

Simulasi Numerik Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu Terhadap Karakteristik Aliran Fluida Melintasi Silinder Sirkular Tersusun Tandem di Dalam Saluran Sempit

Intan Pandang Prinda Sakti dan Wawan Aries Widodo
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wawanaries@me.its.ac.id

Abstrak—Interaksi antara fluida dengan struktur merupakan salah satu pokok analisis yang dilakukan pada suatu struktur. Dengan mengetahui karakteristik dari suatu aliran fluida yang mengalir dapat diprediksi, dianalisa dan dikembangkan sesuai dengan kebutuhan sehingga dapat mendesain suatu konstruksi yang dapat menghasilkan nilai tambah dan meningkatkan efisiensi kinerja. Salah satu kasus interaksi fluida dengan struktur yang sering kita jumpai yaitu fenomena aliran fluida melintasi benda maupun saluran, sebagai contoh *heat exchanger* dimana di dalamnya terdapat *tube* yang dialiri oleh fluida dan instalasi pipa internal sebagai elemen structural yang sering ditemukan pada industri. Tugas akhir ini menggunakan metode simulasi numerik dua dimensi *unsteady* dan *incompressible flow* menggunakan *software CFD Ansys Fluent* versi 19R1. Variasi yang dilakukan adalah rasio jarak longitudinal antara silinder sirkular dengan bodi pengganggu $L/D = 1,25; 1,5; 1,75; 2,0$ dan variasi rasio besar diameter $d/D = 0,16; 0,32$ serta bilangan Reynolds sebesar $1,58 \times 10^4$. Pemodelan *turbulence viscous* yang digunakan adalah *shear stress transport k- ω* . Penambahan bodi pengganggu $d/D = 0,16$ dapat mereduksi *coefficient drag* sebesar 32%. Sedangkan pada $d/D = 0,32$ dapat mereduksi *coefficient drag* sebesar 34%.

Kata Kunci—Silinder Sirkular, Bodi Pengganggu, Rasio Jarak Antar Silinder, Rasio Besar Diameter, Drag Pressure Coefficient, Strouhal Number dan Vortex Shedding.

I. PENDAHULUAN

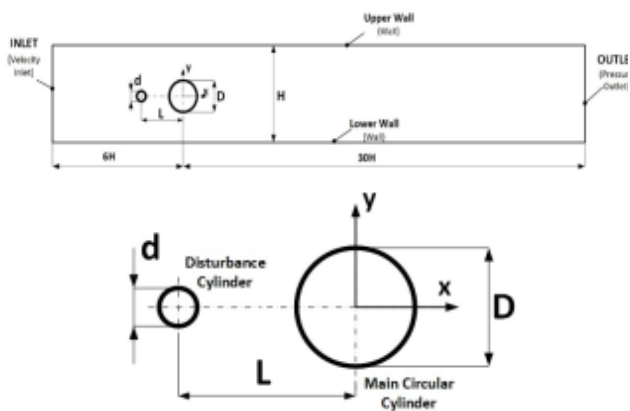
KARAKTERISTIK aliran melintasi sebuah silinder sirkular banyak di terapkan pada kehidupan sehari-hari. Dimana silinder sirkular merupakan jenis *bluff body* yang memiliki kelengkungan paling kuat (*strong adverse pressure gradient*) dengan demikian *wake* yang dihasilkan silinder sirkular sangat besar. *Wake* yang besar menghasilkan gaya hambat (*drag*) yang besar pula. Untuk mengurangi gaya hambat dilakukan metode *pasif flow control* yaitu dengan melakukan modifikasi geometri salah satunya dengan cara memberikan sebuah bodi pengganggu berukuran lebih kecil di bagian *upstream* silinder. Salah satu kasus interaksi fluida melintasi suatu struktur berbentuk silinder sirkular yaitu *heat exchanger* dimana terdapat *tube* yang dialiri oleh fluida didalamnya, serta instalasi pipa internal yang didirikan berkelompok atau dalam susunan tertentu sebagai elemen structural yang sering ditemukan pada industri. Pada *heat*

exchanger terdapat susunan silinder sirkular berkelompok, dimana dengan adanya penambahan bodi pengganggu ini dapat meningkatkan laju aliran sehingga bilangan Reynolds meningkat, dengan meningkatnya bilangan Reynolds maka akan meningkatkan koefisien konveksi perpindahan panas pada *heat exchanger* sehingga perpindahan panas *heat exchanger* semakin baik. Selain itu reduksi *drag* yang terjadi pada silinder mengindikasikan bahwa aliran yang melintasi silinder membutuhkan energi yang lebih rendah seiring berkurangnya gaya hambat pada silinder. Sehingga energi yang dibutuhkan pada *heat exchanger* tidak terlalu besar.

Penelitian mengenai pengaruh bodi pengganggu terhadap aliran melintasi silinder sirkular banyak dilakukan oleh peneliti terdahulu. Penelitian [1] menjelaskan studi eksperimen dengan diameter silinder (D) adalah 40 mm dan diameter bodi pengganggu (d) divariasikan antara 1mm hingga 10 mm. Jarak antara batang pengganggu dan silinder juga divariasikan mulai 50-120mm dengan Re $1,5 \times 10^4$ - $6,2 \times 10^4$. Hasil eksperimen didapatkan nilai C_D dan C_{DT} menurun 73% dan 63% dibandingkan dengan silinder sirkular tunggal.

Selanjutnya [2] meneliti studi eksperimen dengan bilangan Reynolds berdasarkan pada diameter silinder ($D = 30$ mm) adalah $Re = 2 \times 10^4$. Variasi rasio diameter batang pengganggu dengan silinder yaitu $d/D = 0,133$ dan $0,267$. Sedangkan variasi rasio jarak longitudinal antar batang pengganggu dan silinder $L/D = 1,5$ dan $4,0$. Percobaan ini juga membuktikan timbulnya jarak kritis dengan adanya penambahan bodi pengganggu ini. Jarak kritis ini mempunyai rumusan $L_c/D = 1,5 + 0,083d$ ($0,133 \leq d/D \leq 0,233$).

Berikutnya [3] meneliti lebih lanjut karakteristik aliran melintasi silinder dengan metode numerik. Bilangan Reynolds yang digunakan $Re_D = 200$ atau $Re_d = 10, 20, 60$ dan 100 . Variasi d/D sebesar $0,05; 0,1; 0,3$ dan $0,5$ dengan variasi jarak pusat batang pengganggu dan pusat silinder $L = D$ hingga $L = 10D$. Semakin meningkat fluktuasi aliran yang datang menuju silinder melewati batang pengganggu maka kecepatan aliran akan tereduksi oleh *wake* dari batang pengganggu sehingga koefisien *drag* pada silinder pada semua L/D lebih kecil dari silinder tanpa diberi batang pengganggu. Begitu juga jika L/D lebih besar dari nilai kritisnya maka terjadi fluktuasi pada koefisien *lift* pada silinder yang kecil



Gambar 1 Geometry domain penelitian

dikarenakan tidak ada *vortex shedding* dari batang pengganggu

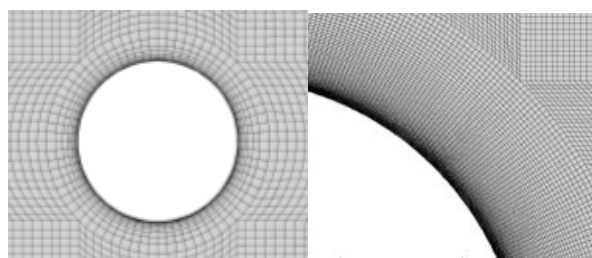
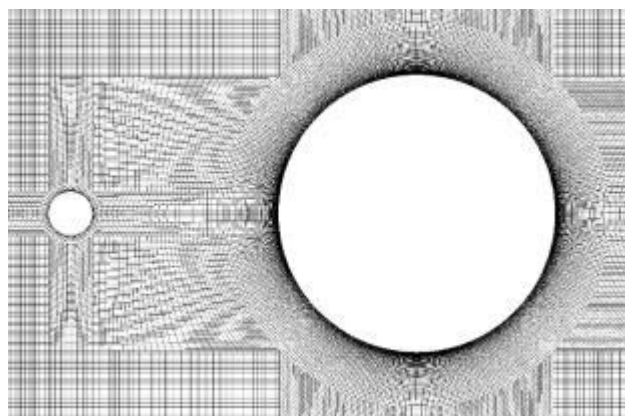
Berbeda sengan penelitian [4] menjelaskan studi eksperimental tentang aliran melintasi silinder sirkular tunggal pada *wind tunnel GALCIT* tipe *open circuit* berukuran (508 mm x 508 mm) dengan *range* kecepatan sebesar 0,5-22 m/s dengan level turbulensi 0,15%. Variasi diameter silinder sebesar 0,3mm hingga 88,9 mm. Hasil eksperimen menyatakan bahwa semakin besar diameter silinder maka *blockage ratio* semakin besar dan meningkatkan *coefficient drag pressure*. Selain itu nilai *coefficient base pressure* semakin bernilai negatif seiring bertambahnya *blockage ratio*.

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, maka dibuatlah penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode numerik pengaruh adanya bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran fluida melintasi silinder sirkular dengan menggunakan aliran *unsteady* pada saluran sempit. Penelitian ini membahas nilai *coefficient drag pressure*, *fluctuating lift coefficient*, *Strouhal number*, dan frekuensi *vortex shedding*.

II. METODE PENELITIAN

Skema geometri (domain) dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 .

Dimensi dari diameter silinder sirkular sebesar 25 mm dengan variasi rasio $d/D = 0,16$ dan $0,32$. Sedangkan variasi rasio jarak antar silinder $L/D = 1,25; 1,5; 1,75$ dan 2 . Bilangan Reynolds yang digunakan pada penelitian ini adalah $1,58 \times 10^4$ berdasarkan diameter silinder sirkular. Penelitian ini menggunakan metode numerik dua dimensi (2D) dengan melalui tiga tahapan yaitu pembuatan model Geometry menggunakan perangkat lunak CFD lalu dilanjutkan dengan pembuatan *meshing* menggunakan software ANSYS Gambit 2.4.6 Kemudian dilanjutkan dengan perhitungan (*solver*) dan analisa hasil (*post-processing*) menggunakan software ANSYS Fluent versi 19R1. *Boundary condition* yang ditetapkan yaitu *velocity inlet* untuk kondisi batas *inlet* dan *pressure outlet* untuk kondisi batas *outlet* sedangkan daerah dinding saluran menggunakan kondisi batas *wall*. Fluida kerja yang digunakan pada penelitian ini adalah udara dengan temperatur 300°K dengan densitas $1,1614\text{kg/m}^3$ dan viskositas



Gambar 2 (a) bodi pengganggu

Gambar 2 (b) silinder sirkular

absolut fluida $1,846 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. Pemodelan turbulensi pada penelitian ini menggunakan *k-omega SST* berdasarkan [5], pemodelan turbulensi *Shear Stress Transport k-omega* memberikan performa yang terbaik untuk kasus aliran seperti *adverse pressure gradient* dan *free shear layer*. Pemodelan turbulensi *Shear Stress Transport k-omega* juga memiliki performa baik dalam menganalisis aliran yang dekat dengan dinding. Bentuk *meshing* yang digunakan yaitu *quadrilateral structured 2-D mesh*. Jenis *grid* ini dapat mengurangi waktu komputasi dibanding jenis segitiga (*triangular*) serta menambah keakuratan hasil simulasi.

Penelitian ini menggunakan aliran *unsteady* sehingga diperlukan nilai *time step size*. Dengan Perhitungan *time step size* sebagai berikut:

$$f = \frac{u \cdot St}{D} \tag{1}$$

Persamaan waktu siklus (t)

$$t = \frac{1}{f} \tag{2}$$

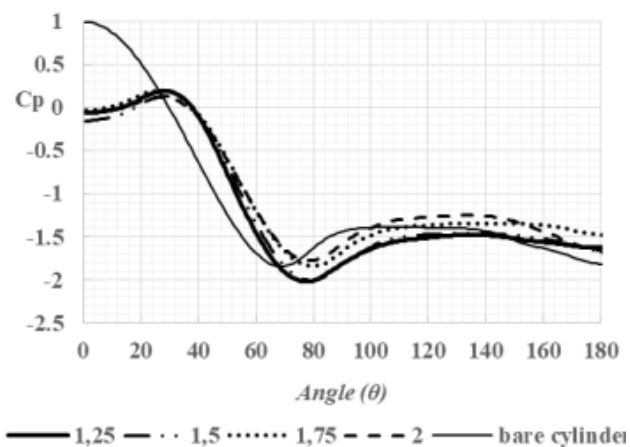
Untuk mendapatkan *timestep size*, Direkomendasikan bahwa untuk menangkap fenomena *vortex shedding* dapat menggunakan paling sedikit 20-25 *time step* dalam satu siklus *shedding*.

$$\text{Time step size} = \frac{\text{waktu siklus}}{25} \tag{3}$$

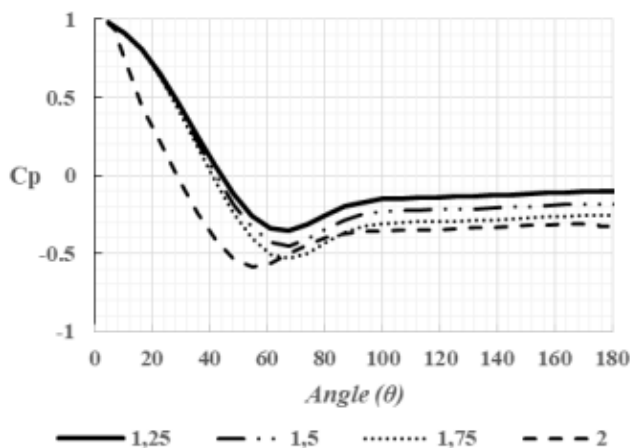
III. HASIL SIMULASI NUMERIK

a. Pengaruh Rasio Jarak Bodi Pengganggu dan Silinder Sirkular (L/D)

Pada gambar 3 dapat terlihat bahwa nilai koefisien tekanan pada titik stagnasi ketika diberi silinder pengganggu bernilai negatif, ini mengindikasikan adanya pengaruh *wake* yang



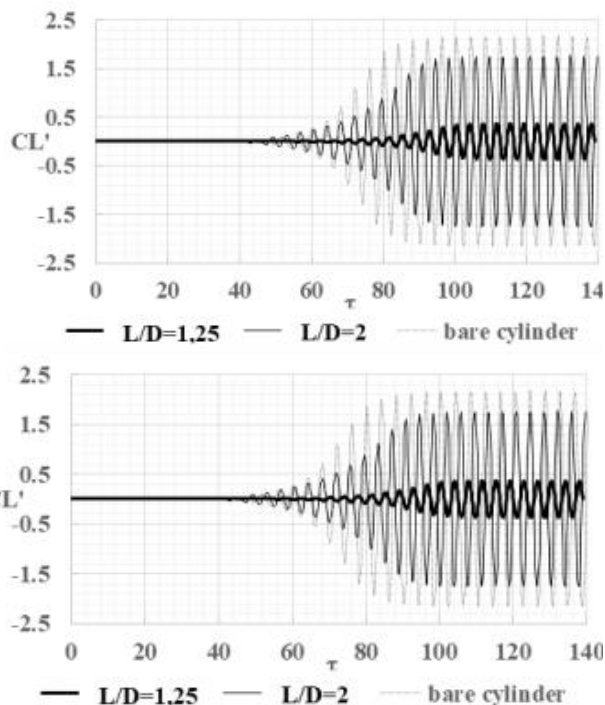
Gambar 3 Distribusi koefisien tekanan pada variasi L/D dengan $d/D=0,16$



Gambar 4 Distribusi koefisien tekanan bodi pengganggu pada variasi L/D dengan $d/D=0,16$

dihasilkan oleh bodi pengganggu sehingga *outer shear layer* dari separasi bodi pengganggu menyelimuti kontur bodi silinder, oleh karena itu nilai distribusi koefisien tekanan untuk silinder hampir seluruhnya berharga negatif di semua L/D karena pusaran *quasi-static* terbentuk antara bodi pengganggu dan silinder kemudian aliran akan mengalami *reattachment* yaitu penempelan kembali *free shear layer* yang dihasilkan oleh bodi pengganggu pada daerah depan silinder, dimana koefisien tekanan memiliki nilai maksimum. Lalu terjadi akselerasi yang diakibatkan penyempitan *streamtube* yang ditandai dengan adanya penurunan tekanan sampai pada koefisien tekanan minimumnya.

Setelah mengalami titik minimumnya aliran mengalami deselerasi yang diindikasikan naiknya nilai distribusi koefisien tekanan, karena aliran tidak mampu menahan *adverse pressure gradient* yang semakin positif dan akumulasi gaya gesek pada kontur permukaan, aliran mengalami separasi pada sudut kontur $\theta = 100^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya bodi pengganggu dapat menggeser titik separasi ke arah downstream dari pada silinder tanpa diberi bodi pengganggu. Titik separasi akan semakin mundur ke belakang seiring bertambahnya L/D yang akan mengakibatkan menyempitnya

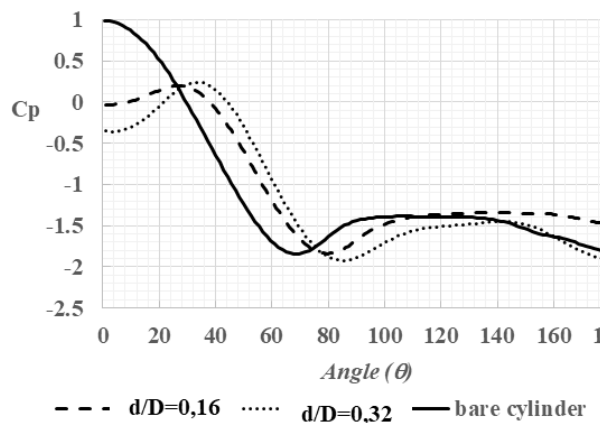


Gambar 5 Fluktuasi lift silinder sirkular

wake yang dihasilkan sehingga dapat mengurangi *drag pressure coefficient* (C_{Dp}) pada silinder .

Pengaruh bodi pengganggu terhadap silinder sirkular dapat ditunjukkan berdasarkan grafik koefisien tekanan pada gambar 4. Terlihat bahwa koefisien tekanan pada titik stagnasi bodi pengganggu bernilai 1 pada semua variasi L/D dengan $d/D=0,16$. Aliran mengalami akselerasi yang di indikasikan dengan penurunan tekanan hingga mencapai koefisien tekanan minimum (C_{Pmin}). Kemudian aliran mengalami perlambatan karena adanya pelebaran *streamtube* ditandai dengan naiknya nilai distribusi koefisien tekanan, karena aliran tidak mampu menahan *adverse pressure gradient* yang semakin positif dan akumulasi gaya gesek pada kontur permukaan, aliran mengalami separasi pada sudut kontur $\theta = 95^\circ$. Nilai *base pressure coefficient* (C_{Pb}) pada $L/D=1,25$ lebih tinggi jika dibanding rasio L/D lainnya, hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang bodi pengganggu tidak begitu besar sehingga *drag* yang dihasilkan tidak begitu besar. Seiring bertambahnya rasio L/D nilai *base pressure coefficient* (C_{Pb}) bodi pengganggu semakin rendah hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan tekanan di bagian depan dan belakang bodi pengganggu semakin besar, sehingga *drag* yang dihasilkan bodi pengganggu membesar seiring bertambahnya L/D. Pada rasio $L/D=2$ mengalami separasi lebih awal diantara L/D lainnya. Titik separasi semakin mundur seiring berkurangnya rasio L/D. Sehingga *coefficient drag* yang dihasilkan bodi pengganggu semakin besar seiring bertambahnya L/D.

Gambar 5 menunjukkan nilai koefisien lift pada setiap variasi L/D di $d/D=0,16$ terhadap *normalized time step* (τ). *Normalized time step* adalah *flow time* dikalikan dengan kecepatan *free stream* dibagi dengan diameter silinder.



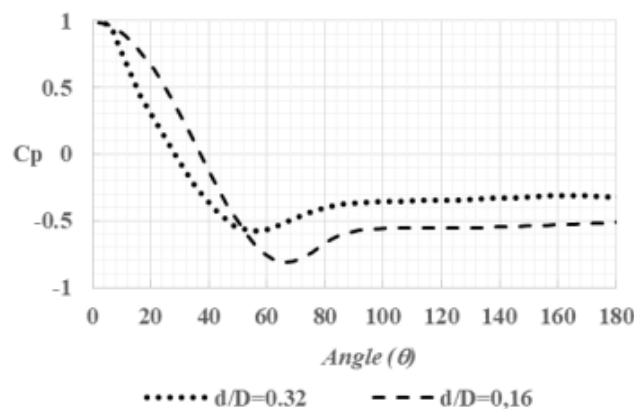
Gambar 6 Distribusi Koefisien Tekanan Terhadap Sudut Kontur (θ) Silinder Sirkular $d/D=0,16,0,32$ dan bare cylinder pada $L/D=2$

Semakin besar nilai koefisien tekanan pada silinder maka koefisien lift yang dihasilkan oleh silinder akan membesar seiring bertambahnya L/D . Frekuensi merupakan banyaknya gelombang dalam 1 periode. Pada gambar 5 menunjukkan bahwa frekuensi yang dihasilkan semakin besar seiring bertambahnya *normalized time step* (τ) dimana ketika frekuensi yang besar maka kecepatan rambat gelombang semakin cepat. Kecepatan rambat yang cepat ini mengindikasikan kecepatan partikel fluida yang mengalir melintasi silinder semakin cepat sehingga dapat menunda titik separasi sehingga drag yang dihasilkan semakin kecil seiring bertambahnya rasio L/D .

b. Pengaruh Rasio Diameter Bodi Pengganggu dan Silinder Sirkular (d/D)

Gambar 6 menunjukkan koefisien tekanan ketika L/D dengan variasi d/D dimana semakin besar d/D titik stagnasi yang dihasilkan semakin rendah pada L/D yang sama. Hal ini mengindikasikan semakin besar dimensi diameter bodi pengganggu maka pengaruh wake dari bodi pengganggu semakin besar, sehingga silinder terselubungi oleh shear layer yang dihasilkan oleh bodi pengganggu semakin besar dan menyebabkan nilai koefisien tekanan pada titik stagnasi di $d/D=0,32$ semakin negatif jika dibandingkan dengan $d/D=0,16$. Pada $d/D=0,16$ mengalami reattachment lebih awal pada sudut kontur $\theta = 30^\circ$ sedangkan pada $d/D= 0,32$ mengalami reattachment pada sudut kontur $\theta = 35^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar diameter bodi pengganggu, kecepatan aliran yang datang pada silinder semakin besar sehingga nilai tekanan pada titik reattachment semakin besar dan menunda sudut kontur titik reattachment.

Kemudian aliran mengalami akselerasi sehingga nilai dari koefisien tekanan turun hingga mencapai nilai koefisien tekanan minimum. Semakin kecil dimensi diameter bodi pengganggu, C_p minimum yang dihasilkan semakin besar hal ini dikarenakan kecepatan yang datang pada silinder pada d/D 0,16 lebih rendah dari pada dimensi diameter pengganggu yang lebih besar sehingga C_p minimum pada $d/D=0,16$ terjadi lebih awal pada sudut kontur = 78° dan C_p minimum pada



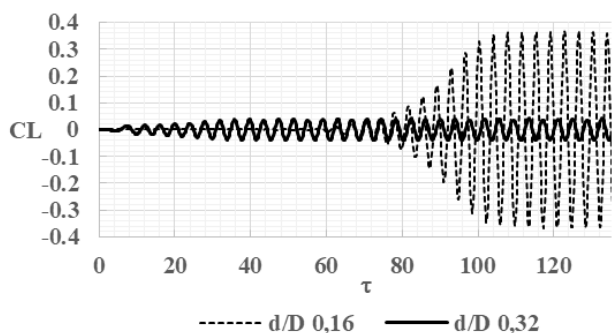
Gambar 7 Distribusi Koefisien Tekanan Bodi Pengganggu pada variasi d/D terhadap Sudut Kontur dengan L/D 2

$d/D=0,32$ terletak pada sudut kontur = 85° . Setelah mencapai nilai koefisien tekanan minimum *streamtube* semakin melebar sehingga fluida mengalami kenaikan tekanan (*adverse pressure*). Hal ini menyebabkan partikel-partikel fluida di dalam *boundary* silinder mengalami perlambatan. Selain itu adanya tegangan geser pada permukaan kontur silinder juga mengakibatkan momentum fluida yang mengalirkan fluida sudah tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan tegangan geser yang terjadi, aliran mengalami separasi pada $d/D=0,16$ dengan sudut kontur $\theta = 107^\circ$ sedangkan pada $d/D=0,32$ separasi terjadi pada sudut kontur $\theta = 115^\circ$.

Terjadinya separasi yang tertunda ini mengindikasikan bahwa semakin besar dimensi diameter bodi pengganggu, aliran yang datang pada silinder lebih kuat melawan *adverse pressure gradient* sehingga wake yang dihasilkan lebih kecil. Menyempitnya daerah wake menyebabkan nilai drag yang dihasilkan lebih kecil. Pada subbab selanjutnya akan dibahas nilai dari *coefficient drag* pada semua variasi.

Perbandingan nilai koefisien tekanan bodi pengganggu dengan variasi $d/D=0,16$ dan $d/D=0,32$ terhadap silinder sirkular dapat ditunjukkan berdasarkan grafik koefisien tekanan pada gambar 7 Nilai koefisien tekanan pada titik stagnasi bodi pengganggu bernilai 1 pada semua variasi d/D . Aliran mengalami akselerasi yang di indikasikan dengan penurunan tekanan hingga mencapai koefisien tekanan minimum (C_{pmin}). Nilai tekanan minimum (C_{pmin}) pada $d/D=0,16$ lebih negatif daripada $d/D=0,32$ hal ini mengindikasikan bahwa terjadi akselerasi yang besar ketika aliran melintasi silinder sirkular yang berukuran lebih kecil. Kemudian aliran mengalami perlambatan karena adanya pelebaran *streamtube* ditandai dengan naiknya nilai distribusi koefisien tekanan, karena aliran tidak mampu menahan *adverse pressure gradient* yang semakin positif dan akumulasi gaya gesek pada kontur permukaan, Pada $d/D=0,16$ aliran mengalami separasi dengan sudut kontur $\theta=90^\circ$ sedangkan pada $d/D=0,32$ titik separasi terjadi lebih awal yakni pada sudut kontur $\theta = 80^\circ$.

Tertundanya titik separasi pada $d/D=0,16$ ini mengakibatkan wake yang di hasilkan oleh bodi pengganggu semakin berkurang sehingga drag yang dihasilkan tereduksi. Sebaliknya wake yang dihasilkan oleh bodi pengganggu



Gambar 8 Fluktuasi Koefisien Lift $d/D=0,16$ dan $0,32$ pada $L/D=2$

membesar dengan bertambahnya ukuran bodi pengganggu dan menghasilkan *drag* lebih besar. Dengan membesarnya *wake* yang dihasilkan maka bagian depan silinder semakin terpengaruh oleh *shear layer* yang dihasilkan oleh bodi pengganggu oleh karena itu nilai koefisien tekanan pada bagian depan silinder sirkular lebih negatif.

Gambar 8 menunjukkan nilai koefisien lift pada setiap variasi $d/D=0,16$ dan $d/D=0,32$ pada $L/D=2$ terhadap *normalized time step* (τ). *Normalized time step* adalah *flow time* dikalikan dengan kecepatan *free stream* dibagi dengan diameter silinder. Frekuensi merupakan banyaknya gelombang dalam 1 periode. Pada gambar 10 menunjukkan bahwa frekuensi yang dihasilkan semakin besar seiring bertambahnya *normalized time step* (τ) dimana ketika frekuensi yang besar maka kecepatan rambat gelombang semakin cepat. Kecepatan rambat yang cepat ini mengindikasikan kecepatan partikel fluida yang mengalir melintasi silinder semakin cepat sehingga dapat menunda titik separasi karena momentum aliran yang melintasi silinder lebih besar dan dapat melawan *adverse pressure gradient* dengan demikian *drag* yang dihasilkan semakin kecil seiring bertambahnya rasio d/D . Meningkatnya frekuensi aliran maka pergantian fluktuasi antara *shear layer* atas dan bawah semakin cepat sehingga pelepasan *vortex* terjadi begitu cepat dan reduksi *wake* semakin besar seiring bertambahnya rasio d/D .

c. Drag Pressure Coefficient pada setiap variasi L/D dan d/D

Silinder sirkular yang dilingkupi fluida akan mengalami gaya akibat interaksi dengan fluida. Gaya yang ditimbulkan dari interaksi ini yaitu gaya *drag* akibat tekanan dari fluida dan gaya *drag* akibat gesekan yang disebabkan oleh viskositas fluida. Kedua jenis gaya *drag* ini merupakan komponen-komponen gaya yang menyusun gaya *drag* total pada silinder sirkular. Walaupun koefisien gaya *drag* total terdiri dari koefisien *drag* akibat tekanan dan koefisien *drag* gesekan, diketahui dari tinjauan pustaka sebelumnya bahwa koefisien *drag* tekanan lebih dominan pada silinder sirkular, sehingga koefisien *drag* tekanan dapat digunakan sebagai koefisien *drag* total. Gaya hambat (*drag*) untuk aliran dua dimensi adalah gaya-gaya yang sejajar dengan aliran fluida, sedangkan gaya yang tegak lurus terhadap arah aliran dinamakan gaya angkat (*lift*). Gaya *lift* pada penelitian ini diabaikan karena

Tabel 1

Nilai C_{Dp} pada silinder dan bodi pengganggu pada $d/D=0,16$			
L/D	C_{Dp} silinder utama	C_{Dp} silinder pengganggu	CD system/ CD_0
0	1,471	0	1
1,25	1,16	0,402	0,832
1,5	1,122	0,447	0,811
1,75	1,044	0,466	0,760
2	1,035	0,498	0,758

Tabel 2

Nilai C_{Dp} pada silinder dan bodi pengganggu pada $d/D=0,32$			
L/D	C_{Dp} silinder utama	C_{Dp} silinder pengganggu	CD system/ CD_0
0	1,471	0	1
1,25	0,97	0,547	0,776
1,5	0,945	0,557	0,764
1,75	0,926	0,581	0,756
2	0,903	0,62	0,749

letak dari silinder sirkular berada di tengah saluran dimana fluktuasi gaya lift bagian *upper* dan *lower side* silinder sirkular saling meniadakan. Sedangkan adanya gaya hambat tidaklah diinginkan.

Tabel 1 dan 2 menunjukkan nilai *drag pressure coefficient* dari bodi pengganggu dan silinder sirkular. Dapat disimpulkan bahwa nilai dari *coefficient drag pressure* dari bodi pengganggu terus bertambah seiring dengan bertambahnya rasio L/D . Hal ini mengindikasikan bahwa *wake* yang dihasilkan oleh bodi pengganggu semakin besar seiring bertambahnya rasio L/D . Sehingga reduksi kecepatan pada daerah *wake* yang dihasilkan oleh bodi pengganggu semakin besar, yang mengakibatkan kecepatan aliran *free stream* yang datang melintasi silinder sirkular semakin tinggi sehingga dapat menunda titik separasi pada silinder sirkular. Dengan demikian *coefficient drag pressure* yang dihasilkan pada silinder sirkular semakin menurun dengan bertambahnya L/D . Dapat dibuktikan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu di daerah *upstream* silinder dapat mereduksi nilai *coefficient drag pressure* pada $d/D=0,16$ sebesar 32% dan pada $d/D=0,32$ sebesar 34%.

d. Strouhal Number

Lift fluctuation pada bodi pengganggu dan silinder disebabkan oleh adanya *vortex shedding* dari silinder. Dimana fenomena *vortex shedding* tidak terlepas dari *Strouhal number*. Besar kecilnya nilai *Strouhal number* sangat dipengaruhi oleh besar frekuensi *vortex shedding*, besar diameter silinder dan kecepatan *free stream*. Bodi pengganggu dan silinder memiliki frekuensi pelepasan *vortex* yang berbeda. Namun pada penelitian ini lebih terfokus pada frekuensi pelepasan *vortex* dari silinder. Tabel 3 menunjukkan variasi *Strouhal number* ($St = fsD/U_0$) sehubungan dengan rasio L/D . Grafik ini didapatkan berdasarkan fluktuasi lift pada silinder dengan mengambil nilai amplitudo tertinggi kemudian didapatkan nilai *Strouhal*. Sedangkan amplitudo sendiri merupakan simpangan terjauh yang diukur dari titik keseimbangan dalam suatu getaran. Dimana semakin besar amplitudo maka getaran yang dihasilkan oleh aliran fluida semakin besar.

Tabel 3
Nilai Strouhal Number pada $d/D=0,16$ dengan variasi L/D

L/D	Strouhal number
1,25	0,261
1,5	0,25
1,75	0,243
2	0,241

Tabel 4
Nilai Strouhal Number pada $d/D=0,32$ dengan variasi L/D

L/D	Strouhal number
1,25	0,27
1,5	0,264
1,75	0,262
2	0,255

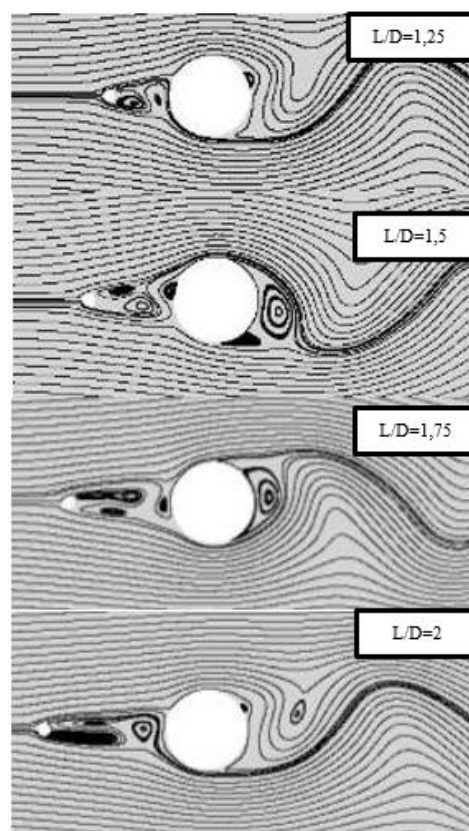
Nilai *Strouhal* diambil pada *peak* terbesar yakni ketika nilai amplitudo maksimal tercapai, dimana nilai maksimal ini menunjukkan adanya awal pembentukan *vortex shedding* dimana getaran optimum terjadi. Jumlah nilai *Strouhal* pada silinder tunggal sebesar 0,24. Distribusi angka *Strouhal* berubah secara substansial dengan berubahnya rasio L/D karena pola *wake* aliran pada setiap L/D berbeda. Untuk kondisi ketika diberi bodi pengganggu angka *Strouhal* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan silinder tunggal. Namun, penurunan nilai *Strouhal* tidak begitu signifikan dengan meningkatnya rasio L/D .

Sebaliknya semakin besar rasio d/D maka semakin besar *Strouhal number* yang dihasilkan walaupun kenaikannya tidak begitu signifikan. Meningkatnya nilai *Strouhal* ketika rasio d/D di perbesar disebabkan karena reduksi kecepatan pada daerah *wake* bodi pengganggu semakin besar sehingga meningkatkan nilai *Strouhal*. Data *Strouhal number* ini di butuhkan untuk mencegah adanya suatu resonansi pada suatu struktur, apabila frekuensi natural dari suatu struktur memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi *vortex shedding* pada suatu aliran fluida maka resonansi akan terjadi dan menyebabkan kegagalan pada suatu struktur karena struktur mendapatkan beban lebih tinggi sehingga suatu struktur dapat mengalami kegagalan.

e. Visualisasi Aliran

Gambar 9 menunjukkan perubahan kontur kecepatan dan tekanan pada silinder dengan adanya pengaruh bodi pengganggu yang berbeda pada *timestep* yang berbeda, perbedaan ini karena pembentukan *vortex shedding* di tiap *timestep* berbeda. Aliran pada penelitian ini adalah *unsteady* dimana pada aliran *unsteady* terdapat perubahan kecepatan terhadap waktu dalam aliran. Pada aliran *unsteady* dapat menangkap adanya fenomena pelepasan *vortex*, pelepasan *vortex* hanya akan terjadi jika terdapat interaksi antara dua lapisan geser (*shear layer*) pada dua sisi silinder. Proses awal terbentuknya *vortex* terjadi ketika pasangan *vortices* yang terbentuk menjadi tidak stabil oleh gangguan atau usikan kecil, sehingga salah satu *vortex* akan tumbuh lebih besar dari yang lainnya.

Pada $L/D=2$ dan 1,75 dengan *time step* tertentu *vorticity* dalam *vortex* sisi *upper* berputar searah jarum jam (CW), sedangkan *vorticity* dalam *vortex* bawah berputar berlawanan



Gambar 9 Visualisasi Aliran variasi L/D pada $d/D=0,16$

arah jarum jam (CCW). Selanjutnya gerakan aliran *vorticity* yang bergerak pada sisi *lower* (CCW) memiliki kecepatan lebih besar pada sisi *lower* yang menandakan kecepatan tinggi di sisi *lower* sehingga dapat memotong aliran *vorticity* yang mensuplai *vortex* sisi *upper* yang memiliki kecepatan lebih rendah, sehingga *vortex* sisi *upper* terlepas lalu menjadi *vortex* bebas dan akhirnya terseret aliran ke arah belakang atau menjauhi silinder. Setelah *vortex* sisi *upper* terlepas, terbentuklah *vortex* baru menggantikan *vortex* sisi *upper*. Maka selanjutnya, *vortex* sisi *downstream* akan mengalami hal yang sama dengan *vortex* sisi *upstream* sebelumnya, yaitu pertama, ukuran dan kekuatannya makin membesar lalu terpotong oleh *vortex* sisi *upper* yang baru dan akhirnya terlepas menjadi *vortex* bebas seperti pada $L/D= 1,25$ dan 1,5. Proses seperti ini akan berlangsung terus-menerus setiap terjadi pelepasan *vortex* baru pada setiap sisi silinder.

Gambar 10 merupakan kontur kecepatan (*velocity magnitude*) pada variasi d/D dengan L/D . Berdasarkan kontur kecepatan pada kedua silinder sirkular ini menjelaskan bahwa semakin besar dimensi diameter bodi pengganggu, *wake* yang dihasilkan sangat besar, sehingga silinder terselubungi oleh *shear layer* yang dihasilkan oleh bodi pengganggu semakin besar. Reduksi kecepatan pada daerah *wake* yang dihasilkan bodi pengganggu $d/D=0,32$ lebih besar jika dibanding bodi pengganggu dengan rasio $d/D=0,16$ hal ini menyebabkan nilai koefisien tekanan pada titik stagnasi di $d/D=0,32$ semakin negatif jika dibandingkan dengan $d/D=0,16$

IV. KESIMPULAN

Secara kuantitatif, peningkatan jarak antar pusat silinder sirkular (L/D) dapat mengurangi nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp})

- a. Pada rasio $d/D=0,16$ nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) semakin berkurang seiring bertambahnya L/D . Penambahan bodi pengganngu pada rasio $d/D=0,16$ dapat mereduksi nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) mencapai 32%. Dengan menurunnya nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) dapat meningkatkan efisiensi, dan menambah *life time* suatu struktur
- b. Pada rasio $d/D=0,32$ nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) semakin berkurang seiring bertambahnya L/D . Penambahan bodi pengganngu pada rasio $d/D=0,32$ dapat mereduksi nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) mencapai 34%. Dengan menurunnya nilai *coefficient drag pressure* (C_{Dp}) dapat meningkatkan efisiensi, dan menambah *life time* suatu struktur.
- c. Semakin besar rasio d/D nilai frekuensi *vortex shedding* dan *Strouhal number* semakin meningkat.
- d. Dengan penambahan bodi pengganngu, fluktuasi aliran semakin rendah sehingga amplitudo yang dihasilkan rendah seiring bertambahnya d/D akibatnya getaran yang dihasilkan oleh aliran yang melintasi silinder tidak terlalu besar.

Secara kualitatif, visualisasi aliran yang terbentuk pada seluruh variasi d/D dan L/D memiliki bentuk *cavity mode* pada bilangan Reynolds $1,58 \times 10^4$

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Tsutsui and T. Igarashi, "Drag Reduction of A Circular Cylinder in An Air-Stream," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 90, no. 4–5, pp. 527–541, May 2002, doi: 10.1016/S0167-6105(01)00199-4.
- [2] S. J. Lee, S. I. Lee, and C. W. Park, "Reducing the Drag on a Circular Cylinder by Upstream Installation of a Small Control Rod," *Fluid Dyn. Res.*, vol. 34, no. 4, pp. 233–250, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.fluidyn.2004.01.001.
- [3] P. F. Zhang, J. J. Wang, and L. X. Huang, "Numerical Simulation of Flow Around Cylinder with An Upstream Rod in Tandem at Low Reynolds Numbers," *Appl. Ocean Res.*, vol. 28, no. 3, pp. 183–192, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.apor.2006.08.003.
- [4] P. Weidman, "Wake Transition and Blockage Effects on Cylinder Base Pressures," 1968.
- [5] H. K. Versteeg *et al.*, "An Introduction to Computational Fluid Dynamits Second Edition."