerah wake silinder downstream dari susunan empat silinder dekat dinding pada  $L/D= 2,7$  dengan tujuh variasi rasio gap ( $G/D$ ), dan susunan empat silinder di center-line. Melalui Gambar 4.153 terlihat profil kecepatan yang tidak simetri, karena dengan adanya dinding yang ditempatkan dekat silinder lower membuat nilai kecepatan minimum di daerah wake silinder downstream menjadi berbeda. Dinding mempengaruhi profil kecepatan di daerah wake dari silinder-2, tetapi tidak mempengaruhi profil kecepatan di daerah wake dari silinder-4.

Di daerah wake silinder-2, pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  nilai kecepatan minimumnya terendah dan relatif sama. Selanjutnya dengan bertambah besar rasio  $G/D$  nilai kecepatan minimumnya mulai meningkat, dan pada rasio  $G/D= 1,0$  nilai

kecepatan minimum pada daerah wake silinder downstream silinder-2 dan silinder downstream silinder-4 relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa pada rasio gap kecil keberadaan silinder lower menghalangi aliran yang melalui celah antara silinder dengan dinding, dan mulai berkurang pada rasio gap menengah, dan akhirnya bebas pada rasio gap yang besar. Ditinjau dari profil kecepatan aliran di lower-side silinder-2 dekat dinding menunjukkan nilai yang sama pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , selanjutnya mulai meningkat pada rasio gap yang bertambah besar, dan mencapai maksimal pada rasio  $G/D = 1,0$ . Ini berarti pada rasio gap yang kecil, momentum aliran yang melalui celah rendah dan belum dapat mengatasi shear stress dinding, sementara pada rasio  $G/D \geq 0,3$  momentum aliran tersebut mulai meningkat sehingga dapat mengatasi shear stress dari dinding. Sedangkan profil kecepatan di upper-side silinder-2 menunjukkan nilai yang relatif sama untuk semua variasi rasio  $G/D$ .

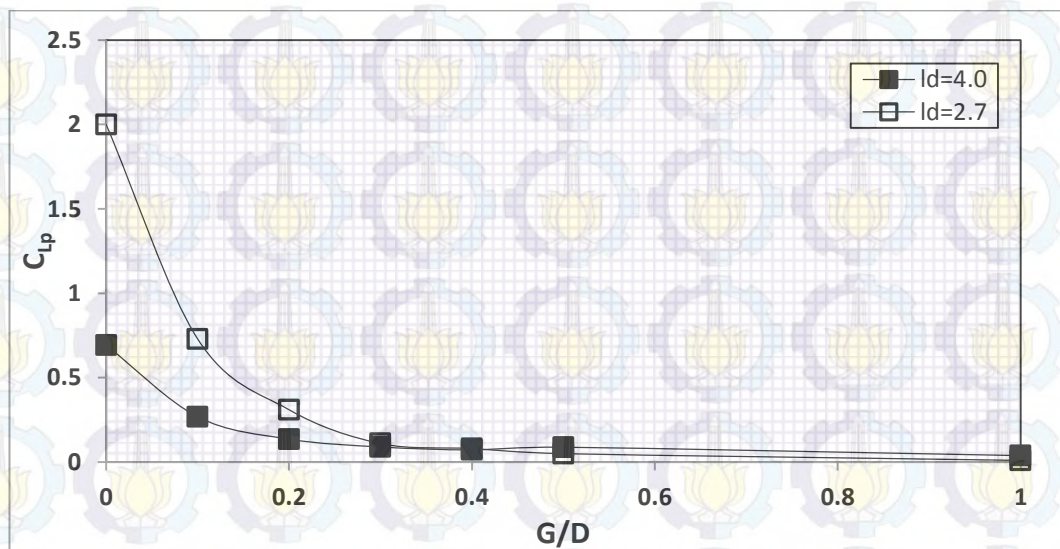
Sementara profil kecepatan di daerah wake silinder downstream silinder-4 relatif sama pada semua variasi rasio  $G/D$ . Ditinjau dari profil kecepatan di lower-side dan upper-side silinder-4 untuk semua variasi rasio  $G/D$  hanya sedikit berbeda terutama pada rasio  $G/D = 0,3$ . Pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  dan rasio  $G/D \leq 0,4$ , semakin besar rasio gap ini defisit momentum semakin kecil. Defisit momentum yang terbesar berlangsung pada rasio gap  $G/D = 0,3$ . Ini berarti keberadaan dinding yang ditempatkan dekat silinder lower juga mempengaruhi kecepatan aliran di daerah wake silinder-4.

Melalui gambar juga terlihat profil kecepatan dari susunan empat silinder di center-line. Tampak profil kecepatan di daerah wake silinder-2 dan silinder-4 untuk susunan ini simetri. Jika dibandingkan dengan profil kecepatan dari susunan empat silinder dekat dinding menunjukkan hasil yang berbeda, terutama pada profil kecepatan silinder-2, yang dengan adanya dinding akan menurunkan kecepatan aliran di lower-side silinder. Selain itu efek blockage yang ditimbulkan dari keberadaan dinding di dekat silinder lower, menyebabkan sebagian besar fluida defleksi ke upper-side silinder, dan ini menambah momentum aliran pada celah silinder lower dan silinder upper. Hal ini ditunjukkan dari nilai kecepatan di daerah wake silinder-4 yang lebih besar pada semua rasio  $G/D$  dibanding silinder-4 dari susunan di center-line, terutama pada lower-side silinder.

#### 4.4. Diskusi tentang pengaruh dinding terhadap karakteristik aliran dari susunan empat silinder *in-line square* dekat dinding pada lapis batas turbulen

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan melalui eksperimen dan visualisasi melalui simulasi dapat disimpulkan beberapa indikasi atau ciri-ciri pengaruh dinding terhadap karakteristik aliran yang terjadi pada susunan empat silinder *in-line square* dengan rasio  $L/D = 4,0$  dan  $L/D = 2,7$  yang ditempatkan dekat dinding dengan variasi rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  dan  $G/D = 1,0$ .

Indikasi pertama, menunjukkan bahwa distribusi tekanan pada kontur silinder *upstream silinder-1* memiliki kesamaan, yaitu rasio gap  $G/D$  berpengaruh terhadap distribusi tekanan kontur silinder-1 pada semua variasi. Hal ini ditandai dari distribusi tekanan yang tidak simetri ketika rasio  $G/D$  kecil atau dekat dinding, dan mulai berubah menjadi simetri ketika rasio  $G/D$  bertambah besar. Pada rasio gap  $G/D = 1,0$  distribusi tekanan pada kontur silinder-1 menjadi simetri. Perubahan distribusi tekanan dari kontur silinder-1 ini membawa dampak terhadap tren nilai koefisien *lift pressure* ( $C_{Lp}$ ) dari silinder, dimana tren nilai koefisien *lift* akan mengecil ketika rasio  $G/D$  bertambah besar.

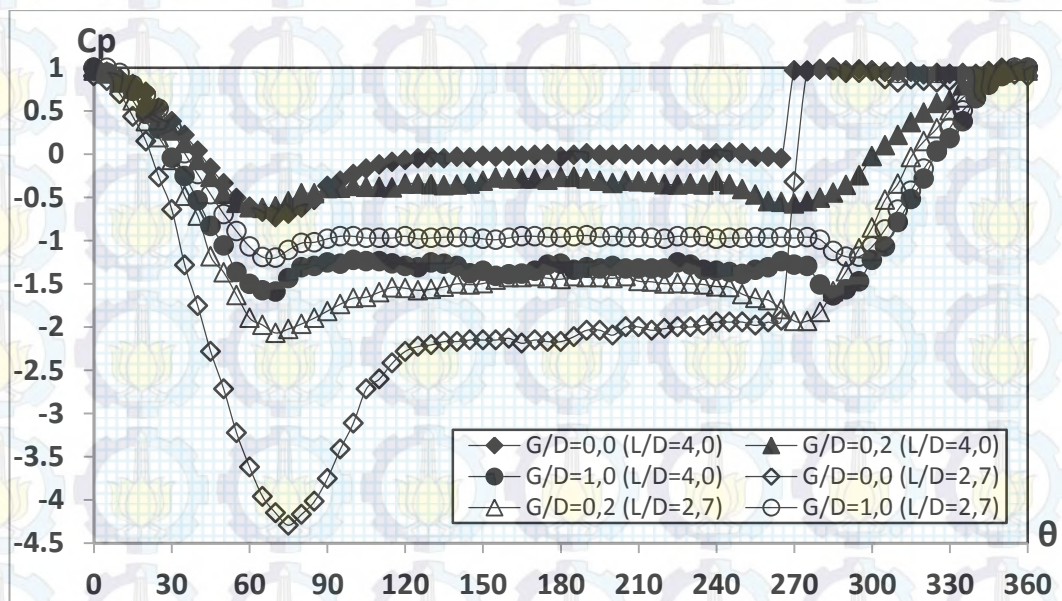


Gambar 4.154. Perbandingan Koefisien Lift ( $C_{Lp}$ ) **Silinder-1** antara Rasio  $L/D = 4,0$  dan  $L/D = 2,7$ , Hasil Eksperimen

Akan tetapi terjadi perbedaan dalam besaran nilai koefisien *lift pressure* ini antara rasio spasi  $L/D = 4,0$  dengan  $L/D = 2,7$  pada rasio gap  $G/D$  yang sama (lihat

Gambar 4.154). Pada rasio  $L/D= 4,0$  besaran nilai koefisien ini lebih kecil dibandingkan dengan rasio  $L/D= 2,7$ , terutama pada rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ . Hal ini menunjukkan adanya interferensi aliran dari silinder yang lain dalam susunan silinder terhadap aliran di silinder-1 ketika rasio spasi yang lebih kecil. Walaupun demikian jika dibandingkan dengan susunan di *center-line*, distribusi tekanan kontur silinder-1 dari susunan ini menunjukkan distribusi tekanan tidak simetri. Titik stagnasi pada susunan di *center-line* berada pada *innerside*, dimana hal ini dikarenakan terjadinya percepatan aliran di gap silinder *lower* dan silinder *upper*.

Terjadi perbedaan nilai tekanan minimum dari distribusi tekanan kontur **silinder-1** pada rasio gap  $G/D$  yang sama, dimulai pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ , antara rasio spasi  $L/D= 4,0$  dengan  $L/D= 2,7$ . Pada *upperside* dan *lowerside* silinder-1 nilai tekanan minimum dari rasio  $L/D= 4,0$  lebih besar dibanding rasio  $L/D= 2,7$ .



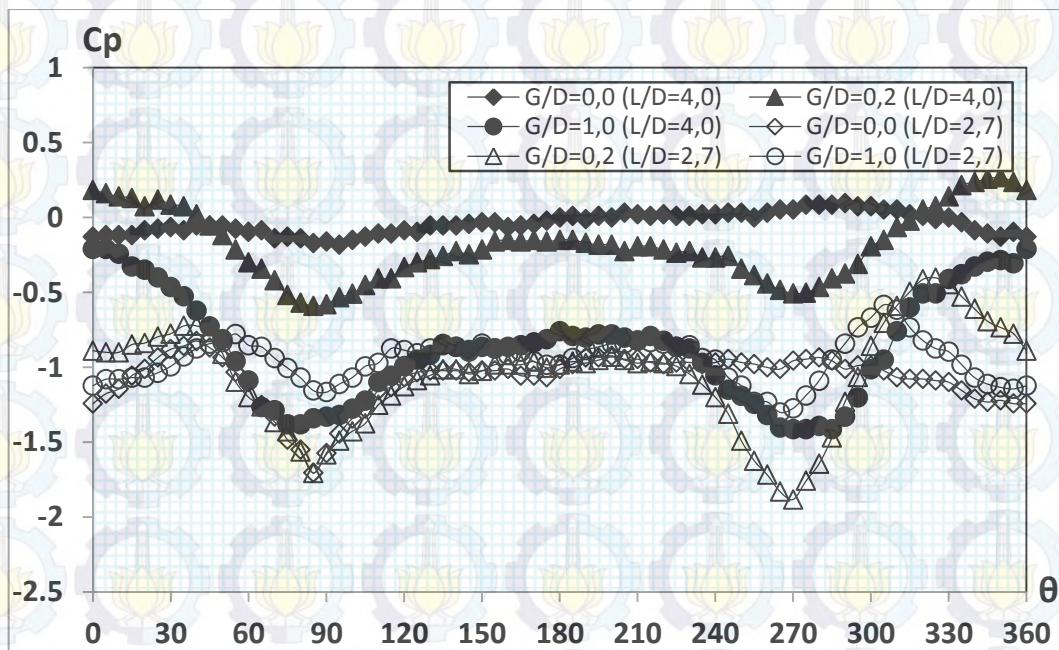
Gambar 4.155. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-1* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  pada Variasi  $G/D= 0,0$ ,  $G/D= 0,2$ , dan  $G/D= 1,0$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen



Selain itu pada rasio  $L/D = 4,0$  dengan meningkat besaran rasio  $G/D$ , nilai tekanan minimum bertambah kecil; sementara itu pada rasio spasi  $L/D = 2,7$  dengan meningkat besaran rasio  $G/D$  nilai tekanan minimumnya bertambah besar (Gambar 4.155). Hal ini menunjukkan adanya interferensi silinder yang lain dalam susunan silinder terhadap aliran disekeliling silinder-1 khususnya pada rasio  $L/D = 2,7$ , karena dengan rasio spasi yang lebih kecil menyebabkan aliran di gap mengalami peningkatan kecepatan dan ditandai dari nilai tekanan minimumnya bertambah kecil. Sebaliknya nilai tekanan minimumnya bertambah besar ketika rasio spasi  $L/D$  membesar.

Sementara variasi nilai tekanan minimum di *upperside* dan *lowerside* kontur **silinder-1** antara rasio spasi  $L/D = 4,0$  dan  $2,7$  memiliki tren yang serupa, yaitu terjadi perbedaan yang besar antara nilai tekanan minimum pada *upperside* dengan *lowerside* pada rasio  $G/D$  yang kecil. Variasi nilai kedua tekanan minimum ini berkurang seiring dengan meningkatnya rasio  $G/D$ . Pada rasio  $G/D \geq 0,3$  relatif hanya terjadi variasi nilai distribusi tekanan yang kecil dan kurang signifikan antara kedua sisi kontur ini. Hal ini berarti pada rasio  $G/D$  tersebut, keberadaan dinding relatif tidak mempengaruhi kecepatan aliran di *lowerside* kontur, baik pada rasio  $L/D = 4,0$  maupun  $L/D = 2,7$ .

Perbedaan nilai tekanan minimum ini juga berpengaruh terhadap nilai koefisien *base pressure* yang terjadi pada kontur **silinder-1**. Pada rasio spasi  $L/D = 4,0$  dengan bertambah besarnya rasio gap  $G/D$  nilai koefisien ini berubah menjadi semakin kecil, sedangkan pada rasio spasi  $L/D = 2,7$  dengan bertambah besarnya rasio gap  $G/D$  nilai koefisien ini berubah menjadi semakin besar. Hal ini dikarenakan dengan rasio spasi yang lebih kecil membuat *shear layer* dari silinder-1 *reattachment* pada kontur silinder downstream. Ketika fenomena *reattachment* ini terjadi membuat sebagian *shear layer* akan melanjutkan ke *downstream* dan oleh peneliti sebelumnya ini disebut *backward shear layer*, sedangkan sebagian *shear layer* akan mengalir kedepan yang disebut *forward shear layer*. Selanjutnya *shear layer* ini akan membuat aliran free stream ini akan terdefleksi lebih awal, sehingga membuat posisi titik separasi akan berlangsung lebih awal pada silinder-1. Hal ini menunjukkan adanya interferensi dari silinder-2 terhadap aliran disekeliling silinder-1.

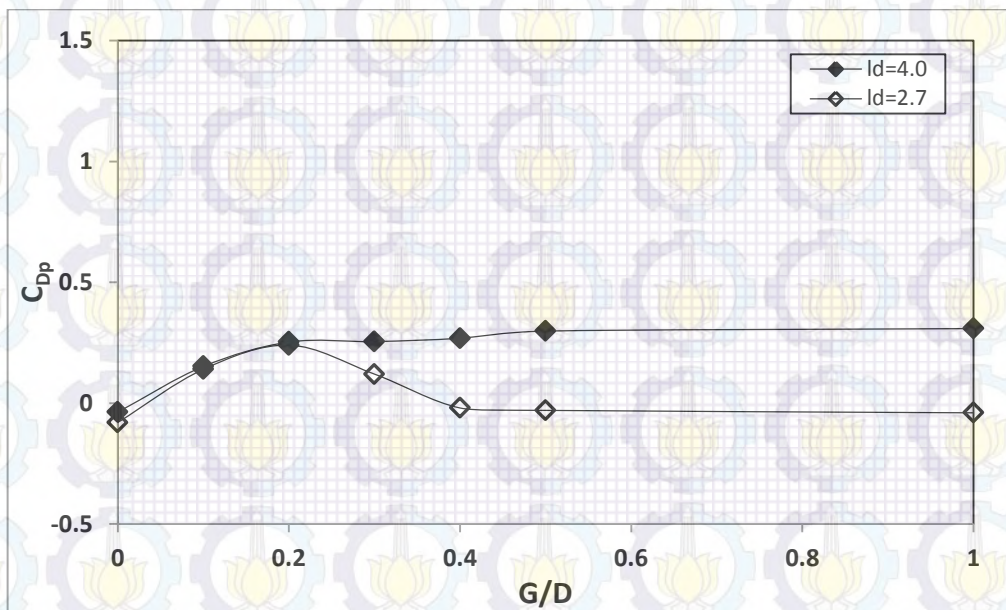


Gambar 4.156. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder *Downstream Silinder-2* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  pada Variasi  $G/D= 0,0$ ,  $G/D= 0,2$ , dan  $G/D= 1,0$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Indikasi kedua, menunjukkan adanya perbedaan pengaruh rasio gap  $G/D$  terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-2** antara rasio spasi  $L/D= 4,0$  dengan  $L/D= 2,7$  (Gambar 4.156). Pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan rasio gap  $G/D= 0,0$  distribusi tekanannya bertanda negatif, menunjukkan *inner shear layer* dari silinder *upstream* silinder-1 melingkupi kontur silinder-2. Selanjutnya pada  $G/D=0,1$  terjadi fenomena *reattachment* tetapi berlangsung hanya pada satu sisi kontur yakni *upperside*. Dan pada rasio  $G/D= 0,2$  *free shear layer* dari silinder-1 *reattachment* pada dua sisi kontur, sementara titik tekanan maksimum berpindah ke *lowerside*. Berikutnya mulai  $0,3 \leq G/D \leq 1,0$  distribusi tekanannya bertanda negatif dan menyerupai silinder tunggal, ini menunjukkan terbentuk *vortices shed* di daerah wake, dan *vortices shed* dari silinder-1 mengenai silinder-2. Pada rasio  $L/D= 2,7$  dengan rasio gap  $G/D= 0,0$  terjadi fenomena *reattachment* tetapi berlangsung hanya pada satu sisi kontur yakni *upperside*. Selanjutnya pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$  terdapat dua titik tekanan maksimum yang menandakan terjadinya fenomena *reattachment* pada kontur *upperside* dan *lowerside* silinder.

Tetapi seiring meningkatnya rasio mulai  $0,4 \leq G/D \leq 1,0$  hanya menunjukkan satu tekanan maksimum, dan ini menunjukkan terjadinya fenomena *reattachment* pada *lowerside* kontur silinder-2. Perbedaan yang terjadi pada kedua rasio spasi ini menunjukkan adanya pengaruh rasio spasi terhadap aliran disekeliling kontur silinder-2. Hal ini berakibat juga terhadap nilai koefisien lift dari silinder-1, dimana pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,4$  nilai koefisien lift dari kedua rasio spasi L/D berkurang dengan meningkatnya rasio gap ini.

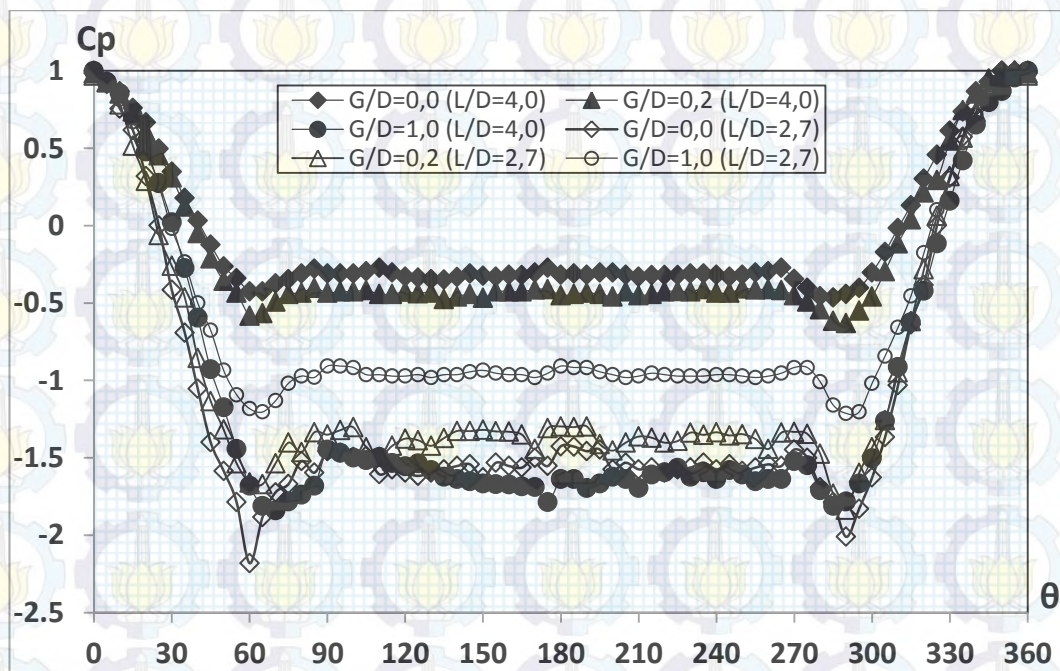
Sementara perbedaan distribusi tekanan ini juga berakibat terhadap koefisien *base pressure* dari **silinder-2** ini, dan akhirnya nilai koefisien *drag* dari kedua rasio spasi L/D ini juga berbeda. Pada rasio L/D= 4,0 nilai koefisien *drag* meningkat seiring dengan meningkatnya rasio gap G/D, sementara pada rasio L/D= 2,7 nilai koefisien meningkat hanya pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ . Sedangkan pada rasio gap  $0,3 \leq G/D \leq 1,0$  nilai koefisien drag ini berkurang dengan meningkatnya rasio (Gambar 4.157). Hal ini menunjukkan adanya interferensi aliran dari susunan silinder disekeliling silinder-2 terhadap aliran di silinder ini.



Gambar 4.157. Perbandingan Koefisien Drag ( $C_{Dp}$ ) **Silinder-2** antara Rasio L/D= 4,0 dan L/D= 2,7, Hasil Eksperimen

Indikasi ketiga, menunjukkan adanya kesamaan pengaruh rasio gap G/D terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-3** antara rasio spasi L/D= 4,0

dengan  $L/D = 2,7$ , yakni tidak simetri pada rasio yang kecil. Tetapi dengan meningkatnya rasio  $G/D$  membuat distribusi tekanan pada kontur silinder-3 menjadi simetri. Hal ini ditandai dari tren nilai  $C_{Lp}$  silinder yang menurun pada rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , dan selanjutnya nilai koefisien ini relatif tetap pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,4$ . Perbedaan nilai  $C_{Lp}$  dari kedua rasio spasi  $L/D$  ini terletak pada besarnya, dimana pada rasio  $L/D = 4,0$  besaran nilai lebih kecil dibanding rasio  $L/D = 2,7$  terutama pada rasio gap  $G/D$  yang kecil. Ini dikarenakan pada rasio  $L/D = 2,7$  kecepatan aliran dicelah jauh lebih tinggi, sehingga membuat perubahan distribusinya lebih cepat dan akibatnya perubahan nilai  $C_{Lp}$  nya lebih besar.



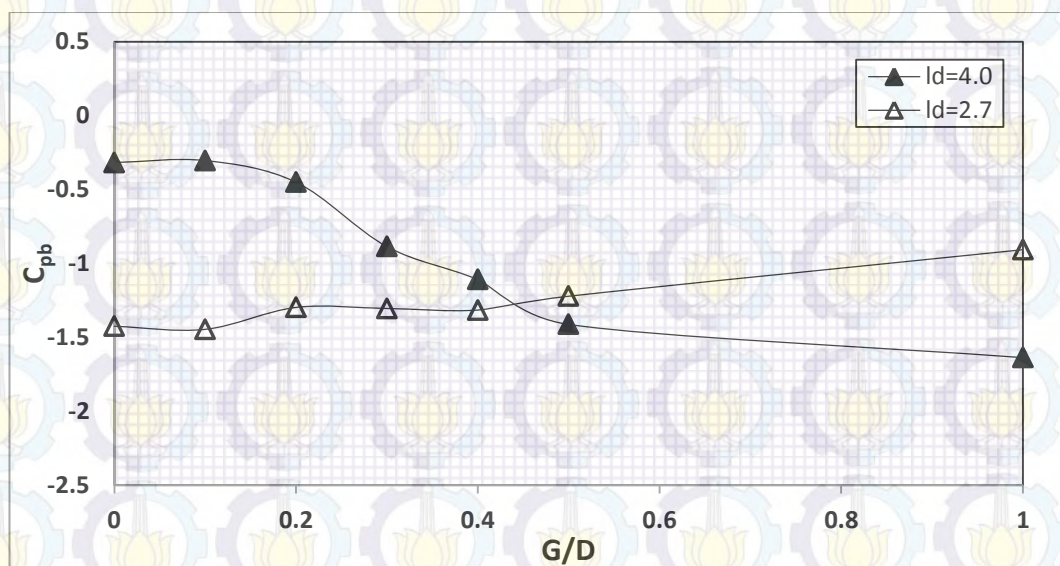
Gambar 4.158. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder *Upstream Silinder-3* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D = 4,0$  dan  $L/D = 2,7$  pada Variasi  $G/D = 0,0$ ,  $G/D = 0,2$ , dan  $G/D = 1,0$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Perbedaan yang signifikan dari pengaruh rasio gap  $G/D$  ini terhadap kedua rasio spasi  $L/D$  adalah pada besaran nilai tekanan minimum dari *upperside* dan *lowerside* kontur silinder. (Gambar 4.158) Pada rasio  $L/D = 4,0$  terlihat nilai tekanan minimumnya semakin kecil ketika rasio  $G/D$  bertambah besar, sedangkan pada rasio  $L/D = 2,7$  nilai tekanan minimumnya semakin besar ketika rasio  $G/D$

bertambah besar. Hal ini berarti pada rasio  $L/D= 4,0$  terjadi peningkatan kecepatan aliran pada *upperside* dan *lowerside* ketika rasio  $G/D$  bertambah besar, sedangkan pada rasio  $L/D= 2,7$  terjadi penurunan kecepatan aliran pada *upperside* dan *lowerside* ketika rasio  $G/D$  bertambah besar.

Sementara itu pada kedua rasio spasi  $L/D$  terjadi perbedaan antara selisih besaran nilai tekanan minimum antara *upperside* dan *lowerside*. Untuk rasio spasi  $L/D= 4,0$  pada rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$  terjadi penurunan selisih antara nilai tekanan minimum *upperside* dengan *lowerside*, dan sebaliknya pada rasio  $0,4 \leq G/D \leq 1,0$  dengan meningkatnya rasio ini terjadi peningkatan selisih perbedaan antara nilai tekanan minimum *upperside* dengan *lowerside*. Sedangkan untuk rasio spasi  $L/D= 2,7$  pada rasio gap  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$  dengan meningkatnya rasio ini terjadi peningkatan selisih antara nilai tekanan minimum *upperside* dengan *lowerside*, dan sebaliknya pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,4$  dengan meningkatnya rasio ini terjadi penurunan selisih perbedaan antara nilai tekanan minimum *upperside* dengan *lowerside*. Ini menunjukkan bahwa adanya interferensi silinder-1 dan silinder-2 dan silinder-4 terhadap aliran yang terjadi pada silinder-3.

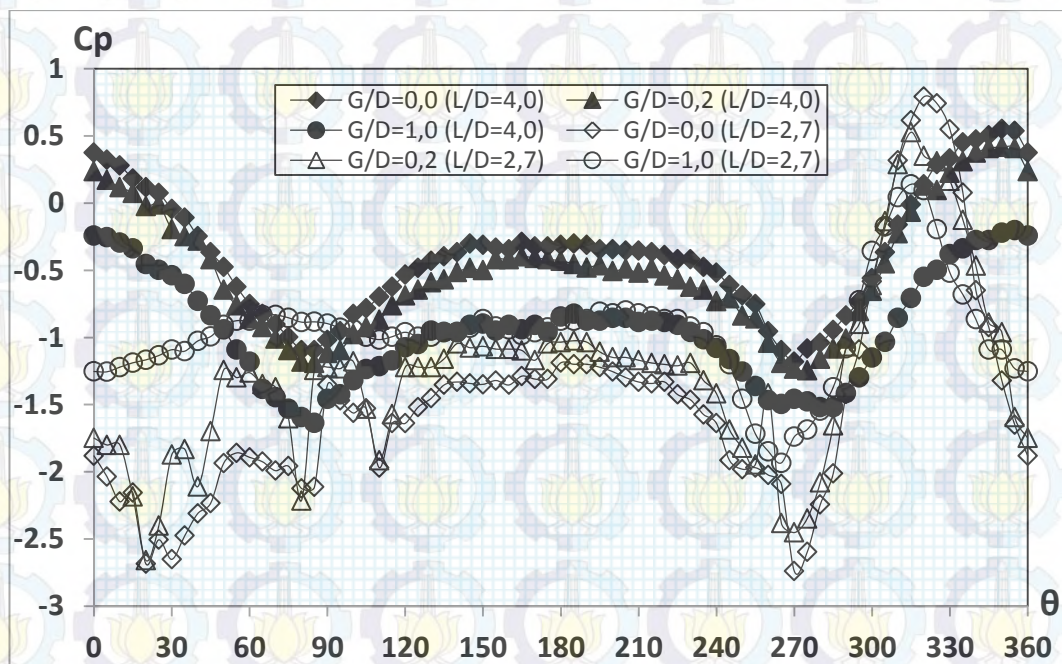
Terdapat perbedaan yang signifikan pada koefisien *base pressure* dari kedua rasio spasi  $L/D$ .



Gambar 4.159. Perbandingan Koefisien *Base Pressure* ( $C_{pb}$ ) **Silinder-3** antara Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen

Pada rasio  $L/D=4,0$  nilai koefisien *base pressure* ini semakin kecil ketika rasio gap  $G/D$  meningkat, sedangkan pada rasio  $L/D=2,7$  nilai koefisien *base pressure* semakin besar walaupun kenaikannya relatif kecil, ketika rasio  $G/D$  meningkat (Gambar 4.159). Perubahan dari nilai koefisien ini membawa dampak terhadap nilai koefisien drag dari silinder-3, dimana pada rasio  $L/D=4,0$  nilai koefisien drag ini semakin besar ketika rasio  $G/D$  meningkat. Sedangkan pada rasio  $L/D=2,7$  nilai koefisien drag pada silinder-3 ini relatif berubah walaupun kecil. Hal ini menunjukkan adanya interferensi dari silinder lain, seperti silinder-4 dan silinder-1 terhadap aliran di silinder-3.

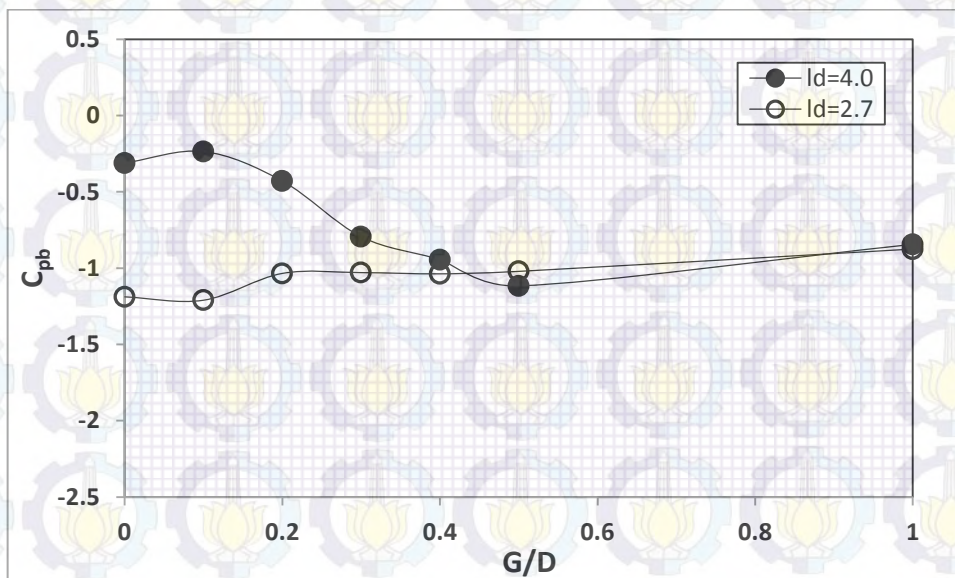
Indikasi keempat, menunjukkan adanya perbedaan pengaruh rasio gap  $G/D$  terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-4** antara rasio spasi  $L/D=4,0$  dengan  $L/D=2,7$ . Pada rasio spasi  $L/D=4,0$  peningkatan rasio  $G/D$  membuat distribusi tekanan dari tidak simetri ( $0,0 \leq G/D \leq 0,5$ ) menjadi simetri pada  $G/D=1,0$  dan menyerupai silinder tunggal.



Gambar 4.160. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada Silinder *Downstream Silinder-4* dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4,0$  dan  $L/D=2,7$  pada Variasi  $G/D=0,0$ ,  $G/D=0,2$ , dan  $G/D=1,0$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Sementara pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  peningkatan rasio  $G/D$  tetap membuat distribusi tekanannya tidak simetri. Dari rasio  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  menunjukkan adanya satu titik tekanan maksimum yang menandakan terjadinya fenomena *reattachment* dari *shear layer* silinder *upstream* pada kontur silinder ini. Besarnya nilai tekanan maksimum ini berkurang seiring dengan meningkatnya rasio  $G/D$  ini, sedangkan posisi tekanan maksimum ini berpindah dari *frontside* ke *lowerside*. (Gambar 4.160) Hal ini ditandai dari nilai  $C_{Lp}$  pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$  dimana nilai koefisien ini meningkat seiring dengan meningkatnya rasio gap, dan menurun ketika rasio  $G/D$  bertambah besar. Sedangkan pada rasio  $L/D= 2,7$  dengan rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,3$  nilai koefisien ini menurun seiring dengan meningkatnya rasio gap dan meningkat kembali ketika rasio ini bertambah besar. Perbedaan ini menunjukkan adanya interferensi dari silinder upstream silinder-1 dan silinder-3 maupun silinder *downstream* silinder-2 terhadap aliran disekeliling silinder-4.

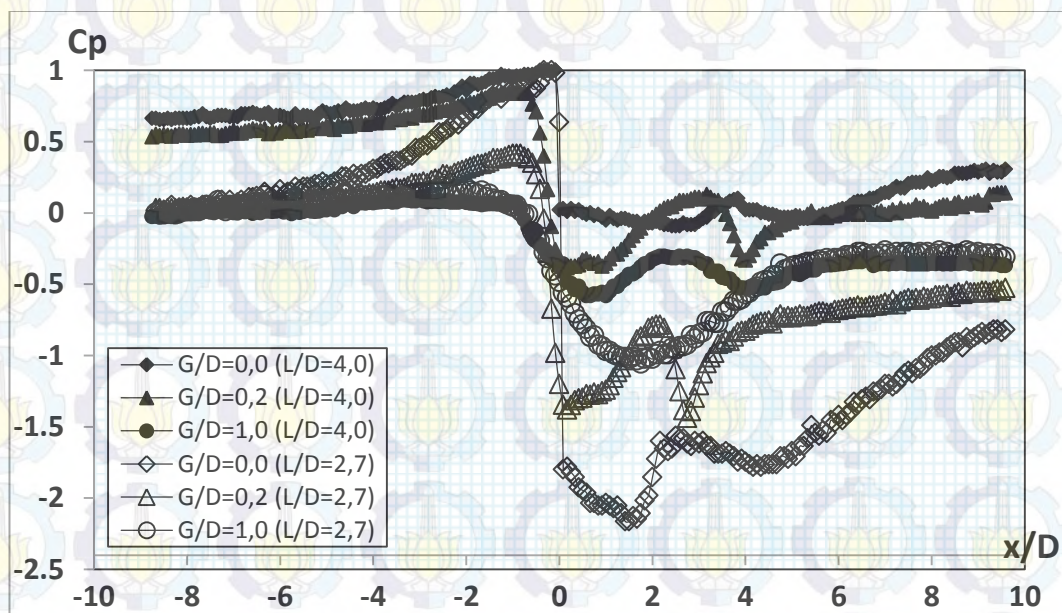
Perbedaan distribusi tekanan ini juga membawa pengaruh terhadap nilai koefisien *base pressure* dari kontur **silinder-4** ini pada kedua rasio spasi  $L/D$ .



Gambar 4.161. Perbandingan Koefisien *Base Pressure* ( $C_{pb}$ ) **Silinder-4** antara Rasio  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ , Hasil Eksperimen

Pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  nilai koefisien ini menurun seiring dengan meningkatnya rasio gap, sementara pada rasio  $L/D= 2,7$  pada

seluruh rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  nilai koefisien ini meningkat seiring dengan meningkatnya rasio gap (Gambar 4.161). Perbedaan nilai koefisien *base pressure* ini berakibat pada perbedaan besaran nilai koefisien *drag* dari silinder ini. Pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan seluruh rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  besaran nilai koefisien ini lebih besar dari besaran nilai pada rasio spasi  $L/D= 2,7$ . Sementara ditinjau dari tren nilai koefisien *drag* pada seluruh rasio  $G/D$  menunjukkan tren yang sama antara rasio  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ . Pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,1$  nilai koefisien ini menurun seiring dengan meningkatnya rasio gap, dan pada rasio  $0,2 \leq G/D \leq 0,5$  besaran nilai koefisien ini relatif tetap dengan meningkatnya rasio gap. Pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan rasio  $G/D= 1,0$  terjadi penurunan nilai koefisien *drag*, sedangkan pada rasio  $L/D= 2,7$  terjadi peningkatan nilai koefisien ini. Hal ini menunjukkan adanya interferensi dari susunan silinder disekeliling silinder-4 terhadap aliran di silinder ini.



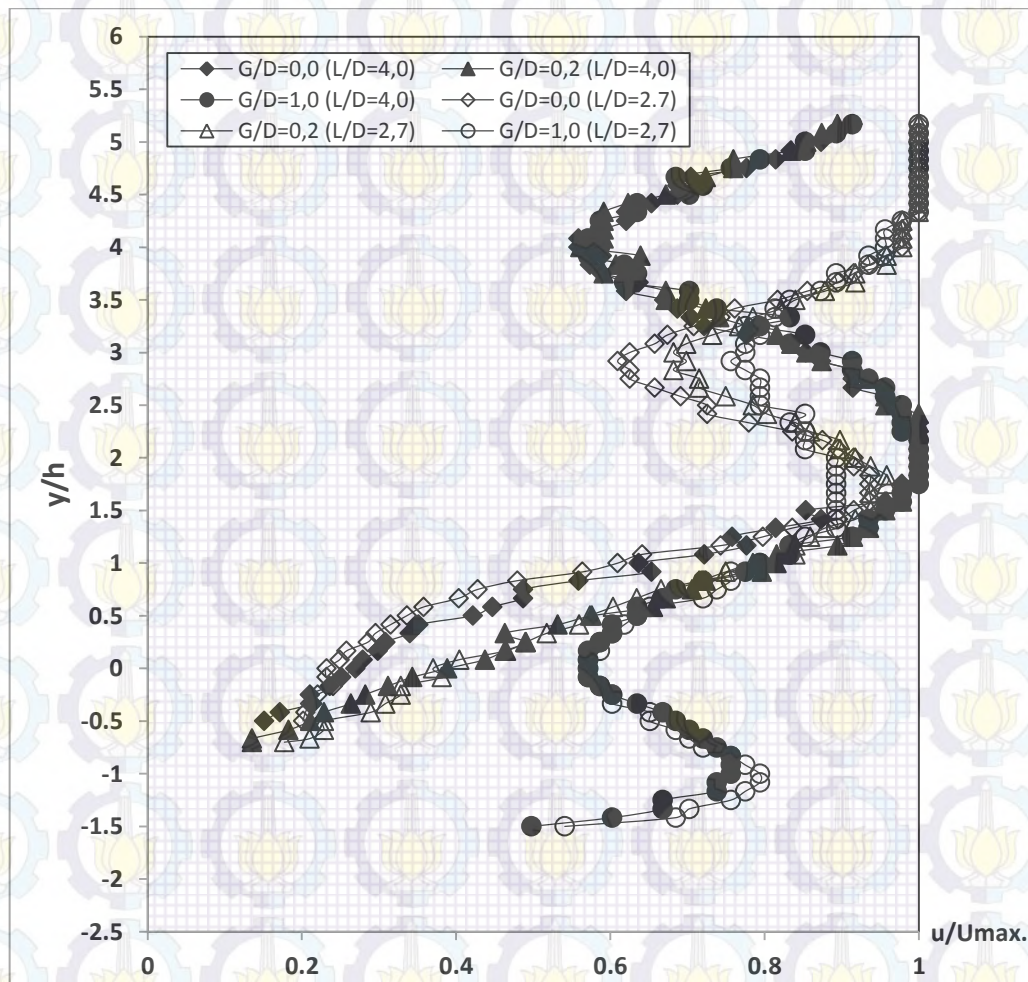
Gambar 4.162. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan ( $C_p$ ) pada **Plat Datar** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  pada Variasi  $G/D= 0,0$ ,  $G/D= 0,2$ , dan  $G/D= 1,0$  pada  $Re= 5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

Indikasi kelima, terjadi perbedaan distribusi tekanan pada kontur **plat datar** antara rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  terutama pada rasio gap  $G/D= 1,0$  (Gambar 4.162). Pada rasio  $L/D= 4,0$  aliran fluida yang akan melintasi gap antara



silinder-2 dengan dinding mengalami penurunan kecepatan, yang ditandai dengan naiknya nilai tekanan statik. Hal ini menunjukkan masih adanya efek blockage dari silinder-2 terhadap aliran yang akan melintasi silinder tersebut. Sementara pada rasio  $L/D=2,7$  tidak terjadi penurunan kecepatan ketika aliran akan melintasi gap silinder-2 dan dinding, yang ditandai dengan tidak berubahnya nilai tekanan statik. Hal ini menunjukkan adanya interferensi aliran dari susunan silinder didekat silinder-2 terhadap aliran di gap silinder tersebut.

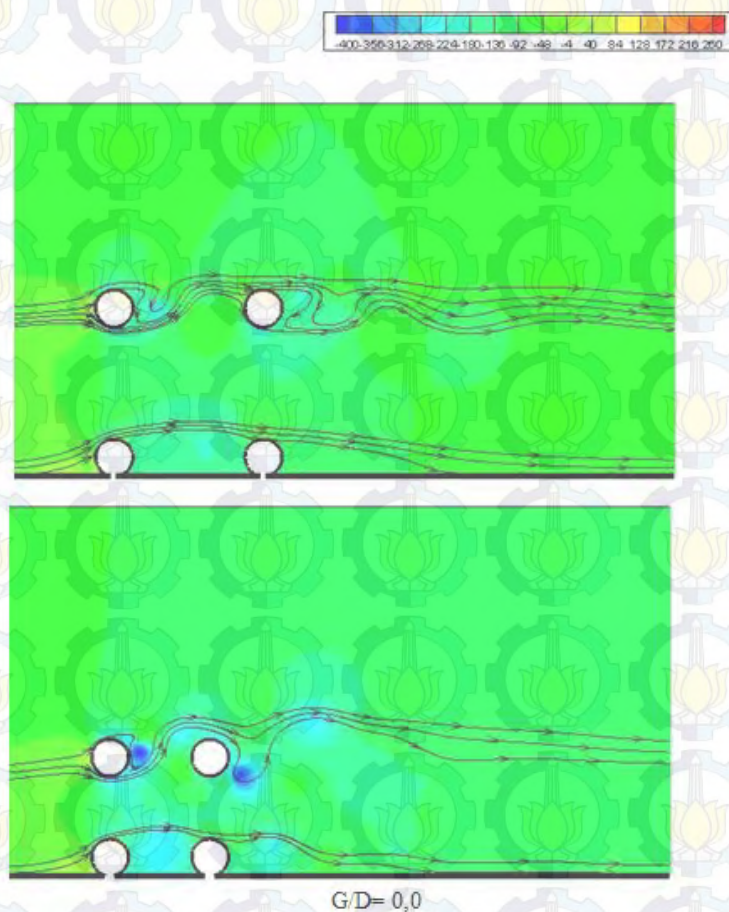
Indikasi keenam, terjadi kesamaan tren **profil kecepatan** dibelakang silinder downstream, silinder-2 dan silinder-4, pada rasio  $L/D=4,0$  dan  $L/D=2,7$  untuk seluruh rasio gap  $G/D$ . (Gambar 4.163)



Gambar 4.163. Perbandingan Profil Kecepatan Daerah Wake Silinder Downstream dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* Dekat Dinding dengan  $L/D=4,0$  dan  $L/D=2,7$  pada Variasi  $G/D=0,0$ ,  $G/D=0,2$ , dan  $G/D=1,0$  pada  $Re=5,3 \times 10^4$ , Hasil Eksperimen

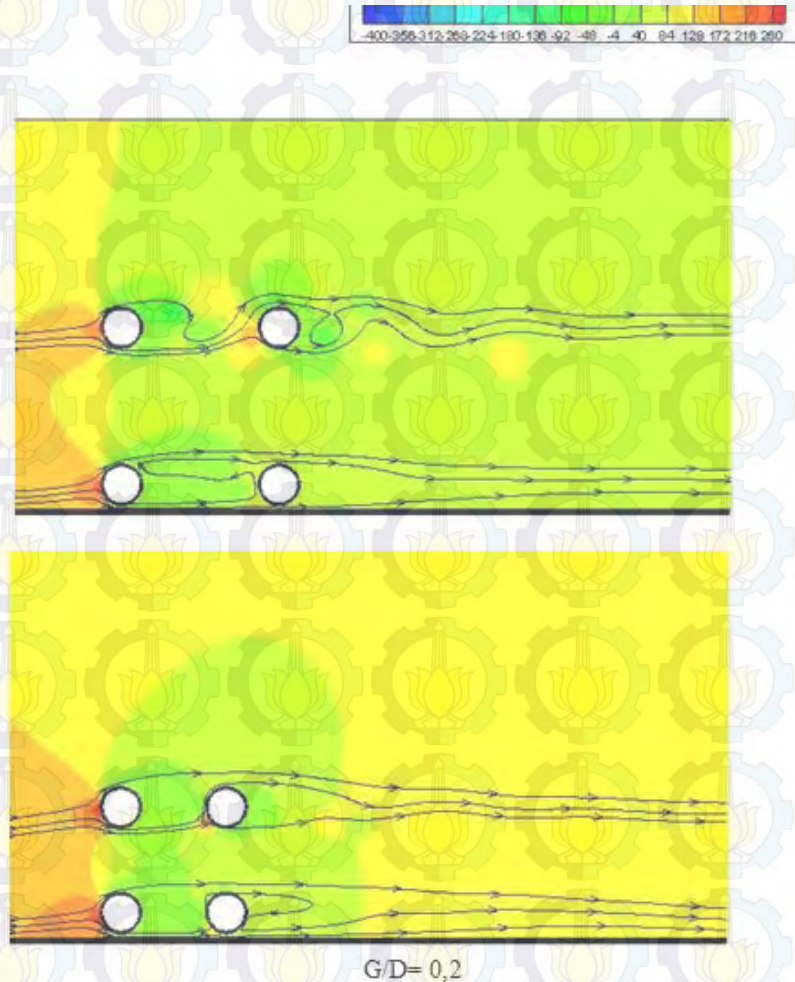
Pada downstream silinder-2 dengan adanya silinder tersebut yang diletakkan dekat dinding membuat aliran di gap mengalami defisit momentum, dan defisit ini berkurang dengan meningkatnya rasio  $G/D$ . Perbedaan dari profil kecepatan terletak pada besaran rasio  $u/U_{\max}$  antara rasio  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ . Terlihat adanya defisit momentum yang lebih kecil antara  $L/D= 4,0$  dibanding  $L/D= 2,7$  pada aliran di celah antara silinder lower dan silinder upper terutama di rasio  $0,4 \leq G/D \leq 1,0$ .

Indikasi ketujuh, berdasarkan hasil visualisasi dari pressure contour dan stream traces, pada rasio gap  $(G/D)= 0,0$  (Gambar 164), tampak pada kedua rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$  terlihat adanya perbedaan ketika aliran setelah melintasi silinder upstream. Karena jarak yang lebih kecil (rasio spasi  $L/D= 2,7$ ) membuat aliran terdefleksi ke upperside silinder-4, sementara pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  momentum aliran pada upperside silinder upstream mampu membuat aliran diantara silinder-3 dan silinder-4 reattachment pada lowerside silinder-4.



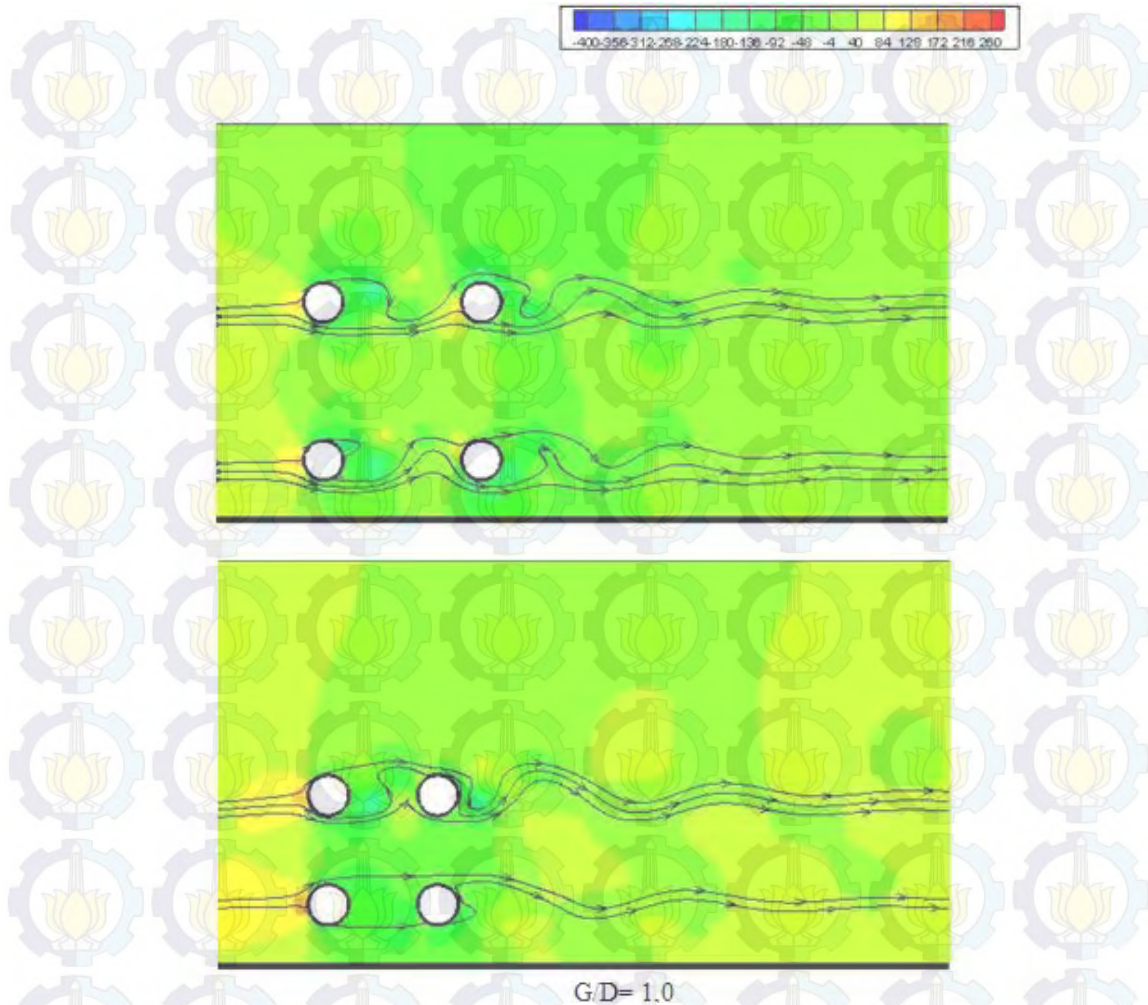
Gambar 4.164. Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada  $G/D= 0,0$

Sedangkan pada rasio gap  $G/D= 0,2$  (Gambar 4.165) terlihat bahwa outer shear layer silinder-3 melingkupi uppside silinder-4 pada rasio spasi  $L/D= 2,7$ , sementara pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  outershear layer membentuk vortices shed di daerah wake silinder-3.



Gambar 4.165. Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada  $G/D= 0,2$

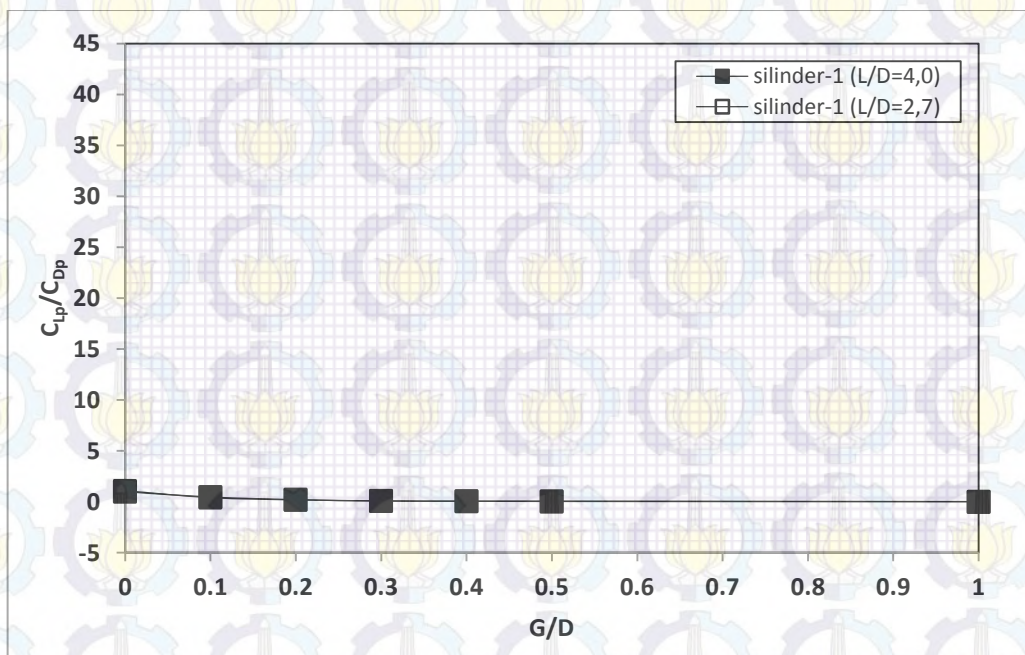
Sementara pada rasio gap  $G/D= 1,0$  (Gambar 4.166) kedua silinder upstream dan silinder downstream sudah membentuk vortices shed di daerah wake untuk rasio spasi  $L/D= 4,0$ , sedangkan pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  hanya silinder upper yang terbentuk vortices shed di daerah wake. Untuk silinder lower, shear layer dari silinder-1 melingkupi silinder-2. Hal ini dikarenakan jarak rasio yang cukup dekat antara silinder-1 dan silinder-2 sehingga membuat momentum aliran masih reattachment pada kontur side silinder-2.



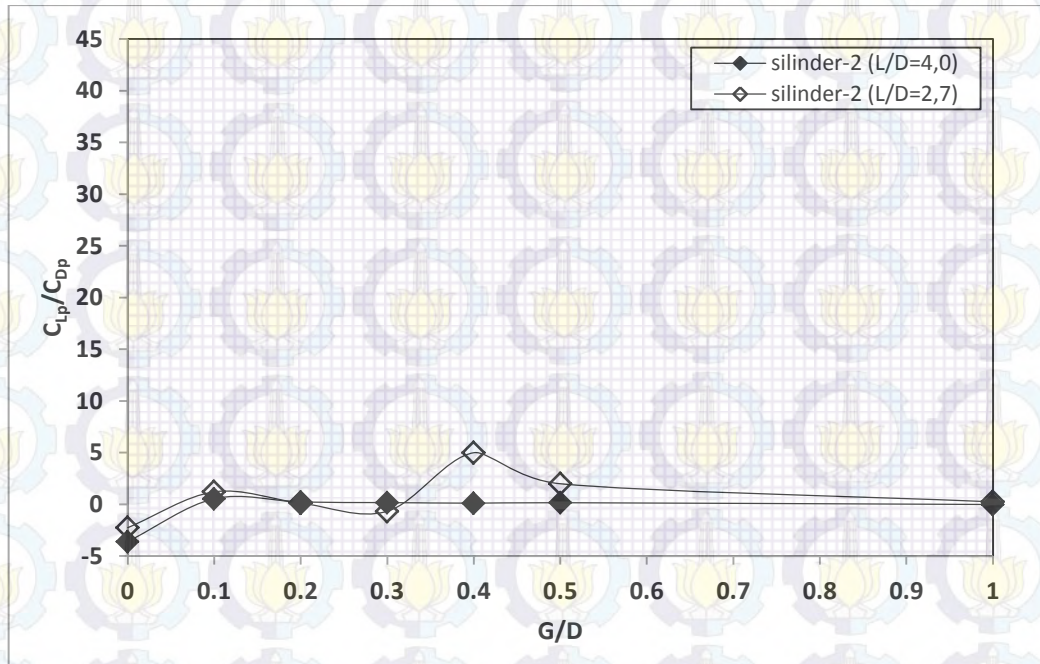
Gambar 4.166. Perbandingan Pressure Contour (Pa) dan Stream Traces pada  $G/D= 1,0$

Indikasi kedelapan, Gambar 4.167 menunjukkan hubungan antara rasio gap  $G/D$  dengan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ . Melalui Gambar 4.167a terlihat pada kedua rasio spasi  $L/D$ , untuk silinder-1 peningkatan rasio gap terutama pada rasio  $0,0 < G/D \leq 0,1$  menyebabkan terjadinya penurunan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ . Tetapi peningkatan rasio gap  $0,1 < G/D \leq 1,0$  berikutnya relatif tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , artinya rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  cenderung tetap. Selanjutnya untuk silinder-2 (Gambar 4.167b) pada rasio spasi  $L/D= 4,0$  peningkatan rasio gap  $0,0 < G/D \leq 0,1$  menyebabkan terjadinya peningkatan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , tetapi peningkatan berikutnya pada rasio gap  $0,1 < G/D \leq 1,0$  relatif tidak berpengaruh terhadap perubahan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , artinya rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  cenderung tetap. Sementara untuk rasio spasi  $L/D= 2,7$

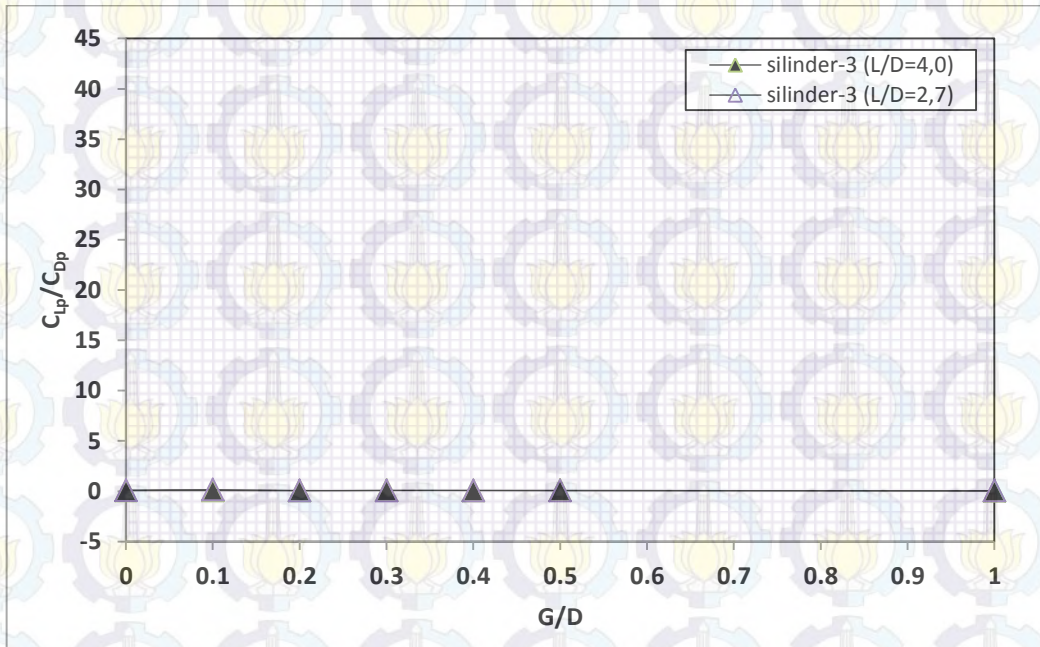
perubahan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  hampir terjadi pada keseluruhan rasio gap  $G/D$ . Secara rinci dapat dijelaskan sebagai berikut: pada rasio gap  $G/D \leq 0,1$  terjadi peningkatan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , selanjutnya pada rasio gap  $0,1 < G/D \leq 0,3$  terjadinya penurunan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , pada rasio gap  $0,3 < G/D \leq 0,4$  terjadi peningkatan kembali rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , dan terakhir pada rasio  $G/D > 0,4$  terjadi penurunan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ . Dibanding dengan rasio spasi  $L/D = 4,0$ , ini menunjukkan adanya interferensi aliran pada silinder-2 dari silinder disekitarnya yang dikarenakan rasio spasi yang lebih kecil. Berikutnya untuk silinder-3 (Gambar 4.167c) pada kedua rasio spasi  $L/D = 4,0$  dan  $L/D = 2,7$  peningkatan rasio gap  $G/D$  dari  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  relatif tidak berpengaruh terhadap perubahan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , artinya rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  relatif tetap. Terakhir untuk silinder-4 (Gambar 4.167d) pada rasio spasi  $L/D = 4,0$  tidak terjadi perubahan dalam rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  dengan meningkatnya rasio gap dari  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ . Sedangkan untuk rasio spasi  $L/D = 2,7$  terjadi perubahan yang sangat signifikan dari rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  ketika rasio gap  $G/D$  berubah. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut: pada rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  terjadi peningkatan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , tetapi peningkatan rasio ini yang signifikan terjadi pada rasio gap  $0,1 < G/D \leq 0,2$ . Pada rasio gap  $0,2 < G/D \leq 0,3$  terjadi penurunan rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , bahkan penurunan ini sampai pada rasio yang negatif.



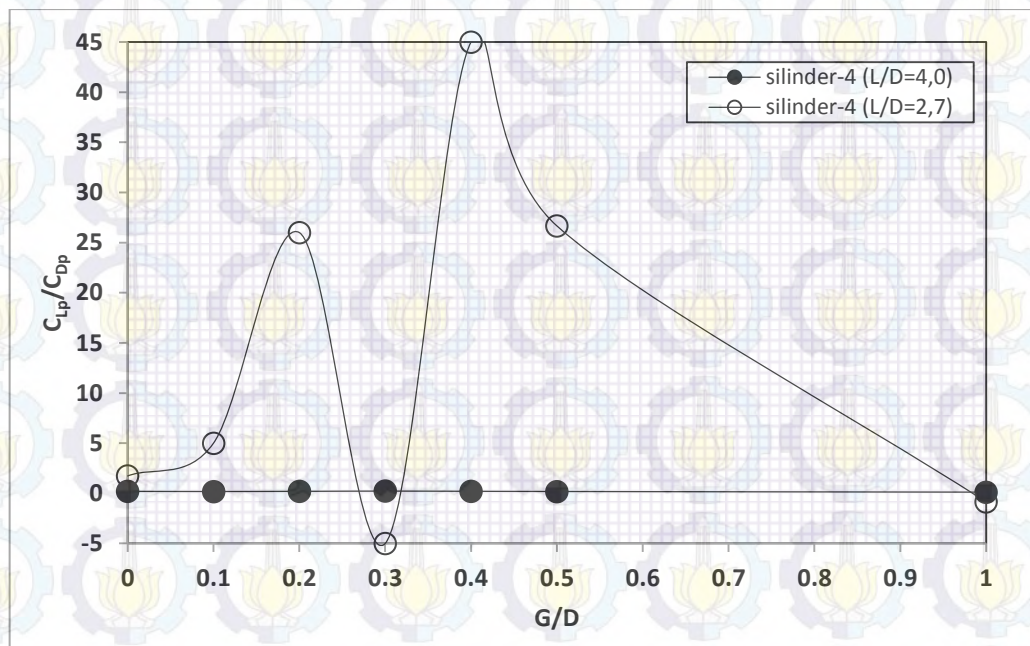
(a)



(b)



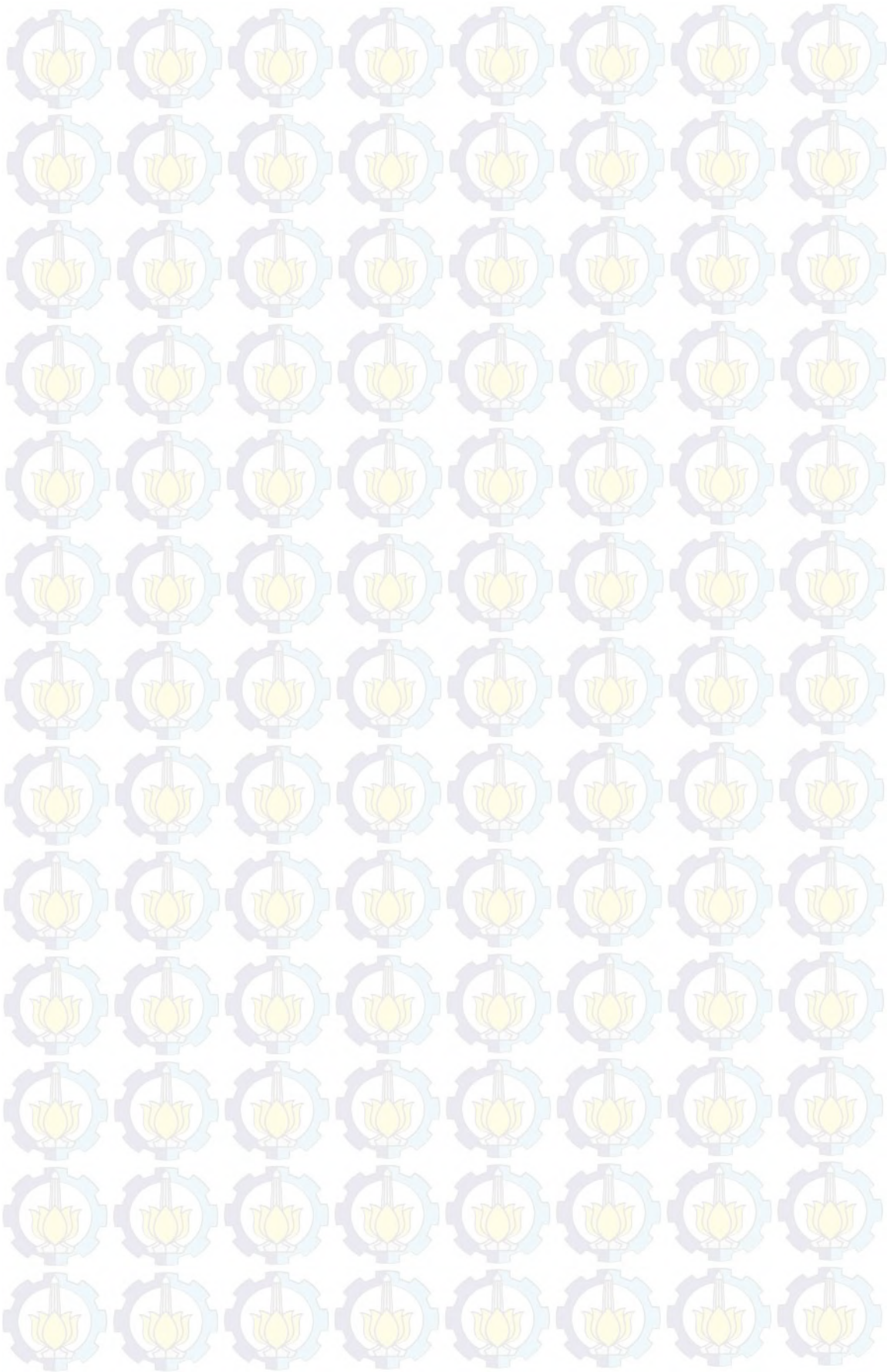
(c)



(d)

Gambar 4.167. Perbandingan rasio gap ( $G/D$ ) dengan rasio koefisien ( $C_{Dp}/C_{Lp}$ ): a) silinder-1, b) silinder-2, c) silinder-3, dan d) silinder-4 antara rasio spasi  $L/D=4,0$  dan  $L/D=2,7$

Selanjutnya pada rasio gap  $0,3 < G/D \leq 0,4$  terjadi peningkatan kembali dari rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$ , bahkan peningkatan rasio ini lebih besar dibanding ketika rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,1$ . Setelah rasio gap  $G/D > 0,4$ , peningkatan rasio gap membuat besaran rasio  $C_{Lp}/C_{Dp}$  menurun atau semakin mengecil. Ini menunjukkan adanya interferensi aliran di silinder-4 yang berasal dari silinder didekatnya, dan interferensi yang berlangsung pada silinder ini lebih besar dibanding silinder-2.





## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisa data dan pembahasan terhadap hasil eksperimen dan simulasi susunan empat silinder sirkular dekat dinding pada rasio spasi  $L/D = 4,0$  dan  $L/D = 2,7$  dengan memvariasikan rasio gap  $G/D = 0,0 \div 0,5$  dan  $G/D = 1,0$  pada  $Re = 5,3 \times 10^4$ , maka dapat disusun beberapa simpulan untuk membuktikan hipotesis yang diajukan pada bab pendahuluan:

1. Distribusi tekanan dari masing-masing kontur silinder dalam susunan empat silinder sirkular in-line square dipengaruhi oleh adanya dinding. Pengaruh dinding yang sangat kuat terutama pada rasio gap  $G/D = 0,0$ , kuat pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$ , melemah pada rasio  $0,3 \leq G/D \leq 0,5$ , dan tidak ada pengaruh pada rasio gap  $G/D = 1,0$ .
2. Nilai koefisien drag pressure ( $C_{Dp}$ ) masing-masing silinder dari susunan silinder sirkular in-line square selain dipengaruhi adanya dinding, juga dipengaruhi oleh besaran rasio spasi  $L/D$  dari susunan itu sendiri. Pada rasio spasi  $L/D = 4,0$  terjadi kenaikan nilai  $C_{Dp}$  yang maksimal ketika rasio gap  $G/D$  meningkat ini terutama terjadi pada silinder-1 dan silinder-3, sementara pada silinder-2 dan silinder-4 kenaikan nilai  $C_{Dp}$  ini relatif kecil. Bahkan untuk silinder-4 perubahan nilai  $C_{Dp}$  ini relatif kurang signifikan khususnya pada rasio gap  $0,2 \leq G/D \leq 0,5$ , dan mengalami penurunan pada rasio  $G/D = 1,0$ . Akan tetapi pada rasio spasi  $L/D = 2,7$ , bertambah besarnya rasio  $G/D$  membuat nilai  $C_{Dp}$  ini menurun terutama pada silinder-1, silinder-3 dan silinder-4, hanya pada silinder-2 khususnya pada rasio  $0,1 \leq G/D \leq 0,2$  nilai  $C_{Dp}$  meningkat ketika rasio gap bertambah besar. Baru pada rasio  $G/D \geq 0,3$  nilai  $C_{Dp}$  menurun ketika rasio gap bertambah besar. Sementara pada silinder-4 terjadi peningkatan nilai  $C_{Dp}$  pada rasio  $G/D = 1,0$ .
3. Nilai koefisien lift pressure ( $C_{Lp}$ ) dari masing-masing silinder dari susunan silinder sirkular in-line square selain dipengaruhi adanya dinding, juga dipengaruhi oleh besaran rasio spasi  $L/D$  dari susunan itu sendiri. Pada

rasio spasi  $L/D= 4,0$  terjadi penurunan nilai koefisien lift ketika rasio gap  $G/D$  bertambah besar. Hal ini terjadi pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$  terutama pada silinder-1 dan silinder-2. Fenomena yang sama juga terjadi pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  untuk silinder-1 dan silinder-2, dimana nilai  $C_{Lp}$  mengalami penurunan ketika rasio  $G/D$  bertambah besar. Sedangkan silinder-3 dan silinder-4 terjadi fenomena yang berlawanan antara rasio spasi  $L/D= 4,0$  dan  $L/D= 2,7$ . Pada rasio  $L/D= 4,0$  nilai koefisien lift ini relatif meningkat ketika rasio gap  $G/D$  bertambah besar, khususnya pada rasio  $0,0 \leq G/D \leq 0,5$ . Sedangkan pada rasio  $L/D= 2,7$  terjadi sebaliknya nilai  $C_{Lp}$  relatif menurun ketika rasio  $G/D$  bertambah besar. Sementara pada rasio  $G/D= 1,0$  untuk rasio spasi  $L/D= 4,0$  semua silinder mulai dari silinder-1, silinder-2, silinder-3 dan silinder-4 mengalami penurunan nilai koefisien lift. Akan tetapi untuk rasio  $L/D= 2,7$  silinder-1 dan silinder-3 mengalami penurunan nilai  $C_{Lp}$ , sedangkan silinder-2 dan silinder-4 mengalami peningkatan nilai koefisien liftnya pada rasio  $G/D= 1,0$ .

4. Profil kecepatan di daerah wake silinder downstream selain dipengaruhi oleh rasio gap  $G/D$  dinding yang ditempatkan dekat susunan silinder in-line square, juga dipengaruhi oleh besaran rasio spasi  $L/D$ . Pada rasio  $L/D= 4,0$  dengan rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  profil kecepatan minimum di daerah wake silinder-2 mengalami peningkatan kecepatan seiring dengan semakin besarnya rasio gap  $G/D$ . Sementara itu kecepatan maksimum pada daerah wake antara silinder lower dan silinder upper relatif tidak terpengaruh seiring dengan meningkatnya rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ . Selanjutnya di daerah wake silinder-4 perubahan rasio gap dari  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$  relatif juga kurang mempengaruhi kecepatan minimum yang terjadi. Sedangkan pada rasio  $L/D= 2,7$  profil kecepatan minimum di daerah wake silinder-2 juga mengalami peningkatan kecepatan seiring dengan meningkatnya rasio gap dari  $0,0 \leq G/D \leq 1,0$ . Sementara kecepatan maksimum pada daerah wake antara silinder lower dan silinder upper mengalami penurunan terutama pada rasio  $G/D= 0,3$  dibanding rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$  dan rasio  $G/D \geq 0,4$  yang relatif tetap. Akan tetapi di daerah wake silinder-4 perubahan kecepatan minimumnya dapat

diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelompok berdasarkan rasio gap  $G/D$ . Klasifikasi pertama pada rasio gap  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , kecepatan minimum mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya rasio gap  $G/D$ . Klasifikasi kedua dan ketiga pada rasio  $G/D= 0,3$  dan rasio  $G/D \geq 0,4$  kecepatan minimum mengalami penurunan setelah itu mengalami peningkatan kembali walaupun relatif kecil seiring dengan meningkatnya rasio  $G/D$ . Akan tetapi kecepatan minimum pada rasio  $G/D= 1,0$  di daerah wake silinder-2 lebih kecil dibanding di daerah wake silinder-4.

5. Bilangan Strouhal ( $St$ ) di daerah wake silinder downstream selain dipengaruhi oleh rasio gap  $G/D$  antara susunan silinder in-line square dengan dinding, juga dipengaruhi oleh rasio spasi  $L/D$ . Pada rasio  $L/D= 4,0$  menunjukkan bahwa frekuensi vortex shedding di daerah wake silinder-2 sangat besar dipengaruhi oleh dinding, terutama pada rasio gap  $G/D= 1,0$ . Sementara frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-4 relatif tidak dipengaruhi oleh perubahan jarak terhadap dinding atau rasio  $G/D$ . Selanjutnya pada rasio spasi  $L/D= 2,7$  pada batasan rasio  $G/D$  yang kecil  $0,0 \leq G/D \leq 0,2$ , bertambahnya rasio membuat frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-2 relatif tetap, sedangkan pada rasio  $0,4 \leq G/D \leq 0,5$  frekuensi vortex shedding cenderung tetap, dan pada rasio yang besar  $G/D= 0,3$  terjadi frekuensi vortex sheddingnya yang besar. Sementara itu kenaikan rasio gap  $G/D$  mempengaruhi frekuensi vortex shedding yang terjadi di daerah wake silinder-4.

## 5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini maka pada penelitian selanjutnya perlu diperhatikan beberapa hal berikut ini:

1. Untuk mendapatkan informasi yang jelas tentang pengaruh rasio gap  $G/D$  terhadap karakteristik aliran pada susunan silinder sirkular in-line square dekat dinding, maka perlu diteliti lebih lanjut dengan membuat interval rasio spasi  $L/D$  yang lebih pendek dan banyak sehingga bisa diperoleh

suatu informasi yang lebih rinci tentang perubahan fenomena karakteristik aerodinamik dari susunan silinder tersebut.

2. Untuk mendapatkan hasil perhitungan bilangan Strouhal yang akurat, maka diperlukan alat ukur yang lebih representatif dalam mendeteksi perubahan fluktuasi frekuensi dalam aliran. Sensor alat ukur yang digunakan seharusnya bisa mendeteksi fluktuasi aliran yang bersumber dari tiga arah, agar dapat diketahui dengan benar vorticity yang berlangsung di daerah wake.
3. Untuk pengukuran koefisien drag maupun koefisien lift seharusnya menggunakan metode pengukuran langsung, agar kedua penyebab timbulnya koefisien tersebut yaitu karena geometri (dalam hal ini disebut efek pressure) dan karena viskositas (yang disebut efek viskositas) dapat diketahui sejauh mana peranannya terhadap kedua koefisien diatas.
4. Untuk mendapatkan visualisasi aliran yang tepat dan sesuai dalam bentuk kontur tekanan, kontur kecepatan, velocity pathline, dan kontur vorticity menggunakan metode simulasi dengan software FLUENT 6.3.26 maka perlu diperhatikan beberapa hal seperti: bentuk dan jarak meshing dengan kontur (silinder ataupun plat datar), pengambilan kondisi batas, dan pengambilan model viscous.

## DAFTAR PUSTAKA

Achenbach, E., (1971), "Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder", *Journal of Fluid Mechanics*, Volume: 46, p. 321-335.

Alam Mahbub, Md., Moriya, M., and Sakamoto, H., (2003), "Aerodynamics characteristics of two side-by-side circular cylinders and application of wavelet analysis on the switching phenomenon", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 18, p. 325-346.

Alam Mahbub, Md., Sakamoto, H., and Zhou, Y., (2005), "Determination of flow configurations and fluid forces acting on two staggered circular cylinders of equal diameter in cross-flow", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 21, p. 363-394.

Bearman, P.W., (1969), "On vortex shedding from a circular cylinder in the critical Reynolds number regime", *Journal of Fluid Mechanics*, Volume: 37, Issue 03, p. 577-585.

Bearman, P.W., (1984), "Vortex shedding from oscillating bluff bodies", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Volume: 16, p. 195-222.

Bruun, H. H., (1995), *Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press Inc., United States.

Choi, J.H., and Lee, S.J., (2000), "Ground effect of flow around an elliptic cylinder in a turbulent boundary layer", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 14, p.697-709.

Fox, Robert W., and McDonald, Alan T., (2010). *Introduction to Fluid Mechanics*, Seventh edition: SI version, John Wiley & Sons, Inc., United States of America.

Goldstein, Sydney, (1965), *Modern Developments in Fluid Dynamics: Volume 1*, Oxford University Press.

Harichandan, A.B., and Roy, A., (2012), "Numerical investigation of flow past single and tandem cylindrical bodies in the vicinity of a plane wall", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 33, p. 19-43.

Lam, K., and Fang, X., (1995), "The effect of interference of four equispaced cylinders in cross flow on pressure and force coefficient", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 9, February, Issue 2, p. 195-214.

Lam, K., Gong, W.Q., and So, R.M.C., (2008), "Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 24, p. 34-57.

Lam, K., and Lo, S.C., (1992), "A visualization study of cross flow around four cylinders in a square configuration", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 6, p. 109-131.

Lam, K., Li, J.Y., Chan, K.T., and So, R.M.C., (2003a), "Flow pattern and velocity field distribution of cross-flow around four cylinders in a square configuration at a low Reynolds number", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 17, p. 665-679.

Lam, K., Li, J.Y., and So, R.M.C., (2003b), "Force coefficients and Strouhal numbers of four cylinders in cross flow", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 18, p. 305-324.

Lam, K., and Zou, L., (2009), "Experimental study and large eddy simulation for the turbulent flow around four cylinders in an in-line square configuration", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume: 20, p. 276-285.

Lam, K., and Zou, L., (2010), "Three dimensional numerical simulations of cross flow around four cylinders in an in-line square configuration", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 26, p. 482-502.

Lei, C., Cheng, L., and Kavanagh, K., (1999), "Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 80, p. 263-286.

Lienhard, John, H., (1966), "Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders", *Bulletin 300*, Technical Extension Service, Washington State University.

Lin, Chang, Jung Lin, Wei, and Shing Lin, Sing, (2005), "Flow characteristics around a circular cylinder near a plane boundary", 16<sup>TH</sup> *International Symposium on Transport Phenomena*, Prague.

Merrick, Ryan, and Bitsuamlak, Girma, (2008), "Control of flow around a circular cylinder by the use of surface roughness: A computational and experimental approach".

Meyditasari, Lina, (2011), "Experimental study of flow characteristics across four circular cylinders with in-lined arrangement and length distance  $L/D=4$  near side wall: Study case for the influence of gap ratio  $0.800 \leq G/D \leq 1.000$ ", *Final Project*, Mechanical Engineering Department, Faculty of Industrial Technology, Sepuluh Nopember Institute of Technology.

Niemann, H.J., and Holscher, N., (1990), "A review of recent experiments on the flow past circular cylinders", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 33, p. 197-209.

Nishino, T., Roberts, G.T., and Zhang, X., (2008), "Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 24, p.18-33.

Prasad, A., and Williamson, C.H.K., (1997), "A method for the reduction of bluff body drag", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 69-71, p.155-167.

Price, S.J., Sumner, D., Smith, J.G., Leong, K., and Paidoussis, M.P., (2002), "Flow visualization around a circular cylinder near to a plane wall", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 16, p. 175-191.

Ramamurthy, A.S., and Lee, P.M., (1973), "Wall effects on flow past bluff bodies", *Journal of Sound and Vibration*, Volume: 31(4), p. 443-451.

Sayers, A.T., (1988), "Flow interference between four equispaced cylinders when subjected to a cross flow", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 31, p. 9-28.

Sumner, D., (2010), "Two circular cylinders in cross-flow: A review", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 26, p. 849-899.

Tsutsui, T., and Igarashi, T., (2002), "Drag reduction of a circular cylinder in an air stream", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume: 90, p.527-541.

Wailanduw, Grummy A., Yuwono, Triyogi, and Widodo, Wawan Aries, (2014), "Flow characteristics around four circular cylinders in equispaced arrangement near a plane wall", *Applied Mechanics and Materials*, Volume: 493, p. 245-250.

Wailanduw, Grummy A., Yuwono, Triyogi, and Widodo, Wawan Aries, (2015), "Flow around two side-by-side circular cylinders with intermediate spaced near a plane wall", *Advances and Applications in Fluid Mechanics*, Volume: 18(2), p. 277-290.

Wang, X. K., Gong, K., Liu, H., Zhang, X. J., and Tan, S. K.,(2013), "Flow around four cylinders arranged in a square configuration", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 43, p.179-199.

Widodo, W.A., (2008), Simulasi numerik aliran melintasi dua silinder sirkular tersusun tandem dengan pengaruh side wall dengan jarak gap ( $G/D= 0,2$ ), *Laporan Penelitian*, ITS, Surabaya.

Wilcox, David, C., (2000), Turbulence modeling for CFD: Second edition, KNI Inc, Anaheim, California.

Yuwono, Triyogi, Fahreza, Fahmi, and Widodo, Wawan Aries, (2010), "Flow around two circular cylinders in tandem arrangement near a plane wall", *Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Bali: February 9-10.

Zdravkovich, M.M., (1985), "Forces on a circular cylinder near a plane wall", *Applied Ocean Research*, Volume: 7, No. 4.

Zdravkovich, M.M., (1987), "The Effect of interference between circular cylinders in cross flow", *Journal of Fluids and Structures*, Volume: 1, p. 239-261.

Zdravkovich, M.M., (1997), *Flow around Circular Cylinders: A Comprehensive guide through flow phenomena, experiments, applications, mathematical models, and computer simulations*, Volume: 1, Oxford University Press Inc., New York.

Zdravkovich, M.M., and Pridden, D.L., (1977), "Interference between two circular cylinders; series of unexpected discontinuities", *Journal of Industrial Aerodynamics*, Volume: 2, p. 255-270.



## BIOGRAFI PENULIS



### I. BIODATA

Nama : A. Grummy Wailanduw  
 Tempat/Tanggal Lahir : Surabaya / 23 Agustus 1962  
 Pekerjaan : Dosen Jurusan Teknik Mesin, FT-UNESA  
 Pangkat/Golongan : Pembina Utama Muda/IVc  
 Jabatan Fungsional : Lektor Kepala  
 Masa Kerja : 30 tahun  
 Jenis kelamin : Laki-laki  
 Alamat Kantor : Kampus FT-UNESA, Jl. Ketintang, Surabaya.  
 Alamat Rumah : Jl. Kedungsroko 72, Surabaya  
 No. HP : 0817585708  
 Email : [grummy\\_wailanduw@yahoo.co.id](mailto:grummy_wailanduw@yahoo.co.id)

### II. PENDIDIKAN

1. SD IMKA IV, Surabaya, Lulus Tahun 1973
2. SMP IMKA I, Surabaya, Lulus Tahun 1976
3. STM Berdikari, Surabaya, Lulus Tahun 1980
4. S1, Jurusan Pendidikan Teknik Mesin IKIP Surabaya, Lulus Tahun 1985
5. S2, Jurusan Pendidikan Teknologi Kejuruan IKIP Yogyakarta, Lulus Tahun 1996
6. Pra-Pasca, Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, Lulus Tahun 1998
7. S2, Jurusan Teknik Mesin ITS, Surabaya, Lulus Tahun 2002

### III. PENGALAMAN PENELITIAN DAN KARYA ILMIAH

-Penelitian 5 tahun terakhir

Tahun	Judul Penelitian	Ketua/ Anggota	Sumber Dana
2015	Simulasi numerik aliran melintasi susunan empat silinder sirkular in-line dekat dinding	Mandiri	Kemenristek-Dikti
2013 dan 2014	Rancang bangun alat recovery dan recycle refrigeran untuk sistem AC kendaraan bermotor guna mendukung program perlindungan lapisan ozon	Ketua	BOPTN Unesa

-Karya Ilmiah Dalam Jurnal

Tahun	Judul	Penerbit Jurnal
2016	Numerical simulation of cross-flow around four circular cylinders in-line square configuration near a plane wall	ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol.11, No.2, January 2016
2015	Flow around two side-by-side circular cylinders with intermediate spaced near a plane wall	Advances and Application in Fluid Mechanics, Vol.18, No.2, October 2015
2014	Flow characteristics around four circular cylinders in equispaced arrangement near a plane wall	Applied Mechanics and Materials, Vol.493, 2014
2014	Simulasi numerik dengan pendekatan 3D-URANS aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular dekat dinding pada "small-gap"	Jurnal "Teknik Mesin", Vol.15, No.1, Universitas Kristen Petra
2011	Karakteristik lapis batas permukaan plat datar dengan gangguan obstacle berbentuk rectangular menggunakan simulasi numerik model turbulensi RANS "two-equation"	Jurnal "TEKNIKA" Vol.12, No.2 Agustus 2011, FT-UNESA

-Karya Ilmiah yang Diseminarkan

Tahun	Judul	Penyelenggara
2015	Numerical simulation of cross-flow around four circular cylinders in-line square configuration near a plane wall	2 <sup>nd</sup> ICOME, Bali 3-5 September 2015, ITS
2014	Simulasi numerik dengan pendekatan 3D-URANS aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular dekat dinding pada "small-gap"	SNTM 9, Universitas Kristen Petra, Surabaya
2013	Flow characteristics around four circular cylinders in equispaced arrangement near a plane wall	ICOME, Mataram 12-14 September 2013, ITS
2013	Simulasi numerik dengan pendekatan U-RANS pada aliran yang melintasi susunan dua silinder sirkular side-by-side dekat dinding	SNTM 8, Universitas Kristen Petra, Surabaya
2012	Simulasi numerik 2-D aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular in-line dekat dinding	SNPs XII, PPs-ITS, Surabaya

2012	Simulasi numerik dengan pendekatan RANS pada aliran yang melintasi silinder sirkular dekat dinding	SNTM 7, Universitas Kristen Petra, Surabaya
------	--	---

#### IV. MINAT KEILMUAN

- Aerodinamika otomotif
- Mekanika Fluida

