



Simulasi Numerik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular pada Rasio $L/D= 3,0$ Dekat Dinding

A. Grummy Wailanduw^{1,*} Priyo Heru AW²

^{1,2}Dosen Jurusan Teknik Mesin FT-Unesa, Indonesia

*Email: grummy_wailanduw@yahoo.co.id

Abstrak. Aliran yang melintasi susunan empat silinder sirkular di *center line* telah banyak dilakukan, baik secara eksperimen, simulasi, maupun visualisasi. Fenomena aliran yang terjadi di sekeliling silinder akan berbeda, ketika rasio susunan empat silinder sirkular diatur di $L/D= 3,0$ dan diletakkan dekat dinding. Pengaruh lapis batas dari dinding akan mempengaruhi aliran pada *lower cylinder* terutama *down-stream cylinder* yang sebelumnya hanya dipengaruhi oleh *up-stream cylinder*. Penelitian ini bertujuan untuk mengungkap fenomena aliran di sekeliling susunan silinder yang diletakkan dekat dengan dinding tersebut. Metode simulasi numerik disini menggunakan bantuan software FLUENT 6.3.26, dan karakteristik aliran diteliti pada susunan empat silinder sirkular dengan rasio $L/D= 3,0$ yang ditempatkan dekat dinding dengan variasi rasio $G/D= 0,2; 0,7; \text{ dan } 1,2$ pada bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$ berdasarkan diameter silinder. 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 2D-URANS yang telah dicoba, model viskos *k- ω sst* memiliki hasil yang mendekati hasil eksperimen. Berdasarkan penelitian tersebut, diperoleh *pressure coefficient distribution* (C_p) dari *upper cylinder* dan *lower cylinder* yang berbeda. Selanjutnya dari hasil simulasi ini juga dapat dilihat bahwa daerah di belakang silinder sirkular, antara *upper* dan *lower cylinder* terjadi perbedaan pola *vortex shedding*.

Kata kunci: dekat dinding; rasio L/D ; simulasi numerik; susunan empat silinder sirkular.

1 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 *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 besaran 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* dalam susunan, dan 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 kontur bodi, dan *skin friction* akibat *shear stress*. 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. Besar kecilnya *drag force* ditentukan oleh kecepatan *free stream* dan profil aliran, *free stream turbulence*, *geometry*, dan kekasaran permukaan bodi.

Penelitian secara eksperimen maupun visualisasi terkait dengan silinder tunggal dekat dinding sudah dilakukan oleh [1,2,3,4,5,6,7,8] tentang pola aliran yang terjadi disekeliling silinder sirkular dan pengaruhnya terhadap karakteristik aerodinamik, seperti *drag* dan *lift coefficient*, dengan memvariasi jarak antara silinder dengan dinding datar, dan posisi penempatan silinder pada lapis batas. Hasil eksperimen membuktikan 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*. Sementara 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 *upstream* atau *downstream cylinder* pada rasio *gap* yang besar.

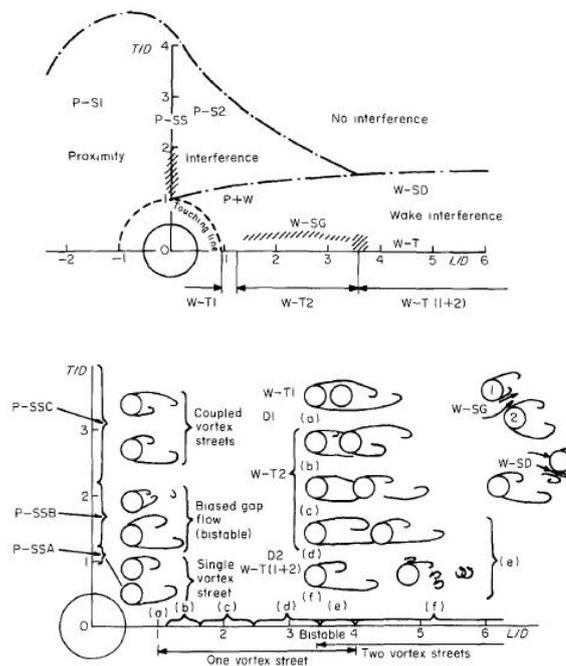
Penelitian tentang susunan dua silinder sirkular *tándem* dekat dinding telah dilakukan oleh [9,10], dan susunan *side by side* dekat dinding oleh [11]. Hasil penelitian untuk susunan tandem menunjukkan dengan memvariasi rasio jarak longitudinal kedua silinder (L/D) dari 1,5; 2; 3; 4; 5; 6 pada rasio *gap* $G/D=0,2$, variasi yang semakin besar lebih memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efek hambatan (*blockage effect*) aliran yang mengalir pada sisi celah silinder *downstream*, dan terjadi interaksi aliran antara silinder *upstream* dan silinder *downstream* akibat adanya dinding sehingga berpengaruh pada *pressure recovery* mencapai $x/D > 12$. Sedangkan pada susunan *side-by-side* dekat dinding dengan rasio jarak transversal antara silinder (T/D)= 1,5 dan rasio $G/D=0,2$ menunjukkan adanya interaksi antara silinder lower dengan dinding sehingga membuat perpindahan titik stagnasi pada silinder tersebut, *reattachment* aliran pada dinding mulai $x/D=2,5$.

Sementara studi awal telah dilakukan oleh [12] tentang susunan empat silinder sirkular dekat dinding pada rasio susunan silinder $L/D=1,5$ dan rasio *gap* $G/D=0,2$. Hasilnya menunjukkan bahwa distribusi koefisien tekanan pada silinder-1 (*lower cylinder upstream cylinder*) tidak simetri, 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 *upper-side* silinder-1. Perpindahan aliran fluida juga membawa penambahan momentum pada aliran dicelah silinder-1 dan silinder-3, yang ditandai dengan posisi titik separasi yang bergerak ke *front-side* dari silinder-3 dengan bertambahnya rasio *gap*.

Penelitian berikut ini bertujuan untuk menggambarkan fenomena aliran yang terbentuk di sekeliling susunan empat silinder sirkular dengan konfigurasi *in-line* pada $L/D=3$ dekat dinding dengan rasio (G/D)= 0,2; 0,7; dan 1,2 melalui simulasi numerik. Penggunaan metode simulasi numerik sebagai suatu studi awal sangat bermanfaat, karena selain dapat menggambarkan dan memprediksi fenomena yang akan terjadi, juga dapat digunakan untuk mengeksplorasi lebih dalam fenomena atau kejadian yang tidak dapat ditunjukkan melalui eksperimen.

Dengan demikian waktu penelitian menjadi lebih singkat dan dapat menghemat biaya dari suatu penelitian, walaupun penerapan metode simulasi inipun memiliki keterbatasan, yaitu adanya ketidak pastian (*uncertainty*) dan pengambilan asumsi ideal.

Medan aliran di sekitar sepasang silinder sirkular baik susunan *side-by-side* maupun *tandem* yang rigid sangatlah rumit. Beberapa tujuan dari studi di atas 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 (*downstream cylinder*) berdekatan atau di dalam *wake* silinder di depannya (*upstream cylinder*).



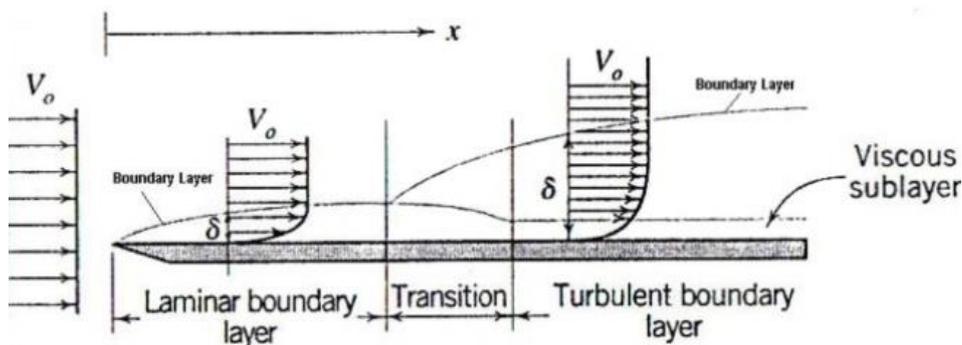
Gambar 1 Regime dan Struktur Aliran dari Susunan Dua Silinder yang Mengalami Interferensi [13].

Berdasarkan susunan dari dua silinder, dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok *regime* aliran seperti ditunjukkan oleh Gambar 1 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.

Interferensi aliran dari susunan silinder sangat dipengaruhi oleh orientasi aliran, jarak dan jumlah silinder dalam susunan, bilangan Reynolds, *surface roughness*, dan turbulensi aliran. Sementara aliran pada bidang/plat datar merupakan *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 lapisan batas karena adanya tegangan geser pada bidang datar akibat viskositas dari fluida yang mengalir. Aliran *viscous* di dalam lapisan 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*). Perkembangan aliran yang terjadi didalam lapisan batas dapat berupa laminar atau turbulen. Kecepatan aliran laminar dalam lapisan batas adalah u , sementara kecepatan aliran turbulen didalam lapisan batas adalah merupakan kecepatan rata-rata (\bar{u}) ditambah dengan kecepatan fluktuasi pada tiga komponen (u' , v' , dan w'). Lapisan batas yang terjadi pada plat datar apabila dialiri oleh suatu aliran ditunjukkan pada Gambar 2. Lapisan batas laminar terjadi mulai ujung depan atau *leading edge* diikuti dengan transisi dan akhirnya menjadi turbulen.



Gambar 2 Lapisan batas kecepatan pada plat datar

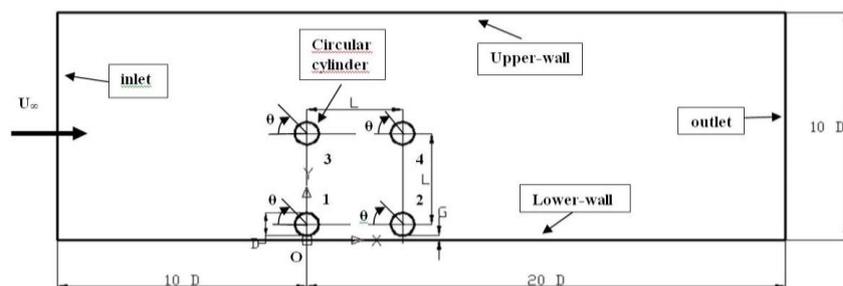
Secara umum faktor-faktor yang mempengaruhi posisi transisi dalam lapisan batas adalah gradien tekanan, kekasaran permukaan solid bodi atau *surface roughness*, perpindahan panas, gaya-gaya bodi atau *body forces*, dan gangguan-gangguan yang diberikan pada *free-stream* atau *free-stream disturbances*.

2 Metodologi

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam simulasi numerik ini adalah: (a) Membuat *geometry set-up* dalam bentuk dua dimensi, untuk silinder sirkular pada rasio silinder (L/D)= 3,0 dan jarak rasio dengan dinding (G/D)= 0,2; 0,7 dan 1,2 seperti terlihat pada Gambar 3; (b) Membuat meshing dua dimensi dalam bentuk *quadrilateral-map* (Gambar 4); (c) Menentukan *boundary condition* dari domain yang dibuat; (d) Memilih teknik untuk iterasi, yaitu menggunakan *pressure velocity coupling SIMPLE* dan diskretisasi 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.

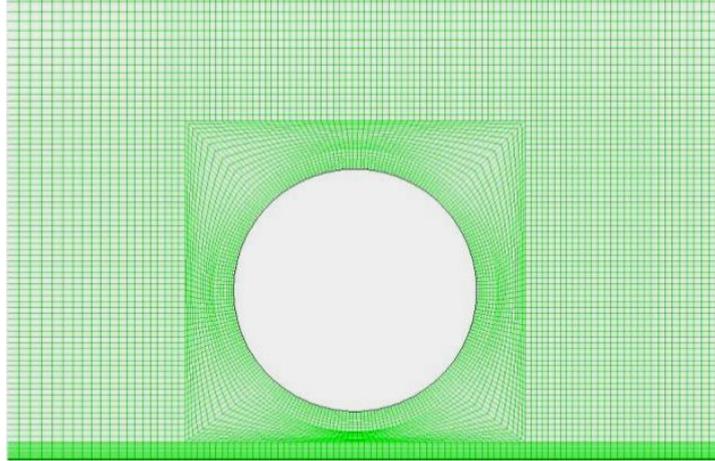
Untuk pengecekan *grid independency* dilakukan analisis terhadap berbagai meshing dengan variasi *nodes* dan *face*, dan diperiksa nilai maksimum y^+ (*y plus*). Selanjutnya dalam menentukan model viskos yang akan digunakan, dilakukan validasi antara hasil simulasi numerik yang menggunakan berbagai model 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 $k-\omega$ 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 dua dimensi dengan tujuan untuk menyesuaikan dengan eksperimen yang pengukurannya dilakukan pada daerah *midspan*.



Gambar 3 Geometri setup dan domain komputasi

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



Gambar 4 Bentuk *meshing* 2-D dari model silinder sirkular dekat dinding menggunakan *quadrilateral-map*

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

- a. Persamaan konservasi masa :

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

- b. Persamaan momentum :

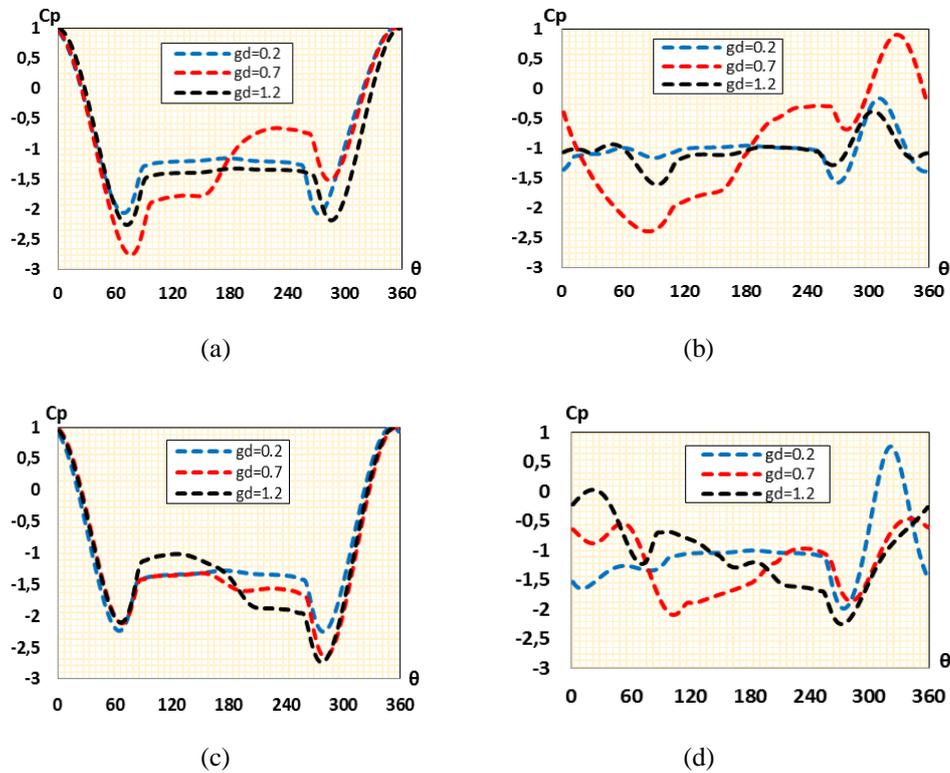
$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial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

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

3 Hasil

Gambar 5a 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*= 1,2 distribusi tekanan pada kontur silinder-1

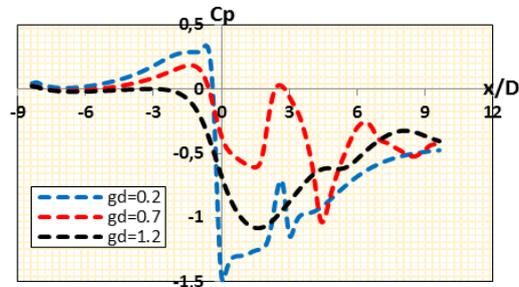
menjadi simetri. Terjadi perbedaan nilai tekanan minimum dari distribusi tekanan kontur **silinder-1** pada rasio *gap* G/D yang berbeda. Pada *upperside* dan *lowerside* silinder-1 nilai tekanan minimum dari rasio $G/D=1,2$ lebih besar dibanding rasio $G/D=0,7$.



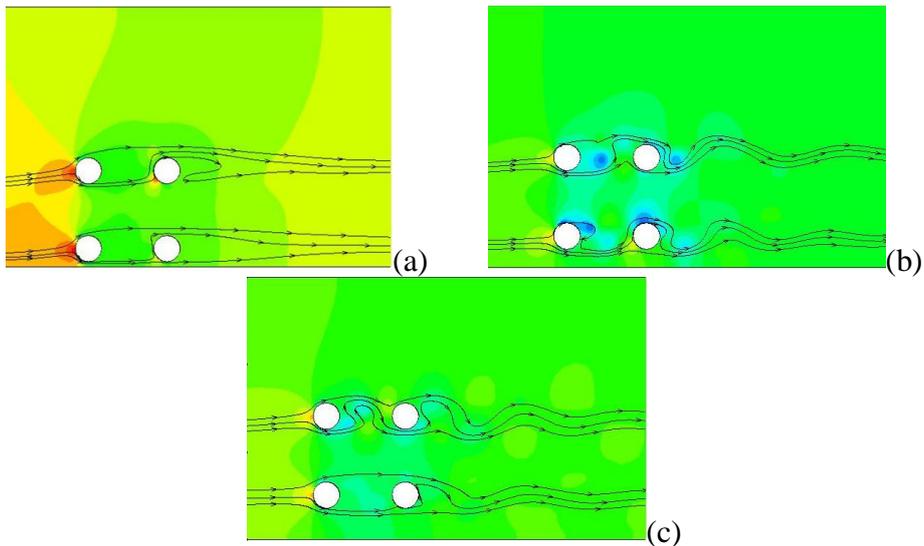
Gambar 5 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Kontur Silinder *Upstream* (a) **Silinder-1** dan (c) **Silinder-3**; Kontur Silinder *Downstream* (b) **Silinder-2** dan (d) **Silinder-4** dari Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan $L/D=3,0$ dan variasi rasio G/D

Gambar 5b menunjukkan adanya perbedaan pengaruh rasio *gap* G/D terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-2**. Pada rasio *gap* $G/D=0,2$; $0,7$; dan $1,2$ distribusi tekanannya bertanda negatif, menunjukkan *inner shear layer* dari silinder *upstream* silinder-1 melingkupi kontur silinder-2. Sementara *outer shear layer* dari silinder -1 terjadi fenomena *reattachment* tetapi berlangsung hanya pada satu sisi kontur yakni *lowerside*. Gambar 5c menunjukkan adanya kesamaan pengaruh rasio *gap* G/D terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-3**, yakni tidak simetri pada rasio yang besar. Tetapi dengan meningkatnya rasio G/D membuat distribusi tekanan pada kontur silinder-3

menjadi tidak simetri. Gambar 5d menunjukkan adanya perbedaan pengaruh rasio *gap* G/D terhadap distribusi tekanan pada kontur **silinder-4**, peningkatan rasio G/D membuat distribusi tekanan dari tidak simetri 0,2 menjadi lebih simetri pada $G/D= 1,2$.



Gambar 6 Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Plat Datar dekat Susunan Empat Silinder Sirkular *In-Line Square* dengan $L/D=3,0$ dan variasi rasio G/D .

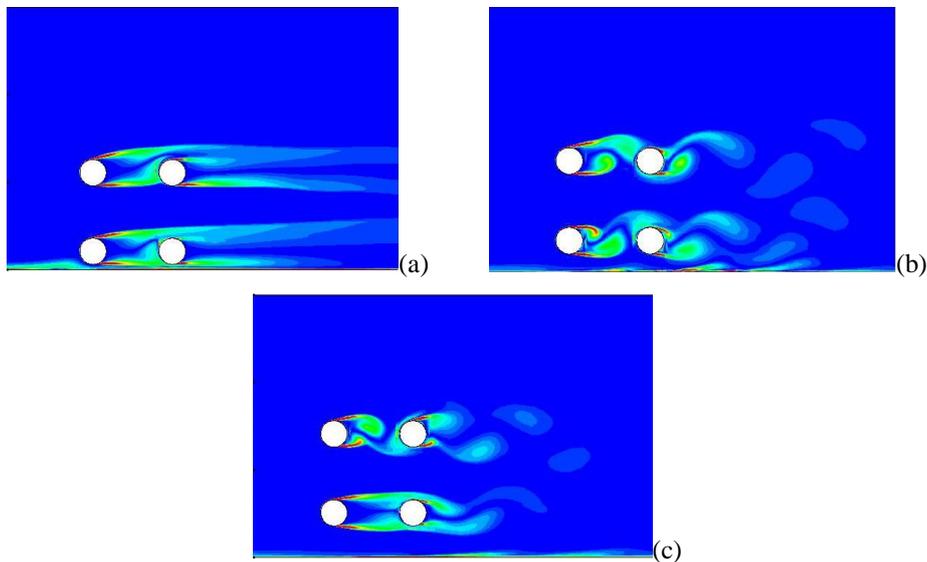


Gambar 7 Perbandingan *Pressure Contour* (Pa) dan *Stream traces* pada $L/D=3,0$ dengan rasio G/D (a) 0,2; (b) 0,7; dan (c) 1,2

Gambar 6 terjadi perbedaan distribusi tekanan pada kontur plat datar antara rasio *gap* $G/D= 0,2$; 0,7 dan 1,2. Pada rasio $G/D= 0,2$ 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 gap $G/D= 1,2$ 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.

Gambar 7 berdasarkan hasil visualisasi dari *pressure contour* dan *stream traces*, pada rasio gap (G/D)= 0,2; 0,7; dan 1,2. Tampak pada ketiga rasio terlihat adanya perbedaan ketika aliran setelah melintasi silinder *upstream*. Karena jarak *gap* yang lebih kecil membuat aliran terdefleksi ke *upperside* silinder-4, sementara pada rasio gap $G/D= 1,2$ momentum aliran pada *lowerside* silinder *upstream* mampu membuat aliran diantara silinder-3 dan silinder-4 *reattachment* pada *lowerside* silinder-4.



Gambar 8 Perbandingan Visualisasi *Vorticity Contours* pada Rasio $L/D= 3,0$ dengan rasio G/D (a) 0,2; (b) 0,7; dan (c) 1,2

Gambar 8 menunjukkan pola aliran dalam bentuk visualisasi *vorticity contours* dari susunan silinder pada rasio $L/D= 3,0$ dan $G/D= 0,2$; 0,7; dan 1,2. Melalui Gambar 8 terlihat bahwa pada daerah *wake* dari kedua silinder *lower*, silinder-1 dan silinder-2, sudah mulai terbentuk *vortices shed* walaupun belum sempurna, terutama pada rasio $G/D= 0,7$ dan 1,2. 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.

4 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tersebut, diperoleh *pressure coefficient distribution* (C_p) dari *upper cylinder* dan *lower cylinder* yang berbeda. Selanjutnya dari hasil simulasi ini juga dapat dilihat bahwa daerah di belakang silinder sirkular, antara *upper* dan *lower cylinder* terjadi perbedaan pola *vortex shedding*.

Referensi

- [1] Ramamurthy, A.S., and Lee, P.M., *Wall Effects on Flow Past Bluff Bodies*, Journal of Sound and Vibration, 31(4), 443-451, 1973.
- [2] Zdravkovich, M.M., *Forces on A Circular Cylinder Near A Plane Wall*, Applied Ocean Research, 7 (4), 1985.
- [3] Lei, C., Cheng, L., and Kavanagh, K., *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, 80, 263-286, 1999.
- [4] Choi, J.H., and Lee, S.J., *Ground Effect Of Flow Around An Elliptic Cylinder In A Turbulent Boundary Layer*, Journal of Fluids and Structures, 14, 697-709, 2000.
- [5] Price, S.J., Sumner, D., Smith, J.G., Leong, K., and Paidoussis, M.P., *Flow Visualization Around A Circular Cylinder Near To A Plane Wall*, Journal of Fluids and Structures, 16, 175-191, 2002.
- [6] Lin, Chang, Jung Lin, Wei, and Shing Lin, Sing, *Flow Characteristics Around A Circular Cylinder Near A Plane Boundary*, 16TH International Symposium on Transport Phenomena, Prague, 2005.
- [7] Nishino, T., Roberts, G.T., and Zhang, X., *Unsteady Rans and Detached-Eddy Simulations of Flow around A Circular Cylinder in Ground Effect*, Journal of Fluids and Structures, 24, 18-33, 2008.
- [8] Wang, X. K., Gong, K., Liu, H., Zhang, X. J., and Tan, S. K., *Flow Around Four Cylinders Arranged in A Square Configuration*, Journal of Fluids and Structures, 43, 179-199, 2013.
- [9] Yuwono, Triyogi, Fahreza, Fahmi, and Widodo, Wawan Aries, *Flow Around Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement Near A Plane Wall*, Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Bali, February 9-10, 2010.
- [10] Widodo, W.A., *Simulasi Numerik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular Tersusun Tandem Dengan Pengaruh Side Wall Dengan Jarak Gap ($G/D= 0,2$)*, Laporan Penelitian, ITS, Surabaya, 2008.
- [11] Wailanduw, Grummy A., Yuwono, Triyogi, and Widodo, Wawan Aries, *Flow Around Two Side-By-Side Circular Cylinders With Intermediate*

- Spaced Near A Plane Wall*, Advances and Applications in Fluid Mechanics, 18(2), 277-290, 2015.
- [12] Wailanduw, Grummy A., Yuwono, Triyogi, and Widodo, Wawan Aries, *Flow Characteristics Around Four Circular Cylinders in Equispaced Arrangement Near A Plane Wall*, Applied Mechanics and Materials, 493, 245-250, 2014.
- [13] Zdravkovich, M.M., *The Effect of Interference Between Circular Cylinders in Cross Flow*, Journal of Fluids and Structures, 1, 239-261, 1987.