

Studi Eksperimen Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular yang Tersusun secara Tandem

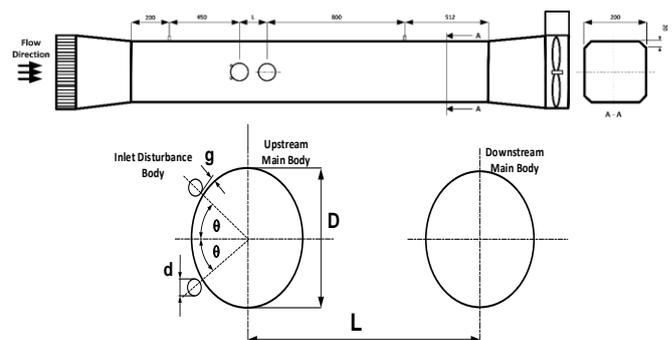
Drestanta Vidyasakti Wibowo, dan Wawan Aries Widodo
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wawanaries71@gmail.com

Abstrak—Aliran fluida merupakan salah satu fenomena yang sering dijumpai. Aliran fluida ketika melewati suatu bodi berbentuk silinder akan terjadi transisi lapis batas aliran dari laminar menjadi turbulen disebabkan perubahan kecepatan, yang dapat menimbulkan separasi aliran. Separasi yang terjadi akan menyebabkan terbentuknya daerah wake, yang dapat menimbulkan gaya drag. Salah satu upaya guna mengurangi gaya drag yaitu dengan penambahan bodi pengganggu. Penambahan bodi pengganggu diharapkan dapat mempercepat transisi aliran agar menunda titik separasi. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengaruh bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran melewati silinder sirkular tersusun tandem. Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan model saluran berpenampang oktagonal. Benda uji yang digunakan berupa silinder sirkular dengan diameter $D = 25$ mm dengan penambahan bodi pengganggu berdiameter $d = 5$ mm di sisi depan silinder upstream. Pengukuran dalam penelitian ini menggunakan pitot static tube, wall-pressure tap dan inclined manometer. Pengujian dilakukan dengan variasi jarak antara kedua silinder utama dengan rasio $L/D = 1,5$ hingga $4,0$ dengan ReDh sebesar $1,33 \times 10^5$ untuk mendapatkan distribusi pressure drop (ΔP), koefisien tekanan (C_p), dan koefisien pressure drag (C_{Dp}). Hasil yang diperoleh bahwa penurunan nilai pressure drop efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu pada semua konfigurasi jarak antar silinder (L/D). Penambahan bodi pengganggu 30° efektif mempengaruhi distribusi nilai koefisien tekanan. Nilai koefisien pressure drag (C_{Dp}) silinder upstream pada seluruh konfigurasi mengalami penurunan sebesar $47 - 73\%$.

Kata Kunci—Circular Cylinder, Disturbance Body, Tandem.

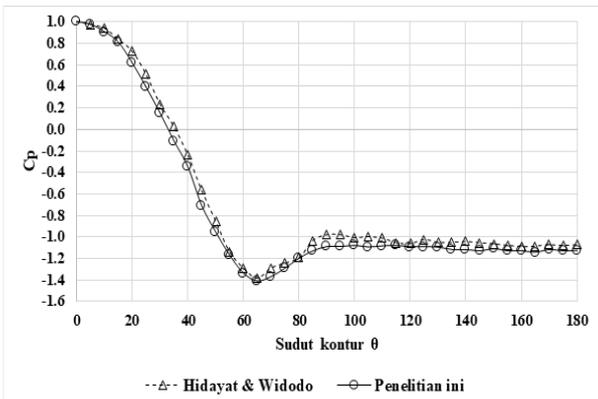
I. PENDAHULUAN

FLUIDA ketika melintasi suatu penampang dengan bentuk tertentu pasti memiliki efek atau gejala yang berbeda-beda. Pada dunia teknik benda tersebut dapat disebut sebagai *bluff body*. *Bluff body* yang dilalui fluida akan mengalami gaya akibat interaksi dengan fluida. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menentukan karakteristik aliran fluida yang melintasi *bluff body*. Dengan mengetahui karakteristiknya maka akan lebih mudah untuk dianalisis serta dikembangkan untuk kemudian diaplikasikan. Penelitian mengenai upaya penurunan gaya drag pada silinder sirkular dilakukan oleh Lee, et.al, 2004[1]. Variasi bodi pengganggu dengan variasi bodi pengganggu dengan rasio diameter $d/D = 0,133$ hingga $0,267$. Penelitian menunjukkan peletakan silinder utama di belakang bodi pengganggu, di daerah pembentukan *wake* dapat menurunkan tekanan pada permukaan silinder utama. Hasil penelitian juga menunjukkan penurunan koefisien drag yang bekerja pada silinder utama dengan penurunan terbesar adalah 29% yaitu ketika menggunakan bodi pengganggu dengan diameter $d =$

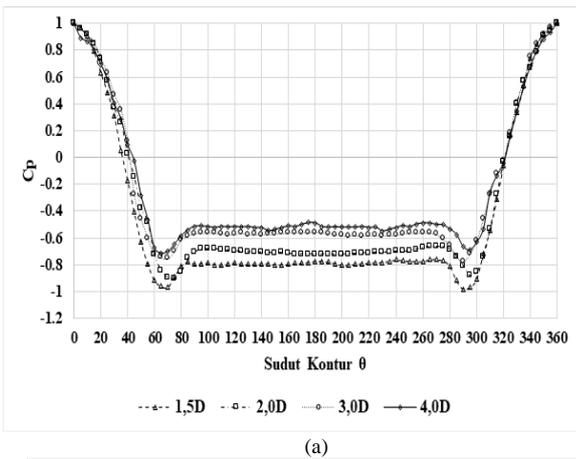


Gambar 1. Skema Penelitian.

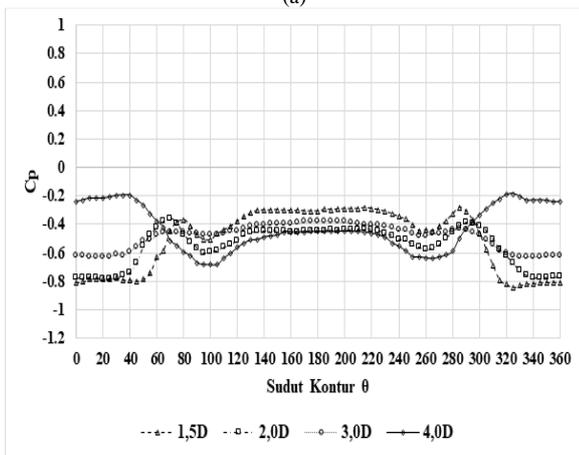
7 mm atau pada rasio diameter $d/D = 0,233$. Penelitian mengenai sepasang silinder sirkular tersusun tandem dilakukan oleh Alam, et.al, 2003 [2] yang membahas tentang pengaruh variasi jarak terhadap gaya hambat. Didapat hasil yaitu pada $L/D < 3,0$; nilai C_D pada silinder *upstream* menurun secara bertahap seiring dengan membesarnya jarak antar kedua silinder. Sedangkan pada silinder *downstream*, nilai C_D yang dihasilkan bernilai negatif, serta terjadi fenomena *bistable flow* pada $L/D = 3$, kedua silinder menunjukkan adanya dua nilai C_D berbeda pada variasi jarak yang sama. Alam, et. all, 2003[3] melakukan penelitian mengenai karakteristik aliran yang melewati silinder sirkular tunggal dan silinder sirkular yang disusun secara tandem dengan penambahan bodi pengganggu telah dilakukan. Pada penelitian digunakan bodi pengganggu dengan variasi diameter $d = 4$ mm hingga $d = 6$ mm. Untuk sudut bodi pengganggu diatur pada sudut $\alpha = 20^\circ$ hingga $\alpha = 60^\circ$ yang tersusun secara simetris. Dari penelitian diketahui bahwa sudut yang dapat mereduksi gaya drag optimum dari susunan tersebut ketika bodi pengganggu dengan diameter $d = 5$ mm berada pada sudut $\alpha = 30^\circ$. Pada susunan silinder sirkular utama tandem, penggunaan bodi pengganggu secara efektif mengurangi fenomena *bistable* pada aliran. Lalu, penelitian yang dilakukan oleh Daman dan Widodo, 2014 [4] membahas mengenai pengaruh penambahan *inlet disturbance body* terhadap karakteristik aliran melewati silinder sirkular yang tersusun secara tandem. Penelitian dilakukan dengan menggunakan variasi jarak antara kedua silinder utama dengan rasio L/D sebesar $1,5$ hingga $4,0$ serta variasi sudut bodi pengganggu yang diatur pada sudut $\alpha = 30^\circ$ dan $\alpha = 60^\circ$. Penelitian menunjukkan penambahan bodi pengganggu pada sudut $\alpha = 30^\circ$ di depan silinder *upstream* dapat menunda separasi aliran disebabkan terjadinya *bubble separation* pada silinder *upstream*, hal ini juga menghasilkan nilai koefisien drag yang rendah. Penelitian dilakukan oleh Daloglu, 2008 [5] secara eksperimen mengenai *pressure drop* pada saluran dengan 2 silinder yang tersusun secara tandem. Hasil



Gambar 4. Perbandingan Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal Penelitian ini dengan Hidayat & Widodo.



(a)

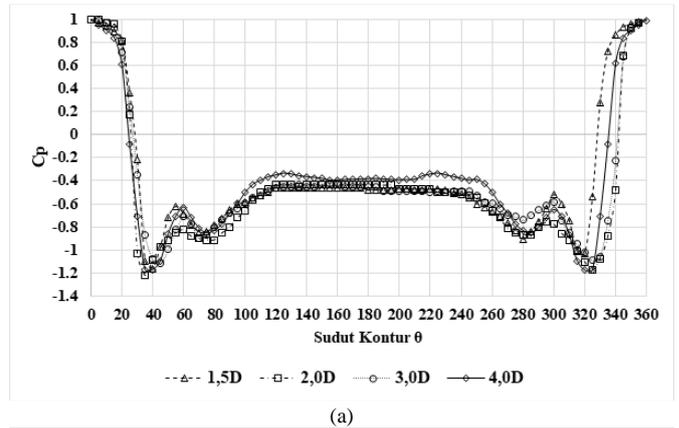


(b)

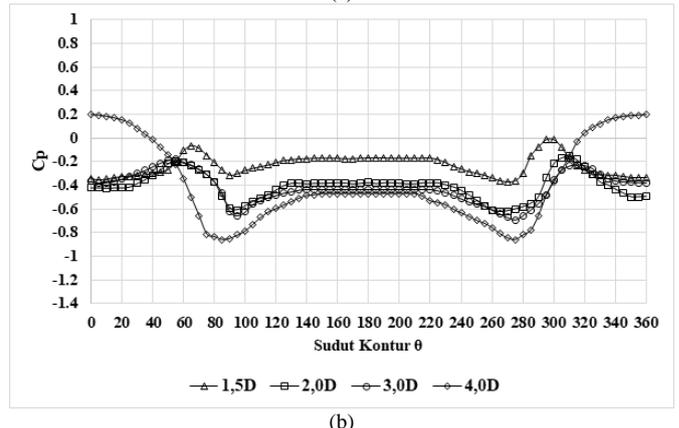
Gambar 5. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*; (b) *Downstream* pada Konfigurasi Tandem Tanpa Bodi Pengganggu untuk Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$.

penelitian menunjukkan bahwa nilai *pressure drop* sangat dipengaruhi oleh jarak antar silinder (L/d) yang tersusun secara tandem.

Berdasarkan penjelasan tentang fenomena aliran melewati silinder sirkular dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka pada penelitian ini akan diamati fenomena aliran melewati silinder sirkular yang tersusun secara tandem dengan menggunakan dua kendali pasif untuk menurunkan koefisien *drag* yang diterima silinder sirkular. Serta pada penelitian ini juga diamati *pressure drop* dari beberapa variasi susunan. Dari penelitian ini dilihat pengaruh variasi susunan yang dilakukan terhadap distribusi koefisien tekanan, koefisien *drag*, dan *pressure drop* pada instalasi saluran.

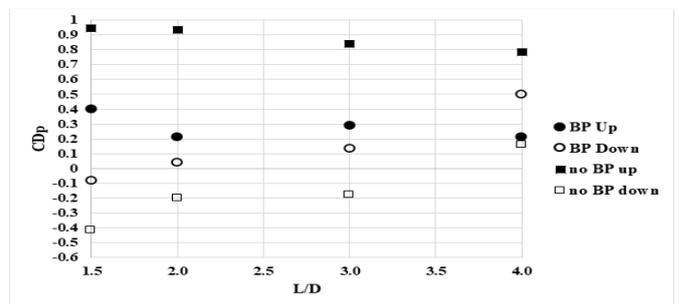


(a)



(b)

Gambar 2. Grafik Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*; (b) *Downstream* pada Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu 30° untuk Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$.

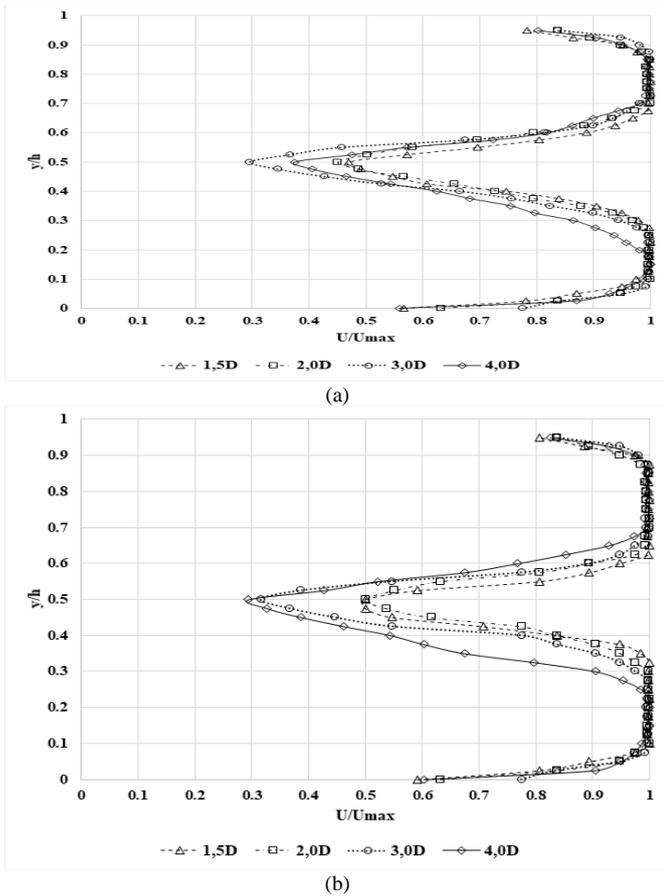


Gambar 3. Koefisien *Pressure Drag* Bilangan Reynolds $1,33 \times 10^5$.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimen untuk menganalisis karakteristik aliran melalui silinder sirkular yang tersusun tandem dengan dua buah bodi pengganggu. Pengambilan data dilakukan pada saluran berpenampang oktagonal. Gambar 1 menunjukkan skema *test section* dan benda uji yang digunakan.

Penelitian eksperimen ini menggunakan dua buah silinder sirkular utama dengan diameter $D = 25$ mm dengan dua buah bodi pengganggu (*Cylinder Circular Disturbance Body*) dengan diameter $d = 5$ mm yang diletakkan simetris membentuk sudut 30° terhadap sumbu silinder utama. perbandingan jarak antara dua silinder sirkular utama divariasikan dengan rasio yaitu $L/D = 1,5; 2,0; 3,0; 4,0$. Bilangan Reynolds yang digunakan berdasarkan diameter hidrolis Re_{Dh} , untuk memperoleh distribusi tekanan digunakan bilangan Reynolds yaitu $1,33 \times 10^5$. Sedangkan



Gambar 7. Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder (a) tanpa Bodi Pengganggu, (b) dengan Bodi Pengganggu 30° pada Bilangan Reynolds 1,33 x 10⁵.

pengukuran nilai *pressure drop* dilakukan pada bilangan Reynolds 4,76 x 10⁴ hingga 1,33 x 10⁵.

Pengukuran yang dilakukan di antaranya pengukuran tekanan statis permukaan kontur silinder utama, pengukuran tekanan dinamis di belakang silinder *downstream* utama, pengukuran tekanan statis dinding *wind tunnel* pada sisi *inlet* dan *outlet*. Pengukuran tekanan status pada kontur silinder utama digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien tekanan (*C_p*) dengan persamaan berikut :

$$C_p = \frac{p_k - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

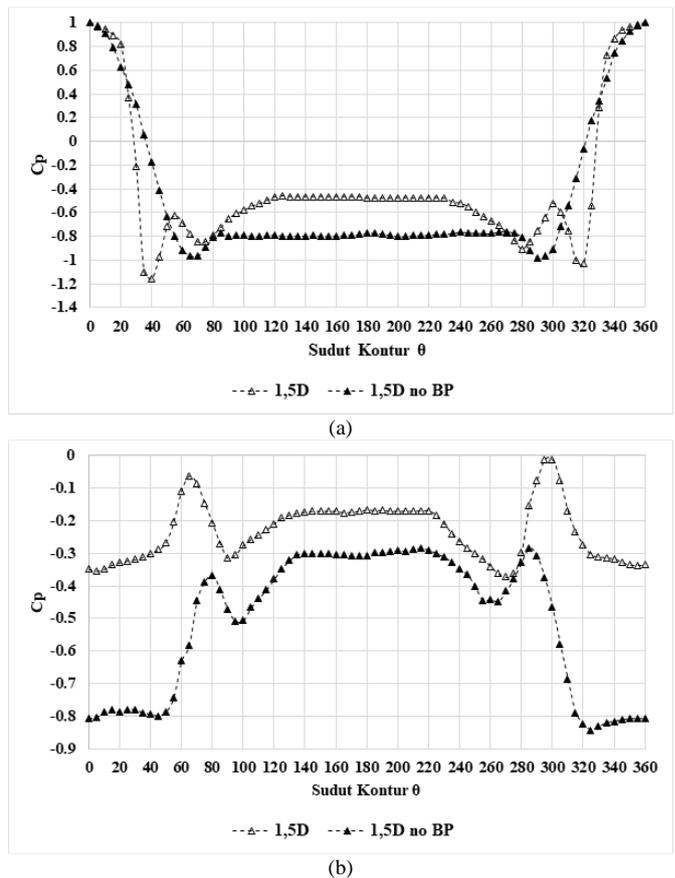
Dimana *p_k* merupakan tekanan permukaan kontur silinder, *p_∞* merupakan tekanan statis aliran *freestream*, dan $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ merupakan tekanan dinamis aliran *freestream*. Data koefisien *pressure drag* (*C_{Dp}*) diperoleh dari hasil integrasi dari nilai koefisien *pressure* (*C_p*) dengan persamaan berikut :

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

Untuk mendapatkan nilai koefisien *pressure drag* digunakan penyelesaian integrasi numerik dengan menggunakan metode Simpson 1/3 segmen berganda sehingga didapatkan persamaan berikut :

$$C_{Dp} = \frac{b-a}{2 \times 3n} \left\{ y_0 + 4(y_1 + \dots + y_{n-1}) + 2(y_2 + \dots + y_{n-2}) + y_n \right\} \quad (3)$$

Dimana : *a* : Sudut awal = 0°
b : Sudut akhir = 2π



Gambar 6. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*, (b) *Downstream*, dengan Variasi Jarak L/D 1,5.

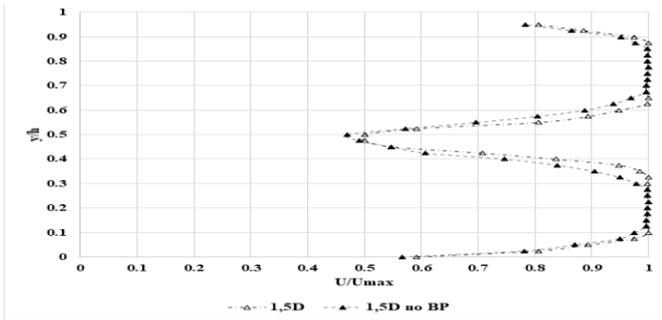
- n* : Jumlah data
- y₀* : Data pertama
- 4(*y₁* + ... + *y_{n-1}*) : Jumlah data ganjil
- 2(*y₂* + ... + *y_{n-2}*) : Jumlah data genap
- y_n* : Data terakhir

III. HASIL DAN DISKUSI

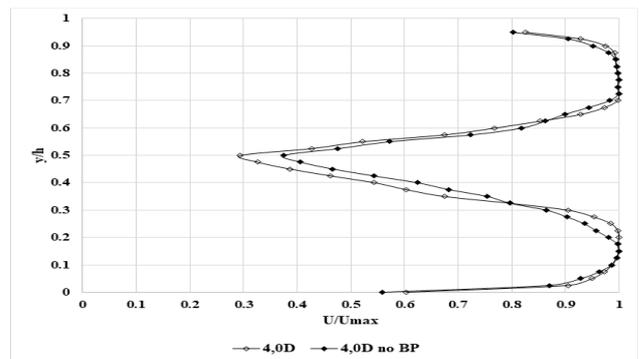
Pada bab ini akan menampilkan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan secara eksperimen. Hasil yang diperoleh dari penelitian berupa distribusi koefisien tekanan pada kontur silinder utama, nilai koefisien *pressure drag* untuk tiap silinder utama, profil kecepatan di belakang susunan silinder tandem, dan *pressure drop* saluran untuk tiap susunan silinder tandem.

A. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Tunggal

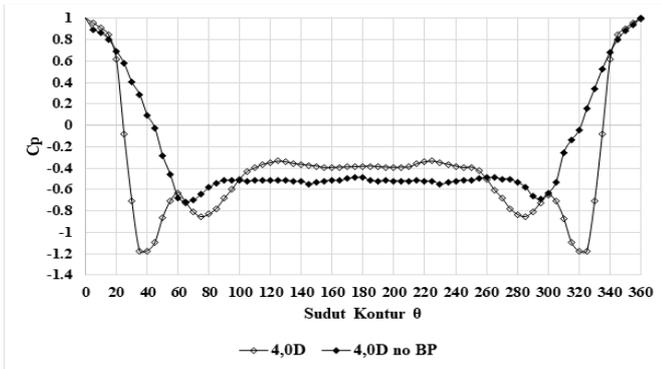
Pada Gambar 2 ditampilkan perbandingan koefisien tekanan pada konfigurasi silinder tunggal tanpa bodi pengganggu antara penelitian ini dengan penelitian Hidayat dan Widodo, 2014 [6]. Pada *wind tunnel* dengan diameter silinder sirkular *D* = 25 mm yang diuji pada bilangan Reynolds sebesar 1,56 x 10⁵, sedangkan penelitian saat ini dilakukan pada bilangan Reynolds (*Re_{Dh}*) 1,33 x 10⁵. Dapat dilihat pada Gambar 2 bahwa terlihat perbandingan grafik tidak memiliki perbedaan yang signifikan, tren yang ditunjukkan sesuai dengan penelitian Hidayat dan Widodo, 2014 [6]. Pada kedua grafik menunjukkan bahwa terjadi titik stagnasi pada sudut 0° dengan nilai *C_p* sebesar 1, lalu aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik secara ekstrem hingga mencapai titik maksimum yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan paling



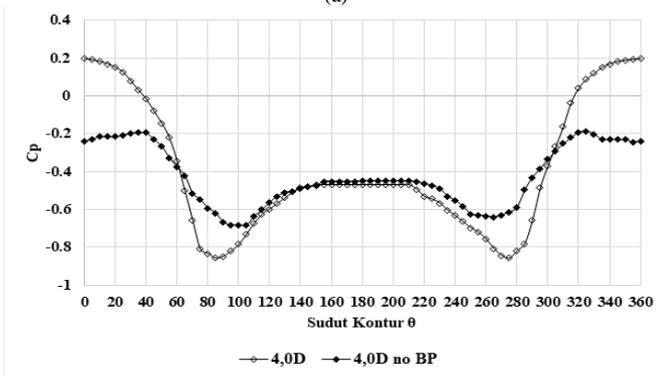
Gambar 10. Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak (L/D) 1,5.



Gambar 8. Grafik Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Tandem dengan Variasi Jarak (L/D) 4,0.



(a)



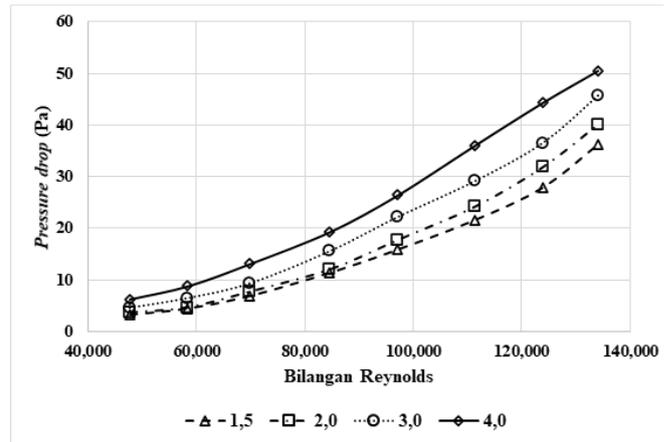
(b)

Gambar 11. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder (a) *Upstream*, (b) *Downstream*, dengan Variasi Jarak L/D 4,0.

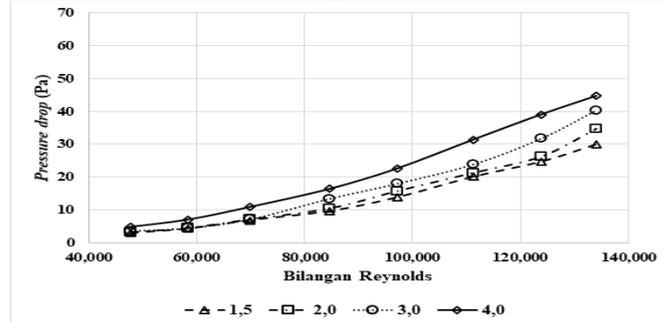
rendah pada sudut sekitar 70°, kemudian aliran mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure gradient* yang ditandai dengan peningkatan koefisien tekanan. Pada satu titik, aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan hingga terjadi separasi yang ditandai dengan koefisien tekanan yang mulai *steady* pada sudut sekitar 90°.

B. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder *Upstream* dan Silinder *Downstream* Konfigurasi Tandem tanpa Bodi Pengganggu

Distribusi koefisien tekanan permukaan silinder *upstream* Gambar 3 (a) menunjukkan tren grafik yang hampir sama untuk tiap variasi jarak (L/D). Posisi letak titik stagnasi berada tepat pada sudut 0°, dengan nilai koefisien tekanan sama dengan 1 (satu). Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang ditandai dengan penurunan nilai Cp pada grafik secara ekstrem hingga aliran mencapai kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan terendah. Aliran kemudian mengalami perlambatan akibat adanya *adverse pressure* yang ditandai dengan adanya kenaikan pada nilai koefisien tekanan, hingga pada satu titik di mana aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga terjadi separasi. Pada grafik, titik



(a)



(b)

Gambar 9. *Pressure drop* terhadap Re_{Dh} pada konfigurasi a) tanpa bodi pengganggu; b) dengan bodi pengganggu 30°.

separasi ditandai dengan nilai koefisien tekanan yang mulai stabil. Pada semua konfigurasi jarak tanpa bodi pengganggu titik separasi aliran relatif sama yaitu pada sudut 90° untuk sisi *upper* dan sudut 270° untuk sisi *lower*. Adapun perbedaan dari masing-masing variasi jarak terlihat pada *base pressure* atau nilai tekanan yang berada di sepanjang daerah separasi aliran, di mana nilai *base pressure* tertinggi berada pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 sedangkan nilai *base pressure* terendah berada pada konfigurasi jarak (L/D) 1,5.

Gambar 3 (b) menunjukkan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) permukaan silinder *downstream* untuk konfigurasi tanpa bodi pengganggu. Konfigurasi silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu memiliki distribusi koefisien tekanan yang bernilai negatif untuk semua konfigurasi jarak (L/D), hal tersebut dikarenakan pada jarak tertentu silinder *downstream* masih berada pada daerah *wake* dari silinder *upstream* sehingga silinder *downstream* masih terpengaruh aliran fluida silinder *upstream*. Pada kasus seperti yang terjadi pada Gambar 3 (b), di mana terdapat peak

pada sisi *upper* maupun sisi *lower* dalam distribusi koefisien tekanan menunjukkan bahwa *shear layer* silinder *upstream* mengalami *re-attachment* pada silinder *downstream*, hingga terbagi menjadi dua arah aliran yaitu *forward shear layer* (FSL) aliran yang mengalir kembali ke arah silinder *upstream* dan *backward shear layer* (BSL) di mana aliran mengalir menuju silinder *downstream*.

C. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Upstream dan Silinder Downstream Konfigurasi Tandem dengan Bodi Pengganggu 30°

Distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° Gambar 5 (a) sama seperti distribusi tekanan pada konfigurasi lain, di mana titik stagnasi koefisien tekanan silinder *upstream* untuk konfigurasi ini bernilai satu dan terletak pada sudut 0°. Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan ditandai dengan turunnya nilai koefisien tekanan secara perlahan. Hal tersebut akibat adanya penambahan bodi pengganggu pada sisi *inlet* sehingga menghambat laju fluida yang mengalir. Selanjutnya aliran mulai mengalami percepatan yang signifikan hingga aliran mencapai kecepatan maksimumnya pada sudut 40° untuk *upper side* dan pada sudut 320° untuk *lower side*. Kecepatan maksimum aliran terjadi sesaat setelah aliran melewati bodi pengganggu, hal ini diakibatkan oleh timbulnya *boundary layer* di antara silinder utama dan bodi pengganggu. Setelah melewati daerah kecepatan maksimum, aliran kemudian mulai mengalami perlambatan hingga terjadi separasi, namun akibat adanya pengaruh *wake* dari bodi pengganggu dan momentum aliran yang lebih besar daripada momentum aliran yang terseparasi maka menyebabkan terlepasnya *shear layer* akan mengalami *re-attachment* ke permukaan silinder *upstream* hal tersebut dapat diamati melalui adanya *peak* pada grafik distribusi koefisien tekanan. Titik terjadinya fenomena *re-attachment* terjadi pada sudut 55° untuk *upper side* dan sudut 300° untuk *lower side*.

Selanjutnya aliran kembali mengikuti kontur permukaan silinder yang ditandai dengan penurunan nilai koefisien tekanan di mana aliran mengalami percepatan sesaat hingga akhirnya mencapai kecepatan maksimumnya yang lain dan mulai mengalami perlambatan dikarenakan aliran melewati daerah *adverse pressure*. Pada satu titik ketika aliran sudah tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan yang timbul, maka terjadilah separasi aliran yang ditandai dengan nilai distribusi koefisien tekanan yang cenderung stabil.

Distribusi koefisien tekanan silinder *downstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° Gambar 5 (b) memiliki tren yang cenderung serupa untuk konfigurasi jarak (L/D) 1,5 hingga 3,0, koefisien tekanan pada konfigurasi tersebut bernilai negatif. Sama hal tersebut menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih berada pada daerah yang terlindungi oleh *wake* silinder *upstream*. Adanya *peak* pada distribusi koefisien tekanan mengindikasikan bahwa *shear layer* yang terpisah dari silinder *upstream* mengalami *re-attachment* dengan permukaan silinder *downstream*.

D. Distribusi Koefisien Pressure Drag Silinder Konfigurasi Tandem

Untuk silinder yang diberi penambahan bodi pengganggu

di sisi arah fluida datang, maka akan terjadi suatu proses interaksi antara *streamline* bodi pengganggu dengan *streamline* silinder yang saling mempengaruhi satu dengan lainnya. Sehingga akan menimbulkan gaya *drag*. Seperti diketahui bahwa koefisien *drag* (gaya hambat) terdiri dari koefisien *pressure drag* dan *skin friction drag*. Namun, pada kasus silinder sirkular koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) jauh lebih dominan dibandingkan dengan *skin friction drag*. Sehingga koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) dapat dikatakan mendekati nilai koefisien *drag* (C_D). Nilai koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) pada kedua silinder sirkular untuk tiap konfigurasi ditampilkan pada **Error! Reference source not found.** koefisien *pressure drag* silinder *upstream* maupun silinder *downstream* diperoleh menggunakan persamaan (3).

Penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dapat mereduksi gaya *drag* silinder *upstream* secara optimal hal tersebut dapat diamati dari terjadinya penurunan nilai C_{Dp} dari silinder *upstream* untuk semua konfigurasi jarak (L/D), namun gaya *drag* silinder *downstream* cenderung lebih tinggi daripada gaya *drag* silinder *downstream* pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu. Pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu pada jarak L/D 1,5 silinder *downstream* memiliki nilai *base pressure* yang relatif tinggi oleh karena itu konfigurasi tersebut memiliki nilai koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) yang rendah, sedangkan pada konfigurasi L/D 2,0; 3,0; dan 4,0 memiliki nilai *base pressure* yang cenderung lebih rendah sehingga untuk konfigurasi yang sama memiliki nilai koefisien *pressure drag* lebih tinggi meningkat seiring dengan bertambahnya jarak. Nilai C_{Dp} yang negatif menunjukkan bahwa luas daerah *wake* yang ditimbulkan berada di depan dari silinder *downstream*.

E. Distribusi Profil Kecepatan di Belakang Konfigurasi Silinder Tandem

Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu Gambar 6 (a) terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara variasi konfigurasi jarak (L/D) 1,5 dan 2,0 dibandingkan dengan variasi konfigurasi jarak (L/D) 3,0 dan 4,0. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 dan 3,0 terjadi defisit momentum yang besar, di mana defisit terbesar terjadi pada konfigurasi jarak L/D 3,0, hal tersebut ditandai dengan nilai U/U_{max} yang paling rendah daripada konfigurasi jarak lainnya. Pada konfigurasi silinder tandem aliran yang melintasi silinder *upstream* akan mempengaruhi silinder *downstream*, di mana *wake* yang timbul akan mengenai silinder *downstream* pada jarak tertentu. Pada jarak yang lebih dekat *wake* yang terjadi akibat silinder *upstream* cenderung melingkupi silinder *downstream*, adapun ketika jarak relatif jauh maka *wake* yang timbul akibat silinder *upstream* semakin kecil pula mempengaruhi silinder *downstream* hingga silinder aliran yang melintasi silinder *downstream* mendekati silinder tunggal. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa adanya pengurangan nilai U/U_{max} mengindikasikan *wake* yang terbentuk di belakang susunan konfigurasi silinder. Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu pada jarak L/D 1,5 memiliki lebar *wake* tersempit.

Data hasil distribusi profil kecepatan Gambar 6 (b) menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem dengan bodi

pengganggu 30° menunjukkan pada konfigurasi jarak (L/D) 4,0 dan 3,0 terjadi defisit momentum yang besar, di mana defisit terbesar terjadi pada konfigurasi jarak L/D 4,0, hal tersebut ditandai dengan nilai U/U_{max} yang paling rendah daripada konfigurasi jarak lainnya. Pada konfigurasi lain menunjukkan nilai U/U_{max} yang lebih tinggi, hal tersebut mengindikasikan bahwa defisit momentum yang terjadi lebih kecil.

Pada konfigurasi silinder tandem aliran yang melintasi silinder *upstream* akan mempengaruhi silinder *downstream*, di mana *wake* yang timbul akan mengenai silinder *downstream* pada jarak tertentu. Pada jarak yang lebih dekat *wake* yang terjadi akibat silinder *upstream* cenderung melingkupi silinder *downstream*, adapun ketika jarak semakin jauh maka *wake* yang timbul akibat silinder *upstream* semakin kecil pula mempengaruhi silinder *downstream* hingga aliran yang melintasi silinder *downstream* akan mendekati silinder tunggal. Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa adanya pengurangan nilai U/U_{max} mengindikasikan *wake* yang terbentuk di belakang susunan konfigurasi silinder. Hasil distribusi profil kecepatan menunjukkan bahwa konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu 30° pada jarak L/D 1,5 memiliki lebar *wake* tersempit, sedangkan lebar *wake* terbesar terjadi pada konfigurasi jarak L/D 4,0.

F. Perbandingan Pengaruh Penambahan Bodi Pengganggu pada Konfigurasi Tandem

Gambar 7 (a) menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) silinder *upstream*. Tampak bahwa aliran pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° lebih awal mengalami akselerasi menuju kecepatan maksimum pada sudut 40°, meskipun di awal konfigurasi ini sempat mengalami akselerasi yang tidak terlalu signifikan akibat adanya bodi pengganggu yang menghalangi laju aliran. Sedangkan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mengalami akselerasi lebih lambat menuju kecepatan maksimum yang terjadi pada sudut 70°. Untuk nilai koefisien tekanan terendah pada konfigurasi silinder tandem terjadi pada susunan dengan penambahan bodi pengganggu dengan nilai koefisien tekanan terendah yaitu sebesar -1,162. Untuk letak titik separasi, konfigurasi tanpa bodi pengganggu mengalami separasi aliran terlebih dahulu pada sudut 90° diikuti konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu yang berhasil menunda terjadinya separasi aliran menjadi lebih lambat yaitu terjadi pada sudut 120°. Hal tersebut karena pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu distribusi koefisien tekanan aliran mengalami *re-attachment* pada kontur yang terjadi pada sudut 55°, sedangkan pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu tidak terjadi fenomena tersebut.

Gambar 7 (b) menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) silinder *downstream*. Tampak bahwa tren grafik distribusi koefisien tekanan relatif sama dengan distribusi koefisien tekanan yang bernilai negatif. Hal tersebut mengindikasikan bahwa silinder *downstream* baik pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu maupun dengan penambahan bodi pengganggu masih berada dalam daerah *wake* silinder *upstream*. Konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu memiliki distribusi koefisien tekanan lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi dengan

penambahan bodi pengganggu. Titik *re-attachment* konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu terjadi lebih awal yaitu pada sudut 65°, lalu diikuti oleh konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu yang mengalami *re-attachment* pada sudut 80°. Hal tersebut mengindikasikan bahwa daerah *wake* silinder *upstream* konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu lebih sempit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu.

Gambar 8 menunjukkan perbandingan distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi tandem pada variasi jarak (L/D) 1,5. Tampak bahwa tren profil kecepatan dari variasi konfigurasi tandem sama. Lebar daerah *wake* antara konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu dan konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu hampir sama, namun pada konfigurasi dengan bodi pengganggu $0,35 \leq y/h \leq 0,625$ terjadi penyempitan sedikit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu $0,3 \leq y/h \leq 0,65$.

Gambar 9 (a) menampilkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) silinder *upstream*. Dapat dilihat bahwa aliran pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° lebih awal mengalami akselerasi menuju kecepatan maksimum pada sudut 35°-40°, meskipun di awal konfigurasi ini sempat mengalami akselerasi yang tidak terlalu signifikan akibat adanya bodi pengganggu yang menghalangi laju aliran. Sedangkan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mengalami akselerasi lebih lambat menuju kecepatan maksimum yang terjadi pada sudut 75°. Untuk nilai koefisien tekanan terendah pada konfigurasi silinder tandem terjadi pada susunan dengan penambahan bodi pengganggu dengan nilai koefisien tekanan terendah yaitu sebesar -1,171. Untuk letak titik separasi, konfigurasi tanpa bodi pengganggu mengalami separasi aliran terlebih dahulu pada sudut 90° diikuti konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu yang berhasil menunda terjadinya separasi aliran menjadi lebih lambat yaitu terjadi pada sudut 125°. Hal tersebut karena pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu distribusi koefisien tekanan aliran mengalami *re-attachment* pada kontur yang terjadi pada sudut 60°, sedangkan pada konfigurasi tanpa bodi pengganggu tidak terjadi fenomena tersebut.

Gambar 9 (b) menunjukkan perbandingan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) silinder *downstream*. Dapat dilihat bahwa grafik distribusi koefisien tekanan pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu bernilai negatif, hal tersebut menunjukkan bahwa silinder *downstream* masih terlindungi oleh daerah *wake* dari silinder *upstream*. Silinder *downstream* pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu mulai mendekati tren distribusi koefisien tekanan silinder tunggal namun masih mengalami *re-attachment* pada sudut 35°-40° pada *upper side* dan pada sudut 325° untuk *lower side*, belum tepat berada pada sudut 0°. Sedangkan pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu menunjukkan tren yang sudah menyerupai silinder tunggal, dengan titik *re-attachment* yang tepat berada pada sudut 0°, dengan nilai koefisien tekanan tertinggi yaitu sebesar 0,197.

Gambar 10 menyajikan grafik perbandingan distribusi profil kecepatan di belakang konfigurasi silinder tandem pada variasi jarak (L/D) 4,0. Tampak grafik menunjukkan kesamaan tren, namun dengan perbedaan lebar daerah *wake* dan nilai perbandingan U/U_{max} yang dapat digunakan guna menentukan defisit momentum yang terjadi. Lebar daerah

wake pada konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu berada di antara $0,2 \leq y/h \leq 0,7$. Daerah *wake* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu cenderung lebih sempit yaitu berada di antara $0,25 \leq y/h \leq 0,675$. Penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem memperbesar defisit momentum yang terjadi dibandingkan dengan konfigurasi tanpa bodi pengganggu.

G. Pressure Drop pada Konfigurasi Silinder Tandem

Data *pressure drop* diambil untuk saluran dengan konfigurasi silinder tandem tanpa bodi pengganggu, dan saluran dengan konfigurasi silinder tandem yang diberi bodi pengganggu. Data hasil eksperimen ditampilkan dalam bentuk grafik *pressure drop* fungsi bilangan Reynolds, dengan hubungan kenaikan bilangan Reynolds terhadap nilai *pressure drop* saluran Gambar 11 menunjukkan seiring bertambahnya bilangan Reynolds, *pressure drop* yang terjadi semakin besar pula. Semakin besar bilangan Reynolds, maka kecepatan aliran semakin tinggi sehingga *pressure drop* meningkat.

Pada Gambar 11, dapat dilihat pengaruh penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem pada *wind tunnel* berpenampang oktagonal terhadap penurunan nilai *pressure drop* efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu yang diletakkan pada sudut 30° dengan semua konfigurasi jarak antar silinder (L/D). Distribusi *pressure drop* pada Gambar 11 (b) lebih rendah dibandingkan dengan Gambar 11 (a), namun kedua grafik menunjukkan *trend* yang sama yaitu nilai *pressure drop* semakin tinggi seiring bertambahnya bilangan Reynolds. Peningkatan *pressure drop* yang terjadi pada bilangan Reynolds $< 8,46 \times 10^4$ tidak terlalu signifikan, Pada berbagai variasi bilangan Reynolds, nilai *pressure drop* tertinggi terjadi pada konfigurasi jarak L/D 40. Nilai *pressure drop* tertinggi untuk konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu terjadi pada konfigurasi jarak L/D 4.0 sebesar 44.7 pa.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian ini, didapatkan beberapa data hasil penelitian dan dapat disimpulkan sebagai berikut:(1)Nilai *Pressure drop* tertinggi terjadi pada susunan silinder tandem dengan bodi pengganggu 30° pada jarak (L/D) 4,0 dan Re

1,33 x 105 yaitu sebesar 50.49 pa. Nilai *pressure drop* semakin tinggi seiring bertambahnya bilangan Reynolds;(2)Penambahan bodi pengganggu pada konfigurasi silinder tandem pada *wind tunnel* berpenampang oktagonal terhadap penurunan nilai *pressure drop* efektif terjadi pada konfigurasi silinder tandem dengan bodi pengganggu yang diletakkan pada sudut 30° dengan semua konfigurasi jarak antar silinder (L/D);(3)Penambahan bodi pengganggu 30° secara efektif mempengaruhi distribusi nilai koefisien tekanan, terjadi penundaan titik separasi pada setiap variasi jarak antar silinder (L/D) Kondisi ini mengindikasikan bahwa gaya hambat pada konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu lebih kecil ketika dibandingkan dengan silinder tandem tanpa bodi pengganggu. Nilai koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) silinder *upstream* pada seluruh konfigurasi mengalami penurunan sebesar 47 – 73%, sedangkan untuk silinder *downstream* nilai C_{Dp} mengalami peningkatan;(4)Pengamatan profil kecepatan dilakukan pada bidang vertikal menunjukkan bahwa, luas daerah *wake* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu 30° cenderung lebih sempit dibandingkan dengan konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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. 1–233, 2004.
- [2] M. M. Alam, M. Moriya, K. Takai, and H. Sakamoto, "Fluctuating fluid forces acting on two circular cylinders in a tandem arrangement at a subcritical Reynolds number," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, no. 1–2, pp. 139–154, 2003.
- [3] M. M. Alam, H. Sakamoto, and M. Moriya, "Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 18, no. 3–4, pp. 347–366, 2003.
- [4] A. Annisa Amin Daman and W. Aries Widodo, "Pengaruh Penambahan Inlet Disturbance Body Terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Sirkular Tersusun Tandem," in *Proceeding Seminar Nasional Thermofluid VI Yogyakarta*, 2014, pp. 79–84.
- [5] A. Daloglu, "Pressure Drop in a Channel with Cylinders in Tandem Arrangement," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, no. 1, pp. 76–83, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.05.011.
- [6] W. A. Widodo and N. Hidayat, "Experimental study of drag reduction on circular cylinder and reduction of pressure drop in narrow channels by using a cylinder disturbance body," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 493, pp. 198–203, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.493.198.