

Studi Numerik Aliran Melintas *Airfoil* Simetris dan Silinder Sirkular yang Tersusun Tandem

Teuku Muhammad Burhanissulthan Pribadi dan Wawan Aries Widodo
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: wawanaries@me.its.ac.id

Abstrak—Selama beberapa dekade terakhir, studi tentang aliran *incompressible* yang melewati benda tegar berbentuk silinder sirkular, yang termasuk dalam kategori aliran eksternal, telah difokuskan oleh para peneliti. *Adverse Pressure Gradient* (APG), yang merupakan karakteristik dari silinder sirkular, telah menjadi fokus utama penelitian ini, di mana terjadinya transisi lapis batas laminar menjadi turbulen pada aliran fluida dapat dipercepat oleh gradien tekanan ini. Aliran fluida di sekitar benda padat yang mengalir melalui fluida, yang dikenal sebagai aliran eksternal *viscous*, menjadi objek penting dalam studi mekanika fluida karena terbentuknya gaya hambat yang signifikan akibat separasi aliran yang terjadi lebih awal pada fluida yang melintasi silinder. Semakin cepat terjadinya separasi aliran, semakin besar pula *wake* yang terbentuk sehingga *drag force* semakin meningkat. Untuk mengurangi *drag force*, upaya dilakukan untuk memanipulasi medan aliran secara pasif. Metode pengendalian aliran pasif yang diterapkan dalam penelitian ini adalah dengan menempatkan benda pengganggu pada bagian upstream dari *bluff body*. Simulasi numerik dilakukan dalam penelitian ini dengan menggunakan metode aliran pasif, di mana satu buah bodi pengganggu berbentuk *airfoil* dengan variasi NACA0012, 0018, dan 0024, serta variasi angle of attack $\alpha = 5^\circ, 0^\circ$, dan -5° ditempatkan di depan satu buah silinder sirkular. Jarak antara trailing edge *airfoil* dan diameter cylinder circular disusun dengan perbandingan jarak longitudinal (S/D) = 1. Penelitian secara numerik menggunakan solver dua dimensi (2D) unsteady flow dengan turbulence *viscous* model $k-\omega$ Shear Stress Transport. Hasil yang diperoleh menunjukkan adanya reduksi gaya hambat yang terjadi dengan penambahan bodi pengganggu *airfoil* NACA0024. Pada $\alpha = 0^\circ$ reduksi gaya hambat yang terjadi sebesar sebesar 30,17%, sedangkan pada $\alpha = -5^\circ$ reduksi gaya hambat yang terjadi sebesar 31,77%.

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

I. PENDAHULUAN

MEKANIKA fluida merupakan ilmu yang mempelajari perilaku fluida, dalam keadaan diam maupun bergerak, termasuk cairan maupun gas. Salah satu aspek yang dipelajari dalam mekanika fluida adalah aliran eksternal. Beberapa dekade terakhir, para peneliti telah fokus pada studi tentang aliran *incompressible* yang melewati benda tegar berbentuk silinder sirkular, yang juga termasuk dalam kategori aliran eksternal. Silinder sirkular memiliki karakteristik *Adverse Pressure Gradient* (APG) yang kuat karena tekanan aliran pada permukaan bodi menyebabkan *pressure drag* yang besar pada kelengkungan kontur permukaannya. *Gradient* tekanan yang besar pada permukaan ini dapat mempercepat transisi lapis batas laminar menjadi turbulen pada aliran fluida.

Aliran eksternal *viscous* merujuk pada aliran fluida di sekitar benda padat yang mengalir melalui fluida. Aliran *viscous* ini pada saat melintasi silinder sirkular akan mengalami beberapa fenomena, seperti stagnasi, lapisan batas, separasi, dan *wake* di belakang silinder. Studi tentang aliran fluida pada silinder sirkular tetap menjadi penting

dalam mekanika fluida karena adanya *drag force* (gaya hambat) yang besar yang diakibatkan oleh terbentuknya separasi aliran lebih awal pada fluida yang melintasi silinder. Separasi aliran ini mengakibatkan terbentuknya *wake* di belakang silinder yang berdampak pada peningkatan *drag force*. Semakin cepat terjadinya separasi aliran, semakin besar pula *wake* yang terbentuk sehingga *drag force* semakin meningkat.

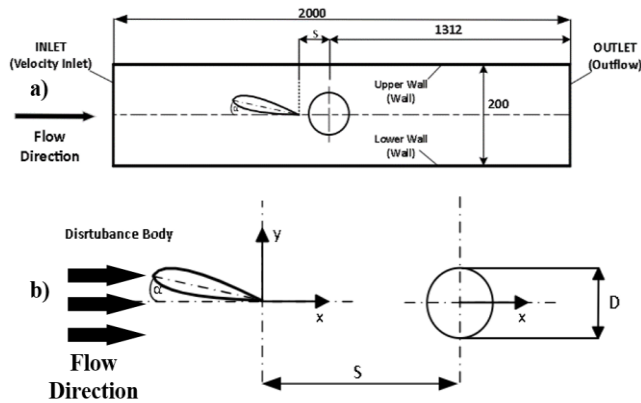
Untuk mengurangi *drag force*, dapat dilakukan upaya untuk memanipulasi medan aliran dengan cara pengendalian aliran secara pasif. Salah satu metode pengendalian aliran pasif adalah dengan memanjangkan bagian *downstream* dari *bluff body*, memberikan kekasaran pada permukaan *bluff body*, atau menempatkan benda pengganggu pada bagian *upstream* dari *bluff body*.

C.Y. Zhou, et.al. (2004) telah melakukan penelitian Sebuah silinder sirkular di dekat *wake airfoil* NACA 4412 dalam *cross flow*, secara numerik dengan menggunakan metode *finite volume* untuk Bilangan Reynolds $Re = 200$ berdasarkan diameter silinder. Efek dari sudut serang *airfoil*, jarak longitudinal dan lateral antara *airfoil* dan silinder terhadap pembebanan *unsteady*, frekuensi pelepasan *vortex* dan pola *vortex* dari silinder diperiksa [1].

M. Sarioglu (2017) melakukan penelitian pada bilangan Reynolds 1,5 dengan panjang *chord airfoil* C dan silinder sirkular berdiameter $D = 25$ mm sebagai *bluff body*, ditempatkan pada sumbu yang sama pada arah aliran di bagian belakang *airfoil*. Sudut serang *airfoil* α divariasikan dari 0° sampai 150° , dengan celah tak berdimensi S/D sebagai variasi jarak longitudinal antara *airfoil* dan silinder dari 0 sampai 4,3. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efek sudut serang *airfoil* dan jarak longitudinal antara *airfoil* dan silinder. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *airfoil* dan silinder saling terpengaruh dan variasi struktur aliran berdasarkan sudut serang *airfoil* dan jarak longitudinal antara *airfoil* dan silinder terungkap melalui visualisasi aliran [2].

Telah dilakukan penelitian S. J. Lee, et.al. (2004) dimana visualisasi pola *wake* yang terbentuk pada silinder sirkular yang telah ditambahkan bodi pengganggu dengan metode eksperimental yang menggunakan variasi bilangan Reynolds yaitu 2×10^4 . Rasio diameter ($d/D=0,133-0,267$) dengan variasi jarak antara bodi pengganggu dengan silinder sirkular utama S/D , yaitu 2 mm, 2.08 mm, dan 3 mm. Didapat hasil yang mana mode *wake impingement* lebih baik dalam mengurangi gaya hambat daripada mode *cavity* [3].

Dedy Z. Sinaga (2005) telah melakukan penelitian secara eksperimental yang bertujuan untuk mengevaluasi efek dari penambahan *inlet disturbance body* pada karakteristik aliran di sekitar silinder utama [4]. Hal ini dilakukan dengan melihat perubahan *pressure coefficient* (C_p) pada silinder dan *inlet disturbance body*. Menggunakan bilangan Reynold sebesar $1,3 \times 10^5$ serta kecepatan udara *freestream* sebesar 20,87 m/s.



Gambar 2. Domain simulasi numerik a) Skema keseluruhan, b) Detail penempatan silinder sirkular dan *airfoil* secara tandem.

Bodi utama yang digunakan adalah silinder sirkular dengan diameter 100 mm dan panjang 500 mm. Sedangkan untuk *inlet disturbance body*, digunakan tiga jenis yaitu *ellips*, *airfoil* simetris dan *airfoil* asimetris dengan ketebalan maksimum dan panjang *chord* yang sama, yaitu 30 mm dan 120 mm. Jarak antara *inlet disturbance body* dan silinder sirkular (S/D) divariasikan dengan tiga variasi yaitu $S/D = 0,5$; $1,0$; $1,5$. Hasil penelitian yang berupa grafik C_p sebagai fungsi sudut kontur dari silinder pada Re yang tetap dengan variasi jarak (s/d) dan variasi gradien tekanan *airfoil* simetris (t/c), membuktikan bahwa penggunaan *ellips*, *airfoil* simetris dan *airfoil* asimetris sebagai *inlet disturbance* efektif mempengaruhi perkembangan *boundary layer* pada permukaan silinder di belakangnya.

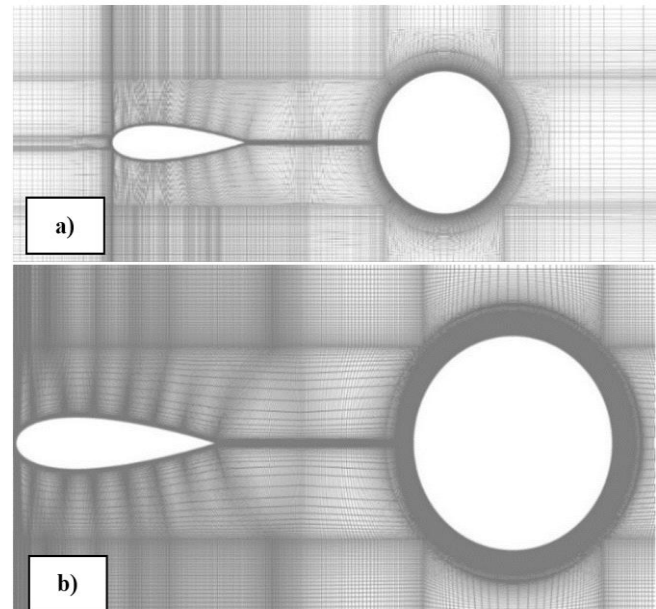
II. URAIAN PENELITIAN

A. Penyelesaian Numerik

Penyelesaian numerik dilakukan dengan tiga tahap, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*. Tahap *pre-processing* terdiri dari pembuatan geometri 2-dimensi dan pemodelan simulasi dengan *software* SolidWorks 2021, lalu *meshing* dan penentuan kondisi batas pada *software* Gambit 2.4.6. Pertama, yaitu pembuatan geometri 2-dimensi yang dilakukan di *software* SolidWorks 2021 dengan dimensi *wind tunnel* 2000×200 mm, lalu menyusun satu bodi utama berbentuk silinder sirkular berdiameter 36 mm dan satu bodi pengganggu berbentuk *airfoil* dengan *chord* 36 mm, di mana *angle of attack* *airfoil* divariasikan 0° dan jarak antar *airfoil* dengan silinder sirkular $S/D = 1$ dengan skema seperti pada Gambar 1. Dengan keterangan Gambar 1, Diameter Silinder Sirkular (D) = 36 mm, Chord Disturbance Body (c) = 36 mm, Jarak (S) = 36 mm.

Langkah kedua yaitu melakukan *meshing* yang dilakukan di *software* Gambit 2.4.6. *Meshing* merupakan proses pembagian model solid menjadi elemen-elemen kecil yang berfungsi untuk mempermudah perhitungan dan iterasi sebuah simulasi. Untuk melakukan *meshing* dari suatu model harus didefinisikan kondisi batasnya agar proses iterasi dapat berjalan lancar sesuai apa yang diinginkan. Pembuatan *meshing* dijelaskan pada Gambar 2 *Meshing* yang digunakan memiliki jumlah *nodes* 203801 dengan penentuan menggunakan *Grid Independency Test* (GIT).

Kemudian, langkah berikutnya adalah tahap *processing* yang terdiri dari *scale and check*, pemilihan *solver*, *input model*, penentuan material, *input boundary conditions*, *input*



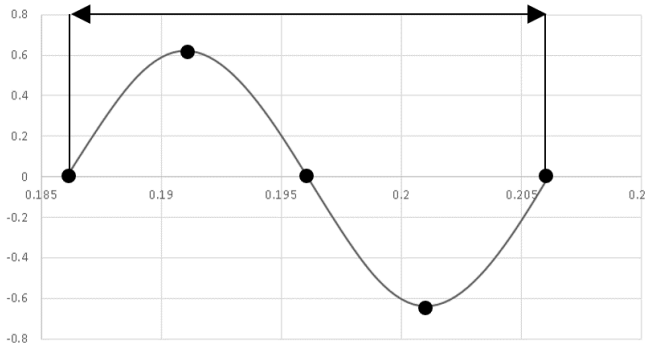
Gambar 1. *Computational meshing* a) Overall meshing system, b) Detil meshing antara *airfoil* dan silinder sirkular.

solution methods, *initialization*, dan *calculation*. *Energy* pada keadaan *off* karena pada penelitian ini tidak menganalisis perpindahan panas yang terjadi. Untuk model *viscous* yang digunakan pada simulasi adalah $k-\omega$ *Shear stress transport* (SST), karena $k-\omega$ SST merupakan gabungan yang akurat dari perumusan model $k-\omega$ *Standard* pada dekat dari dinding dengan $k-\epsilon$ *Standard* yang jauh dari dinding. Model $k-\omega$ SST juga lebih andal untuk kelas aliran yang lebih luas daripada $k-\omega$ *Standard*, termasuk aliran *adverse pressure gradient*.

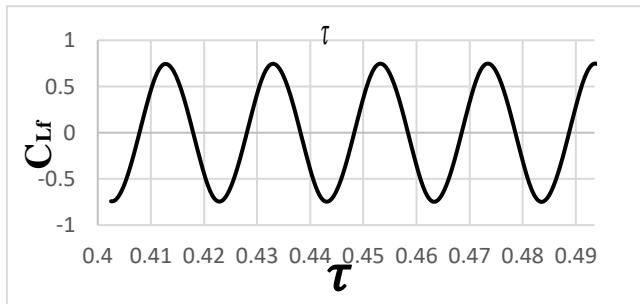
Material yang digunakan memiliki temperatur 300 K, densitas $1,225 \text{ kg m}^{-3}$, dan viskositas sebesar $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ N s m}^{-2}$. Parameter yang dimasukkan adalah kecepatan inlet yaitu *velocity magnitude* sebesar 8,717 m/s. *Turbulent Intensity* sebesar 0.5 %. Untuk *turbulent Length Scale* sebesar $0,07D$ (D = diameter silinder sirkular) 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*. Inisialisasi dilakukan dengan metode *hybrid Intilializaiton*. Sebelum melakukan iterasi, karena analisis numerik pada *Transient* maka *Time Step Size* yang di terapkan untuk aliran yang melitasi silinder sirkular yaitu sebesar 0.001.

Pada tahap *post-processing* data yang diambil berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa koefisien tekanan (C_p), fluktuatif nilai koefisien *drag* (C_{Df}), fluktuatif nilai koefisien *lift* (C_{Lf}), *Strouhal Number* (St), *Shape Factor* (H), grafik C_{Lf} dapat dilihat pada Gambar 3. Sedangkan untuk data kualitatif berupa kontur tekanan statis, kontur kecepatan yang dipadu dengan *streamline*, dan kontur *vorticity magnitude*.

Koefisien tekanan dan profil kecepatan dapat diperoleh menggunakan metode *instantaneous time*, yakni pengambilan nilai rata-rata yang dilakukan dengan penghentian iterasi pada lima titik. Untuk menghitung rata-rata koefisien tekanan, Penghitungan rata-rata koefisien tekanan dapat menggunakan rumus sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik C_{L_f} pengambilan nilai rata-rata dalam satu periode.



Gambar 5. Grafik C_{L_f} silinder sirkular tanpa bodi pengganggu.

Kemudian untuk memperoleh *Strouhal number* dapat menggunakan grafik fluktuatif koefisien *lift*. Perhitungan dari *Strouhal number* menggunakan persamaan berikut.

$$C_p = \frac{C_{p1} + C_{p2} + C_{p3} + C_{p4} + C_{p5}}{5} \quad (1)$$

$$Periode = \frac{T_n - T_1}{Shedding\ cycle} \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{Periode} \quad (3)$$

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (4)$$

Dari grafik C_{L_f} pada Gambar 4, didapat perhitungan sebagai berikut:

$$Periode = \frac{(0,495 - 0,4025)}{4,5} = 0,0205\ s/siklus \quad (5)$$

$$f = \frac{1}{0,0205} = 48,78\ Hz \quad (6)$$

$$St = \frac{48,78\ Hz \cdot 0,036\ m}{8,717\ m/s} = 0,201 \quad (7)$$

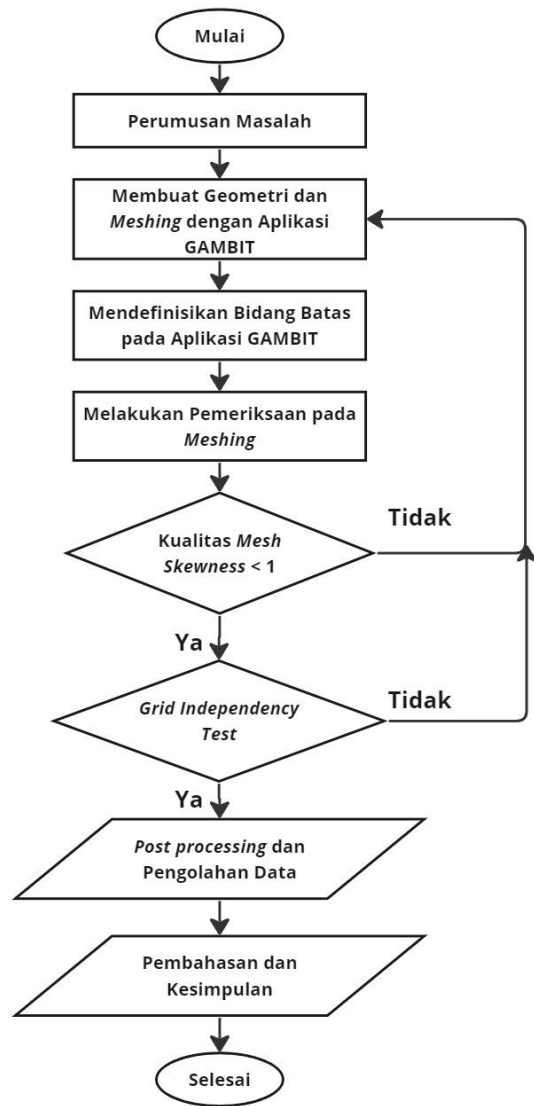
B. Diagram Alir Penelitian

Skema penelitian dijelaskan dalam bentuk diagram alir yang diberikan pada Gambar 5.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Silinder Utama pada Variasi Tanpa Bodi Pengganggu dan dengan Bodi Pengganggu Airfoil pada Sudut $\alpha=0^\circ$

Pembahasan dilakukan dengan mengelompokkan dan membandingkan grafik distribusi koefisien tekanan pada silinder utama dengan variasi konfigurasi tanpa bodi pengganggu dan dengan variasi *airfoil* NACA0012, NACA0018, dan NACA 0024 pada sudut $\alpha = 0^\circ$. Data koefisien tekanan sesaat pada setiap titik dalam satu

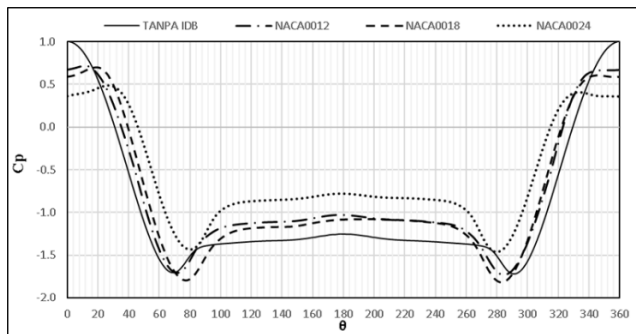


Gambar 3. Diagram alir penelitian.

gelombang koefisien *lift* sesaat fungsi waktu (jumlah titik sebanyak 5 titik) yang kemudian diolah menjadi koefisien rata-rata.

Distribusi nilai tekanan pada permukaan silinder utama dalam konfigurasi tanpa bodi pengganggu yang ditampilkan dalam Gambar 6. menunjukkan bahwa titik stagnasi, yang ditandai dengan $C_p = 1$, terjadi pada sudut 0° . Setelah titik stagnasi, distribusi nilai tekanan menurun secara signifikan, menandakan bahwa aliran mengalami percepatan hingga mencapai kecepatan maksimum yang ditunjukkan oleh nilai koefisien tekanan yang paling rendah. Aliran mencapai kecepatan maksimum sekitar $\pm 65^\circ$ di *upper side* silinder utama, dan pada sudut $\pm 290^\circ$ di *lower side* silinder utama. Setelah itu, aliran mengalami perlambatan akibat adanya tekanan *adverse pressure*, yang ditunjukkan oleh peningkatan grafik nilai koefisien tekanan. Pada satu titik, aliran tidak dapat melawan *adverse pressure* dan gesekan, sehingga mengalami separasi pada titik sekitar $\pm 85^\circ$ di *upper side* dan $\pm 270^\circ$ di *lower side*. Terdapat perbedaan dalam grafik distribusi nilai koefisien tekanan antara variasi NACA, dengan NACA0024 memiliki nilai *base pressure* tertinggi dan NACA0018 memiliki nilai terendah.

Sedangkan untuk silinder utama dengan adanya bodi pengganggu *airfoil* yang dijelaskan pada Gambar 6, hampir



Gambar 6. Grafik distribusi koefisien tekanan rata-rata silinder dengan bodi pengganggu *airfoil* pada sudut $\alpha = 0^\circ$.

Tabel 1.

Titik *reattachment* dan separasi pada silinder utama dengan adanya bodi pengganggu *airfoil*

Airfoil	Upper side		Lower Side	
	Re-attach	Separasi	Re-attach	Separasi
NACA 0012	$\pm 15^\circ$	$\pm 105^\circ$	$\pm 345^\circ$	$\pm 260^\circ$
NACA 0018	$\pm 20^\circ$	$\pm 110^\circ$	$\pm 340^\circ$	$\pm 255^\circ$
NACA 0024	$\pm 30^\circ$	$\pm 105^\circ$	$\pm 335^\circ$	$\pm 250^\circ$

Tabel 2.

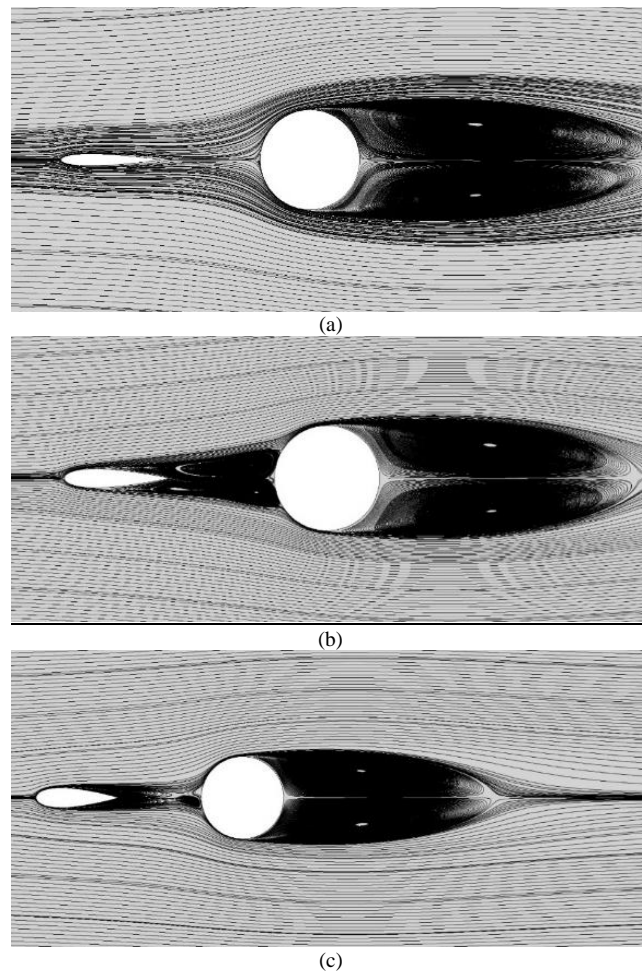
Perbandingan rata-rata koefisien *lift*, koefisien *drag*, dan angka *strouhal*

NO.	Variasi (α)	NACA	Silinder utama		
			C_L	C_D	St
1.	Tanpa IDB	-	0	1,23	0,204
		0012	0	1,04	0,240
2.	0°	0018	0	1,14	0,250
		0024	0	0,86	0,249

seluruh nilai koefisien tekanan bernilai negatif. Hal ini menandakan bahwa silinder utama masih dilingkupi oleh *wake* dari bodi pengganggu *airfoil* terutama pada NACA0018. Tren grafik seluruh variasi bodi pengganggu *airfoil* hampir menyerupai tren grafik silinder tunggal. Namun, pada variasi bodi pengganggu NACA0018, titik *reattachment* belum tepat pada sudut 0° , melainkan terletak pada sudut $\pm 20^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 340^\circ$ untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi pada sudut $\pm 110^\circ$ *upper side* dan pada sudut $\pm 255^\circ$ untuk *lower side*. Sedangkan, pada variasi bodi pengganggu NACA0012, titik *reattachment* terletak pada sudut $\pm 15^\circ$ untuk *upper side* dan pada $\pm 345^\circ$ untuk *lower side* dan aliran mengalami separasi pada sudut $\pm 105^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 260^\circ$ untuk *lower side*. Selanjutnya, pada variasi bodi pengganggu NACA 0024, titik *reattachment* terletak di sekitar sudut $\pm 30^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 335^\circ$ pada *lower side* dan aliran mengalami separasi di sudut $\pm 105^\circ$ pada *upper side* dan di sudut $\pm 260^\circ$ pada *lower side*. Perbandingan titik *reattachment* dan separasi pada silinder utama seluruh variasi bodi pengganggu *airfoil* dapat dilihat pada Tabel 1.

Berikutnya, data yang ditampilkan merupakan data kualitatif visualisasi aliran yang diperoleh dari simulasi berupa *velocity pathline* pada bodi pengganggu *airfoil* dan silinder utama tersusun tandem yang dijelaskan pada Gambar 7 (a); (b); (c), titik stagnasi (St) terletak pada *leading edge*. Akibat adanya *adverse pressure*, aliran mengalami separasi (Sp) setelah *maximum thickness* pada *lower dan upper side*.

Sedangkan, untuk *velocity pathline* pada silinder utama ditunjukkan pada Gambar 7 (a), (b), dan (c), aliran mengalami *reattachment* pada sudut $\pm 15^\circ$, $\pm 20^\circ$, dan $\pm 30^\circ$ untuk *upper side* dan pada sudut $\pm 345^\circ$, $\pm 340^\circ$, dan



Gambar 7. *Velocity pathline* konfigurasi tandem dengan $\alpha = 0^\circ$ dan bodi pengganggu *airfoil* pada; (a) NACA0012; (b) NACA0018; (c) NACA0024.

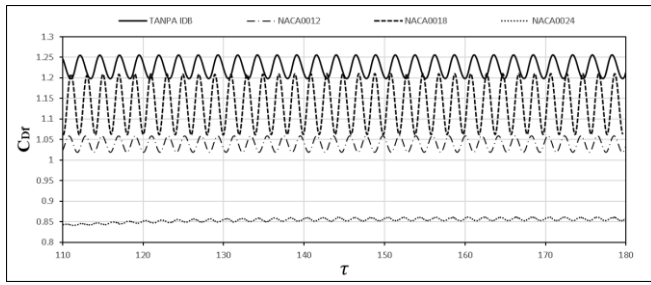
$\pm 335^\circ$ untuk *lower side*. Setelah terjadi *reattachment* pada aliran, aliran tersebut membagi menjadi dua di bodi pengganggu *airfoil*. Aliran pertama mengalir ke arah silinder utama dan terpisah, disebut sebagai separasi *forward shear layer*. Sementara itu, aliran kedua mengalir ke arah bodi pengganggu *airfoil* dan terpisah, disebut sebagai separasi *backward shear layer*.

B. Koefisien Drag (C_D) pada Silinder Utama

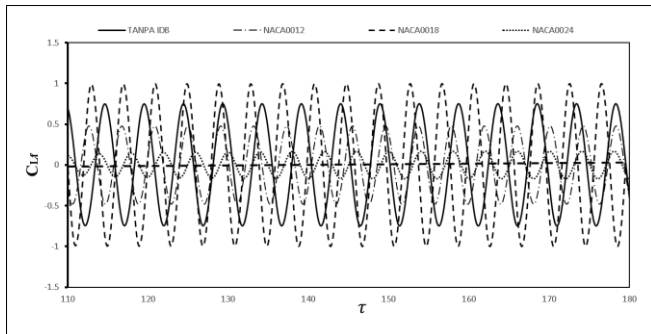
Data kuantitatif selanjutnya yang diteliti pada penelitian ini adalah menghitung koefisien *drag* yang dihasilkan dari silinder utama. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan bodi pengganggu *airfoil* terhadap nilai koefisien *drag* dengan tanpa bodi pengganggu. Nilai koefisien *drag* (C_D) dengan variasi NACA0012, 0018, dan 0024, serta variasi *angle of attack* $\alpha = 0^\circ$ dengan bilangan Reynolds $Re = 2,1 \times 10^4$ ditunjukkan pada Tabel 2.

Dari Tabel 2, pada silinder utama nilai koefisien *drag* terkecil dihasilkan oleh konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu *airfoil* NACA0024 dan nilai koefisien *drag* terbesar dihasilkan konfigurasi dengan penambahan bodi pengganggu *airfoil* NACA0018. Nilai koefisien *drag* silinder utama yang terendah yaitu 0,86. Sedangkan nilai koefisien *drag* silinder utama yang tertinggi yaitu 1,23.

Perbandingan grafik fluktuatif koefisien *drag* (C_{Df}) pada silinder utama dengan variasi *angle of attack* pada bodi pengganggu *airfoil* ditunjukkan pada Gambar 8. menjelaskan perbandingan nilai C_{Df} pada silinder utama, yaitu penambahan bodi pengganggu *airfoil* pada *angle of attack* $\alpha =$



Gambar 8. Grafik fluktuatif koefisien drag (C_{Df}) pada silinder utama dengan kofigurasi $\alpha = 0^\circ$.



Gambar 9. Grafik fluktuatif koefisien drag (C_{Lf}) pada silinder utama dengan kofigurasi $\alpha = 0^\circ$.

Tabel 3.
Grafik perbandingan nilai koefisien drag penelitian terbaru dengan penelitian Sarioglu (2017)

Variasi NACCA0012 (α)	C_D Terbaru Silinder Utama	C_D (Sarioglu, 2017) Silinder Utama
0°	1,039	1,001

0° sangat efektif dalam mereduksi gaya hambat dibandingkan dengan nilai gaya hambat yang dimiliki silinder utama tanpa bodi pengganggu.

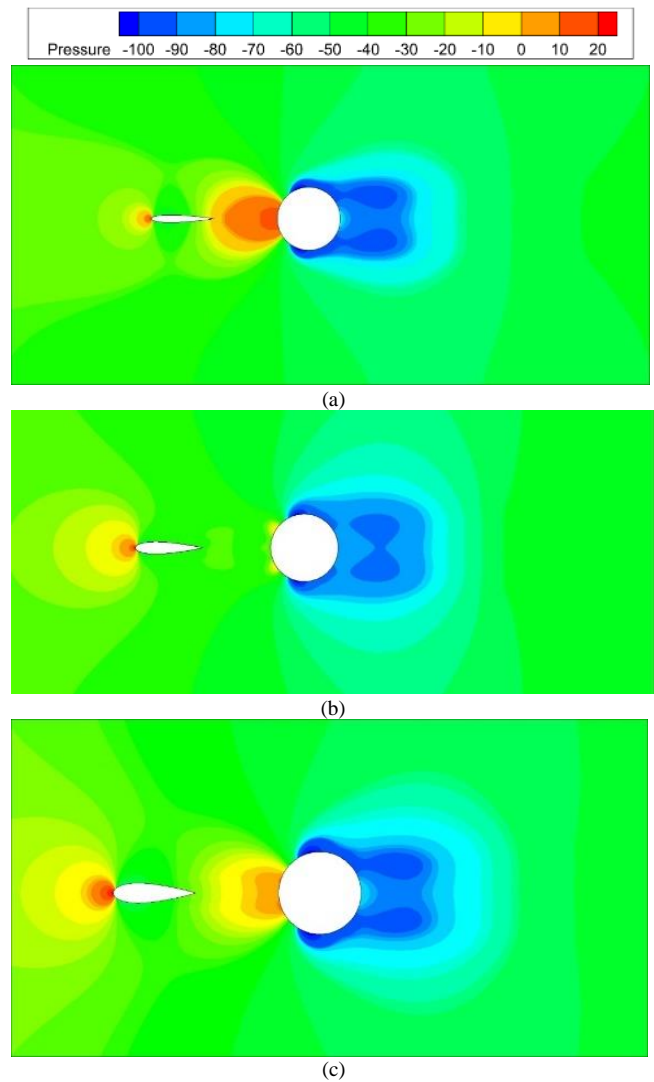
Perbandingan grafik fluktuatif koefesien lift (C_{Lf}) pada silinder utama dengan variasi *angle of attack* pada bodi pengganggu *airfoil* ditunjukkan pada Gambar 9. Gambar tersebut menunjukkan penambahan bodi pengganggu *airfoil* pada *angle of attack* $\alpha = 0^\circ$ memiliki rentang grafik lebih besar dibandingkan dengan silinder utama tanpa bodi pengganggu.

C. Analisis Srouhal Number pada Silinder Utama

Berdasarkan Tabel 2, nilai angka Strouhal meningkat dan relatif lebih tinggi dibandingkan silinder utama tanpa bodi pengganggu. Nilai tertinggi didapatkan pada variasi bodi pengganggu. Hasil ini menjelaskan bahwa reduksi gaya drag yang semakin besar akan menghasilkan panas yang semakin tinggi. (Alam, et al., 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.

D. Analisis Kontur Tekanan Statis Aliran Melintas Airfoil Simetris dan Silinder Sirkular

Gambar 10 menunjukkan bahwa variasi penambahan bodi pengganggu *airfoil* dengan $\alpha = 0^\circ$ mengalami tekanan statis rendah ditandai dengan daerah pada konfigurasi tersebut yang didominasi dengan warna biru, artinya nilai tekanan yang terjadi pada daerah tersebut rendah. Selain itu, perbedaan tekanan yang terjadi antara *trailing edge* pada *airfoil* dan



Gambar 10. Kontur tekanan statis instantaneous pada silinder utama dan dengan $\alpha = 0^\circ$ pada bodi pengganggu *airfoil* pada; (a) NACA0012; (b) NACA0018; (c) NACA0024.

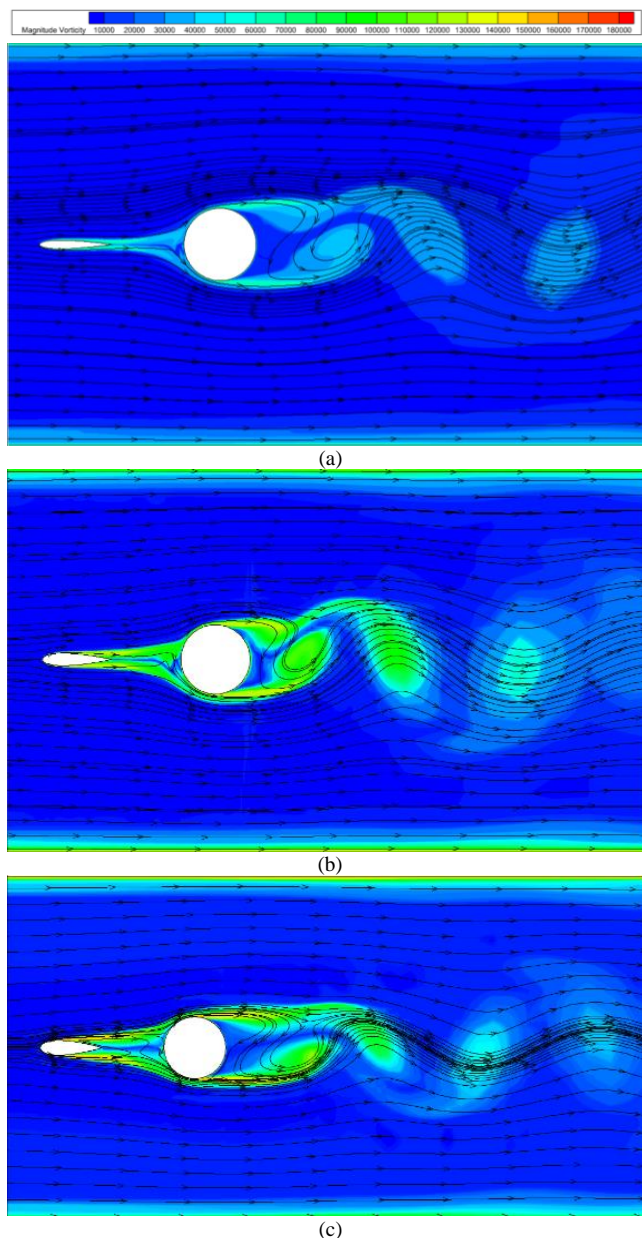
silinder utama menjelaskan bahwa terjadi daerah *wake* yang sempit setelah aliran melewati *trailing edge*, dan kontur tekanan statis pada sisi *upper side* dan *lower side* tidak teralu signifikan.

E. Analisis Kontur Vorticity Magnitude Aliran Melintasi Airfoil Simetris dan Silinder Sirkular

Dalam *unsteady flow*, terjadi pembentukan pelepasan *vortex* pada setiap *time step* yang berbeda. Keadaan aliran yang tidak stabil ini dapat menghasilkan fenomena pelepasan *vortex*. Pelepasan *vortex* terjadi ketika terjadi interaksi antara dua lapisan aliran yang bergeser pada *upper side* dan *lower side* silinder. Proses awal terbentuknya *vortex* terjadi ketika pasangan *vortex* yang terbentuk menjadi tidak stabil karena adanya gangguan kecil. Gambar 11 menggambarkan bahwa konfigurasi utama silinder dengan tambahan pengganggu berbentuk *airfoil* dengan sudut $\alpha = 0^\circ$ memiliki *wake* yang besar ditandai dengan gradasi hijau ke merah.

F. Diskusi

Pada subbab ini akan dilakukan diskusi dengan membandingkan hasil simulasi numerik dengan penelitian eksperimen yang dilakukan oleh Sarioglu (2017) untuk membandingkan nilai koefisien drag silinder utama dengan adanya bodi pengganggu *airfoil*. Penelitian eksperimen ini



Gambar 11. Kontur *vorticity magnitude instantaneous* pada silinder utama dengan $\alpha=0^\circ$ pada bodi pengganggu *airfoil* pada; (a) NACA0012; (b) NACA0018; (c) NACA0024.

dilakukan pada bilangan Reynolds, $Re = 1,5 \times 10^5$ pada $D = 25$ mm pada silinder sirkular dan bodi pengganggu *airfoil* NACA0012 dengan *angle of attack* $\alpha = 0^\circ$, serta jarak antara *trailing edge* dan silinder utama $S/D = 1$. Tabel 3 menunjukkan perbandingan nilai koefisien *drag* pada silinder utama yang sangat mirip antara hasil numerik dan eksperimen

yang dilakukan Sarioglu (2017). Kedua penelitian juga membuktikan bahwa penambahan bodi pengganggu *airfoil* dapat mereduksi nilai koefisien *drag* [2].

IV. KESIMPULAN

Penelitian mengenai pengaruh penambahan bodi pengganggu *airfoil* terhadap karakteristik aliran melintasi silinder sirkular yang tersusun tandem dengan berbentuk *airfoil* dengan variasi NACA0012; 0018; 0024 dan dengan variasi *angle of attack* $\alpha = 0^\circ$ disusun dengan jarak antara *trailing edge airfoil* dan diameter silinder sirkular $S/D = 1$. Pada bilangan Reynolds $Re = 2,1 \times 10^4$ telah dilakukan secara numerik dengan aliran *unsteady* menggunakan model $k-\omega$ *Shear stress transport* (SST). Kesimpulan berikut dapat ditarik dari hasil penelitian ini: (1) Distribusi tekanan pada silinder utama memiliki karakteristik yang serupa dengan silinder tunggal, pada bodi pengganggu *airfoil* dengan $\alpha = 0^\circ$ memiliki hasil relatif kecil. (2) Penambahan bodi pengganggu *airfoil* NACA0024 pada $\alpha = 0^\circ$ dapat mereduksi koefisien *drag* maksimum 30,17%. Sedangkan pada penambahan bodi pengganggu *airfoil*. (3) Angka Strouhal terbesar didapatkan oleh konfigurasi tandem dengan penambahan *airfoil* NACA0018 dengan $\alpha = 0^\circ$, sedangkan angka Strouhal terkecil didapatkan oleh konfigurasi tandem dengan penambahan *airfoil* NACA0012 dengan $\alpha = 0^\circ$. (4) Visualisasi *velocity pathline* menjelaskan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu *airfoil* dapat menunda titik separasi aliran pada silinder utama. Sedangkan pada visualisasi *vorticity magnitude* menunjukkan bahwa dengan penambahan bodi pengganggu *airfoil* *wake* yang terbentuk pada silinder utama lebih kecil dibandingkan dengan silinder tunggal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Y. Zhou, C. W. Sun, Y. Zhou, and L. Huang, "A Numerical Study of a Circular Cylinder in the Wake of an Airfoil," in *15th Australasian Fluid Mechanics Conference, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Sydney, Sydney, Australia, 2004*, pp. 13–17.
- [2] M. Sarioglu, "Aerodynamic characteristics of the flow around an airfoil and a circular cylinder," *Omer Halisdemir Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 191–202, 2017.
- [3] 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, 2004, doi: 10.1016/j.fluidyn.2004.01.001.
- [4] D. Z. Sinaga, "Studi Eksperimental Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Tunggal yang Diganggu Ellips, Airfoil Simetris dan Airfoil Asimetris," Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2005.