Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Numerical Analysis of the Wake Interactions Between Two Tandem Cylinders at a Reynolds Number of 1×10^5

Muhammad Fadli Tambunan [1], Banta Cut [2*], Nasruddin A.Abdullah [3]

[1,2,3)] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Samudra, Langsa 24416, Indonesia
**)Corresponding Author*

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 1 Desember 2025
Direvisi dari 7 Desember 2025
Diterima 15 Desember 2025
Dipublikasi 30 Desember 2025

***Keywoard's*:**
Silinder Sirkular;
bilangan reynolds;
longitudinal;
tandem;
k-ω SST.

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v12i02.13824

A B S T R A C T

Circular cylinders are a geometric shape widely utilized in engineering applications such as electricity poles, offshore piles, subsea pipelines, and heat exchangers, where the drag force fluctuations experienced by two tandem-arranged cylinders are known to be determined by the longitudinal spacing ratio (L/D); previous studies were conducted at a Reynolds number of 6.5 x 104. This foundation led to the initiative for further numerical simulation research aimed at analyzing the effect of L/D variations (1.5, 2.0, 3.0, and 4.0) on the flow characteristics around two such cylinders at a higher Reynolds number (1X10), utilizing a cylinder diameter (d) of 25 mm within a narrow square channel (H = 300 mm and L = 1500 mm). This study was performed using 2D unsteady RANS via Ansys Fluent Student R2 2021, employing a structured mesh and the k-ω SST turbulence model. The results revealed that the L/D = 1.5 variation shows a significantly lower rear pressure compared to L/D = 2.0, 3.0, and 4.0, where the largest pressure difference between the front (high) and the rear (very low and negative) indicates the highest pressure drag, a characteristic dominated by earlier flow separation and a large wake. Conversely, the L/D = 3.0 variation demonstrated the lowest upstream cylinder CD value (0.734) among all variations, suggesting optimal reduction, while the lowest downstream cylinder CD value (0.209) was recorded at the L/D = 1.5 spacing.

A B S T R A K

Silinder sirkular merupakan bentuk bentuk geometri yang banyak digunakan dalam aplikasi keteknikkan seperti tiang listrik, tiang pancang lepas pantai, jaringan pipa bawah laut, dan juga untuk alat penukar kalor. Dimana fluktuasi gaya hambat yang dialami oleh dua silinder sirkular tersusun tandem ditentukan oleh rasio jarak *longitudinal* (L/D) yang dimana penelitain terdahulu menggukan bilangan Reynolds 6,5x10^4. Dan muncul gagasan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan simulasi numerik yang bertujuan menganalisa pengaruh variasi jarak *longitudinal* (L/D) terhadap karakteristik aliran yang terjadi pada dua silinder sirkular tersusun tandem dengan bilangan Reynolds 1x10^5. Pada kedua silinder sirkular menggunakan diameter (d) = 25mm dengan variasi jarak *longitudinal* (L/D) = 1.5; 2.0; 3.0; 4.0 dam susunan ditempatkan dalam saluran sempit berpenampang bujur sangkar dengan luas (H= 300mm dan L=1500). Penelitian ini didasarkan pada simulasi numerik 2D *Unsteady-Rans* menggunakan *software* Ansys *fluent student* R2 2021 dengan jenis *meshing*nya *structure mesh* dan model turbulensi adalah k-ω SST. Hasil penelitian ini dimana variasi jarak L/D = 1,5 menunjukkan tekanan yang sangat rendah dibandingkan dengan variasi jarak LD = 2.0; 3.0; 4.0; dimana perbedaan tekanan terbesar antara depan (tinggi) dan belakang (sangat rendah dan negatif), yang mengindikasikan *drag pressure* yang paling tinggi. Ini adalah karakteristik aliran yang didominasi oleh sparasi aliran yang lebih awal dan *wake* yang besar. Variasi L/D = 3.0 menunjukkan nilai CD (0,734) terendah pada silinder *upstream* diantara semua variasi jarak L/D yang merupakan nilai reduksi yang optimal. Pada silinder *downstream* nilai CD (0,209) terendah pada variasi jarak L/D = 1.5.

© 2025 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

E-mail Coresponden: bantacut@unsam.ac.id
© 2025 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

1. Pendahuluan

Mekanika fluida merupakan ilmu yang mempelajari perilaku fluida baik dalam keadaan diam maupun bergerak, baik cairan maupun gas. Salah satu aspek yang dipelajari dalam ilmu mekanika fluida adalah aliran eksternal [1]. Silinder sirkular dengan berbagai macam susunan seperti in-line, tandem, *staggered*, atau *square arrays* adalah salah satu bentuk geometri tubuh yang banyak digunakan dalam aplikasi *engineering*. Ini digunakan dalam bidang *engineering* seperti tiang listrik, tiang pancang lepas pantai, jaringan pipa bawah laut, dan juga untuk alat penukar kalor [2]. Aliran fluida yang melewati silinder sirkular tersebut, telah menyebabkan timbulnya gaya gaya, diantaranya adalah gaya hambat (*Drag*) dan gaya angkat (*lift*). *Drag* adalah gaya aerodinamika yang timbul karena adanya tekanan dan gesekan. Untuk mengurangi gaya *drag* ini, peran *boundary layer* penting karena berhubungan dengan *shear stress*. *Shear stress* pada permukaan benda dipengaruhui oleh distribusi yang terjadi pada kontur [3]

Mengendalikan aliran merupakan salah satu cara untuk untuk melihat fenomena aliran yang melewati *bluff body* sehingga dapat mengurangi gaya hambat (*drag force*). Dengan berkurangnya *drag force* maka material akan terselamatkan, oleh karena itu penelitian ini sangat bermanfaat dibidang teknologi [3]. Aliran disekitar dua silinder *stagger* memiliki hubungan erat dengan bangunan lepas pantai atau jaringan pipa dalam *offshore oil* and gas *enggineering*, dan sangat populer dalam aplikasi praktis lainya. Karena banyaknya interaksi fluida disekitar *bluff body*, telah menyebabkan terjadinya *vortex* dan penelitian aliran disekitar dua silinder sirkular semakin menarik minat para ilmuan dan insinyur [4]

Sirikular merupakan salah satu bentuk *bluff body* yang banyak digunakan dalam aplikasi teknik. Silinder sirkular menghasilkan *stress* (tegangan normal) and *shear stress* (tegangan geser). Interaksi antara aliran fluida dengan geometri *bluff body* atau streamlined *body*, dimana lapisan batasnya berubah dari laminar *flow* menjadi *turbulent flow* [5], [6]. Interaksi ini telah menyebabkan terjadinya tegangan normal terjadi karena adanya tekanan dari fluida, dan tegangan geser yang disebabkan oleh viskositas fluida. *Drag force* untuk aliran dua dimensi adalah gaya-gaya sejajar dengan aliran fluida, sedangkan gaya yang tegak lurus terhadap arah aliran dinamakan *lift force* (gaya angkat). Kedua gaya tersebut sangatlah dipengaruhi oleh *let*ak titik separasi pada bodi. Maka pengetahuan mengenai *drag force* dan *lift force* serta cara mereduksinya sangat diperlukan untuk mendesain konstruksi yang berguna untuk meningkatkan efisiensinya [6]. Karakteristik aliran fluida melintasi sebuah silinder sirkular banyak diterapkan dikehidupan sehari-hari, dimana silinder sirkular merupakan jenis *bluff body* yang memiliki kelengkungan paling kuat (*strong adverse pressure* gradient) dengan demikian *wake* yang dihasilkan silinder sirkular sangat besar. *Wake* yang menghasilkan *drag force* yang besar pula [7].

Pada peneliti terdahulu bahwa fluktuasi gaya hambat yang dialami oleh dua silinder sirkular yang tersusun tandem ditentukan oleh rasio jarak *longitudinal* (L/D) antara keduanya (L/D) [8] [9] [10]. Penelitian yang telah dilakukan dengan dua silinder sirkular tersusun tandem variasi jarak L/D = 3.0; 4.0; 5.0 dengan bilangan Re_{DH} = 6,5 x 10^4 pada variasi jarak L/D = 3.0 memiliki nilai 1,006 yang merupakan nilai koefisien terbesar dari selurung variasi, menunjukan bahwa dua silinder yang tersusun tandem menghasilkan gaya hambat dan *wake* yang besar [8]. Berdasakan penelitian terdahulu, terdapat ide untuk melakukan penelitian lebih lanjut melalui simulas numerik yaitu simulasi numerik dua silinder sirkular tersusun tandem pada bilangan Reynolds 1x10^5 dengan variasi jarak L/D = 1,5; 2.0; 3.0; 4,0.

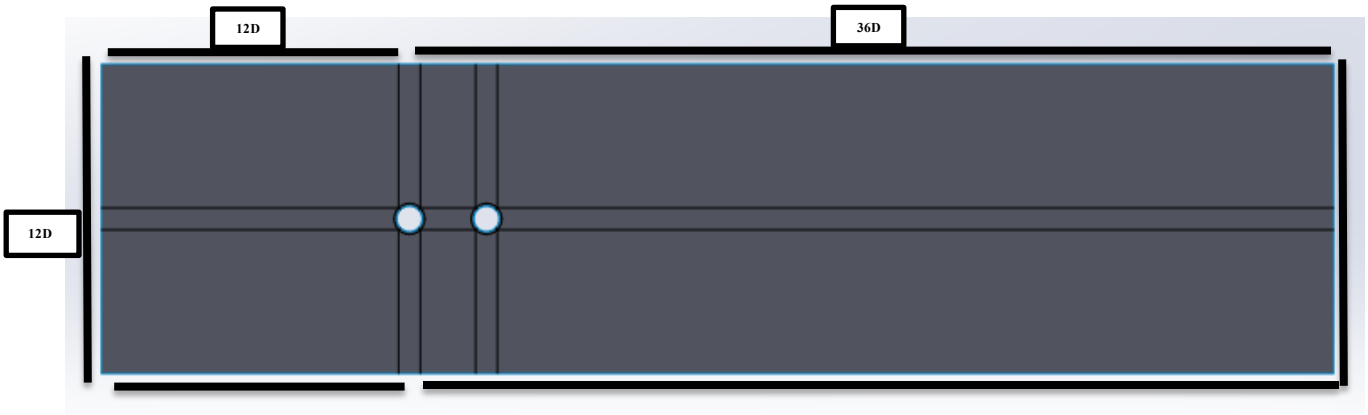
2. Metode

Dalam melakukan penelitian terdapat tujuan yang harus terpenuhi dimana dilakukan penelitian secara studi numerik menggunakan perangkat lunak CFD *software* ANSYS FLUENT yang mana nanti akan menjelaskan fenomena aliran yang terjadi pada sekitar silinder sirkular tersusun tandem, dan terdapat informasi detail secara terstruktur. Dalam dalam metode simulasi numerik ini adalah sebagai berikut:

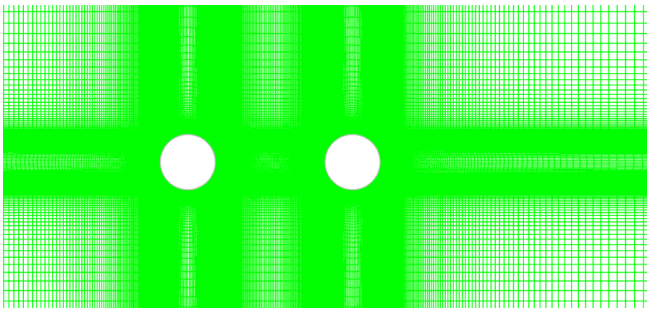
2.1. Pre-processing

Tahapan *Pre-processing* melibatkan permodelan atau pembuatan geometri, penentuan domain, dan pembuatan *meshing*; tahapan pengolahan atau penyelesaian dan tahapan *Post-processing* menghasilkan hasil data kuantitatif. Dimana diameter silinder sirkular (d) 25mm. Dan selanjutnya *meshing* dimana *meshing* merupakan adalah proses membagi domain fluida yang kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang disebut sel atau elemen. Proses ini

memungkinkan komputer menghitung persamaan aliran fluida secara numerik dan kualitas dari *mesh* sangat mempengaruhi akurasi hasil simulasi. Terdapat batasan-batasan dalam penelitian ini adalah *outlet*, *inlet*, silider sirkular, *wall* dan bodi pengganggu. Pada kondisi batas *inlet* menggunakan *velocity inlet* pada *outlet* menggukan *outflow*, pada *upper wall*, *lower wall*, silinder *upstream*, silinder *downstream* dan bodi pengganggu menggunakan *wall*.



Gambar 1. Domain pemodelan dua silinder sirkular tersusun tandem



Gambar 2. *Meshing* dua silinder sirkular tersusun tandem

2.2. Grid Independensi

Grid independency dilakukan pada tahap post processing. Langkah ini dilakukan untuk menentukan pengaruh kualitas *meshing* terhadap hasil data simulasi numerik yang diperoleh dengan membandingkan kerapatan *meshing*. Untuk mengetahui hasil terbaik dari kerapatan *meshing*, perbandingan dilakukan mulai dari kerapatan *mesh* yang renggang (coarse), menengah (medium), rapat (fine), dan sangat rapat (very fine). Semua perbandingan ini dilakukan menggunakan *software* ANSYS FLUENT Workbench 2021 R2. Hasilnya ditampilkan dalam bentuk Y+ dan koefisien gaya hambat (coefficient of *drag*).

Hasil uji grid independensi menunjukkan bahwa mesh D dengan kerapatan meshing 250.050 memberikan hasil terbaik dengan error terkecil baik dari nilai Y^+ maupun dari nilai C_D, sehingga mesh D dipakai untuk melakukan running simulasi numerik untuk seluruh variasi.

Tabel 1. Grid Independensi - Yplus pada 2 silinder sirkular

No.	Nodes	Y+ Maksimum	Y+ Minimum	Y+ Average
Mesh A	101.075	14,156	0,250	7,470
Mesh B	200.996	11,577	0.257	4,918
Mesh C	226.771	9,125	0.141	4.015
Mesh D	250.050	8,138	0,189	3,976
Mesh E	276.719	7,014	0.123	3,701

Tabel 2. Nilai *Coefficient Drag* (C_D)

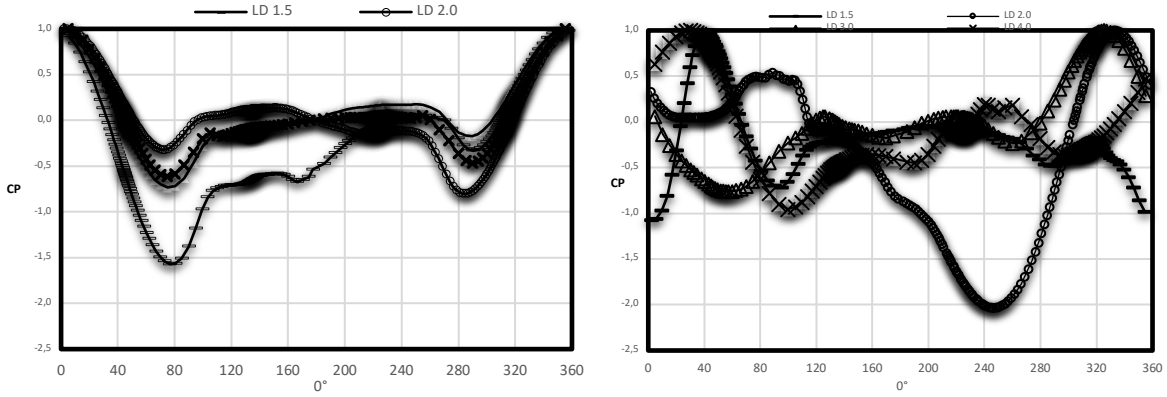
Model	Nodes	*Coefficient of Drag*	
		Sil 1	Sil 2
Mesh A	101.075	1,516268823	0,038759724
Mesh B	200.996	1,388422518	-0,04007631
Mesh C	226.771	1,174935823	-0,53536959
Mesh D	250.050	1,132889979	-0,54932976
Mesh E	276.719	1,30722767	-0,41896705

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan menjelaskan fenomena aliran dan menganalisa karakteristik aliran yang melintasi dua buah silinder sirkular yang akan dijelaskan melalui post processing data kuantitatif berupa koefisien tekanan (Cp), intensitas turbulensi (TI), koefisien *coefficient lift* dan koefisen *coefficient drag pressure*. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran *velocity* pathline (tampilan kontur). Varisasi yang dilakukan adalah variasi jarak L/D antara silinder sirkular *upstream* dan silinder sirkular *downstream* dengan jarak L/D = 1.5; 2.0; 3.0; 4.0; bilangan *Reynolds* yang digunakan yaitu $Re=1x10^5$. Pembahasan yang akan di analisa pada bab ini berupa karakteritik aliran dengan variasi L/D pada silinder sirkular upsteream dan *downstream*. Koefisien tekanan (Cp) akan ditampilkan untuk memprediksi perubahan yang terjadi di sepanjang kontur permukaan silinder, mulai dari titik *stagnasi*, *sparation*, dan transisi laminar ke turbulen. Kemudian koefisen *coefficient drag pressure* (CDP) untuk memprediksi besarnya reduksi *drag* yang dihasilkan. Hasil dari post processing ini (kuantitatif dan kualitatif) akan saling melengkapi untuk menejelaskan fenomena aliran pada silinder sirkular *upstream* dan *downstream*.

3.1 Distribusi Koefisien Tekanan (CP)

Diatas merupakan grafik perbandingan antara silinder *upstream* tanpa bodi penggangu dengan variasi jarak L/D = 1.5; 2.0; 3.0; 4.0; yana mana dapat kita lihat dimana tidak terlihat perbedaan yang sangat signifikan dan pada variasi jarak ini memiliki titik *stagnasi* mendekati 1, ini ada titik *stagnasi* yang dimana kecepatan aliran fluida melambat hingga nol saat menabrak permukaan silinder. Namun ada yang berbeda pada jarak L/D = 1.5 yang dimana aliran mengalami penurunan tekanan yang sangat jauh hingga mencapai -1,56463 pada sudut 76° yang memperlihatkan bahwa pada jarak L/D = 1.5 memiliki kecepatan aliran yang sangat tinggi disekitr silinder berbeda dengan variasi jarak L/D = 2.0; 3.0; 4.0 yang dimana juga memiliki penurunan tekanan yang tajam namun tidak setajam pada variasi jarak L/D = 1.5 dan variasi jarak L/D = 4.0 merupakan penurunan yang paling mendekati nol.



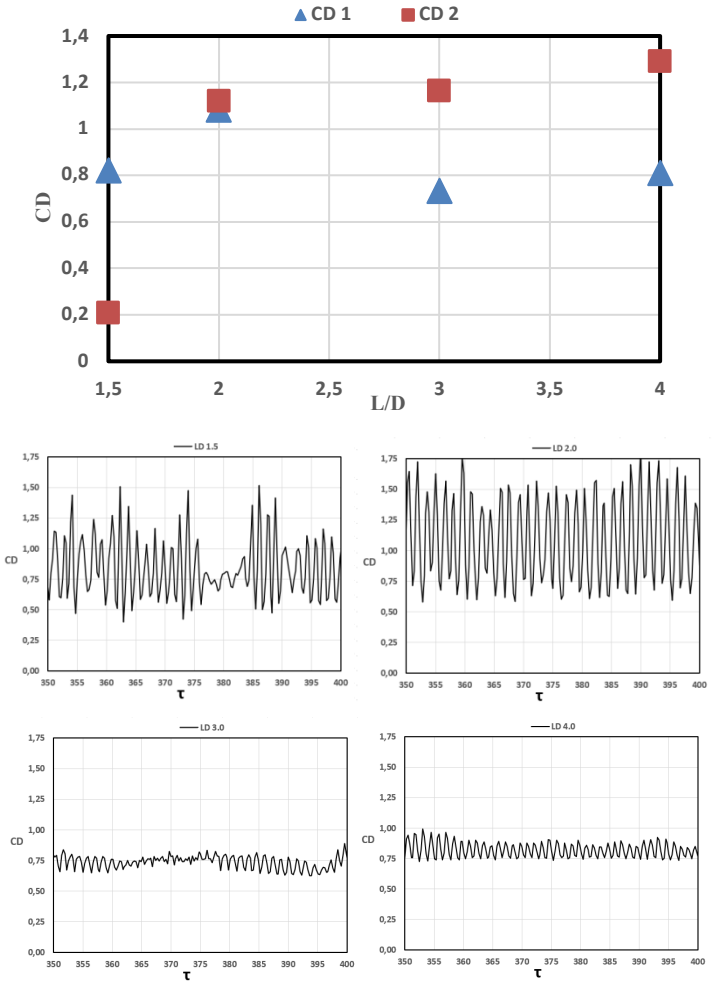
Gambar 3. Distribusi koefisien tekanan (CP) silinder *upstream* dan *downstream* pada dua silinder sirkular tersusun tandem.

Setelah mencapai nilai koefisien tekanan minimum tekanan akan mulai pulih namun pada permukaan melengkung seperti silinder, gradien tekanan yang tidak mengguntungkan dapat menyebabkan *flow* separation dari permukaan. Setelah sparasi terbentuk lah *wake* dibelakang objek. Dan pada variasi L/D = 1.5 menunjukkan tekanan yang sangat rendah dan pemulihan yang sangat buruk dibagian belakang silinder. Hal ini adalah ciri khas dari daerah *wake* yang besar dan terbentuknya sparasi aliran yang terjadi relatif lebih awal. Berbeda dengan silinder *upstream* dengan variasi jarak L/D = 2.0; 3.0, 4.0 yang menunjukkan sparasi aliran yang jauh lebih baik di bagian belakang silinder, dengan koefisien tekanan yang mendekati nol atau bahkan positif. Ini menandakan bahwa aliran cenderung tetap menempel pada permukaan lebih lama. Dan dapat menarik kesimpulan bahwa variasi jarak L/D = 1.5 menunjukkan perbedaan tekanan terbesar antara depan (tinggi) dan belakang (sangat rendah dan negatif), yang mengindikasikan *drag pressure* yang paling tinggi. Ini adalah karakteristik aliran yang didominasi oleh sparasi aliran yang lebih awal dan *wake* yang besar. Dan pada variasi Variasi L/D = 2.0 masih memiliki hambat tekanan yang signifikan, tetapi lebih rendah dari L/D = 1.5. Selanjutnya Variasi L/D 3.0 dan 4.0 menunjukkan pemulihan tekanan yang jauh lebih baik di bagian belakang silinder, dengan koefisien tekanan yang mendekati nol atau bahkan positif di daerah *wake*. Ini mengindikasikan *drag pressure* yang jauh lebih rendah. Untuk L/D 4.0, pemulihan tekanan terbaik menunjukkan hambatan tekanan paling rendah.

Perbandingan distribusi koefisien tekanan silinder *downstream* tanpa bodi pengganggu pada variasi jarak L/D = 1.5; 2.0; 3.0; 4.0. Dapat kita lihat bahwa pada variasi jarak L/D memiliki perbedaan yang sangat signifikan antara variasi jarak L/D. Pada Jarak L/D = 1.5 Nilai CP negatif di bagian depan ($0^{o)}$ mengindikasikan bahwa silinder ini berada di area *wake* dengan tekanan yang lebih rendah dari freestream. Adanya titik-titik impak aliran atau area tekanan tinggi lokal yang kuat ditunjukkan oleh puncak CP positif yang signifikan pada sudut 40°. Ini sangat mungkin disebabkan oleh aliran balik yang terstruktur dari objek di depannya atau silinder yang berinteraksi langsung dengan pusat vorteks. Aliran balik ini menekan permukaan silinder, menciptakan tekanan tinggi sesaat. Aliran di sisi silinder sangat dipercepat, karena gangguan *wake* membuat aliran bergerak dengan kecepatan lokal yang tinggi. Ini ditunjukkan dengan penurunan CP yang signifikan ke nilai negatif yang dalam pada sudut 94°. Meskipun ada simetri umum, detailnya menunjukkan beberapa asimetri yang menandakan dinamika aliran yang kompleks dan tidak sepenuhnya simetris. Selanjut pada variasi L/D = 2.0 yang dimana grafik ini menampilkan karakteristik yang paling ekstrem dan asimetris. Dimulai dari CP positif yang moderat 0,33068 di 0°, CP turun secara bertahap menuju nilai negatif yang sangat ekstrem -2,03164 di sekitar 246°, kemudian melonjak tajam kembali ke nilai positif yang tinggi 1.0 di 333°. Pada sudut 0° mengindikasikan bagian depan silinder menangkap sebagian aliran yang relatif pulih atau ada aliran balik yang memberikan tekanan positif. Dan pada sudut 246° Ini adalah yang paling mencolok pada grafik. Nilai CP −2,03164 sangat tidak biasa untuk distribusi tekanan di sekitar silinder. Ini menunjukkan bahwa pada L/D = 2.0, silinder ini berada pada posisi yang sangat kritis di dalam *wake*, yang dimana aliran berinteraksi langsung dengan inti dari vorteks yang kuat atau *shear layer* yang sangat terakselerasi dari objek di depannya. Aliran lokal di sisi tersebut mencapai kecepatan yang luar biasa tinggi, menyebabkan tekanan yang sangat rendah. Asimetri yang ekstrem ini (satu sisi sangat rendah, sisi lain relatif normal) adalah kunci. Adanya perbedaan drastis antara sisi atas/bawah (misalnya, 120° vs 240°) menunjukkan bahwa silinder mengalami gaya angkat (*lift force*) yang signifikan, selain gaya hambat.

3.2 Distubusi Koefisien Gaya Hambat

Pada grafik di atas menunjukkan nilai koefisien *coefficient drag* (CD 1) sebesar 0,821 pada jarak terdekat ini, dengan L/D = 1,5. Meskipun nilai ini relatif normal untuk sebuah silinder dalam aliran fluida, ada interaksi *wake* yang kuat di belakang silinder *downstream*. Meskipun belum mencapai puncak ekstrem, silinder di atas sudah merasakan efek konfigurasi tandem ini, di mana aliran di belakangnya mulai dipengaruhi oleh keberadaan objek kedua. Kondisi pada L/D = 2.0 adalah titik penting yang sangat penting. CD 1 meningkat pesat hingga 1.084, yang merupakan nilai tertinggi dari semua variasi. Peningkatan besar ini menunjukkan bahwa interaksi *wake* yang sangat berbahaya atau bahkan resonansi antara kedua silinder terjadi pada jarak ini. Tekanan di belakang silinder *upstream* sangat rendah dan gaya hambatnya meningkat secara signifikan karena silinder *downstream* berada pada posisi yang ideal untuk mengganggu pola *vortex* shedding silinder *upstream*.



Gambar 4. Grafik fluktuasi koefisen *drag* pada silinder *upstream*

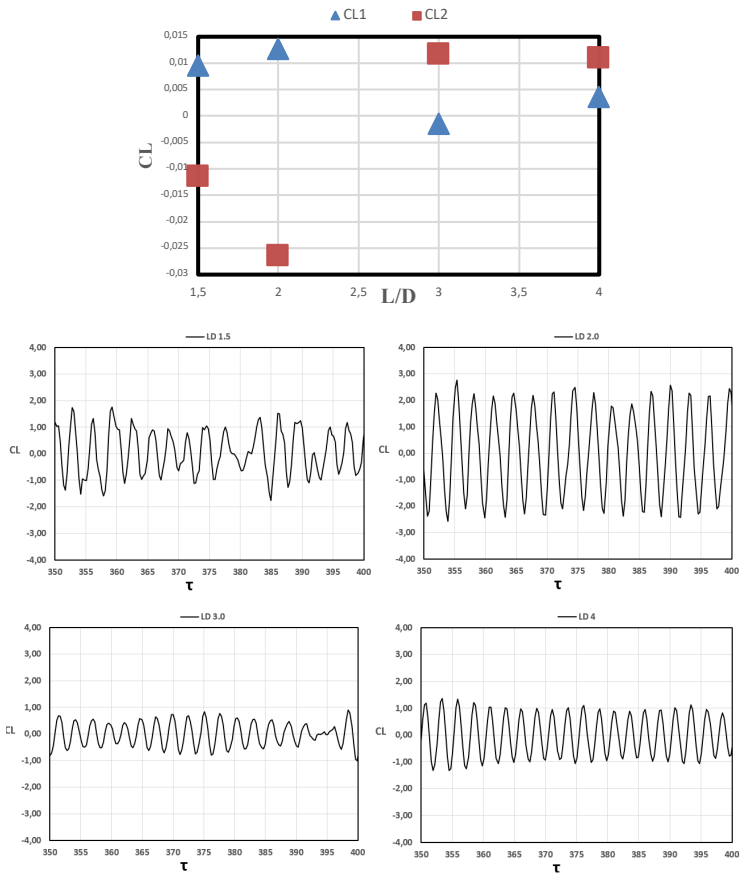
Koefisien *coefficient drag* silinder *upstream* menurun drastis pada L/D = 3.0, mencapai nilai terendah 0.734. Ini menunjukkan bahwa jarak yang lebih besar memungkinkan *wake* silinder *upstream* berkembang dengan lebih stabil dan teratur tanpa gangguan feedback yang signifikan dari silinder *downstream*. Akibatnya, tekanan di belakang silinder *upstream* tidak lagi serendah L/D = 2.0, yang mengurangi gaya hambat yang dialaminya. Dalam susunan tandem, jarak ini dapat dianggap sebagai jarak optimal untuk meminimalkan *drag* pada silinder *upstream*. Nilai CD 1 sedikit meningkat menjadi 0.811 pada L/D = 4.0, mendekati nilai yang dilihat pada L/D = 1.5. Silinder *upstream* mulai berperilaku hampir sama dengan silinder tunggal yang terisolasi pada jarak yang lebih jauh ini. Pengaruh feedback silinder *downstream* terhadap gaya hambat silinder *upstream* menjadi sangat minimal, dan *vortex* shedding silinder *upstream* berlangsung lebih independen. Peningkatan kecil dalam L/D = 3.0 mungkin merupakan bukti bahwa setelah titik optimal L/D = 3.0, efek perlindungan atau interaksi yang mengurangi *drag* silinder *upstream* menjadi tidak lagi dominan, dan CD 1 kembali ke nilai *drag* dasar silinder tunggal dalam aliran.

Dinamika aliran silinder *downstream* sangat berbeda dari silinder *upstream* dalam analisis koefisien *drag* (CD 2) pada berbagai variasi L/D. Silinder *downstream* mengalami gaya hambat yang sangat rendah, hanya 0.209, pada L/D = 1.5. Efek "perlindungan" yang kuat dari silinder *upstream* menyebabkan fenomena ini terjadi, di mana silinder *downstream* sepenuhnya berada dalam *wake* dengan kecepatan aliran yang berkurang dan tekanan yang tidak terlalu rendah di belakangnya. Namun, ketika jarak meningkat menjadi L/D = 2.0, nilai CD 2 meningkat secara signifikan hingga 1.1207. Lonjakan ini menunjukkan bahwa efek perlindungan telah berkurang secara signifikan; silinder *downstream* mulai berinteraksi secara intens dengan pola *vortex* shedding yang tidak stabil dari silinder *upstream*, yang menghasilkan turbulensi tinggi yang secara signifikan meningkatkan gaya hambatnya. Pada L/D = 3.0, peningkatan ini berlanjut, dengan CD 2 sedikit naik menjadi 1.164. Meskipun *vortex* shedding dari silinder *upstream*

mungkin menjadi lebih teratur, silinder *downstream* tetap dalam aliran yang sangat turbulen, yang menyebabkan pemisahan aliran dan tekanan yang lebih rendah di belakangnya. Pada jarak ini, silinder *downstream* mencapai puncak gaya hambat pada L/D = 4.0 dan nilai CD 2 sebesar 1.2899.

3.3 Disturbusi Koefisien Gaya Angkat

Pada CL1 L/D = 1.5 menunjukkan osilasi CL yang cukup besar dan tidak teratur (lebih kompleks) dibandingkan L/D=2.0. Pusat osilasi terlihat berada di dekat nol, konsisten dengan nilai CL1 yang sangat kecil dan positif. Fluktuasi CL mencapai sekitar ±1.5 hingga ±2.0, dengan beberapa puncak ekstrem. Osilasi CL menunjukkan amplitudo terbesar di semua grafik pada L/D = 2.0. Ini mencapai sekitar ±2.0 hingga ±2.5, dan osilasi terlihat lebih teratur daripada pada L/D = 1.5. Nilai rata-rata, atau pusat osilasi, sangat dekat dengan nol dan sedikit di atas nol; ini sangat sesuai dengan nilai CL1 yang kecil dan positif (0,01268). Variasi L/D = 3.0 menunjukkan osilasi CL dengan amplitudo yang lebih kecil daripada L/D = 1,5 dan L/D = 2,0. Variasi CL berkisar antara ±0,8 dan ±1,0. Nilai CL1 negatif (-0,0015) menarik perhatian, menunjukkan bahwa rata-rata *lift* turun sedikit. Meskipun pergeseran kecil ini dari nol pada grafik sulit dilihat secara visual, osilasi yang berpusat di sekitar nol (sedikit di bawah nol) konsisten dengan nilai CL1. Pada L/D = 4.0, ini juga menunjukkan osilasi CL dengan amplitudo yang relatif kecil, sebanding dengan L/D = 3,0, dan mungkin sedikit lebih besar. Fluktuasi CL berkisar antara ±0.8 hingga ±1.2. Nilai CL1 positif (0,00357) menunjukkan *lift* rata-rata sedikit ke atas. Seperti pada L/D = 3,0, pusat osilasi secara visual tampak sangat dekat dengan nol, tetapi nilai positif kecil ini konsisten dengan grafik yang berpusat.

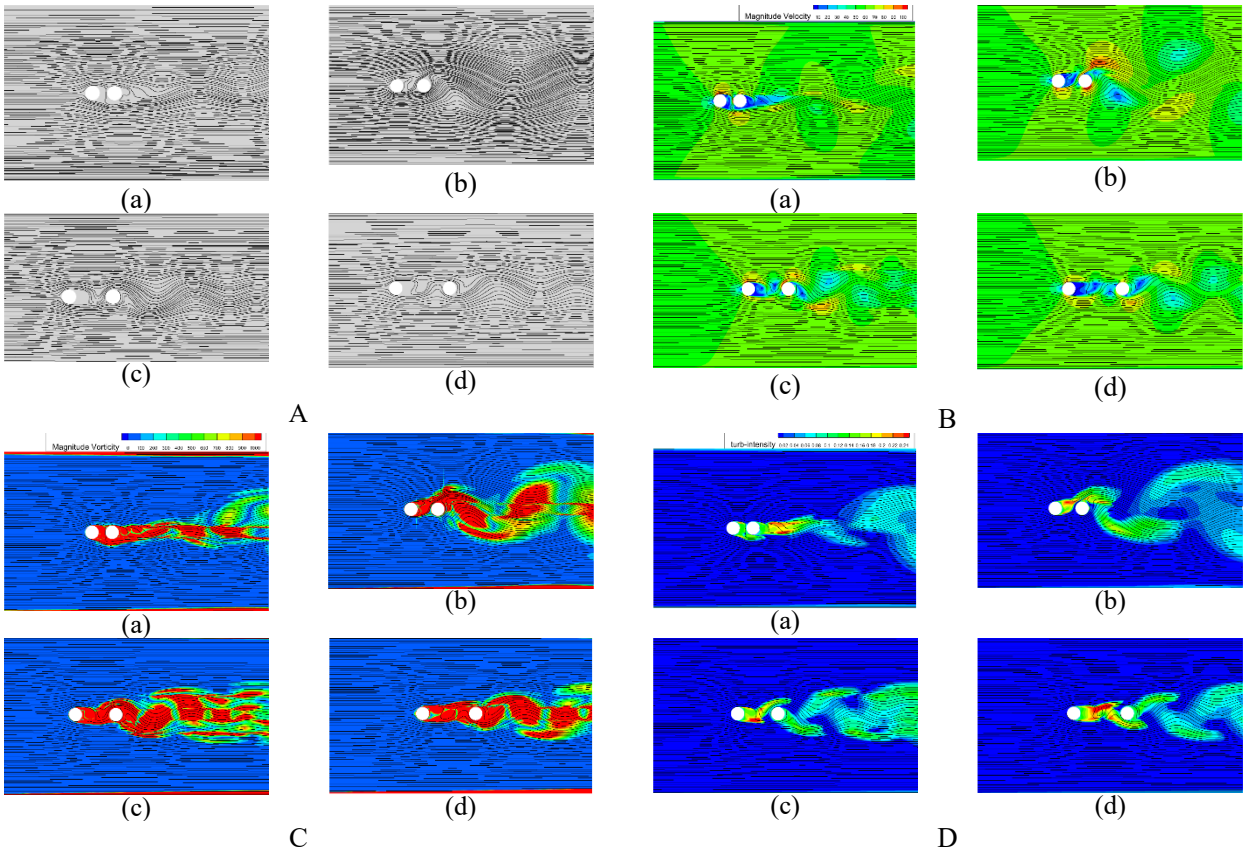


Gambar 5. Grafik fluktuasi koefisen *lift* pada silinder *upstream*

Nilai CL rata-rata negatif pada L/D 1,5 dan L/D 2,0. Ini menunjukkan adanya gaya *lift* kecil ke bawah rata-rata. Hal ini disebabkan oleh distribusi tekanan asimetris di *wake* atau pola *vortex* shedding tertentu yang cenderung menekan silinder ke bawah. Nilai CL rata-rata positif pada L/D 3,0 dan L/D 4,0. Perubahan tanda ini menunjukkan gaya *lift* rata-rata yang kecil ke atas. Perubahan ini menunjukkan bahwa pola interaksi *wake* dan distribusi tekanan di sekitar silinder *downstream* berubah seiring dengan jarak (L/D). Ini mungkin karena *wake* mulai pulih atau menyebar, yang

menyebabkan efek *lift* rata-rata yang berlawanan. Grafik dengan L/D=1.5 dan L/D=2.0 menunjukkan dinamika yang kompleks, tetapi grafik dengan L/D=3.0 dan L/D=4.0 terlihat sedikit lebih teratur dalam osilasinya. Keteraturan ini mungkin menunjukkan *vortex* shedding yang lebih stabil pada jarak yang lebih jauh. Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan dinamika kompleks gaya *lift* pada silinder *downstream* yang berada di dalam *wake* objek *upstream*. Perubahan L/D secara signifikan memengaruhi amplitudo fluktuasi CL dan, yang lebih menarik, arah rata-rata gaya *lift* (dari negatif ke positif), yang mencerminkan perkembangan *wake* dan interaksinya dengan silinder *downstream*.

3.4 Kontur Aliran *Velocity* Pathline, *Velocity* Magnitude, Vorticity Magnitude, Turbulensi Intensitas



Gambar 6. Kontur Aliran *Velocity Pathline* (A), *Velocity Magnitude* (B), *Vorticity Magnitude* (C), *Turbulent Intensity* (D) Pada Variasi L/D = 1.5 (a); 2.0 (b); 3.0 (c); 4.0 (d)

4. Kesimpulan

Hasil simulasi numerik terhadap dua silinder sirkular tersusun tandem yang di uji pada bilangan Re = $1x10^5$ terhadap 4 variasi jarak L/D, dengan karakteristik aliran bersifat *Unsteady-Rans* menggunakan model *viscous SST k-ω* dapat disimpulkan bahwa: Distribusi koefisien tekanan (CP) pada silinder *upstream* variasi jarak L/D = 1,5 menunjukkan tekanan yang sangat rendah dibandingkan dengan variasi jarak LD = 2.0; 3.0; 4.0; dimana perbedaan tekanan terbesar antara depan (tinggi) dan belakang (sangat rendah dan negatif), yang mengindikasikan *drag pressure* yang paling tinggi. Ini adalah karakteristik aliran yang didominasi oleh sparasi aliran yang lebih awal dan *wake* yang besar. Variasi L/D = 3.0 menunjukkan nilai CD (0,734) terendah pada silinder *upstream* diantara semua variasi jarak L/D yang merupakan nilai reduksi yang optimal. Pada silinder *downstream* nilai CD (0,209) terendah pada variasi jarak L/D = 1.5.

DAFTAR PUSTAKA

1 T. M. B. Pribadi and W. A. Widodo, "Studi Numerik Aliran Melintas Airfoil Simetris," JURNAL TEKNIK ITS Vol. 12, No.3, 2023.

2 A. Manuels, B. Cut, and Z. Arif, "Phenomenon *coefficient Flow* Through Four Circular Cylinders Arranged In-Line *Square*," JURUTERA - J. Umum Tek. Terap., vol. 12, no. 01, pp. 57–65, 2025, doi: 10.55377/jurutera.v12i01.11828.

3 Helmizar. Experimental study *coefficient* the comparison *coefficient* the *flow* around two circular and ellipse cylinder arranged in tandem position with their interaction on the flat *wall*. 2011;

4 Rina and R. Sumiati, "*Drag* Reduction *coefficient* Circular Cylinder using *Square* Disturbance *Body* at 600 Angle by 2D Numerical Simulation Unsteady-RANS," Nov. 21, 2017. doi: 10.31227/osf.io/4bp9d.

5 P. F. Zhang, J. J. Wang, and L. X. Huang, "Numerical simulation *coefficient flow* around cylinder with an *upstream* rod in tandem at low Reynolds numbers," Applied Ocean Research, vol. 28, no. 3, pp. 183–192, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.apor.2006.08.003.

6 N. I. Riani, A. Lostari, M. Ulum, and A. Hakim, "The Effect *coefficient* Adding a *Square* Disturbance on the *Flow* Characteristics across Circular Cylinders Arranged in Tandem," JMPM (Jurnal Material dan Proses Manufaktur), vol. 8, no. 1, pp. 45–53, Jun. 2024, doi: 10.18196/jmpm.v8i1.21898.

7 A. M. Makka and W. A. Widodo, "Studi Eksperimen Aliran Melintasi Silinder Sirkular," JURNAL TEKNIK ITS Vol. 1, No. 1, 2012.

8 K. W. Nirwana, "Studi Numerik Pengaruh Bodi Pengganggu," JURNAL TEKNIK ITS, vol. 11, 2022. H. M.

9 Wawan Aries Widodo, Triyogi Yuwono, "Studi Komparasi Simulasi Numerik Aliran Melintasi Dua Silinder Teriris (Tipe I-65o) dan Dua Silinder Sirkular Tersusun Tandem (L/D = 1,5) akibat Pengaruh Dinding Datar Pada Berbagai Jarak Gap (G/D)," J. Tek. Mesin, vol. 10, no. September 2016, pp. 90–98, 2010, [Online]. Available: http://personal.its.ac.id/files/pub/3328-wawanaries-me-3_JTM09-54_90-98_Edisi Mei 2010.pdf

10 D. V. Wijanarko, "Studi Numerik *Pressure* Drop Pada Silinder Tandem Dengan Penambahan Splitter Plate Dan *Vortex* Generator Di Penampang Sempit," Otopro, vol. 17, no. 1, pp. 15–20, 2021, doi: 10.26740/otopro.v17n1.p15-20.