

Pengendalian Aliran Pasif pada Silinder Sirkular dengan *Inlet Disturbance Body* Berbentuk Silinder Elip (AR = 1/4)

Wawan Aries Widodo¹⁾, Triyogi Yuwono¹⁾, P. Indiyono²⁾, Wasis Dwi Aryawan²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS, Surabaya

²⁾Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik Kelautan, ITS, Surabaya

Email: wawanaries@me.its.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini adalah untuk mendapatkan informasi mengenai fenomena interaksi aliran dari momentum fluida yang *attach* pada kontur permukaan *bluff body* berbentuk silinder elip maupun silinder sirkular. Karakteristik tersebut digunakan untuk memprediksi gaya aerodinamika pada kedua benda tersebut, terutama berkenaan dengan reduksi gaya hambat (*drag reduction*). Kedua bentuk *bluff body* (silinder elip dan silinder sirkular) ditempatkan dalam susunan tandem, dengan menempatkan silinder elip dengan *axis ratio* (AR = 1/4) sebagai *inlet disturbance body* yang ditempatkan pada sisi upstream. Bentuk geometri silinder elip (AR = 1/4) memiliki empat variasi yaitu silinder elip yaitu tanpa pemotongan sisi depan, dan ketiga lainnya dengan memodifikasi silinder elip dengan memotong sisi depan 5%, 10%, dan 15% dari panjang sumbu mayornya (B). Silinder sirkular ditempatkan pada sisi *downstream* dalam posisi tandem dengan jarak longitudinal (G/D) = 1. Karakteristik aliran melintasi silinder elip (AR = 1/4) dan silinder sirkular tersusun tandem, diteliti secara eksperimental pada *open-circuit subsonic wind tunnel*. Hasil-hasil dari kajian eksperimental tersebut digunakan untuk menjelaskan fenomena interaksi aliran yang menghasilkan proses *reattachment* yang ditandai dengan munculnya separasi *bubble* maupun separasi masif pada kontur permukaan silinder elip (AR = 1/4) yang dimodifikasi. Proses *separating-reattaching* dari silinder elip mempercepat transisi aliran dari lapis batas laminar menjadi lapis batas turbulen, serta letak separasi masif pada kontur permukaan silinder sirkular yang semakin tertunda ke belakang. Penempatan silinder elip (AR = 1/4) dengan pemotongan sisi depan sebesar 10% dari panjang sumbu mayornya sebagai *inlet disturbance body* berhasil mereduksi gaya hambat pada silinder sirkular paling signifikan. Seluruh kajian dilakukan pada bilangan Reynolds $6,4 \times 10^4$ didasarkan pada diameter silinder sirkular.

Kata kunci: *Bluff body, inlet disturbance body, reattachment, separasi bubble, separasi masif.*

ABSTRACT

This investigation to observe the information about fluid interaction phenomena from fluid momentum flow attach on surface contour of two bluff body shapes, there are elliptic cylinder and circular cylinder. This characteristic predicts aerodynamic force on the bluff bodies are related with drag reduction. Elliptic cylinder (AR = 1/4) and circular cylinder are arranged tandem position with longitudinal gap (G/D = 1), and are located elliptic cylinder as inlet disturbance body on upstream and circular cylinder as downstream body. The inlet disturbance body has four shapes, first elliptic cylinder without modification geometry, and the others with modification geometry to cut in front of elliptic cylinder with configuration 5%, 10%, and 15% of major axis length (B). Fluid flow characteristics investigate experimentally on open-circuit subsonic wind tunnel. The experimental results obtain the phenomena fluid interactions are indicated by reattachment process which is related with appearing bubble and massive separation on the surface contour of modified elliptic cylinder. Separating and reattching process is increasing flow transition from laminar to turbulent boundary layer until the postponement of massive separation position on surface contour of circular cylinder. To arrange elliptic cylinder (AR = 1/4) with modification geometry to cut front side 10% from length of major axis as inlet disturbance body gives significant results to reduce drag of circular cylinder. All investigations are running at Reynolds Number of 6.4×10^4 based on circular cylinder diameter.

Keywords: *Bluff body, inlet disturbance body, reattachment, separasi bubble, massive separation.*

PENDAHULUAN

Aliran fluida yang melintasi sebuah benda akan menimbulkan interaksi khususnya pada daerah lapis batas. Interaksi aliran tersebut dapat menyebabkan transisi aliran laminar menjadi turbulen. Penelitian yang dilakukan oleh Niemann dan Holscher [1] maupun Zdravkovich [2], menyatakan bahwa interaksi antara aliran fluida dengan geometri berbentuk *bluff body* maupun *streamlined body*, dimana lapis batas bertransisi dari aliran laminar menjadi turbulen hingga aliran terseparasi masif, sangat dipengaruhi antara lain oleh kecepatan pada *free-stream* serta bentuk profil alirannya, *free-stream turbulence* (intensitas turbulensi), bentuk benda (geometri maupun orientasi benda terhadap arah alirannya), serta kekasaran pada permukaan benda.

Apabila aliran fluida melingkupi *bluff body* maupun *streamlined body*, maka pada kontur permukaannya terjadi interaksi aliran yang dapat menimbulkan gaya-gaya aerodinamika, baik gaya hambat (*drag force*) maupun gaya angkat (*lift force*). Gaya *drag* pada *bluff body* didominasi oleh *pressure drag*, sedangkan pada *streamlined body*, umumnya didominasi oleh *skin friction drag*. Meskipun demikian *pressure drag* memberikan kontribusi juga terhadap adanya gaya *drag* yang diakibatkan oleh separasi dekat *trailing edge* dan *wake* di belakang benda. Perbedaan *pressure drag* di antara kedua benda tersebut menyebabkan perbedaan gaya hambat yang besar.

Fokus dari berbagai penelitian tersebut pada aliran melintasi *bluff body* salah satunya adalah untuk mereduksi gaya hambat (*drag reduction*). Metode yang digunakan untuk mereduksi gaya-gaya aerodinamika tersebut adalah dengan mengendalikan aliran fluida baik secara aktif maupun pasif, atau yang dikenal dengan *active flow control* maupun *passive flow control* yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. Metode pengendalian aktif (*active flow control*) yaitu memberikan suplai energi eksternal pada aliran fluida seperti eksitasi akustik, injeksi momentum (*blowing*), dan *boundary layer heating*, dan lain-lain.
- b. Metode pengendalian pasif (*passive flow control*) yaitu dengan melakukan modifikasi geometri *bluff body*, memberikan kekasaran pada permukaan *bluff body*, serta menempatkan *bluff body* kecil sebagai pengganggu aliran.

Beberapa penelitian terdahulu yang menjadi referensi untuk mendapatkan informasi yang berkaitan dengan metode tersebut di atas adalah dengan memodifikasi geometri silinder sirkular seperti dilakukan oleh Aiba dan Watanabe [3] serta Igarashi dan Shiba [4], yaitu dengan memotong silinder sirkular pada bagian depan yang disebut sebagai silinder tipe-D, serta bagian depan maupun

bagian belakang dipotong sekaligus dengan sudut pengirisan tertentu dan disebut sebagai silinder tipe-I. Tujuan pemotongan tersebut untuk mendapatkan interaksi momentum aliran yang terdefleksi dari sisi tegak silinder tersebut yang bertemu dengan momentum aliran bebas (*free-stream*). Interaksi kedua momentum aliran tersebut akan meningkatkan intensitas turbulensi aliran, dan selanjutnya momentum fluida tersebut akan *reattach* pada permukaan lengkung silinder. Kondisi yang demikian itu akan mendorong transisi aliran dari laminar menjadi turbulen lebih cepat dengan ditandai adanya separasi *bubble* pada kontur permukaan silinder tersebut.

Bentuk *bluff body* sederhana seperti silinder sirkular maupun modifikasi geometri dari bentuk dasar silinder sirkular mewakili bentuk geometri yang memiliki *adverse pressure gradient* yang kuat (*strong APG*) ketika dilalui oleh fluida. Silinder elip adalah bentuk *bluff body* sederhana lainnya yang memiliki karakteristik *adverse pressure gradient* yang lemah (*mild APG*). Namun demikian, hal ini tergantung orientasi aliran fluida yang melintasi silinder elip tersebut. Apabila orientasi aliran membentuk sudut serang tertentu atau tegak lurus terhadap sumbu mayornya, maka silinder elip akan memiliki karakteristik *adverse pressure gradient* yang kuat.

Penelitian secara eksperimental yang dilakukan Schubauer [5], pada silinder elip dengan *axis ratio* ($AR = 1/3$) menunjukkan bahwa transisi aliran laminar menjadi turbulen hingga terseparasi masif yang secara kuantitatif ditunjukkan oleh distribusi koefisien tekanan (C_p), sangat dipengaruhi oleh kecepatan *free-stream* (bilangan Reynolds), dimana semakin besar harga kecepatan aliran maka separasi masif akan semakin tertunda ke belakang. Penelitian oleh Faruqee, dkk [6] menggunakan perangkat lunak *CFD solver Fluent*, dengan melakukan simulasi numerik aliran melintasi silinder elips dengan variasi *axis ratio* (AR) = 0,3 hingga 1, pada bilangan Reynolds rendah ($Re = 40$). Simulasi numerik tersebut dilakukan karena kajian eksperimental tidak dapat melakukan pengukuran pada bilangan Reynolds yang sangat rendah. Penelitian tersebut mengambil berbagai hasil kuantitatif seperti distribusi koefisien tekanan, profil kecepatan pada *maximum thickness*-nya, serta mengintegrasikan harga C_p untuk mendapatkan koefisien *pressure drag*, serta *skin friction drag*, dengan mengintegrasikan distribusi *wall shear stress*.

Penelitian secara eksperimental dilakukan oleh Lajos [7] tentang reduksi gaya hambat pada *bluff body* yang memiliki *adverse pressure gradient* lemah, dengan melakukan modifikasi bentuk sisi depan *bluff body* tersebut. Modifikasi yang dilakukan menghasilkan separasi *bubble* pada kontur permukaan *bluff body* tersebut, dan mampu mereduksi gaya hambat hingga 50% apabila

dibandingkan bentuk tanpa modifikasi. Peneliti lain seperti Yaghoubi dan Mahmoodi [8], melakukan kajian eksperimental fenomena *separating* dan *reattaching* aliran turbulen pada benda berbentuk balok, dimana pengamatan tentang fenomena separasi *bubble* pada kontur plat datar (2-dimensi) dengan berbagai *aspect ratio* panjang terhadap tingginya (L/H) = 4, 5, 6, dan 9, pada bilangan Reynolds (Re_H) = $3,6 \times 10^4$. Penelitian yang dilakukan baik oleh Lajos [7] maupun Yaghoubi dan Mahmoodi [8], menunjukkan fenomena *separating-reattaching* sepanjang kontur benda yang tidak memiliki kelengkungan (*curvature*). Kelengkungan kontur menyebabkan menguatnya *adverse pressure gradient*, kondisi ini akan mempengaruhi terbentuknya separasi *bubble* maupun separasi msif pada benda tersebut. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa fenomena transisi aliran laminar hingga menjadi turbulen, dengan diawali dengan terbentuknya separasi *bubble*, diamati dengan perubahan profil kecepatan aliran, intensitas turbulensi, serta *shape factor* sepanjang kontur permukaan pelat datar. Penelitian oleh Bao dan Dallman [9], mengkaji lebih detail berbagai aspek fisis terbentuknya separasi *bubble* yang melalui geometri berbentuk *rounded backward-facing step*, baik dari kajian eksperimental maupun pemodelan numerik. Penelitian tersebut dapat lebih menjelaskan evolusi lapis batas yang *attach* pada kontur permukaan yang bertransisi dari aliran laminar hingga menjadi turbulen, yang diantaranya dipengaruhi adanya separasi *bubble*.

Penelitian lainnya tentang pengendalian aliran pasif, selain melakukan modifikasi geometri seperti yang dilakukan oleh Aiba dan Watanabe [3] serta Igarashi dan Shiba [4], yaitu dengan menempatkan benda pengganggu (*inlet disturbance body*) yang diletakkan di depan silinder utama dengan posisi tandem. Penelitian tersebut telah dilakukan oleh Igarashi [10], Tsutsui dan Igarashi [11], serta Lee, Sang-Joon, dkk. [12], dimana kedua peneliti tersebut menggunakan silinder sirkular kecil sebagai silinder pengganggu. Prasad & Williamson [13], menggunakan plat datar yang memiliki dimensi tertentu dengan posisi vertikal dan horisontal (normal terhadap arah aliran) yang diletakkan di depan silinder utama. Keser dan Unal [14], menggunakan *blunt-based flat plate* yang ditempatkan pada jarak tertentu terhadap silinder utama dengan posisi tandem.

Secara keseluruhan penelitian yang dilakukan dengan menempatkan benda yang berukuran lebih kecil di depan silinder sirkular atau bentuk *bluff body* lainnya, menjelaskan bahwa *free shear layer* yang terseparasi dari silinder pengganggu atau plat datar yang merupakan *inlet disturbance body* tersebut akan *reattach* pada sisi bagian depan silinder utama dan membentuk *quasi-static vortex* atau menciptakan celah bertekanan rendah atau dikenal dengan *cavity mode*. Penelitian yang

dilakukan oleh Lee, Sang-Joon, et al. [12], menjelaskan dengan detail tentang dua terminologi *wake-impingement mode* maupun *cavity mode*, yang diperoleh dengan memvariasikan jarak longitudinal diantara disturbance body maupun silinder sirkular (S/d), rasio diameter *inlet disturbance body* dengan silinder sirkular (d_s/d), serta bilangan Reynolds. *Free shear layer* yang terseparasi dari silinder pengganggu atau pelat datar akan membentuk *discrete vortices* dan mengenai permukaan bagian depan silinder sirkular utama dan ini dikenal sebagai *wake-impingement mode*, dan mempunyai konfigurasi yang berkebalikan dengan konfigurasi *cavity mode* sebagaimana dijelaskan di atas. Momentum fluida yang terseparasi dari kontur permukaannya tersebut, selanjutnya membentuk *free shear layer* yang terseparasi dari *upstream body* mengagitasi aliran *freestream* dan kemudian berinteraksi dengan lapisan batas pada permukaan silinder sirkular (*main circular cylinder*) yang terletak di belakangnya. Berdasarkan dua bentuk penelitian yang telah dilakukan oleh berbagai peneliti dengan metode pengendalian aliran pasif (*passive flow control*), baik melakukan modifikasi geometri dengan melakukan pemotongan sisi depan (silinder tipe-D), maupun pemotongan sisi depan dan belakang sekaligus (silinder tipe-I) dari bentuk dasar silinder sirkular, maupun menempatkan berbagai bentuk benda yang lebih kecil ukurannya sebagai *inlet disturbance body* di depan benda utama, kedua hal tersebut menjadi referensi utama bagi penulisan penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan untuk melihat pengaruh interaksi aliran yang dikenal dengan fenomena *separating and reattaching* antara silinder pengganggu (*inlet disturbance body*) berbentuk silinder elip dengan maupun tanpa modifikasi pemotongan pada sisi depan, yang dikarakteristikan memiliki *adverse pressure gradient* lemah, dengan silinder sirkular yang memiliki *adverse pressure gradient* yang kuat yang ditempatkan dalam susunan tandem dengan jarak longitudinal tertentu (G/D). Fenomena interaksi aliran *separating* dan *reattaching* tersebut, baik pada silinder pengganggu dengan berbagai bentuk geometri maupun silinder sirkular, akan dikaji lebih mendalam dan detail pada penelitian ini melalui kajian eksperimental.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental dan seluruh pengujian dilaksanakan di lorong angin (*open-circuit subsonic wind tunnel*). Skema susunan tandem antara silinder elip ($AR = 1/4$) yang tanpa dan dengan modifikasi geometri dengan memotong sisi depan sebesar 5%, 10%, dan 15% dari panjang sumbu mayornya (B) yang diletakkan sebagai *inlet disturbance body* dengan jarak longitudinal terhadap silinder sirkular,

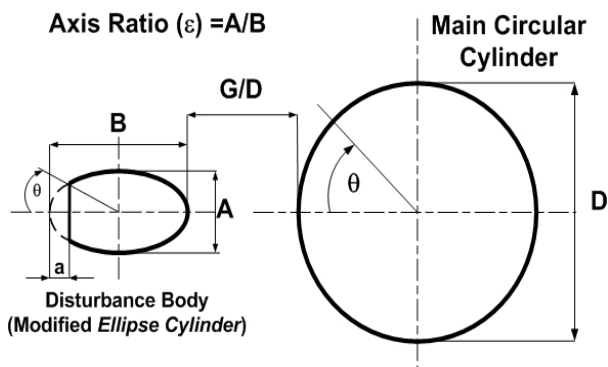
sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pengukuran yang dilakukan akan mendapatkan data kuantitatif yang diolah menjadi distribusi koefisien tekanan pada kedua kontur permukaan benda tersebut, yang merupakan perbandingan dari perbedaan tekanan antara tekanan *freestream* dengan tekanan sepanjang kontur benda padat dengan tekanan dinamis dari *freestream*, atau dapat dirumuskan pada persamaan (1) :

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

dimana: p_c adalah tekanan pada kontur silinder sirkular, p_∞ adalah tekanan statis pada *freestream*, dan $\frac{1}{2} \rho U_\infty^2$ adalah tekanan dinamik pada *freestream*. Distribusi koefisien tekanan selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai *pressure drag* (C_{Dp}) dengan persamaan sebagai berikut:

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

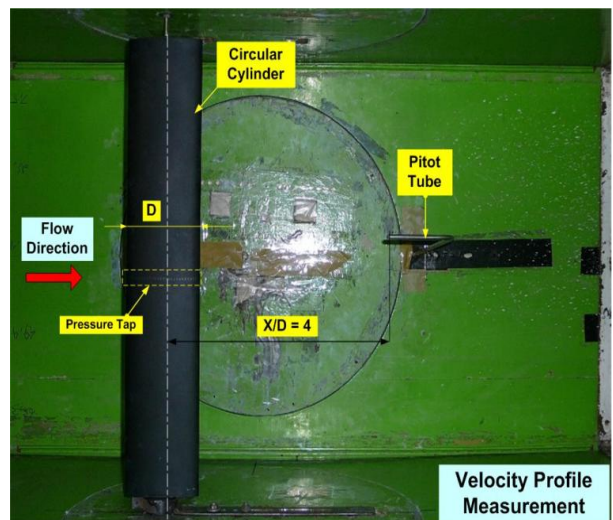
Data kuantitatif lainnya berupa profil kecepatan di daerah wake kedua benda yang tersusun tandem tersebut yang diukur pada jarak $x/D = 4$, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2b. Profil kecepatan pada daerah *wake* tersebut untuk mengetahui defisit momentum ketika aliran fluida melintasi kedua benda, dengan bentuk *inlet disturbance body* yang berbeda-beda. Informasi secara kualitatif yang berkaitan dengan interaksi aliran dengan kedua benda dilakukan pula pengujian di lorong angin dengan metode visualisasi aliran yaitu berupa guratan-guratan *streakline* yang tersapu oleh aliran fluida. Guratan-guratan tersebut diperoleh dengan menempelkan kertas tertentu pada kedua benda yang selanjutnya dilumuri dengan campuran bubuk titanium oksida, minyak nabati, dan *silicone oil* dengan perbandingan terhadap massa setiap komponen tersebut. Metode visualisasi aliran tersebut dikenal sebagai metode *oil-flow picture*.



Gambar 1. Skema Susunan Tandem Antara Silinder Elip ($AR = 1/4$) Dengan dan Tanpa Modifikasi Sebagai *Inlet Disturbance Body* dengan Silinder Sirkular



a. Penempatan Alat Ukur pada Open Circuit Subsonic Wind Tunnel



b. Letak Benda Uji di Lorong Uji

Gambar 2. Penempatan Alat Ukur dan Benda Uji

Dimensi silinder elip dengan $AR = 1/4$ yaitu sumbu minor (A) = 28,5 mm dan sumbu mayor (B) = 114 mm, sedangkan diameter silinder sirkular (D) = 114 mm, kedua benda tersebut memiliki panjang *span* yang sama 660 mm. *Pressure tap* ditempatkan pada bagian *mid-span* kedua benda dengan jumlah 72 tap dan dihubungkan dengan *inclined* manometer. Ukuran lorong angin sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, adalah ukuran penampang lorong uji (*test-section*) adalah 660 mm x 660 mm dengan panjang 1200 mm, dan dapat diperpanjang hingga 1800 mm. Seluruh pengujian di lorong angin dilakukan pada bilangan Reynolds (Re_a) = $6,4 \times 10^4$ didasarkan pada diameter silinder sirkular.

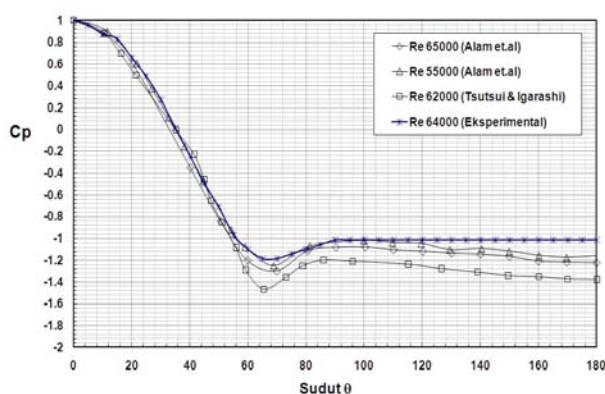
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data kuantitatif (distribusi koefisien tekanan dan profil kecepatan di daerah *wake*) serta hasil visualisasi aliran dengan metode *oil flow picture*

diuraikan secara komprehensif pada bagian ini, untuk menjelaskan berbagai interaksi aliran fluida yang melintasi dua buah *bluff body* yang tersusun tandem dengan jarak longitudinal ($G/D = 1$), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pada bagian ini akan dibahas berbagai grafik distribusi koefisien tekanan pada Gambar 3, 4, 5, dan 6, sedangkan nilai *pressure drag* (C_{Dp}) dalam bentuk rasio antara silinder sirkular sebagai *downstream body* (tandem) dengan silinder sirkular tunggal, ditunjukkan pada Gambar 7, serta profil kecepatan pada Gambar 8. Hasil visualisasi aliran pada kontur permukaan *inlet disturbance body*, maupun silinder sirkular dengan dan tanpa *inlet disturbance body*, ditunjukkan masing-masing pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) pada Silinder Sirkular Tunggal

Grafik distribusi koefisien tekanan memberikan informasi tentang evolusi aliran yang melintasi kontur permukaan lengkung silinder elip yaitu, pada daerah *leading edge* silinder elip (untuk yang tanpa modifikasi) atau daerah sisi tegak (untuk yang dilakukan pemotongan sisi depan) hingga terjadinya akselerasi maksimum, daerah terjadinya deselerasi, serta daerah *base pressure* (daerah bertekanan konstan atau telah terjadi separasi masif). Distribusi koefisien tekanan dari silinder sirkular dari berbagai hasil penelitian yang dilakukan oleh Tsutsui dan Igarashi [2002], serta Alam, dkk [2003 & 2006], dibandingkan dengan hasil pengukuran tekanan statis pada kontur permukaan silinder sirkular di daerah *mid-span*, yang kemudian diolah menjadi grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Sirkular Tunggal Berbagai Hasil Penelitian Dibandingkan dengan Hasil Eksperimen

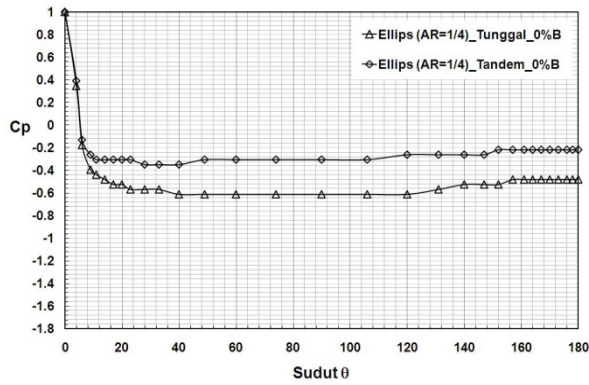
Berdasarkan Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa pada bilangan Reynolds pada rentang 10^3 hingga 10^5 perbedaan distribusi koefisien tekanan pada silinder sirkular tidaklah terlalu mencolok. Apabila terdapat perbedaan seperti posisi *base pressure coefficient*

(C_{pb}), minimum akselerasi, atau letak separasi, hal tersebut dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain kecepatan *freestream* (dinyatakan dalam bilangan Reynolds), intensitas turbulensi aliran, serta kekasaran permukaan dari silinder sirkular. Akurasi dari hasil pengukuran pada kajian eksperimental yang dilakukan pada *open-circuit subsonic wind tunnel* di laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, menunjukkan konsistensi pada trend dari grafik, namun sedikit berbeda dalam hal nilai kuantitatifnya.

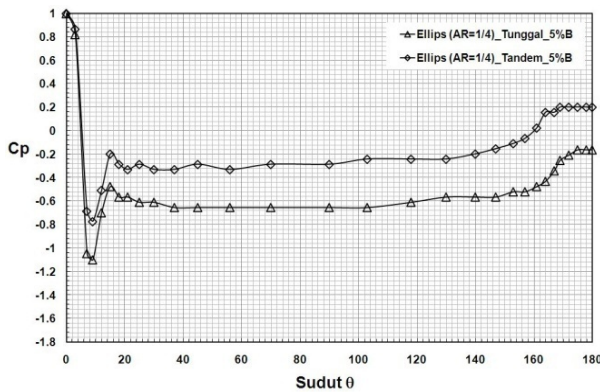
Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) Silinder Elip ($AR = 1/4$) Sebagai *Inlet Disturbance Body*

Perbandingan data hasil dari kajian eksperimental pada silinder elip dalam posisi tunggal maupun dalam susunan tandem sebagai *inlet disturbance body*, yang diplotkan dalam sebuah grafik berupa evolusi distribusi koefisien tekanan sepanjang kontur permukaan silinder elip. Masing-masing data, baik untuk silinder elip tunggal maupun tandem, tanpa modifikasi maupun dengan modifikasi pemotongan pada sisi depan ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$), ditampilkan dalam Gambar 4. Distribusi koefisien tekanan pada silinder elip tanpa modifikasi ($a = 0\%B$) yang ditunjukkan pada Gambar 4a, baik dalam bentuk tunggal maupun tandem mengindikasikan bahwa momentum fluida yang *attach* pada kontur permukaannya masih didominasi oleh lapis batas laminar, hal tersebut dapat dibandingkan dengan penelitian Schubauer [5], untuk bilangan Reynolds yang hampir sama harganya.

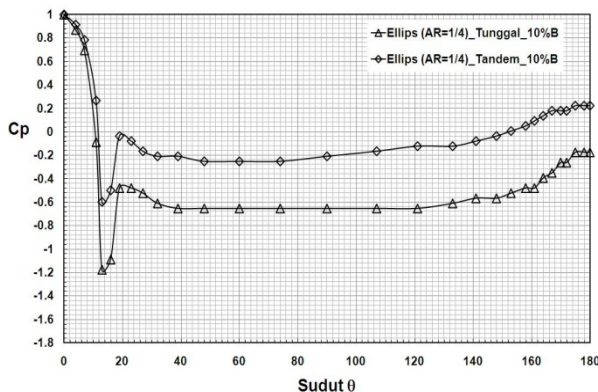
Distribusi koefisien tekanan yang ditunjukkan pada Gambar 4b, 4c dan 4d, masing-masing untuk silinder elip dengan pemotongan sisi depan ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$), masing-masing dibandingkan dalam bentuk tunggal maupun tersusun tandem. Aliran fluida yang terdefleksi pada sisi tegak pemotongan silinder elips mampu dibelokkan pada kontur permukaan lengkungnya atau mengalami proses *reattachment* akibat injeksi aliran dari sisi *freestream*. Ketiga gambar tersebut (4b, 4c, dan 4d) menunjukkan bahwa silinder elip dengan modifikasi pemotongan sisi depan baik dalam bentuk tunggal maupun sebagai *inlet disturbance body*, dimana proses *reattachment* tersebut yang ditandai adanya separasi *bubble* yang ditunjukkan dengan akselerasi yang tajam pada sudut $15^\circ < \theta < 30^\circ$, mampu mempercepat transisi lapis batas pada kontur permukaan lengkungnya dari laminar menjadi turbulen. Secara keseluruhan terlihat bahwa silinder elip dengan modifikasi pemotongan sisi depan mampu menunda separasi masif lebih ke belakang apabila dibandingkan silinder elip tanpa pemotongan sisi depan.



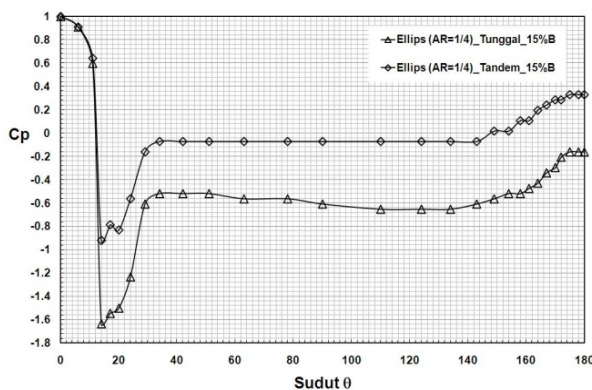
a. Silinder Ellips Tanpa Pemotongan



b. Silinder Elip Dengan Pemotongan a = 5%B



c. Silinder Elip Dengan Pemotongan a = 10%B



d. Silinder Elip Dengan Pemotongan a = 15%B

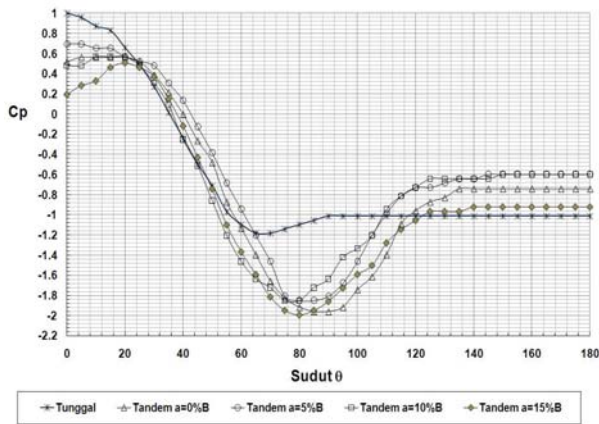
Gambar 4. Perbandingan Antara Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Elip Tunggal dengan Susunan Tandem

Pada daerah *leading edge*, untuk silinder elip tanpa modifikasi, menunjukkan karakteristik aliran yang tipikal, dimana pada silinder elip pada posisi *pressure tap* yang sama (sudut θ yang sama) akselerasi yang lebih tinggi hingga mencapai maksimum ditunjukkan oleh silinder elip tunggal apabila dibandingkan dengan silinder elip tandem. Kondisi tersebut dapat dijelaskan berikut ini, karena keberadaan silinder sirkular (*downstream body*) pada jarak longitudinal ($G/D = 1$) menyebabkan adanya *free shear layer* yang terseparasi dari *inlet disturbance body* terdefleksi kembali pada *trailing edge* (back flow) atau dikenal dengan *forward shear layer*. Fenomena tersebut membuat *stream tube* pada daerah *base pressure* silinder elip sebagai *inlet disturbance body* menjadi semakin membuka hal tersebut semakin meningkatkan *adverse pressure gradient*, kondisi tersebut menjadikan akselerasi aliran pada kontur permukaan silinder elip tandem lebih rendah jika dibandingkan silinder elip tunggal. Secara keseluruhan apabila dikaitkan dengan keberadaan silinder sirkular tersebut, pada Gambar 4, menunjukkan bahwa letak separasi masif silinder elip sebagai *inlet disturbance body* lebih maju ke depan apabila dibandingkan dengan silinder elip tunggal.

Distribusi Koefisien Tekanan (C_p) Silinder Sirkular (*Downstream Body*)

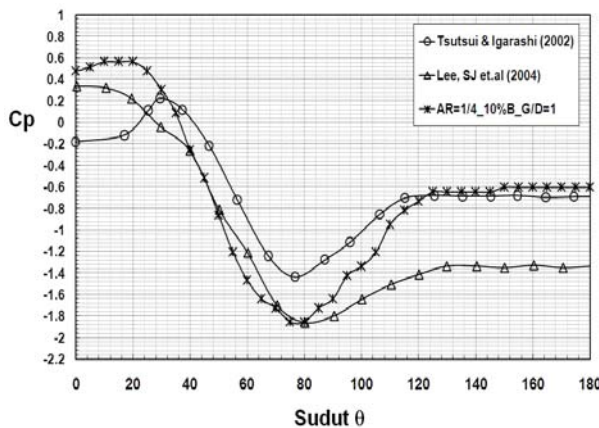
Sebagaimana dijelaskan pada berbagai penelitian terdahulu, bahwa interaksi aliran antara *inlet disturbance body* dengan *downstream body*, menghasilkan fenomena yang dapat memberikan efek reduksi gaya hambat yang cukup signifikan pada *downstream body*, dalam hal ini berbentuk silinder sirkular. Kondisi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut, *free shear layer* yang terseparasi dari silinder elip memiliki kandungan intensitas turbulensi yang cukup signifikan untuk mengganggu *free-stream flow* di sekitarnya, yang kemudian sebagian *back flow* menuju *inlet disturbance body*, dan sebagian lagi *attach* pada kontur permukaan silinder sirkular. Grafik distribusi koefisien tekanan silinder sirkular tunggal maupun tandem ($G/D = 1$) yang ditunjukkan pada Gambar 5, menjelaskan pengaruh berbagai bentuk silinder elip sebagai *inlet disturbance body*, secara keseluruhan silinder sirkular yang diposisikan sebagai *downstream body* memiliki letak separasi masif yang lebih tertunda ke belakang sekitar sudut $\theta \approx 120^\circ$, sedangkan letak separasi masif silinder sirkular tunggal pada sudut $\theta \approx 85^\circ$. Hal tersebut menunjukkan bahwa *free shear layer* yang terseparasi dari *trailing edge* silinder elip mampu meningkatkan intensitas turbulensi momentum fluida yang *attach* pada kontur permukaan silinder

sirkular. Momentum fluida yang lebih turbulen tersebut lebih mampu melawan *wall shear stress* maupun *adverse pressure gradient*, hingga akhirnya separasi masif lebih tertunda ke belakang.



Gambar 5. Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Sirkular yang Tersusun Tandem dengan Silinder Elip Dibandingkan dengan Silinder Sirkular Tunggal pada Bilangan Reynolds

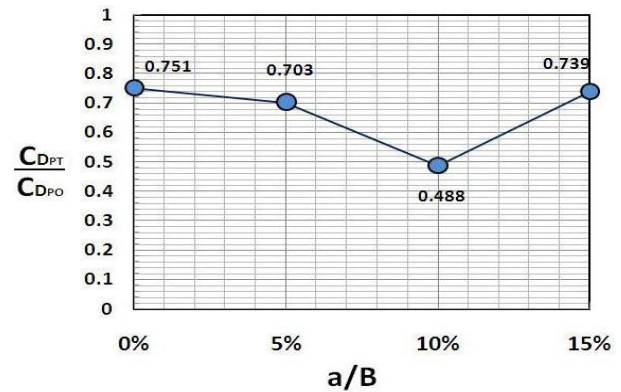
Komparasi grafik distribusi koefisien tekanan silinder sirkular sebagai *downstream body*, yang dipengaruhi oleh berbagai bentuk *inlet disturbance body* pada kajian eksperimental ini dengan penelitian lainnya, dalam hal ini penelitian oleh Tsutsui dan Igarashi [11] dan Lee, Sang-Joon, dkk. [12], dimana keduanya menggunakan silinder sirkular sebagai *inlet disturbance body*, berdasarkan gambar distribusi koefisien tekanan dari silinder sirkular sebagaimana terlihat pada Gambar 6, menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dari pengaruh *inlet disturbance body* yang memiliki karakteristik *adverse pressure gradient* kuat berbentuk silinder sirkular, dan yang memiliki karakteristik *adverse pressure gradient* lemah berbentuk silinder elip yang dimodifikasi dengan pemotongan sisi depan $a = 10\%B$.



Gambar 6. Komparasi Distribusi Koefisien Tekanan Silinder Sirkular Sebagai Downstream Body

Bentuk geometri *inlet disturbance body* adalah silinder elip yang dimodifikasi memiliki akselerasi yang lebih tajam, serta posisi separasi masif yang tertunda lebih ke belakang jika dibandingkan dengan *inlet disturbance body* berbentuk silinder sirkular. Fenomena ini dapat dijelaskan yaitu momentum fluida yang bertransisi pada kontur permukaan silinder elip yang dimodifikasi untuk menjadi aliran turbulen memiliki kesempatan *attach* yang lebih lama dibandingkan momentum fluida yang bertransisi pada kontur permukaan silinder sirkular. Kesempatan yang lebih lama untuk *attach* pada permukaan kontur benda menjadikannya memiliki intensitas turbulensi yang semakin meningkat hingga akhirnya momentum fluida tersebut mengalami separasi masif. *Free shear layer* dari momentum fluida yang terseparasi tersebut memiliki kemampuan yang cukup besar dalam melakukan agitasi maupun *mixing* terhadap *freestream flow* yang akan *attach* pada kontur permukaan silinder sirkular.

Berdasarkan grafik distribusi koefisien tekanan (C_p) pada Gambar 5, selanjutnya dapat diolah untuk mendapatkan koefisien *pressure drag* (C_{Dp}) silinder sirkular tunggal maupun yang tersusun tandem dengan mengintegrasikan secara numerik dengan menggunakan persamaan (2), dan ditunjukkan pada Gambar 7. Rasio *pressure drag* (C_{DPT}/C_{DPO}) antara silinder sirkular tandem dengan tunggal menunjukkan bahwa silinder elip ($AR = 1/4$) dengan pemotongan $10\%B$ memberikan pengaruh reduksi *drag* pada silinder sirkular paling signifikan apabila dibandingkan dengan *inlet disturbance body* lainnya.



Gambar 7. Rasio *Pressure Drag* Silinder Sirkular Tunggal dengan Silinders Sirkular Tandem dengan *Inlet Disturbance Body* Silinder Elip Tanpa Variasi Pemotongan Sisi Depan ($a = 0\%B$) dan dengan Variasi Pemotongan Sisi Depan ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$)

Profil Kecepatan di Daerah *Wake*

Defisit momentum yang diindikasikan dengan profil kecepatan di daerah *wake* silinder sirkular pada jarak sekitar $x = 4D$ dari pusat silinder sirkular, ditunjukkan pada Gambar 8, untuk

semakin memperkuat penjelasan dengan data kuantitatif bahwa keberadaan *inlet disturbance body* di depan silinder sirkular menghasilkan defisit momentum yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan defisit momentum silinder sirkular tunggal. Hal tersebut dapat digunakan untuk memberikan kesimpulan awal bahwa reduksi gaya hambat ditandai dengan defisit momentum yang kecil atau daerah *wake* yang sempit di belakang silinder sirkular. Profil kecepatan di daerah *wake* silinder sirkular yang ditunjukkan akibat pengaruh bentuk *inlet disturbance body*.

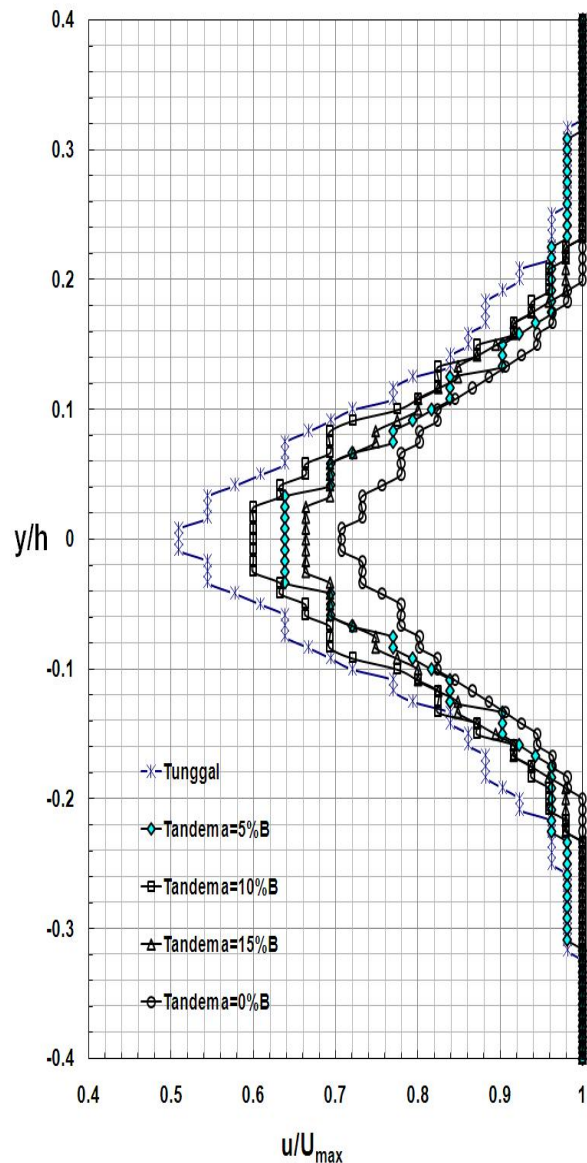
Defisit momentum paling kecil ditunjukkan dengan penempatan silinder elip tanpa modifikasi ($a = 0\%B$) sebagai *inlet disturbance body*, apabila dibandingkan dengan ketiga bentuk *inlet disturbance body* lainnya. Informasi berdasarkan gambar 8 tersebut, menunjukkan perbedaan dengan informasi yang diberikan oleh Gambar 7, yang menyatakan silinder elip dengan pemotongan $10\%B$ memberikan reduksi gaya hambat yang paling signifikan. Kondisi tersebut dapat dijelaskan, defisit momentum yang ditampilkan pada Gambar 8 tersebut merepresentasikan gaya hambat total (*total drag*) dari kedua buah silinder, dimana didalamnya juga terdapat gaya hambat dari silinder elip sebagai *inlet disturbance body*, serta gaya hambat dari silinder sirkular, sedangkan pada Gambar 7 hanya *pressure drag* silinder sirkular yang dipengaruhi berbagai bentuk *inlet disturbance body*.

Visualisasi Aliran

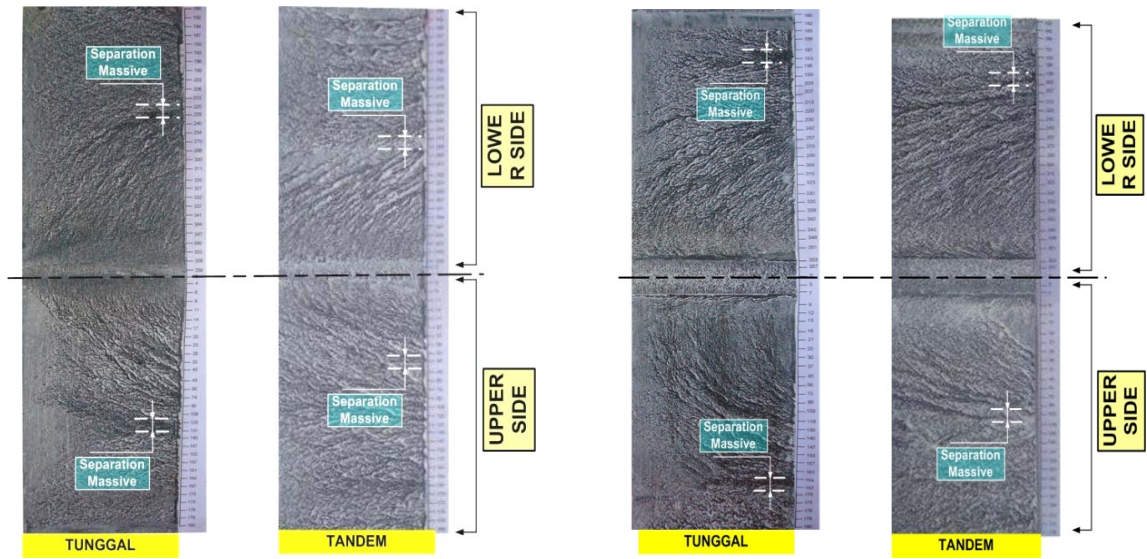
Data kualitatif berupa visualisasi aliran dengan metode *oil-flow picture* digunakan untuk memperkuat hasil eksperimental berupa data kuantitatif (distribusi koefisien tekanan dan profil kecepatan), yang telah dibahas sebelumnya. Visualisasi aliran yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 tersebut, menunjukkan guratan-guratan *streakline* yang menggambarkan letak separasi *bubble* maupun letak separasi masif pada *upper side* maupun *lower side* kontur permukaan silinder elip tersebut.

Hasil visualisasi aliran pada kontur permukaan *inlet disturbance body* ditunjukkan pada Gambar 9. Hasil visualisasi aliran tersebut membandingkan silinder elip tanpa modifikasi ($a = 0\%B$), maupun dengan modifikasi pemotongan sisi depan ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$), dengan silinder elip tunggal. Secara keseluruhan dari gambar tersebut menunjukkan bahwa letak separasi masif silinder elip sebagai *inlet disturbance body* lebih terdesak ke depan menjauhi *trailing edge*, dimana hal tersebut

dipengaruhi oleh keberadaan silinder sirkular yang berada di belakang silinder elip. Namun demikian secara kualitatif tidak menunjukkan adanya perubahan panjang separasi *bubble* khususnya pada pemotongan $a = 10\%B$ dan $a = 15\%B$. Hasil visualisasi aliran pada silinder elip dengan maupun tanpa pemotongan sisi depan, semakin memperkuat penjelasan sebelumnya dari hasil distribusi koefisien tekanan pada Gambar 4, tentang proses *reattachment* yang ditandai dengan separasi *bubble*, maupun letak separasi masif pada kontur permukaan lengkungnya.

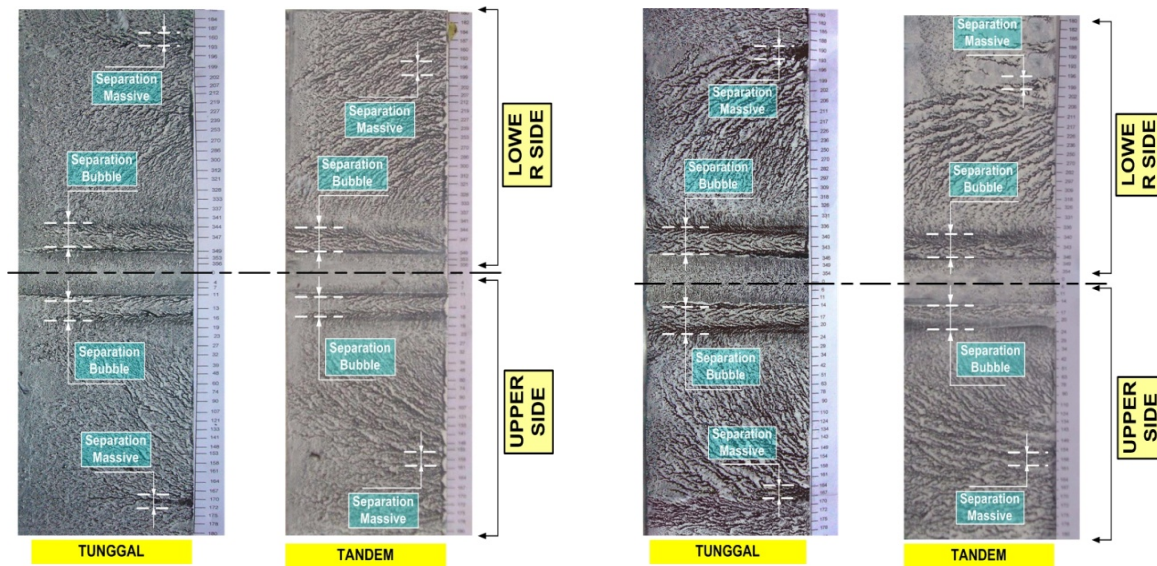


Gambar 8. Profil Kecepatan Pada Daerah Wake Kedua Benda (pada Jarak $x = 4D$ dari *centerline* Silinder Sirkular)



a. Elips Tanpa Pemotongan $a = 0\%B$

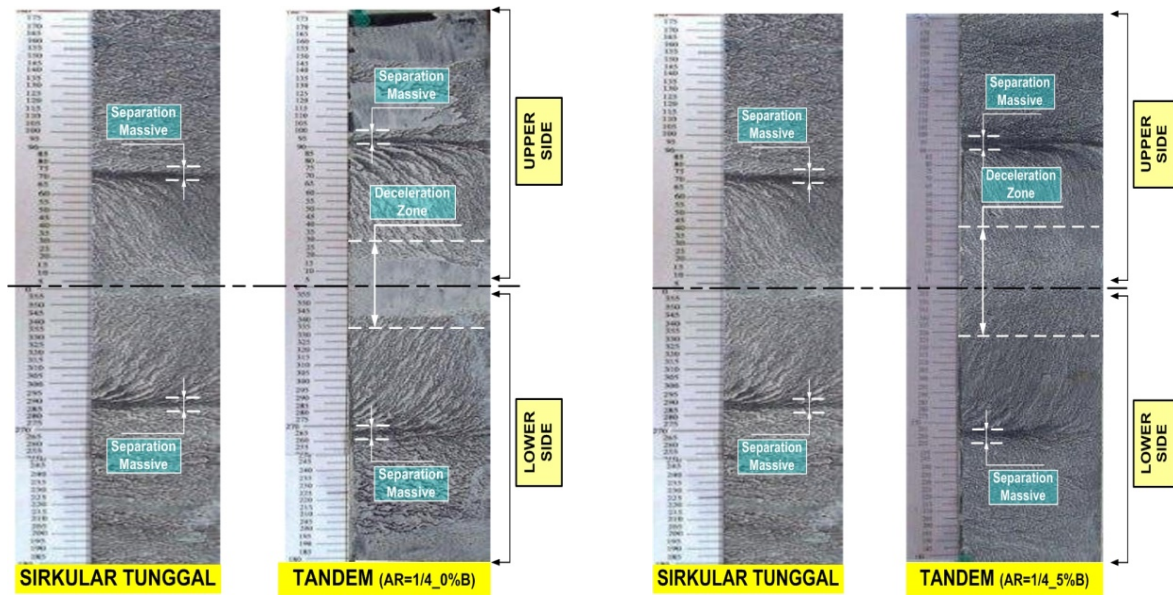
b. Pemotongan $a = 5\%B$



c. Pemotongan $a = 10\%B$; d

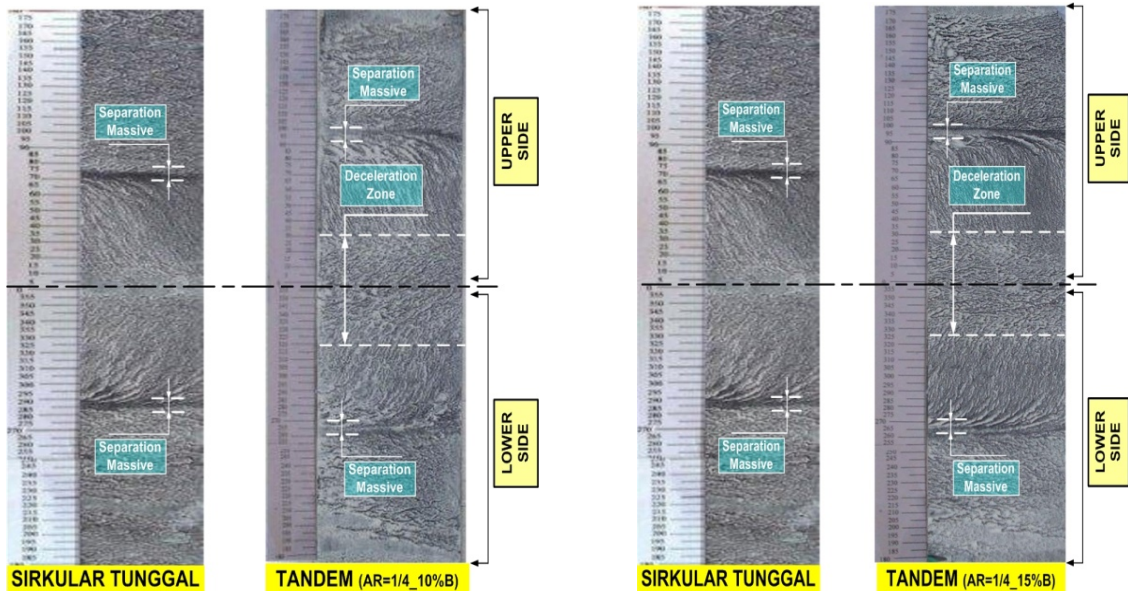
d. Pemotongan $a = 15\%B$

Gambar 9. Komparasi Visualisasi Aliran Pada Kontur Permukaan Silinder Elips Tunggal dan Tandem Pada Jarak Gap ($G/d = 1$)



a. Elips Tanpa Pemotongan ($a = 0\%B$)

b. Elips ($a = 5\%B$)



c. Elips ($a = 10\%B$)

d. Elips ($a = 15\%B$)

Gambar 10. Komparasi Visualisasi Aliran Pada Kontur Permukaan Silinder Sirkular Tunggal dan Tandem Pada Jarak Longitudinal ($G/D = 1$)

KESIMPULAN

Berdasarkan berbagai uraian di atas dengan menampilkan hasil eksperimental berupa data kuantitatif maupun data kualitatif yang saling melengkapi berbagai penjelasan berkaitan dengan fenomena *separating-reattaching* pada dua buah *bluff body*, yaitu silinder elip dan silinder sirkular. Dan dapat disimpulkan bahwa variasi bentuk silinder elip sebagai *inlet disturbance body* dengan maupun tanpa modifikasi geometri, memberikan informasi mengenai fenomena fisis tentang interaksi

aliran yang dikaitkan dengan keberadaan separasi *bubble* pada kontur permukaan silinder elip yang dimodifikasi ($a = 5\%B$, $a = 10\%B$, dan $a = 15\%B$). Adanya separasi *bubble* tersebut mampu meningkatkan intensitas turbulensi momentum fluida yang *attach* pada kontur permukaan silinder sirkular yang dapat mempercepat transisi lapis batas laminar menjadi turbulen, dan dapat menunda separasi masif lebih ke belakang. Keberadaan separasi *bubble* yang terdapat pada kontur permukaan silinder elip yang dipotong pada sisi depan, secara keseluruhan memberikan

kontribusi dalam mereduksi gaya hambat (*drag force*) secara signifikan pada silinder sirkular, khususnya pada silinder elip dengan pemotongan sisi depan sebesar 10% dari panjang sumbu mayornya ($a = 10\%B$).

DAFTAR PUSTAKA

- Niemann, H.J. & Holscher, N., *A Review of recent experiments on the flow past circular cylinders*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.33, 197-209, 1990.
- Zdravkovich, M.M., *Conceptual review of laminar and turbulent flow past smooth and rough circular cylinders*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 33, 53-62, 1990.
- Aiba, S., & Watanabe, H., Flow characteristics of a bluff body cut from a circular cylinder, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.119, 453-457, 1997.
- Igarashi T., & Shiba Y., *Drag reduction for D-shape and I-shape cylinders (aerodynamics mechanism of reduction drag)*, JSME International Journal, Series B, Vol.49, No. 4, 2006.
- G. B. Schubauer, *Air flow in the boundary layer of an elliptic cylinder*, Report No. 652-National Advisory Committee For Aeronautics, 1939.
- Faruqee, Z., Ting, D S-K., Fartaj, A., Barron, R.M., & Carrivea, R., *The effects of axis ratio on laminar fluid flow around an elliptical cylinder*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, 1178-1189, 2007.
- Lajos, Tamas, *Drag reduction by The production of a separation bubble on the front of a bluff body*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 22, 331-338, 1986.
- Yaghoubi, M., & Mahmoodi, S., *Experimental study of turbulent separated and reattached flow over a finite blunt plate*, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, 105-112, 2004,
- Bao, F., & Dallmann, Uwe Ch., *Some physical aspects of separation bubble on a rounded backward-facing step*, Aerospace Science and Technology, vol. 8, pp. 83-91, 2004.
- Igarashi, T., *Drag reduction of square prism by flow control using a small rod*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, 141-153, 1997.
- Tsutsui, T., & Igarashi, T., *Drag reduction of a circular cylinder in an air-stream*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 90, 527-541, 2002.
- Lee, Sang-Joon., Lee, Sang-Ik., & Park, Cheol-Woo, *Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod*, Fluid Dynamic Research, Vol. 34, 233-250, 2004.
- Prasad, A., & Williamson, C.H.K., *A Method for the reduction of bluff body drag*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 69-71, 156-167, 1997.
- Keser, H.I, & Unal, M.F., *Flow around a circular cylinder downstream of a blunt-based flat plate in tandem and staggered arrangements*, Journal of Fluids and Structures, Vol. 17, 783-791, 2003.
- Alam, M.M., Sakamoto, H., & Moriya, M., *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, 347-366, 2003.
- Alam, M.M., Sakamoto, H., & Zhou, Y., *Effect of T-shaped plate on reduction in fluid forces on two tandem cylinders on cross-flow*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 94, 525-551, 2006.