

Numerical Simulation of Cross Flow Around Four Circular Cylinders In An In-Line Square Configuration Near A Plane Wall At Laminar Boundary Layer

A. Grummy Wailanduw^{1,*}, Priyo Heru Adiwibowo² dan Budihardjo Achmadi Hasyim³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

*Corresponding author: grummywailanduw@unesa.ac.id

Abstract. The flow characteristics around four circular cylinders in an in-line square configuration near a plane wall at laminar boundary layer were investigated numerically. The pressure distributions on the plane wall and on the each cylinder surface were observed for a spacing ratio $L/D=2.7$ (L , center to center spacing between cylinders; D , diameter), $G/D=0.3$ (G , gap spacing between cylinder surface and the plane wall), and a variation of $x/D=5, 10, \text{ and } 15$ (x , a distance between leading edge of the plane wall and center of the upstream cylinders) in a uniform flow at a Reynolds Number of 1.743×10^4 . The 2D U-RANS numerical simulation with $k-\omega$ SST as viscous model with using FLUENT 6.3.26 software was used to observe the flow phenomena occurred around the cylinders. The results indicating that there were an effect of boundary layer thickness to the pressure distribution of the cylinders.

Abstrak. Karakteristik aliran di sekeliling susunan empat silinder sirkular dekat dinding pada lapis batas laminar diteliti secara simulasi numerik. Distribusi tekanan di dinding dan di setiap permukaan silinder diamati pada $L/D=2,7$ (L adalah jarak pusat masing-masing silinder; D adalah diameter silinder), $G/D=0,3$ (G adalah jarak gap permukaan silinder dengan dinding), dengan variasi $x/D=5, 10, \text{ dan } 15$ (x adalah jarak *leading edge* dari dinding dengan pusat silinder *upstream*) dengan bilangan Reynolds $1,743 \times 10^4$ berdasarkan diameter silinder. Metode simulasi numerik dengan pendekatan 2D U-RANS dan model viskos $k-\omega$ SST menggunakan bantuan software FLUENT 6.3.26 untuk mengamati fenomena aliran sekeliling silinder. Hasil penelitian menunjukkan adanya pengaruh perubahan tebal lapis batas terhadap distribusi tekanan pada setiap silinder.

Keywords: simulasi numerik, susunan empat silinder sirkular, dekat dinding, lapis batas laminar

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Aliran yang melintasi silinder sirkular dekat dinding banyak dijumpai dalam *aplikasi engineering*, seperti konstruksi sistem perpipaan di bawah laut, alat penukar kalor *shell and tube* atau *tube banks*. Ketika aliran melintasi silinder sirkular yang ditempatkan dekat dinding akan terbentuk 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. Selain itu juga dipengaruhi oleh adanya *flow interference* akibat

pola aliran yang terbentuk antara dinding dan silinder sirkular tersebut.

Flow interference adalah fenomena aliran yang terbentuk ketika aliran pada silinder sirkular dipengaruhi oleh aliran dinding tersebut. Fenomena *flow interference* ini sangat bergantung pada kecepatan *free stream* dan diameter silinder (bilangan Reynolds), dan sifat-sifat lapis batas, seperti jenis dan tebal lapis batas dari 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* 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.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, susunan empat silinder sirkular secara *equispaced* di *center line*, pada sudut orientasi (α) = 0° , *downstream cylinder* akan dilingkupi oleh *wake* dari *upstream cylinder*, atau terjadi *re-attachment* lapis geser bebas (*free shear layers*) dari aliran *upstream cylinder* pada *downstream cylinder* 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 *downstream cylinder*, sementara pada daerah *wake* dari *upstream cylinder* tidak terjadi *vortex shedding*. Sedangkan pada rasio $L/D = 1,26$ terjadi kondisi *bistable* pada *downstream cylinder*, yaitu terbentuknya *narrow wake* pada frekuensi *shedding* yang besar, dan *wide wake* pada 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 *downstream cylinder*.

Sementara menurut hasil penelitian terdahulu tentang 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 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 St 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 *upstream* silinder 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. Sementara pada susunan 2 silinder secara side-by-side dengan $T/D = 1,5$ yang ditempatkan dekat dinding dengan $G/D = 0,2$ diperoleh aliran di daerah *wake* bias ke satu sisi sehingga terbentuk *wide wake* dan *narrow wake*, dan ini menyebabkan terjadi perbedaan yang besar dari nilai *drag coefficient* silinder *upper* dengan silinder *lower*.

Beberapa peneliti seperti [1-4], telah melakukan penelitian secara eksperimen maupun secara visualisasi tentang pola aliran yang terjadi di sekeliling susunan *equispaced* empat 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 (α). Peneliti lainnya [5-7], melakukannya pada kondisi pengujian di *turbulent flow region* dan *laminar flow region*.

Jadi penelitian-penelitiannya sebelumnya memfokuskan pada susunan silinder di *center-line*, silinder tunggal dan susunan dua silinder secara tandem dekat dinding. Sedangkan pada penelitian ini akan difokuskan untuk mengamati perilaku aliran yang terjadi apabila susunan 4 silinder sirkular *equispaced in-line* yang ditempatkan dekat dinding. Walaupun sebelumnya telah dilakukan penelitian awal oleh [8-9] untuk rasio $L/D = 1,5$ dengan $G/D = 0,2$ dan melalui metode simulasi numerik untuk $L/D = 4,0$ dengan $G/D = 0,1$ dan $0,3$. Untuk mendapatkan informasi tentang pengaruh rasio jarak leading edge dengan pusat silinder *upstreams* (x/D) ini terhadap pola aliran yang terbentuk disekeliling susunan silinder dekat dinding, maka dibuat variasi rasio $x/D = 5,0; 10;$ dan 15 , dengan rasio susunan silinder (L/D) = $2,7$ dan rasio gap $G/D = 0,3$. Dengan melihat hasil-hasil penelitian dari susunan 4 silinder pada *center line*, dan silinder tunggal maupun susunan 2 silinder secara tandem dan side-by-side yang ditempatkan dekat dinding, maupun penelitian awal susunan 4 silinder dekat dinding, maka diprediksi pola aliran yang terjadi disekeliling susunan 4 silinder *equispaced in-line* yang diletakkan dekat dinding akan dipengaruhi oleh variasi x/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 tebal 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.

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

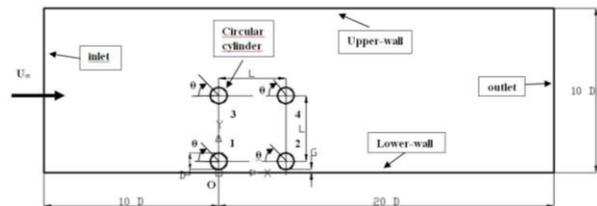
Regime aliran melalui silinder sirkular tunggal yang dipresentasikan oleh Lienhard sebagai berikut :

- Pada bilangan *Reynolds* (Re) yang sangat kecil ($Re < 5$) aliran tidak terseparasi. Seiring dengan peningkatan bilangan *Reynolds*, aliran terseparasi untuk membentuk sepaang resirkulasi eddy pada tiap sisi dari silinder.
- 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.
- 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.
- Pada bilangan *Reynolds* (Re) = 3×10^2 , memunculkan lapisan batas laminar yang melalui bagian depan silinder, saat melalui bagian belakang silinder, lapisan terseparasi dan memecah menjadi turbulente *wake*. Dengan meningkatnya bilangan *Reynolds* ($3 \times 10^2 \leq Re < 3 \times 10^5$) titik separasi akan bergerak ke depan.
- Pada bilangan *Reynolds* sekitar 3×10^5 , titik separasi akan bergerak ke belakang hal ini

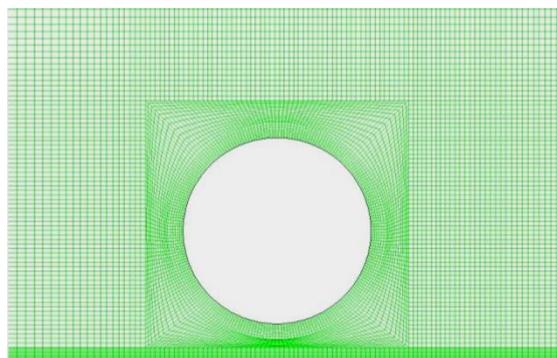
dipengaruhi oleh turbulensi aliran bebas (*free stream*) dan kekasaran permukaan benda, yang ini akan menyebabkan *drag* semakin turun dengan tajam dan *vortex shedding* menjadi tidak beraturan.

Metode Penelitian

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam simulasi numerik ini adalah: (a) Membuat geometri set-up dalam bentuk dua dimensi (2-D), untuk silinder sirkular pada jarak rasio dengan dinding (G/D)= 0,3, gambar 1; (b) Membuat meshing dua dimensi dalam bentuk *quadrilateral-map*, gambar 2; (c) Menentukan *boundary condition* dari domain yang dibuat; (d) Memilih teknik untuk iterasi, yaitu menggunakan *pressure velocity coupling SIMPLE* dan diskritisasi menggunakan *second order upwind* agar menghasilkan akurasi dan stability yang tinggi; (e) Melakukan proses iterasi dengan menggunakan pemodelan U-RANS 2D; (f) Melakukan *post processing* dari hasil iterasi.



Gambar 1. Geometri setup dan domain komputasi



Gambar 2. Bentuk meshing 2-D dari model silinder sirkular dekat dinding menggunakan *quadrilateral-map*

Untuk pengecekan *grid independency* dilakukan analisis terhadap berbagai meshing dengan variasi nodes dan face, dan diperiksa nilai maksimum y^+ (y plus). Selanjutnya dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model viskos dan hasil eksperimen pada silinder sirkular tunggal yang ditempatkan di *center line*. Hasil validasi menunjukkan bahwa dari berbagai model viskos U-RANS yang telah dicoba, model viskos *k- ω SST* memiliki hasil yang mendekati eksperimen maupun model numerik LES.

Simulasi numerik di sini menggunakan bantuan software FLUENT versi 6.3.26, untuk mengamati karakteristik aliran di sekeliling silinder sirkular. Bentuk

geometri diambil 2-D dengan tujuan untuk menyesuaikan dengan eksperimen yang pengukurannya dilakukan pada daerah *midspan*.

Karakteristik aliran yang diperoleh melalui simulasi numerik ini meliputi distribusi tekanan (koefisien tekanan, C_p), visualisasi aliran yang melintasi silinder sirkular (*velocity pathline*).

Persamaan pengendali pada aliran 2-D, *incompressible flow* dan *unsteady state*:

a. Persamaan konservasi masa:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

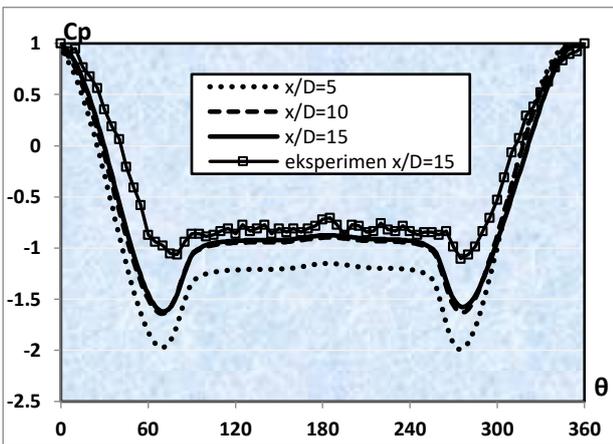
b. Persamaan momentum:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2a)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots (2b)$$

Hasil dan Pembahasan

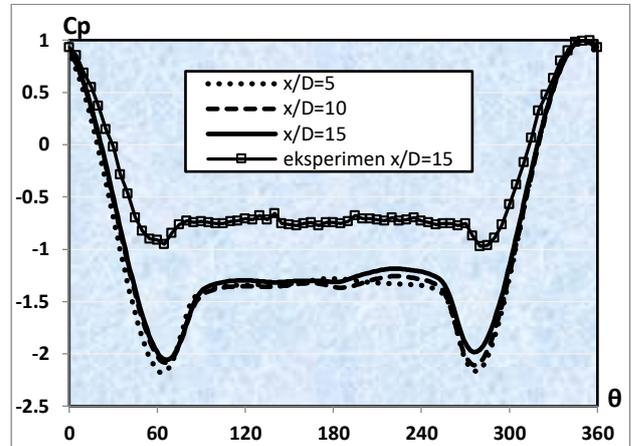
Distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur plat datar maupun pada silinder sirkular yang diprediksi oleh model turbulensi *k- ω SST* pada kecepatan 12,4 m/s, atau pada bilangan Reynolds= $1,743 \times 10^4$.



Gambar 3. 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 $G/D= 0,3$ variasi $x/D= 5; 10$ dan 15 , pada bilangan Reynolds $Re= 1,743 \times 10^4$

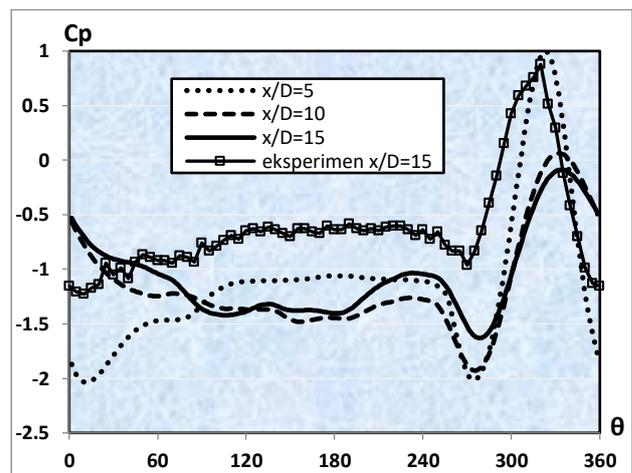
Dari gambar 3 dapat diketahui pada rasio $x/D= 5, 10$ dan 15 , harga $C_p= 1$ atau titik stagnasi bergerak ke depan pada sudut $\theta_s = 350^\circ$ menjadi 355° . Ini menunjukkan bahwa aliran yang menuju ke silinder-1 tidak tegak lurus terhadap silinder,

karena posisi peletakan silinder dekat dinding menyebabkan terjadinya efek *blockage*, sehingga sebagian besar fluida akan terdefleksi ke *upperside* silinder-1 sehingga terjadi peningkatan akselerasi, yang ditandai dari tekanan minimum yang terjadi pada $\theta= 68^\circ$ dan separasi terjadi pada $\theta= 91^\circ$.



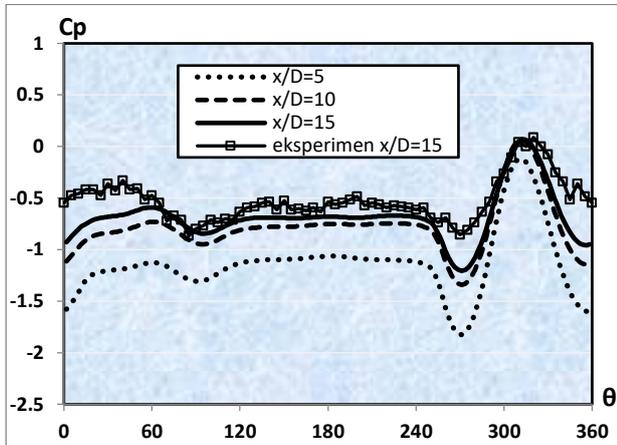
Gambar 4. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *upstream silinder-2* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,3$ variasi $x/D= 5; 10$ dan 15 , pada bilangan Reynolds $Re= 1,743 \times 10^4$

Dari gambar 4 dapat diketahui bahwa $C_p= 1$ atau titik stagnasi terjadi pada $\theta_s= 350^\circ$, ini menunjukkan bahwa momentum aliran pada *lowerside* silinder lebih besar dibanding *upperside*, sehingga titik stagnasi bergerak ke bawah menjauhi *frontside* $\theta_s= 360^\circ$. Akselerasi aliran pada *upperside* relatif kecil, hal mana ditunjukkan dari tekanan minimum pada $\theta= 65^\circ$ dan titik separasi $\theta= 95^\circ$.



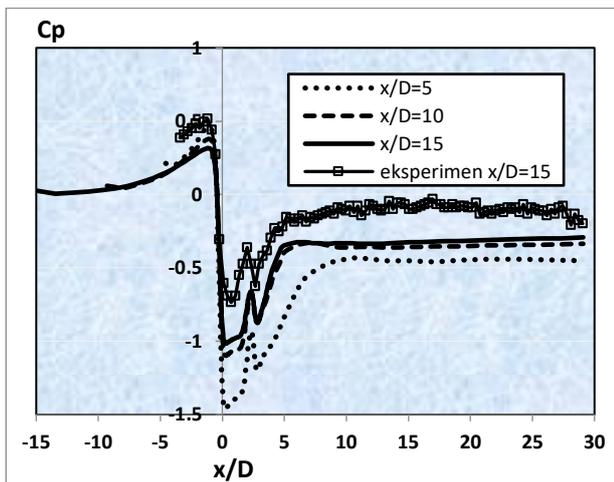
Gambar 5. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada kontur silinder *downstream silinder-3* dari susunan empat silinder sirkular *in-line square* dekat dinding dengan $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,3$ variasi $x/D= 5; 10$ dan 15 , pada bilangan Reynolds $Re= 1,743 \times 10^4$

Dari gambar 5 menunjukkan terdapat distribusi koefisien tekanan C_p yang memiliki harga yang negatif, hal ini menandakan terjadinya fenomena *shearlayer melingkupi* pada kontur silinder-3, terutama pada *frontside-upper* silinder.



Gambar 6. 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 $G/D= 0,3$ variasi $x/D= 5$; 10 dan 15, pada bilangan Reynolds $Re= 1,743 \times 10^4$

Dari gambar 6 dapat diketahui bahwa distribusi koefisien tekanan C_p untuk silinder-4 memiliki harga yang negatif, ini menunjukkan bahwa pada kontur silinder dilingkupi oleh shear layer. Sementara pada *lowerside front* terjadi *reattachment* dari shear layer.



Gambar 7. Perbandingan distribusi koefisien tekanan (C_p) pada **plat datar** dekat susunan empat silinder sirkular *in-line square* dengan $L/D= 2,7$ dan $G/D= 0,3$ variasi $x/D= 5$; 10 dan 15, pada bilangan Reynolds $Re= 1,743 \times 10^4$

Gambar 7 menunjukkan distribusi koefisien tekanan sepanjang dinding yang diamati dari $-15,0 \leq x/D \leq 30,0$. Keberadaan *upstream silinder-1* dan *downstream silinder-4* yang dekat dinding

menyebabkan efek blockage pada aliran fluida yang akan melalui celah antar *lowerside* dari silinder dan dinding, ini ditandai dengan harga $C_p < 1,0$. Ketika aliran melalui celah mengalami akselerasi, yang ditandai dengan dua nilai tekanan minimum (C_p negatif) pada masing-masing silinder. Selanjutnya aliran fluida melanjutkan ke belakang, dan distribusi tekanan yang positif ini recovery menjadi static pressure pada $x/D \geq 5$, dan ini ditunjukkan dari nilai distribusi koefisien tekanan yang tetap sepanjang dinding.

Kesimpulan

Distribusi koefisien tekanan pada silinder-1 menunjukkan distribusi yang tidak simetri terutama pada seluruh rasio x/D , dimana $5,0 \leq x/D < 15,0$, yang ditandai dengan tidak adanya posisi titik stagnasi $C_p= 1$ pada front side. Ini dikarenakan posisi silinder-1 yang dekat dengan dinding datar, sehingga timbul efek blockage dan menyebabkan sebagian besar fluida mengalir ke *upperside* silinder-1.

Perpindahan fluida juga membawa penambahan momentum pada aliran diantara silinder-1 dan silinder-2, yang ditandai dengan posisi titik separasi yang bergerak ke *frontside* dari silinder-3 dengan bertambahnya rasio gap.

Koefisien base pressure pada silinder-1 menurun dengan bertambahnya rasio gap x/D , hal ini sesuai dengan penelitian [11].

Referensi

- [1] Sayers, A.T. 1988. Flow interference between four equispaced cylinders when subjected to a cross flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 31, 9-28.
- [2] 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* 6, 109-131.
- [3] 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* 9, February, Issue 2, p. 195-214.
- [4] 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* 24, 34-57.
- [5] 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* 20, 276-285.
- [6] 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* 26, 482-502.
- [7] 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* 16, 175-191.
- [8] Lin, Chang, Jung Lin, Wei, and Shing Lin, Sing. 2005. Flow characteristics around a circular cylinder near a plane boundary, 16TH International Symposium on Transport Phenomena, Prague.
- [9] Wailanduw, Grummy, A., Triyogi Yuwono, and Wawan Aries W. 2014. Flow characteristics around four circular cylinders in equispaced arrangement near a plane wall. *Applied Mechanics and Materials* 493, 245-250.
- [10] Wailanduw, Grummy, A., Triyogi Yuwono, and Wawan Aries W. 2016. Numerical simulation of cross-flow around four circular cylinders in-line square configuration near a plane wall. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 11-2, 812-817.
- [11] 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* 14, 697-709.