

Studi Numerik Pengaruh Bodi Pengganggu terhadap Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Sirkular yang Tersusun Tandem

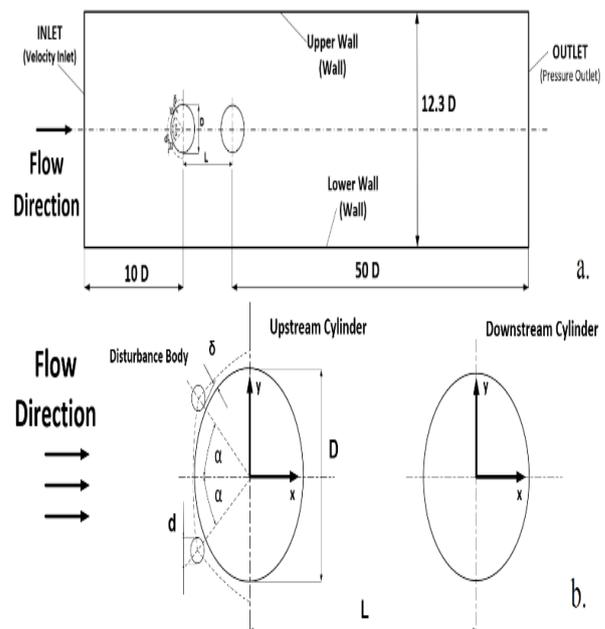
Kanda Wibisana Nirwana, dan Wawan Aries Widodo
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wawanaries71@gmail.com

Abstrak—Aliran yang melintasi suatu bluff body berbentuk silinder sirkular merupakan aliran eksternal yang menjadi perhatian dalam bidang fluida. Aplikasi bluff body sering diaplikasikan dalam perkembangan industri yaitu konstruksi gedung, cerobong asap, dll. Dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, hasilnya menunjukkan bahwa adanya gaya hambat yang timbul pada aliran tersebut, maka dari itu dilakukan penelitian dengan metode numerik untuk meneliti karakteristik aliran yang melintasi silinder sirkular tersusun tandem dengan penambahan bodi pengganggu. Untuk penelitian secara numerik menggunakan solver dua dimensi (2D) unsteady flow dengan turbulence viscous model $k-\omega$ Shear Stress Transport. Penelitian ini menggunakan geometri diameter silinder sirkular (D) = 49 mm, diameter bodi pengganggu (d) = 5 mm, dan jarak gap (δ) = 1 mm dengan variasi jarak antara kedua silinder (L/D) = 3; 4; dan 5 serta variasi penambahan bodi pengganggu pada sudut (α) = 30° dan 60° . Penelitian ini dengan bilangan Reynolds (Re) = $6,5 \times 10^4$ dengan kecepatan inlet yang digunakan konstan pada 19,5 m/s. Hasil dari penelitian ini menunjukkan adanya reduksi gaya hambat dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° yaitu sebesar 38,5%. Sedangkan pada silinder downstream reduksi gaya hambat dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° , yaitu sebesar 37,1%.

Kata Kunci—Bodi Pengganggu, Silinder Sirkular, Bluff Body.

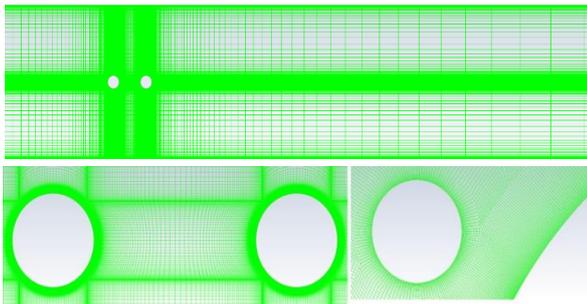
I. PENDAHULUAN

MEKANIKA fluida adalah ilmu yang mempelajari mengenai perilaku fluida salah satunya adalah aliran eksternal melintasi *bluff body* berbentuk silinder sirkular. *Bluff body* adalah salah satu fenomena fluida yang sering kali diaplikasikan dalam perkembangan dunia industri, misalnya konstruksi gedung, cerobong asap, sistem bangunan lepas pantai, dan lain-lain. Topik mengenai *bluff body* semakin berkembang setelah Ludwig Prandtl menemukan konsep lapis batas (*boundary layer*) pada tahun 1904 [1]. Ludwig menjelaskan bahwa lapis batas adalah lapisan yang terbentuk di sekitar aliran fluida di dekat permukaan akibat efek gesekan atau viscous yang terjadi secara signifikan. Aliran fluida yang mengalir dapat berubah dari aliran laminar menjadi aliran turbulen. Adapun fase yang dialami suatu aliran *viscous* di sekitar *bluff body* adalah fase stagnasi, fase terbentuknya lapis batas, fase separasi dan fase terbentuknya *wake* di belakang *bluff body*. Metode yang digunakan untuk mereduksi gaya *drag* tersebut adalah dengan mengendalikan aliran fluida baik secara aktif maupun secara pasif salah satunya dengan menempatkan bodi pengganggu pada bagian *upstream* dari *bluff body*. Penelitian mengenai pengurangan gaya *drag* pada silinder tunggal dengan menambahkan bodi pengganggu dilakukan oleh Alam,at.al 2003 [2]. Penelitian dilakukan dengan geometri diameter silinder utama sebesar $D = 49$ mm, dengan bilangan Reynolds sebesar $Re = 5,5 \times 10^4$.



Gambar 1. Skema penelitian.

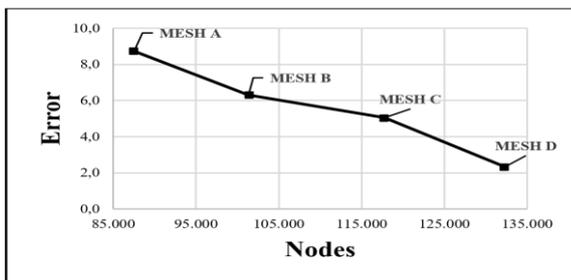
Variasi diameter bodi pengganggu, $d = 4; 5; 6$ mm, dengan penempatan pada sudut $\alpha = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 45^\circ; \text{ dan } 60^\circ$. Jarak antara bodi pengganggu dengan silinder sirkular sebesar $\delta = 0,4$ mm. Nilai koefisien *drag* minimum terjadi pada penempatan sudut bodi pengganggu $\alpha = 30^\circ$ dan diameter bodi pengganggu, $d = 5$ mm, dengan nilai gaya *drag* tereduksi sebesar 67%. Penelitian mengenai silinder sirkular yang tersusun tandem dilakukan oleh Alam,at.all, 2002 [3]. Penelitian dilakukan dalam bilangan $Re = 6,5 \times 10^4$. Penelitian dilakukan dengan variasi jarak $L/D = 1,0 - 8,0$. Menjelaskan rasio jarak $L/D < 3,0$ nilai koefisien *drag* pada silinder *upstream* lebih kecil dibandingkan nilai pada silinder *downstream*. Hal ini disebabkan karena *shear layer* yang terpisah dari silinder *upstream* menempel kembali dengan silinder *downstream* mengakibatkan *Karman-type vortex* terbentuk hanya dibelakang silinder *downstream*. Untuk rasio jarak $L/D > 3,0$ ketika kedua silinder membentuk *vortices* sendiri-sendiri, nilai koefisien *drag* pada silinder *downstream* menurun seiring dengan bertambahnya rasio jarak antar silinder. Penelitian mengenai pengaruh penambahan bodi pengganggu terhadap karakteristik aliran pada silinder sirkular tersusun tandem dilakukan oleh Daman & Widodo, 2014 [4]. Penelitian dilakukan pada $Re_{DH} = 1,56 \times 10^5$ dengan variasi sudut bodi pengganggu $\alpha = 30^\circ$ dan 60° dan variasi jarak antara kedua silinder $L/D = 1,5$ dan 4. Penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° pada jarak $L/D = 4$ dapat mereduksi koefisien *drag* hingga 53% pada silinder *upstream*, sedangkan penambahan bodi pengganggu pada



Gambar 2. Hasil *meshing* pada kedua silinder dan bodi pengganggu.

Tabel 1.
Hasil Grid Independency Test pada silinder upstream

Mesh	Nodes	C_D	Error (%)	Y^+ max
Alam, et al.		1,032		
Mesh A	87.514	1,1	8,7	1,23
Mesh B	101.344	1,095	6,2	0,81
Mesh C	117.731	1,082	5,0	0,66
Mesh D	132.294	1,006	2,3	0,52



Gambar 3. Grafik *Grid Independency Test*.

sudut 60° koefisien *drag* pada silinder *downstream* dapat tereduksi hingga 78%.

Dari beberapa penelitian tersebut, muncul permasalahan yang akan diteliti lebih lanjut mengenai pengaruh penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dan 60° terhadap nilai koefisien *drag* silinder sirkular yang tersusun tandem. Penelitian dilakukan pada variasi jarak antara kedua silinder $L/D = 3; 4; \text{ dan } 5$.

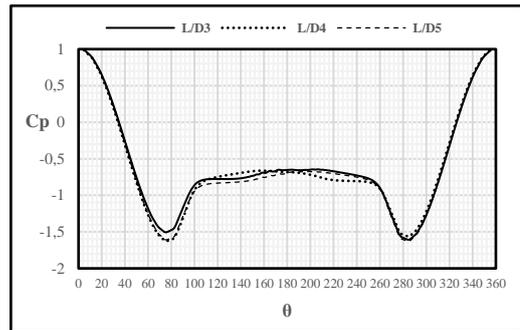
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode komputasi numerik menggunakan *software* Gambit 2.4.6 dan Fluent 2021R2 dengan tiga tahapan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

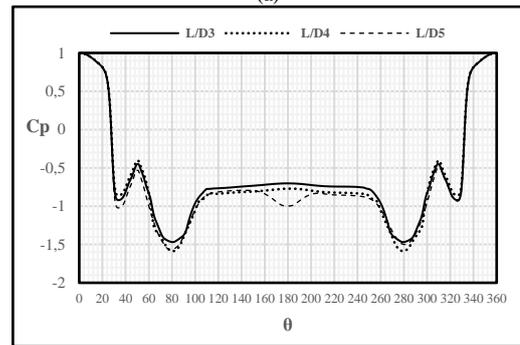
A. *Pre-processing*

Penelitian ini dilakukan pada bilangan Reynolds $Re = 6,5 \times 10^4$. Diameter kedua silinder utama (D) yang digunakan sebesar 49 mm. Bodi pengganggu berupa silinder sirkular berdiameter (d) 5 mm yang diletakkan pada sisi *upstream* ditempatkan pada sudut (α) 30° dan 60° . Jarak permukaan bodi pengganggu terhadap silinder *upstream* (δ) sebesar 1 mm. Variasi jarak antar sumbu silinder *upstream* dengan silinder *downstream* (L/D) yaitu 3; 4; dan 5. Skema penelitian dapat dilihat pada gambar 1.

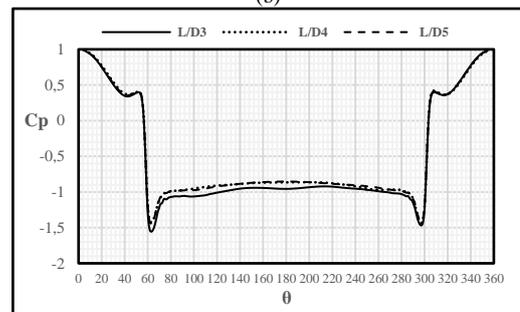
Selanjutnya dilakukan proses *meshing* dan penentuan kondisi batas yang dilakukan pada *software* Gambit 2.4.6. Hasil *meshing* dapat dilihat pada gambar 2 dan kondisi batas dijelaskan pada Tabel 1.



(a)



(b)



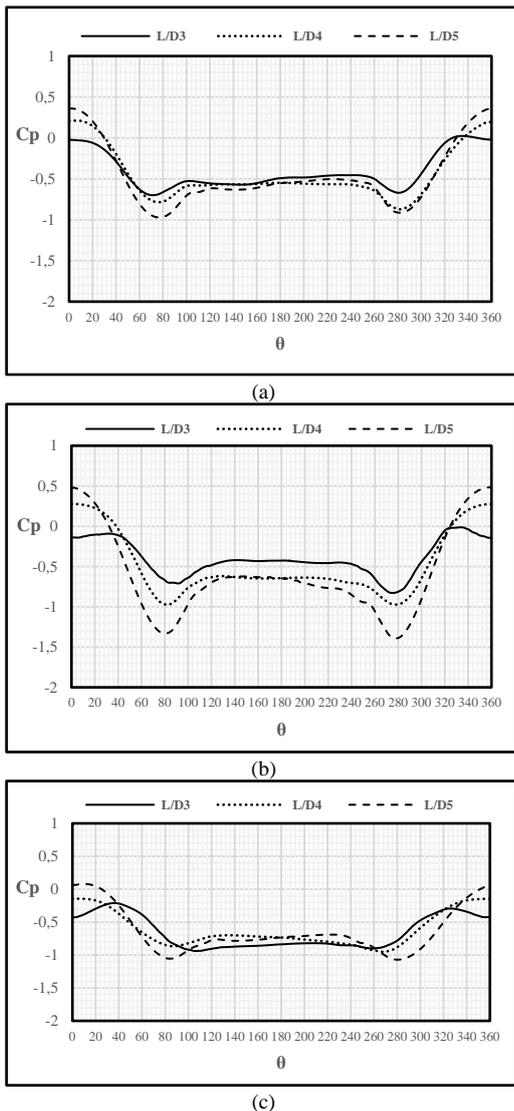
(c)

Gambar 4. Grafik koefisien tekanan rata-rata silinder *upstream*: (a) tanpa bodi pengganggu; (b) bodi pengganggu 30° ; (c) bodi pengganggu 60° .

Batasan-batasan yang ditetapkan dalam penelitian ini adalah *inlet*, *outlet*, *wall*, silinder sirkular, dan bodi pengganggu. Kondisi batas yang digunakan untuk *inlet* menggunakan *velocity inlet*, untuk *outlet* menggunakan *pressure outlet*, pada silinder *upstream*, silinder *downstream*, *upper wall*, *lower wall*, dan bodi pengganggu adalah *wall*.

B. *Pre-processing*

Pemodelan aliran yang digunakan dalam penelitian ini adalah SST k-omega. Model SST k-omega memiliki akurasi yang lebih baik ketika digunakan untuk memodelkan aliran. Model SST k-omega juga lebih andal untuk kelas aliran yang lebih luas daripada *Standard* k-omega, termasuk aliran *adverse pressure gradient* (Mulvany, 2004). Kecepatan aliran diatur pada 19,5 m/s. Nilai *turbulent intensity* yang digunakan sebesar 1% dan *turbulent length scale* sebesar 0,07D (Ansys Inc., 2009). Metode yang digunakan untuk simulasi ini adalah *Pressure-Velocity Coupling* dengan skema *SIMPLEC*. *Spacial Discretization* untuk tekanan menggunakan *Second Order*. Untuk momentum, *turbulent kinetic energy*, dan *specific dissipation rate* menggunakan *Second Order Upwind*. *Transient Formulation* menggunakan *Second Order Implicit*. Pada simulasi ini kriteria konvergen diatur sebesar 10^{-6} . *Time Step Size* yang digunakan untuk aliran melintasi



Gambar 5. Grafik koefisien tekanan rata-rata silinder *downstream*: (a) tanpa bodi pengganggu; (b) bodi pengganggu 30°; (c) bodi pengganggu 60°.

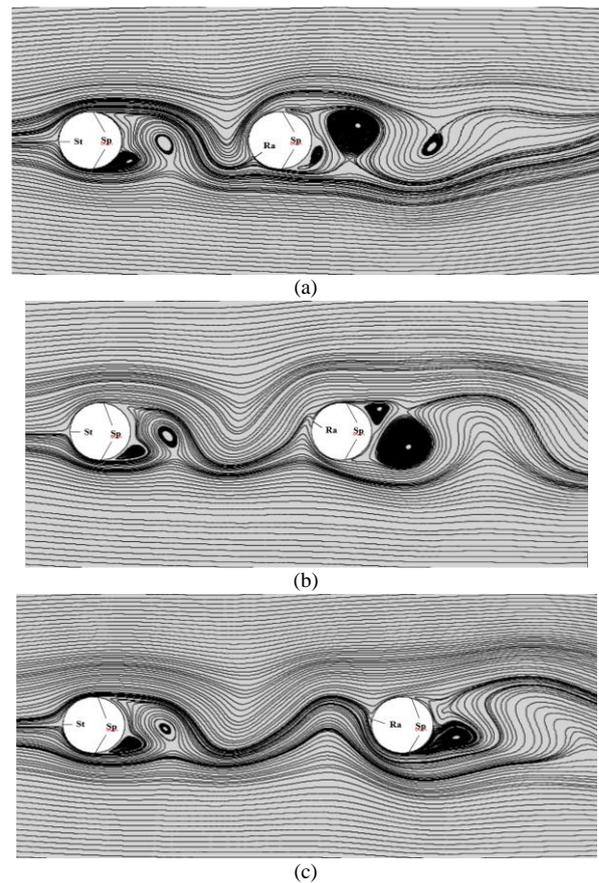
silinder sirkular yaitu sebesar 0.0001 (Guinness & Persoons, 2021).

C. Post-processing

Parameter *mesh* yang dapat digunakan untuk menentukan *mesh* yang sesuai disebut *Grid Independency Test* (GIT). Dalam GIT didapat nilai berupa *coefficient of drag* (C_D) dari hasil simulasi dengan jumlah elemen *meshing* yang berbeda. Berikut merupakan hasil dari GIT yang ditunjukkan pada tabel 1 dan grafik perbandingan pada gambar 3. Berdasarkan hasil GIT, *mesh* jenis D dapat digunakan untuk pengambilan data dikarenakan selisih *error* yang relatif lebih kecil apabila dibandingkan dengan *mesh* yang lain.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh adalah data kuantitatif dan data kualitatif. Data yang ditampilkan merupakan hasil *post-processing*, yaitu distribusi koefisien tekanan (C_p) pada permukaan silinder *upstream* dan silinder *downstream*, nilai fluktuatif koefisien *drag* (C_{Df}), nilai fluktuatif koefisien *lift* (C_{Lf}), *Strouhal Number* (St), kontur kecepatan yang dipadu dengan *streamline*, dan kontur *vorticity magnitude*.

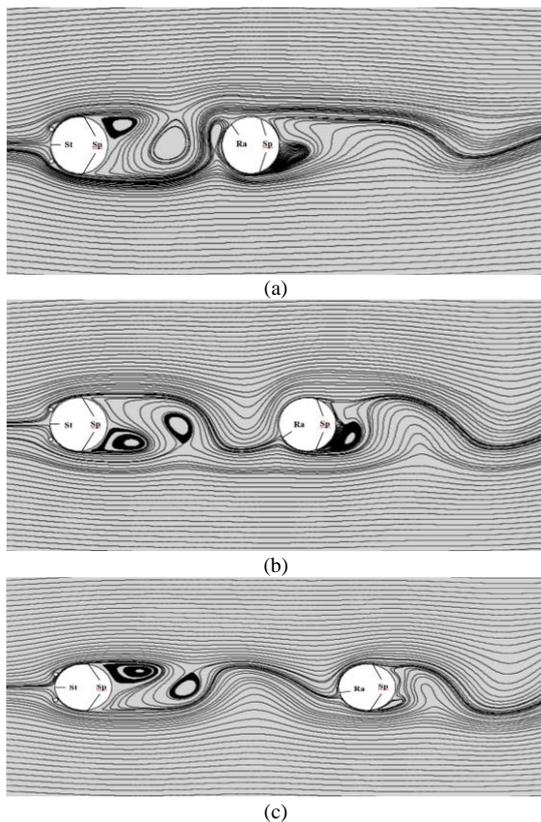


Gambar 6. *Velocity pathline* konfigurasi tanpa bodi pengganggu: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.

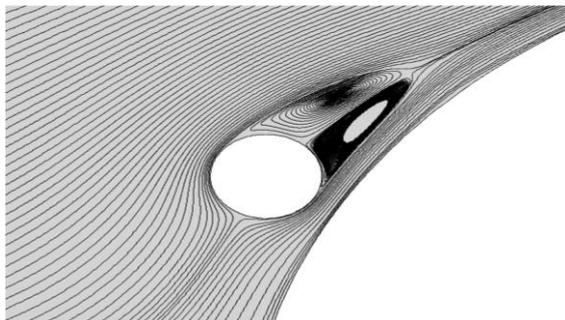
A. Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Silinder *Upstream*

Distribusi koefisien tekanan permukaan untuk silinder *upstream* gambar 4 menunjukkan tren grafik yang hampir sama untuk seluruh variasi jarak L/D . Titik stagnasi pada seluruh variasi pada silinder *upstream* tepat berada pada sudut 0° . Pada gambar 4a menjelaskan setelah titik stagnasi aliran langsung mengalami percepatan yang ditandai dengan menurunnya grafik koefisien tekanan secara signifikan hingga aliran mengalami kecepatan maksimum yang ditandai dengan nilai koefisien tekanan paling rendah. Kecepatan maksimum aliran terjadi pada sudut $\pm 75^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 285^\circ$ untuk *lower side*. Kemudian aliran mengalami perlambatan yang diakibatkan oleh adanya *adverse pressure* yang ditandai dengan meningkatnya nilai koefisien tekanan. Pada satu titik, aliran tidak mampu lagi melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga aliran mengalami separasi pada sudut $\pm 100^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 260^\circ$ untuk *lower side*.

Sedangkan untuk distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° ditunjukkan pada gambar 4b. Setelah titik stagnasi, aliran mengalami percepatan yang tidak terlalu signifikan yang disebabkan oleh aliran mengalami hambatan karena adanya celah antara bodi pengganggu dengan silinder *upstream*. Kemudian di sudut $\pm 20^\circ$ pada *upper side* dan sudut $\pm 340^\circ$ pada *lower side*, aliran mulai mengalami percepatan secara signifikan hingga mencapai kecepatan maksimum di sudut $\pm 35^\circ$ pada *upper side* dan $\pm 325^\circ$ pada *lower side* yaitu 5° setelah celah tersempit antara bodi pengganggu dengan silinder *upstream*. Kemudian



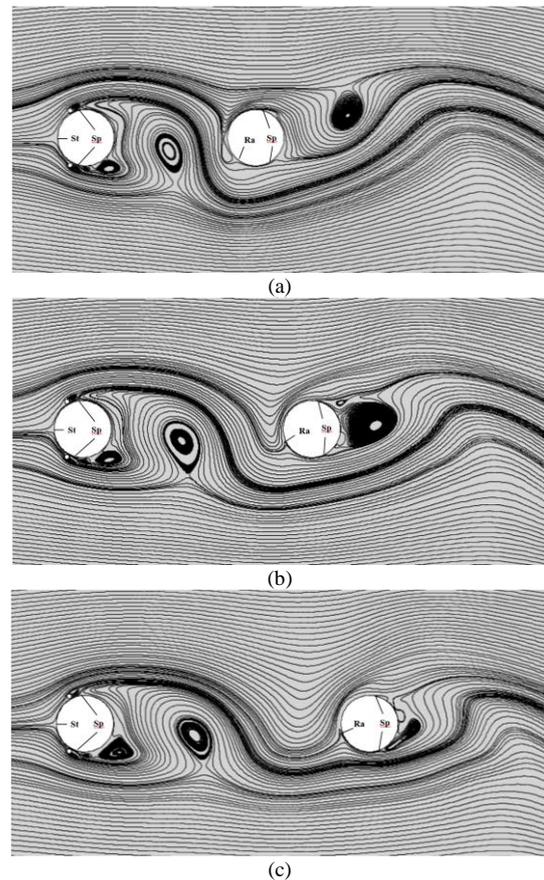
Gambar 7. *Velocity pathline* konfigurasi dengan bodi pengganggu sudut 30°: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.



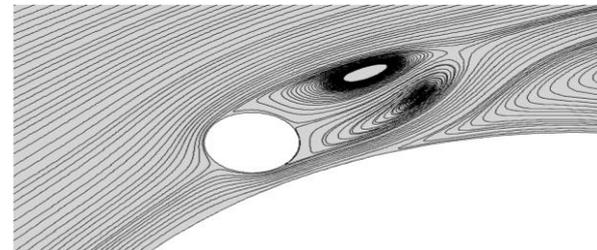
Gambar 8. Detail *velocity pathline* bodi pengganggu sudut 30°.

karena adanya *mixing shear layer* antara bodi pengganggu dengan *freestream* menyebabkan aliran *attach* ke silinder *upstream*, hingga aliran memiliki momentum energi dan adanya pengaruh *wake* dari bodi pengganggu untuk melawan *adverse pressure*. Fenomena ini disebut dengan *re-attachment* yang ditandai dengan adanya puncak pada grafik distribusi koefisien tekanan. Letak puncak pada *upper side* di titik $\pm 50^\circ$ dan pada *lower side* di titik $\pm 310^\circ$. Kemudian aliran mengikuti kontur permukaan silinder *upstream* kembali yang ditandai dengan penurunan tekanan dan mencapai kecepatan maksimum di sudut $\pm 75^\circ$ - $\pm 80^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 280^\circ$ - $\pm 285^\circ$ pada *lower side*. Setelah mengalami kecepatan maksimum, aliran mengalami perlambatan yang ditandai dengan naiknya grafik koefisien tekanan karena harus melawan *adverse pressure* dan gesekan sehingga aliran tidak mampu melawan dan mengalami separasi. Titik separasi aliran terjadi di sudut $\pm 110^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 250^\circ$ pada *lower side*.

Kemudian untuk distribusi koefisien tekanan silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° ditunjukkan pada gambar 4c. Setelah titik stagnasi distribusi koefisien tekanan menurun



Gambar 9. *Velocity pathline* konfigurasi dengan bodi pengganggu sudut 60°: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.



Gambar 10. Detail *velocity pathline* bodi pengganggu sudut 60°.

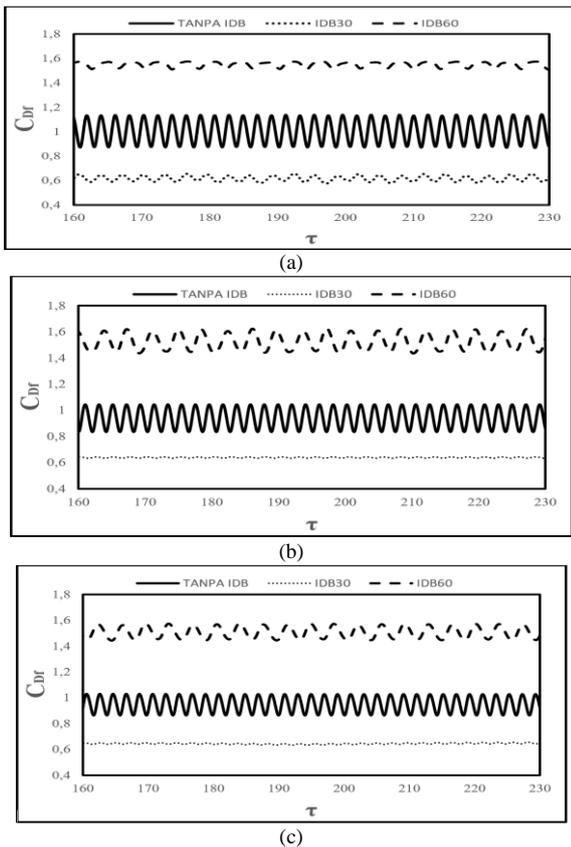
secara perlahan, yang kemudian terbentuk suatu *small adverse pressure gradient* yang dipengaruhi oleh adanya bodi pengganggu yang terjadi pada rentang sudut 40° - 50° pada *upper side* dan rentang sudut 310° - 330° pada *lower side*. Kemudian aliran mengalami percepatan sehingga grafik koefisien tekanan menurun secara signifikan hingga mencapai kecepatan maksimum terjadi di sudut $\pm 63^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 297^\circ$ pada *lower side*. Sesaat setelah mencapai kecepatan maksimum, aliran mengalami perlambatan dan mengalami separasi di sudut $\pm 70^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 290^\circ$ pada *lower side*. Hal ini disebabkan karena momentum aliran *freestream* maupun *wake* dari bodi pengganggu tidak mampu mendorong *shear layer* yang terlepas sehingga tidak dapat kembali *attach* pada kontur silinder *upstream*.

B. Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Silinder Downstream

Distribusi koefisien tekanan untuk silinder *downstream* konfigurasi tanpa bodi pengganggu yang dijelaskan pada gambar 5(a) hampir seluruh nilai koefisien tekanan bernilai negatif. Hal ini menandakan bahwa silinder *downstream*

Tabel 2.
Koefisien drag, koefisien lift, angka Strouhal

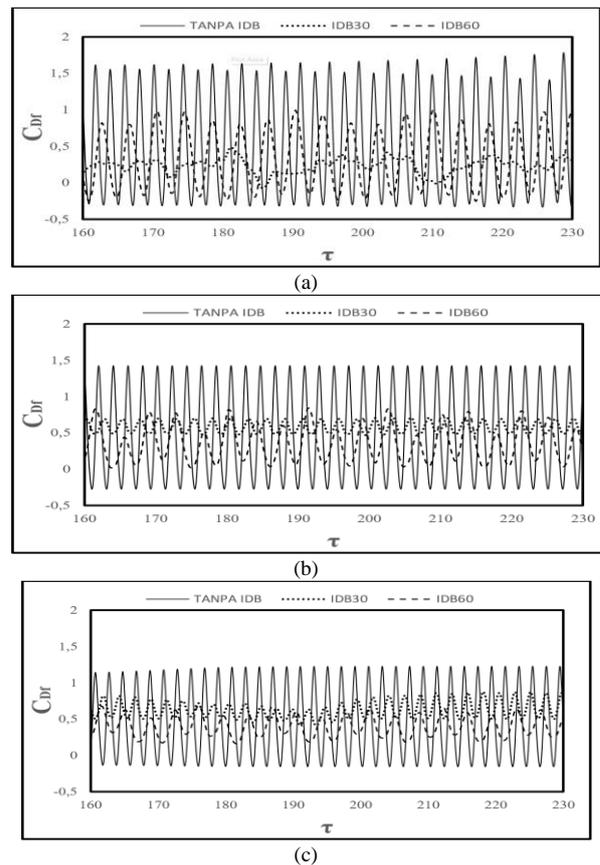
Variasi	L/D	Upstream Cylinder			Downstream Cylinder		
		C_D	C_L	St	C_D	C_L	St
Tanpa IDB	3	1,006	-0,005	0,211	0,536	0,041	0,208
	4	0,941	-0,008	0,224	0,482	-0,003	0,218
	5	0,947	-0,013	0,227	0,459	0,001	0,224
IDB 30	3	0,618	0,001	0,228	0,243	0,027	0,217
	4	0,637	0,0002	0,252	0,585	0,0001	0,257
	5	0,645	0,0001	0,288	0,628	-0,001	0,288
IDB 60	3	1,549	-0,004	0,127	0,337	-0,002	0,126
	4	1,525	-0,002	0,135	0,351	-0,003	0,132
	5	1,506	0,003	0,14	0,397	0,003	0,14



Gambar 11. Grafik fluktuatif koefisien drag (C_{Dr}) pada silinder upstream: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.

masih terlingkupi oleh wake dari silinder upstream, terutama pada jarak antara kedua silinder $L/D = 3$. Untuk tren grafik seluruh variasi jarak hampir menyerupai tren grafik silinder tunggal. Namun untuk variasi jarak $L/D = 3$, titik *re-attachment* belum tepat pada sudut 0° melainkan pada terletak pada sudut $\pm 30^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 330^\circ$ untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi pada sudut $\pm 95^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 265^\circ$ untuk *lower side*. Sedangkan pada variasi jarak $L/D = 4$, titik *re-attachment* terletak pada sudut $\pm 20^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 340^\circ$ untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi pada sudut $\pm 105^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 255^\circ$ untuk *lower side*. Selanjutnya pada variasi jarak $L/D = 5$, titik *re-attachment* terletak di sekitar sudut 0° pada *upper side* dan di sudut 360° pada *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 110^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 250^\circ$ pada *lower side*.

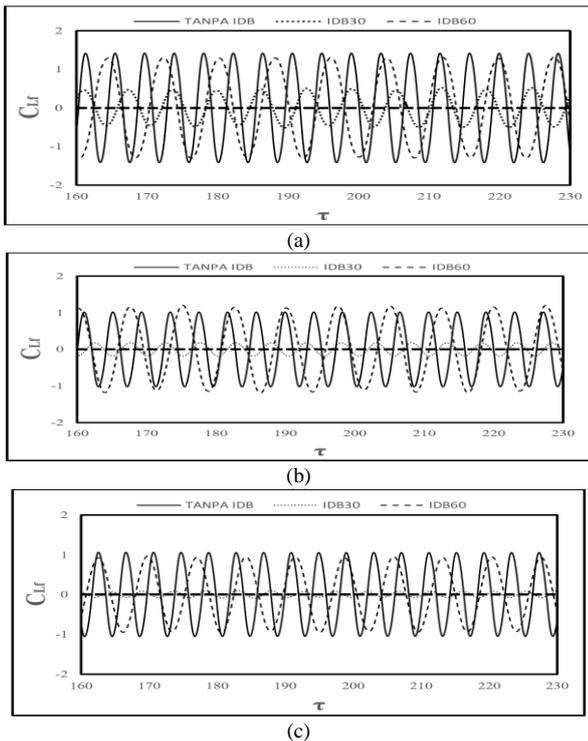
Distribusi koefisien tekanan untuk silinder downstream pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° ditunjukkan oleh gambar 5(b) pada jarak antar silinder $L/D = 3$ bernilai negatif, hal ini



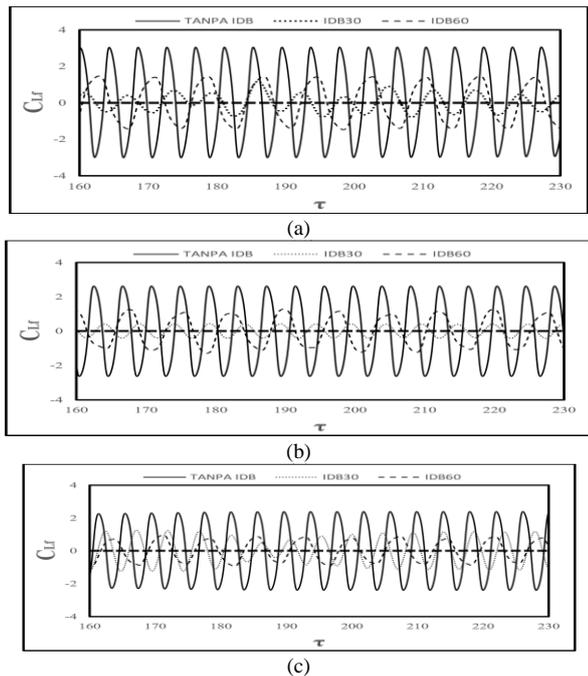
Gambar 12. Grafik fluktuatif koefisien drag (C_{Dr}) pada silinder downstream: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.

menandakan bahwa silinder downstream masih terlingkupi wake dari silinder upstream. Pengaruh wake silinder upstream terhadap silinder downstream mulai berkurang pada jarak antar silinder $L/D = 4$ yang ditandai dengan tren grafik koefisien tekanan mulai menyerupai silinder tunggal. Pada jarak $L/D = 3$, aliran mengalami *re-attachment* terhadap silinder downstream di sudut $\pm 40^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 320^\circ$ pada *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 130^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 230^\circ$ pada *lower side*. Untuk jarak antar silinder $L/D = 4$, aliran mengalami *re-attachment* di sudut $\pm 20^\circ$ untuk *upper side* dan di sudut $\pm 340^\circ$ untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 110^\circ$ untuk *upper side* dan di sudut $\pm 250^\circ$ untuk *lower side*. Sedangkan pada jarak antar silinder $L/D = 5$, aliran mengalami *re-attachment* di sudut 0° untuk *upper side* dan di sudut 360° untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 100^\circ$ untuk *upper side* dan di sudut $\pm 260^\circ$ untuk *lower side*.

Sedangkan untuk distribusi koefisien tekanan yang terjadi pada kontur permukaan silinder downstream yang tersusun tandem dengan konfigurasi bodi pengganggu pada sudut 60° gambar 5(c) menunjukkan tren grafik yang tidak jauh berbeda untuk masing-masing jarak antar kedua silinder. Pada variasi jarak antara kedua silinder $L/D = 3$, titik *re-attachment* aliran terletak di sudut $\pm 50^\circ$ untuk *upper side* dan di sudut $\pm 310^\circ$ untuk *lower side*, kemudian aliran mengalami separasi di sudut $\pm 120^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 240^\circ$ pada *lower side*. Sedangkan pada variasi jarak $L/D = 4$, titik *re-attachment* aliran terletak di sudut $\pm 30^\circ$ untuk *upper side* dan di sudut $\pm 330^\circ$ untuk *lower side*, kemudian aliran mengalami separasi di sudut $\pm 115^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 245^\circ$ pada *lower side*. Kemudian pada variasi jarak $L/D = 5$ aliran mengalami *re-attachment* di sudut $\pm 15^\circ$ pada *upper side* dan



Gambar 13. Grafik fluktuatif koefisien lift (C_{L_f}) pada silinder upstream: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.

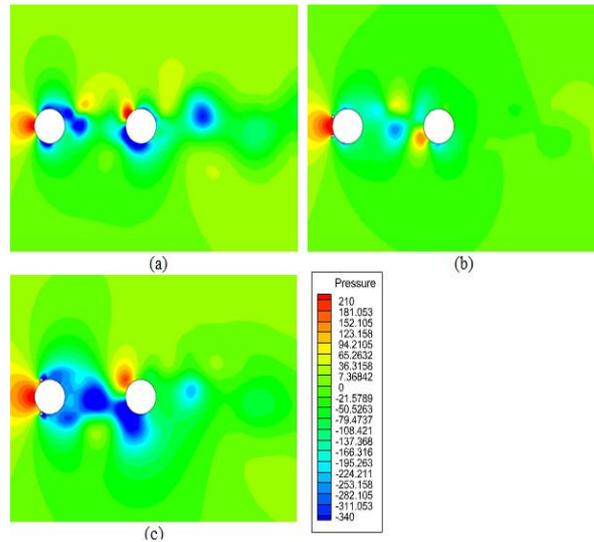


Gambar 14. Grafik fluktuatif koefisien lift (C_{L_f}) pada silinder downstream: (a) $L/D = 3$; (b) $L/D = 4$; (c) $L/D = 5$.

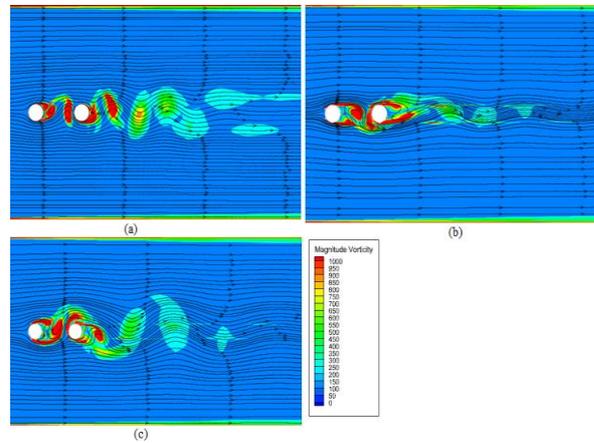
di sudut $\pm 345^\circ$ pada *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 110^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 250^\circ$ pada *lower side*.

C. Velocity Pathline pada Kedua Silinder

Untuk silinder *upstream* tanpa bodi pengganggu sebagaimana yang terlihat pada gambar 6, titik stagnasi (St) terletak tepat pada sudut 0° . Akibat adanya *adverse pressure*, aliran mengalami separasi (Sp) pada sudut 100° untuk *upper side* dan pada sudut 260° untuk *lower side*. Hal ini sesuai dengan grafik distribusi koefisien tekanan pada gambar 6(a) yang menunjukkan aliran terseparasi pada sudut 100° .



Gambar 15. Kontur tekanan statis pada $L/D = 3$: (a) tanpa bodi pengganggu; (b) bodi pengganggu 30° ; (c) bodi pengganggu 60° .



Gambar 16. Kontur *vorticity magnitude* pada $L/D = 3$: (a) tanpa bodi pengganggu; (b) bodi pengganggu 30° ; (c) bodi pengganggu 60° .

Sedangkan untuk *velocity pathline* pada silinder downstream ditunjukkan pada gambar 6(a) dan (b), aliran mengalami *re-attachment* pada sudut $\pm 40^\circ$ dan $\pm 20^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 330^\circ$ untuk *lower side*. Pada jarak antar silinder $L/D = 3$, setelah aliran mengalami *re-attachment* terhadap silinder *downstream* aliran terbagi menjadi dua, yaitu aliran yang menuju ke arah silinder *upstream* kemudian terseparasi yang dinamakan separasi *forward shear layer* dan aliran yang menuju ke arah silinder *downstream* kemudian terseparasi yang dinamakan separasi *backward shear layer*. Namun untuk jarak $L/D = 5$, titik *re-attachment* hampir mendekati sudut 0° , dimana karakteristiknya hampir menyerupai karakteristik pada silinder *upstream*. Hal ini menunjukkan bahwa untuk konfigurasi tandem tanpa IDB pada jarak antar silinder $L/D = 5$, interaksi antara silinder *upstream* dengan silinder *downstream* sudah mulai berkurang.

Velocity pathline pada silinder susunan tandem dengan bodi pengganggu pada sudut 30° ditunjukkan oleh gambar 7 dapat dilihat titik stagnasi (St) pada silinder *upstream* terletak di sudut 0° . Setelah melewati celah antara bodi pengganggu dengan silinder *upstream*, aliran mengalami separasi dan *re-attachment* kembali ke permukaan kontur silinder *upstream*. Kemudian, aliran terseparasi karena adanya *adverse gradient*. Pada gambar 8 menunjukkan detail aliran yang melewati

celah antara bodi pengganggu dengan silinder *upstream*. Setelah melewati celah tersebut, aliran terseparasi. Namun akibat adanya *wake* dari bodi pengganggu, *shear layer* yang terlepas mengalami *re-attachment* ke permukaan silinder *upstream*. Sedangkan pada silinder *downstream*, setelah aliran mengalami *re-attachment*, aliran terbagi menjadi *forward shear layer* yang kemudian terseparasi pada sisi depan silinder, dan *backward shear layer* yang kemudian terseparasi pada sisi belakang silinder *downstream*. Untuk jarak $L/D = 5$, aliran mengalami *re-attachment* di sekitar sudut 0° .

Sedangkan *velocity pathline* pada silinder susunan tandem dengan bodi pengganggu pada sudut 60° ditunjukkan gambar 9 dapat dilihat titik stagnasi (St) pada silinder *upstream* terletak di sudut 0° . Perbedaan terlihat pada gambar 9 dimana titik separasi aliran terjadi lebih cepat dibandingkan variasi lain. Gambar 10 menunjukkan bahwa setelah aliran melewati celah antara bodi pengganggu dengan silinder *upstream*, aliran langsung terseparasi dan tidak mengalami *re-attachment* pada permukaan silinder *upstream*. Fenomena ini terjadi disebabkan oleh *shear layer* yang terseparasi terlalu lebar, sehingga *wake* yang ditimbulkan dari bodi pengganggu tidak mampu mendorong *shear layer* kembali ke permukaan silinder. Sedangkan untuk silinder *downstream*, aliran mengalami titik *re-attachment* yang lebih tertunda dibandingkan dengan variasi jarak yang lain. Hal ini menjelaskan bahwa penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° mengakibatkan *wake* yang disebabkan oleh silinder *upstream* lebih lebar dibandingkan variasi sudut penempatan bodi pengganggu yang lain.

D. Koefisien Drag (C_D) dan Angka Strouhal (St)

Dari tabel 2, pada silinder *upstream* nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan oleh konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dan nilai koefisien *drag* terbesar dihasilkan konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° . Nilai koefisien *drag* silinder *upstream* yang terendah yaitu 0,618 pada $L/D = 3$. Sedangkan, nilai koefisien *drag* silinder *upstream* yang tertinggi yaitu 1,549 pada $L/D = 3$. Sedangkan untuk silinder *downstream* distribusi koefisien *drag* konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° cenderung memiliki nilai lebih rendah daripada konfigurasi yang lain. Distribusi koefisien *drag* konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° memiliki nilai yang lebih tinggi untuk silinder *downstream*. Nilai koefisien *drag* pada silinder *downstream* tertinggi yaitu 0,628 pada konfigurasi penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dengan jarak $L/D = 5$.

Analisa selanjutnya adalah analisa data kuantitatif mengenai grafik fluktuatif koefisien *drag* (C_{Df}) dan fluktuatif koefisien *lift* (C_{Lf}). Grafik C_{Df} dan C_{Lf} didapat dari hasil simulasi numerik, dimana grafik yang diambil dimulai dari $\tau = 160$ sampai dengan 230.

Pada gambar 11 menjelaskan perbandingan nilai C_{Df} pada silinder *upstream* dimana dapat dilihat bahwa penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° cukup efektif dalam mereduksi gaya hambat dibandingkan dengan nilai gaya hambat yang dialami silinder *upstream* tanpa bodi pengganggu dan dengan bodi pengganggu pada sudut 60° . Sedangkan pada gambar 12 menjelaskan bahwa nilai gaya hambat yang dialami pada silinder *downstream* dengan

penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° justru memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu maupun dengan bodi pengganggu pada sudut 30° .

Pada gambar 13 menunjukkan rentang grafik C_{Lf} pada jarak $L/D = 3$ dan 5 cenderung sama, tetapi untuk rentang grafik C_{Lf} pada jarak $L/D = 4$ berbeda, dimana untuk penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° memiliki rentang grafik yang lebih besar dibandingkan dengan variasi yang lain. Sedangkan pada gambar 14 menunjukkan rentang grafik yang hampir sama untuk seluruh variasi, dimana penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° memiliki rentang grafik yang lebih kecil dibandingkan dengan variasi yang lain.

Berdasarkan tabel 2 nilai angka Strouhal terbesar didapatkan dari variasi penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° , sedangkan untuk angka Strouhal terkecil pada variasi penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° . Hasil ini menjelaskan bahwa reduksi gaya *drag* yang semakin besar akan menghasilkan panas yang semakin tinggi. (Alam, dkk, 2003) menyebutkan bahwa frekuensi *vortex shedding* dihitung berdasarkan lebar dari *shear layer* yang bergantung pada titik separasi aliran. Separasi aliran yang tertunda menyebabkan lebar dari *shear layer* separasi berkurang, oleh karena itu nilai dari angka Strouhal bertambah.

E. Kontur Tekanan Statis dan Vorticity Magnitude

Pada gambar 15 menunjukkan bahwa pada variasi penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° mengalami tekanan statis terendah. Hal ini ditandai pada gambar 8(c) daerah pada konfigurasi tersebut didominasi dengan warna biru yang berarti nilai tekanan yang terjadi pada daerah tersebut rendah. Selain itu, perbedaan tekanan yang terjadi pada *upper side* dan *lower side* pada bodi pengganggu 60° menjelaskan bahwa terjadi daerah *wake* yang lebar dibelakang silinder *upstream*. Sedangkan pada gambar 8(a) menunjukkan tekanan statis pada silinder tanpa bodi pengganggu dimana terlihat bahwa luasan kontur tekanan pada *upper side* lebih besar dibandingkan di bagian *lower side*. Hal tersebut mengindikasikan terjadinya daerah *wake* yang lebar di bagian belakang silinder *upstream*. Sedangkan untuk variasi penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° pada gambar 8(b) terlihat bahwa perbedaan warna kontur tekanan statis pada sisi *upper side* dan *lower side* tidak terlalu signifikan, yang berarti perbedaan tekanan statis lebih rendah dibandingkan dengan variasi yang lain.

Sedangkan untuk kontur *vorticity magnitude* gambar 16 menjelaskan bahwa konfigurasi silinder *upstream* tanpa bodi pengganggu memiliki gumpalan *wake* yang lebih besar dibandingkan dengan bodi pengganggu pada sudut 30° . Sedangkan pada silinder *downstream* konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° memiliki gumpalan *wake* yang lebih kecil dibandingkan variasi yang lain. Hal ini disebabkan *wake* dari silinder *upstream* pada konfigurasi dengan bodi pengganggu sudut 60° memiliki *wake* yang besar dan menyelimuti silinder *downstream*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:(1)Penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dapat mereduksi nilai koefisien

drag maksimum 38,5% pada jarak antar silinder $L/D = 3$. Sedangkan pada penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° menambahkan nilai koefisien *drag* maksimum 62,1% pada jarak antar silinder $L/D = 4$;(2)Nilai koefisien *drag* silinder *upstream* pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu pada sudut 60° lebih tinggi 53,9%-62,1% dari konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu. Sedangkan pada konfigurasi tandem dengan bodi pengganggu pada sudut 30° dapat mereduksi koefisien *drag* sebesar 31,8%-38,5% dari konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu;(3)Nilai koefisien *drag* silinder *downstream* pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° dapat tereduksi hingga 37,1% dari konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu. Sedangkan pada konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° koefisien drag 36,8% lebih besar dari konfigurasi tandem tanpa bodi pengganggu;(4)Angka Strouhal terbesar didapat oleh konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° , sedangkan Angka Strouhal terkecil didapat oleh konfigurasi tandem dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 60° ;(5)Dari *velocity pathline* menjelaskan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu pada sudut 30° dapat menunda titik separasi aliran pada silinder *upstream* dibandingkan dengan silinder *upstream* tanpa bodi pengganggu. Sedangkan pada *vorticity magnitude* menunjukkan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu

pada sudut 30° *wake* yang terbentuk pada silinder *upstream* lebih kecil dibandingkan dengan tanpa bodi pengganggu.

Adapun saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu;(1)Perlu diperhatikan geometri dan kualitas *meshing* yang digunakan agar mendapatkan hasil karakteristik aliran yang lebih baik;(2)Pada tahap *processing*, perlu diperhatikan dalam memberikan kondisi batas, kondisi awal, serta properti fluida sehingga data hasil *post-processing* yang didapatkan bisa lebih akurat;(3)*Meshing* didaerah antara kedua silinder harus lebih dirapatkan untuk hasil karakteristik aliran yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Robert W Fox, Philip J Pritchard, and Alan T McDonald, *Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. ; Chichester : John Wiley, 2011.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.