



Numerical Simulation of Two Circular Cylinders Arranged In-line in a Narrow Channel with a Reynolds Number of 1.0×10^5

Zulfikar¹, Banta Cut*², Suheri³

^{1,2,3}) Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science & Technology, Universitas Samudra, Langsa 24416, Indonesia

*)Corresponding Author

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Dikirim 09 Desember 2025
Direvisi dari 14 Mei 2026
Diterima 04 Juni 2026
Dipublikasi 30 Juni 2026

Keyword's:

Silinder Sirkular;
bilangan reynolds;
longitudinal;
in-line;
k- ω SST.

DOI:

doi.org/10.55377/jurutera.v13i01.13616

ABSTRACT

The flow of fluid around the circular cylinder (bluff body) is a fundamental problem in engineering with a wide range of applications, such as in offshore buffer pipes and chimneys. A common phenomenon is the emergence of drag forces, elevator forces, and vortex shedding. This study aims to reduce drag and lift forces in the arrangement of two circular cylinders arranged in line in narrow channels. The variation in the distance between cylinders was tested at $T/D = 2.0, 2.5, 3.0$, and 4.0 ratios (cylinder diameter $D = 25$ mm). Reduction efforts are made by placing the disruptor body ($d=4$) at an angle ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$) around the perimeter of the array. Numerical simulation was performed using the 2D unsteady RANS method with Ansys Student Fluent® 2021 software and the turbulence model ($K-\omega$ SST) at Reynolds numbers ($Re = 1.0 \times 10^5$) in cross-sectional channels ($H = 300$ mm, $L = 150$ mm). The results showed that at the $T/D = 4.0$ ratio, the wake interaction between the two cylinders was no longer dominant. The addition of a disruptor body at an angle ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$) has also been shown to be very effective in reducing the drag coefficient (CD) of both cylinders. The CD value in cylinder 1 without a disruptor body is 0.762 and with a disruptor body reaches 1.148 (reduction: [percentage with disruptor body Cyl 1]), while in cylinder 2, CD without a disruptor body is 0.762 and with a disruptor body, it reaches 1.148 (reduction: [percentage with disruptor body Cyl 2]). There are contradictions in the results data. The reduced CD values (1.148 and 1.148) were actually higher than the CD values without the disruptor body of 0.762 and 0.762, although the text states that there is a reduction and that it is very effective.

ABSTRAK

Aliran fluida di sekitar silinder sirkular (bluff body) merupakan masalah fundamental dalam teknik dengan berbagai aplikasi, seperti pada pipa penyangga lepas pantai dan cerobong asap. Fenomena yang umum terjadi adalah munculnya gaya drag, gaya lift, dan pelepasan pusaran (vortex shedding). Penelitian ini bertujuan untuk mereduksi gaya drag dan lift pada susunan dua silinder sirkular yang tersusun in-line dalam saluran sempit. Variasi jarak antar-silinder diuji pada rasio $T/D = 2.0; 2.5; 3.0; 4.0$ (diameter silinder $D=25$ mm). Upaya reduksi dilakukan dengan menempatkan bodi pengganggu ($d=4$) pada sudut ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$) di sekeliling susunan. Simulasi numerik dilakukan menggunakan metode 2D Unsteady-RANS dengan perangkat lunak FLUENT® 2021 dan model turbulensi ($K-\omega$ SST), pada bilangan Reynolds ($Re = 1 \times 10^5$) dalam saluran berpenampang ($H=300$ mm $L=150$ mm). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada rasio $T/D = 4.0$, interaksi wake di antara kedua silinder tidak lagi dominan. Penambahan bodi pengganggu pada sudut ($0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$) juga terbukti sangat efektif dalam mengurangi koefisien drag (C_D) kedua silinder. Nilai C_D pada silinder 1 tanpa bodi pengganggu adalah 0,7626 dan dengan bodi pengganggu mencapai 1,1482 (reduksi: [Persentase Dengan Bodi Pengganggu S1]), sementara pada silinder 2, C_D tanpa bodi pengganggu adalah 0,7625 dan dengan bodi pengganggu mencapai 1,1483 (reduksi: [Persentase Dengan Bodi Pengganggu S2]). Terdapat kontradiksi dalam data hasil. Nilai C_D yang direduksi (1,1482 dan 1,1483) justru lebih tinggi daripada nilai C_D tanpa bodi pengganggu 0,7626 dan 0,7625, meskipun teks menyatakan terjadi reduksi dan sangat efektif.

© 2026 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

1. Pendahuluan

Aliran fluida melintasi benda tumpul seperti silinder sirkular merupakan salah satu fenomena fundamental dalam mekanika fluida yang memiliki aplikasi luas dalam berbagai bidang teknik. Fenomena ini sangat penting dalam desain struktur offshore, sistem perpipaan, heat exchanger, serta berbagai komponen teknik lainnya. Ketika dua atau lebih silinder ditempatkan secara berurutan (*in-line* arrangement), kompleksitas aliran meningkat secara signifikan akibat interaksi antara wake yang dihasilkan oleh silinder hulu dengan silinder hilir (1). Dalam kondisi nyata, aliran melintasi silinder sering kali terjadi dalam ruang terbatas atau saluran sempit, yang menambah kompleksitas fenomena aliran. Keberadaan dinding saluran menyebabkan efek blockage yang mengubah karakteristik aliran, distribusi tekanan, dan pola pelepasan vortex dibandingkan dengan aliran di ruang tak terbatas (2). Selain itu, kehadiran bodi pengganggu (*disturbance body*) di sekitar silinder dapat mengubah secara dramatis struktur aliran, pola wake, dan karakteristik perpindahan panas serta momentum.

Studi tentang aliran melintasi silinder tersusun *in-line* telah menjadi fokus penelitian yang intensif selama beberapa dekade terakhir (3) melakukan tinjauan komprehensif tentang aliran melintasi dua silinder sirkular dan mengidentifikasi berbagai pola aliran yang bergantung pada jarak antar silinder (spacing ratio) dan bilangan Reynolds. Pada jarak yang sangat dekat, kedua silinder berperilaku seperti satu benda tumpul, sedangkan pada jarak yang lebih jauh, silinder hilir mengalami aliran yang sangat tidak stabil akibat wake dari silinder hulu. Penelitian eksperimental yang dilakukan oleh (4) (5) menunjukkan bahwa karakteristik aliran dan gaya aerodinamika pada silinder hilir sangat dipengaruhi oleh rasio jarak L/D (dimana L adalah jarak antar pusat silinder dan D adalah diameter silinder). Pada rasio $L/D < 3.7$, tidak terjadi pelepasan vortex dari silinder hulu, sedangkan pada $L/D > 3.7$, terbentuk pola pelepasan vortex yang kompleks dengan frekuensi yang berbeda antara kedua silinder. Pengembangan teknologi komputasi telah memungkinkan analisis yang lebih mendalam melalui simulasi numerik computational fluid dynamics (CFD) (6) (7)(8) menggunakan metode elemen untuk menganalisis aliran laminar melintasi dua silinder *in-line* dan berhasil mengidentifikasi berbagai rezim aliran berdasarkan rasio jarak dan bilangan Reynolds. Simulasi numerik memberikan keunggulan dalam hal kemampuan untuk menganalisis detail struktur aliran yang sulit diamati secara eksperimental.

Efek saluran sempit (channel confinement) pada aliran melintasi silinder telah dipelajari oleh (9) (8), yang menunjukkan bahwa rasio blockage (rasio diameter silinder terhadap lebar saluran) memiliki pengaruh signifikan terhadap koefisien drag, lift, dan frekuensi pelepasan vortex. Semakin tinggi rasio blockage, semakin besar pengaruh dinding saluran terhadap karakteristik aliran. Kehadiran bodi pengganggu dalam aliran melintasi silinder menambah dimensi kompleksitas yang baru. (10) meneliti pengaruh pelat splitter pada wake silinder dan menemukan bahwa posisi dan panjang pelat dapat mengubah secara drastis pola pelepasan vortex dan mengurangi gaya drag yang bekerja pada silinder. Penelitian ini membuka peluang untuk pengendalian aliran (flow control) yang dapat diaplikasikan dalam berbagai sistem teknik. Studi numerik yang dilakukan oleh (11) menggunakan metode stabilitas linier untuk menganalisis transisi dari aliran steady ke unsteady pada konfigurasi dua silinder *in-line*. Penelitian ini mengungkap mekanisme ketidakstabilan yang berbeda untuk berbagai rasio jarak, memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang dinamika aliran.

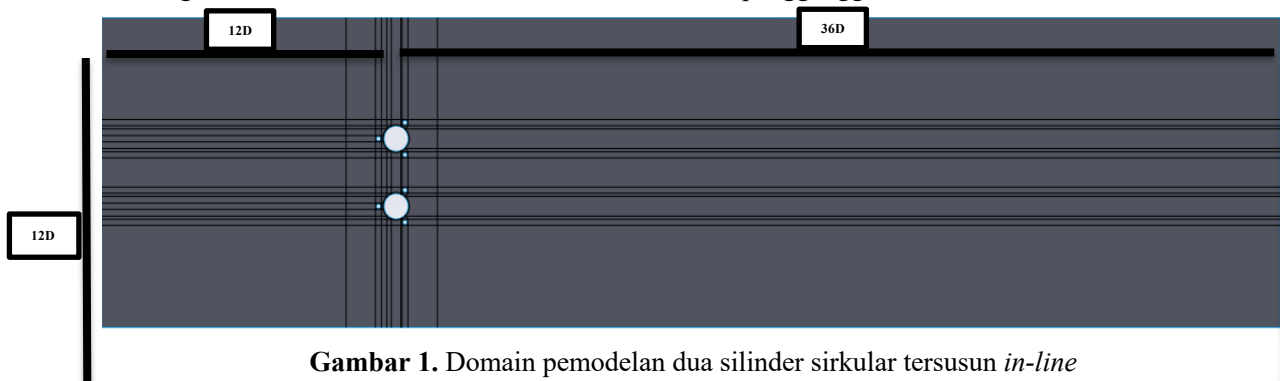
Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa rasio jarak *longitudinal* (L/D) antara dua silinder sirkular yang disusun secara berurutan (*in-line*) adalah faktor penentu utama fluktuasi gaya hambat yang dialami oleh silinder-silinder tersebut (12)(3)(13). Dalam sebuah studi spesifik, variasi jarak L/D sebesar 3,0, 4,0, dan 5,0 diselidiki pada bilangan Reynolds yang didasarkan pada diameter hidraulik $Re_{DH} = 6,5 \times 10^4$ (14). Hasil studi tersebut mengungkapkan bahwa variasi jarak $L/D = 3,0$ menghasilkan nilai koefisien gaya hambat tertinggi, yaitu 1,006, dibandingkan dengan variasi jarak lainnya. Nilai maksimum ini mengindikasikan bahwa ketika jarak antara kedua silinder sangat dekat $L/D = 3,0$, konfigurasi tersebut menimbulkan gaya hambat dan daerah bangun (*wake*) yang paling besar (15)(12). Dari penelitian terdahulu muncul ide untuk melakukan penelitian lebih lanjut lagi yaitu simulasi numerik dua silinder sirkular tersusun *in-line* dalam saluran sempit pada bilangan Reynolds 1×10^5 dengan variasi jarak $T/D = 2.0; 2.5; 3.0; 4.0$.

2. Metode

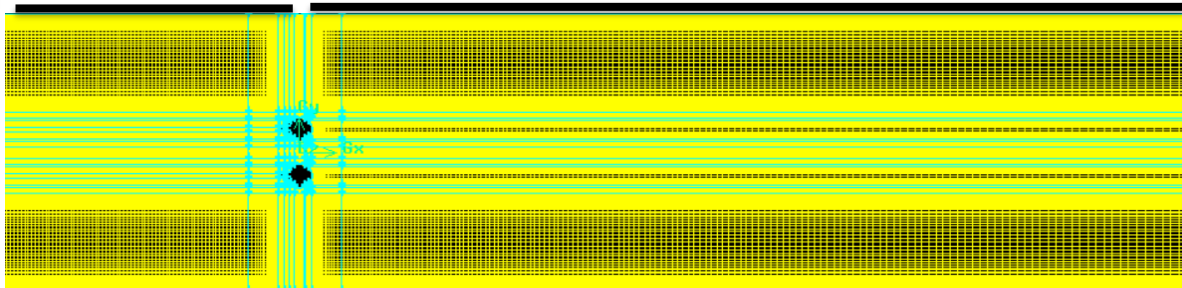
Metode Penelitian yang digunakan untuk tugas akhir ini yaitu metode simulasi numerik atau CFD (Computational Fluid Dynamics). Terdapat tiga tahapan dalam simulasi numerik yaitu pre-processing, processing dan post-processing. Pre-processing adalah tahapan pemodelan permasalahan. Processing adalah tahap perhitungan secara iterasi untuk mendapatkan penyelesaian. Post processing adalah tahap pengambilan data hasil penyelesaian berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Tahapan-tahapan dalam simulasi numerik dijalankan dengan menggunakan tiga software yaitu Solidworks 2021, Gambit versi 2.4.6, dan Fluent versi 2021R2. Proses pre-processing terdiri dari pembuatan domain simulasi menggunakan Solidworks 2021. Data geometri (.STEP) yang dihasilkan dari pembuatan domain digunakan untuk meshing dan penetapan kondisi batas pada domain simulasi menggunakan ANSYS Gambit versi 2.4.6. Selanjutnya, data mesh.msh yang dihasilkan oleh ANSYS Gambit digunakan untuk tahap perhitungan.

2.1. Pre-processing

Permodelan atau pembuatan geometri, penentuan domain, dan pembuatan meshing merupakan bagian dari tahapan pre-processing, dan tahapan proses atau penyelesaian menghasilkan hasil data kuantitatif. Dimana diameter silinder sirkular (d) adalah 25 milimeter, kemudian meshing. Meshing adalah proses membagi domain fluida yang kontinu menjadi elemen kecil yang disebut sel atau elemen. Proses ini memungkinkan komputer menghitung persamaan aliran fluida secara numerik, dan kualitas mesh sangat mempengaruhi akurasi hasil simulasi. Dalam penelitian ini, batasannya terdiri dari outlet, inlet, silinder sirkular, dinding, dan badan pengganggu. Dalam kondisi ini, batas inlet menggunakan kecepatan inlet untuk outlet menggunakan outflow; Batas inlet juga menggunakan dinding untuk dinding atas, dinding bawah, silinder atas, silinder bawah, dan badan pengganggu.



Gambar 1. Domain pemodelan dua silinder sirkular tersusun *in-line*



Gambar 2. Meshing dua silinder sirkular tersusun *in-line*

2.2. Processing

Saat menggunakan perangkat lunak *FLUENT Workbench* 2021 R2, kondisi yang ditetapkan pada tahap pre-processing diproses (iterasi) untuk mendapatkan data dari aliran yang diinginkan. Dalam penelitian ini, model turbulensi aliran *viscous k- ω SST* digunakan. Kecepatan aliran 58,8 m/s, nilai intensitas turbulensi 0,0379, dan diameter pipa hidrolik 300 mm. Simulasi ini menggunakan penggabungan kecepatan tekanan dengan skema SIMPLEC, yang menggunakan diskretisasi spasial khusus tekanan menggunakan order kedua. Dan akan menggunakan upwin urutan kedua untuk momentum, turbulen energi kinetik, dan tingkat disipasi tertentu. Bentuk

transien menggunakan order implisit kedua. Kriteria konvergen diatur dengan nilai 10-6. Ukuran langkah waktu yang digunakan untuk aliran melalui silinder sirkular adalah 0,0005.

Post-Processing

Pada tahap *post-processing*, uji grid independensi dilakukan. Untuk mengetahui bagaimana kualitas meshing berdampak pada hasil simulasi numerik yang dihasilkan, perbandingan kerapatan mesh dilakukan dari yang renggang (*coarse*), menengah (*medium*), rapat (*fine*), dan sangat rapat (*very fine*). Semua perbandingan ini dilakukan menggunakan program ANSYS FLUENT Workbench 2021 R2. Hasilnya adalah bentuk Y^+ dan koefisien drag, juga dikenal sebagai koefisien gaya hambat.

Tabel 1. Grid Independensi - Y^+ pada 2 silinder sirkular

Tipe mesh	nodes	Maximum y^+	Minimum y^+	Average y^+
Mesh A	80900	17.87224	0.7076834	10.80194
Mesh B	183300	12.6921	0.5012363	6.857921
Mesh C	223700	6.827033	0.3616331	4.405073
Mesh D	264300	4.321934	0.2465675	2.808047
Mesh E	301000	2.856312	0.02848031	1.913207

Tabel 2. Nilai *coefficient coefficient Drag*

Tipe mesh	Nodes	Koefisien of Drag	
		Sil 1	Sil 2
Mesh A	80900	1,3084	1,2682
Mesh B	183300	1,1137	1,1577
Mesh C	223700	1,0713	1,1230
Mesh D	264300	1,1454	1,0458
Mesh E	301000	1,0693	-0,5624

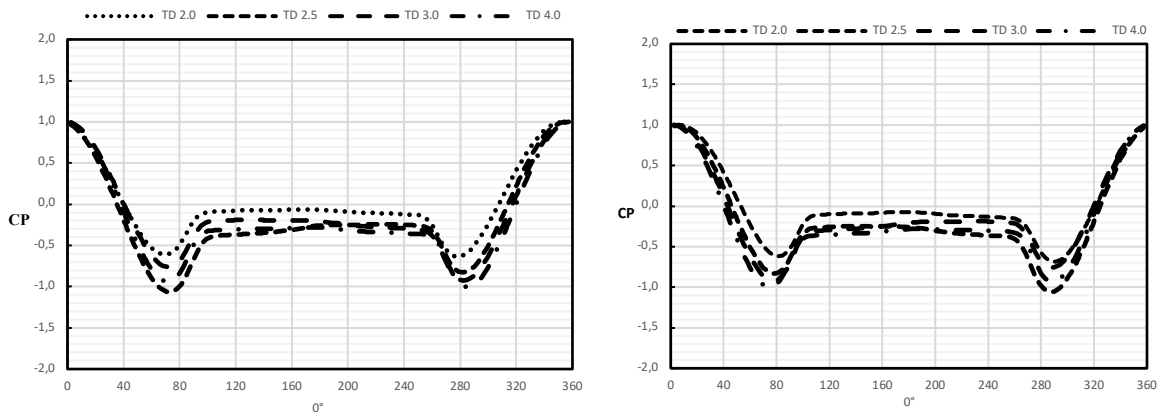
3. Hasil dan Pembahasan

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 (C_p), intensitas turbulensi (TI), koefisien *coefficient lift* dan koefisien *coefficient drag pressure*. Sedangkan data kualitatif berupa visualisasi aliran *velocity* pathline (tampilan kontur). Variasi yang dilakukan adalah variasi jarak L/D antara silinder sirkular *atas* dan silinder sirkular bawah dengan jarak $L/D = 1.5; 2.0; 3.0; 4.0$; bilangan *Reynolds* yang digunakan yaitu $Re=1 \times 10^5$. Pembahasan yang akan di analisa pada bab ini berupa karakteristik aliran dengan variasi L/D pada silinder sirkular upstream dan bawah. Koefisien tekanan (C_p) akan ditampilkan untuk memprediksi perubahan yang terjadi di sepanjang kontur permukaan silinder, mulai dari titik *stagnasi*, *sparation*, dan transisi laminar ke turbulen. Kemudian koefisien *coefficient drag pressure* (C_{DP}) untuk memprediksi besarnya reduksi *drag* yang dihasilkan. Hasil dari post processing ini (kuantitatif dan kualitatif) akan saling melengkapi untuk menjelaskan fenomena aliran pada silinder sirkular *atas* dan bawah.

3.1 Distribusi Koefisien Tekanan (C_p)

Gambar 3 silinder atas distribusi C_p menunjukkan pola yang simetris, mengindikasikan aliran yang relatif stabil dan teratur dalam saluran sempit. Nilai C_p dimulai sekitar 1.0 pada 0° dan 360° , menurun drastis, mencapai nilai negatif minimum, kemudian meningkat kembali menuju 1.0. Ini adalah karakteristik tipikal aliran di sekitar objek silinder atau dalam saluran dengan perubahan penampang. Terdapat zona tekanan rendah (C_p negatif) yang signifikan, yang puncaknya terjadi sekitar 60° hingga 80° dan kembali sekitar 280° hingga 300° . Ini menunjukkan percepatan aliran di area tersebut, yang sering terjadi pada bagian lengkung atau konstriksi dalam saluran. Zona tekanan tinggi (C_p positif) terlihat pada awal dan akhir rentang sudut (0° hingga sekitar 30° dan 330° hingga 360°), dengan nilai C_p mendekati 1.0. Ini umumnya mewakili titik stagnasi atau area di mana aliran melambat secara signifikan. Dengan

peningkatan rasio T/D (dari 2.0 ke 4.0), nilai C_p negatif maksimum cenderung sedikit berkurang (mendekati nol atau kurang negatif). Misalnya, untuk T/D 2.0, C_p negatif mencapai sekitar -1.0, sedangkan untuk T/D 4.0, nilai C_p negatif maksimumnya sekitar -0.7. Ini menunjukkan bahwa saluran yang lebih panjang (T/D lebih tinggi) memiliki efek yang sedikit meredam percepatan aliran dan penurunan tekanan di area sempit. Terlihat bahwa kurva untuk T/D 3.0 dan 4.0 memiliki profil C_p negatif yang sedikit lebih datar di bagian tengah (sekitar 120° hingga 240°) dibandingkan dengan T/D 2.0 dan 2.5. Ini mengindikasikan bahwa pada saluran yang lebih panjang, aliran mungkin memiliki kesempatan lebih besar untuk "pulih" atau mendistribusikan tekanan secara lebih merata. Titik di mana C_p mencapai nilai negatif minimum tampak sedikit bergeser seiring dengan perubahan T/D. Untuk T/D 2.0, titik minimum lebih tajam dan terletak sedikit lebih dekat ke $60^\circ/300^\circ$. Sebaliknya, untuk T/D 4.0, titik minimum sedikit lebih tumpul dan mungkin sedikit bergeser ke arah sudut yang lebih besar.



Gambar 3 Distribusi koefisien tekanan (C_p) silinder atas dan bawah pada dua silinder sirkular tersusun *in-line*

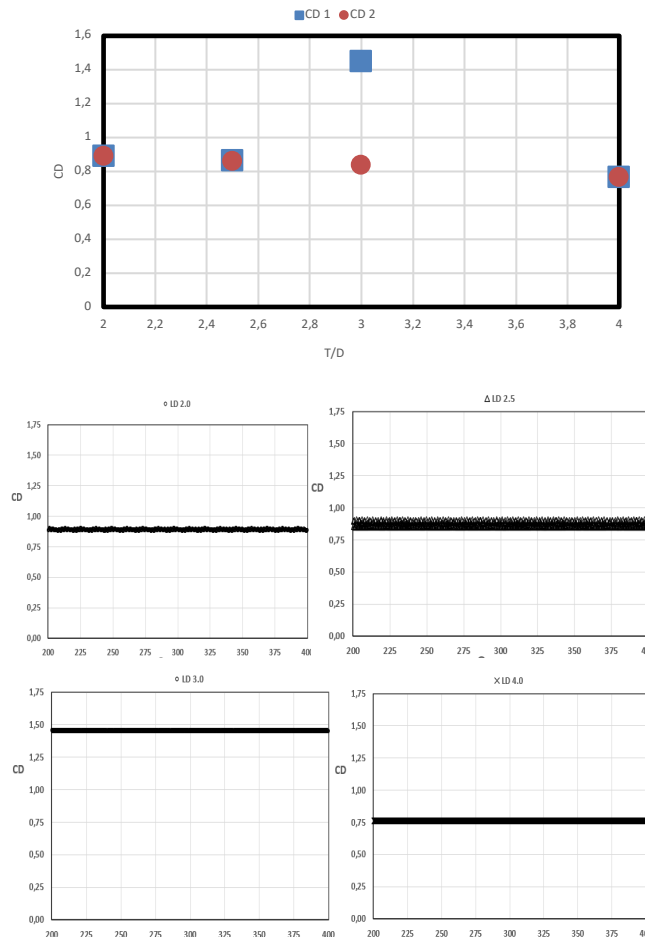
Gambar 3 silinder bawah grafik C_p di atas. Kurva untuk T/D 2.0 (garis putus-putus hitam) secara konsisten menunjukkan nilai C_p minimum yang paling mendekati nol (yaitu, tekanan kurang negatif atau relatif lebih tinggi) dibandingkan dengan rasio T/D lainnya. Ini mengindikasikan bahwa untuk silinder yang lebih pendek (T/D 2.0), percepatan aliran di sisi silinder mungkin tidak seintens pada silinder yang lebih panjang, atau efek interaksi dengan silinder atas dan dinding saluran lebih dominan dalam membatasi penurunan tekanan. Seiring peningkatan T/D (dari 2.5, 3.0, hingga 4.0), nilai C_p minimum menjadi semakin negatif (tekanan lebih rendah). Secara spesifik, T/D 2.5 dan T/D 4.0 menunjukkan penurunan tekanan yang paling signifikan di sekitar 70° - 80° dan 280° - 290° , dengan T/D 4.0 mencapai nilai C_p paling rendah (sekitar -1.0 pada sisi kiri dan bahkan mendekati -1.2 pada sisi kanan). Ini menyiratkan bahwa pada silinder yang lebih panjang, aliran memiliki kesempatan untuk berakselerasi lebih kuat di sekitar permukaan silinder sebelum memasuki daerah pemisahan, menghasilkan tekanan yang lebih rendah. Antara sekitar 100° hingga 260° , terdapat "dataran" atau area dengan perubahan C_p yang relatif kecil. Pada daerah ini, C_p umumnya negatif, menunjukkan adanya daerah tekanan rendah di belakang silinder, yang merupakan ciri khas dari daerah wake (aliran balik).

Pada daerah ini, T/D 2.0 (garis putus-putus hitam) secara konsisten menunjukkan nilai C_p yang paling mendekati nol atau bahkan sedikit positif dibandingkan dengan T/D lainnya. Ini bisa diinterpretasikan bahwa wake yang terbentuk di belakang silinder dengan T/D 2.0 mungkin memiliki tekanan yang relatif lebih tinggi, mengindikasikan daerah wake yang lebih "lebar" atau kurang teroksigenasi, atau pengaruh balik dari silinder atas yang lebih kuat pada T/D yang lebih pendek. grafik ini menunjukkan tingkat simetri yang cukup baik antara sisi kiri (0° - 180°) dan sisi kanan (180° - 360°) untuk semua rasio T/D, meskipun ada sedikit asimetri terutama pada nilai C_p minimum di sekitar 70° dan 290° (terutama untuk T/D 2.5 dan 4.0). Asimetri minor ini mungkin disebabkan oleh interaksi dengan dinding saluran sempit atau efek hilir dari silinder atas yang tidak sepenuhnya simetris.

3.2 Distubusi Koefisien Gaya Hambat

Gambar 4 diatas menunjukkan nilai C_D pada simulasi aliran fluida pada dua silinder tersusun *in-line* dengan variasi jarak antar-silinder T/D, berfokus pada koefisien hambat C_{D1} silinder hulu (atas). Secara keseluruhan, semua variasi T/D (2.0, 2.5, 3.0, dan 4.0) menunjukkan nilai C_{D1} yang sangat stabil tanpa adanya pelepasan vorteks periodik (*vortex shedding*), yang mengindikasikan bahwa interaksi kedua silinder efektif menjaga pola aliran tetap stabil dan mencegah fluktuasi gaya hambat. Pada jarak T/D 2.0 dan 2.5, interaksi *wake* yang kuat menekan pembentukan

vorteks, menghasilkan nilai C_D 1 yang relatif rendah dan stabil (sekitar 0.888 dan 0.862). Ketika jarak meningkat drastis menjadi T/D 3.0, C_D 1 mencapai nilai tertinggi yaitu 1.447 karena *wake* kedua silinder mulai terpisah, mengurangi efek penekanan aliran dari silinder hilir, yang menyebabkan silinder hulu mengalami gaya hambat yang lebih besar. Namun, pada jarak terjauh T/D 4.0, C_D 1 justru menurun ke nilai terendah (0.762). Penurunan ini disebabkan oleh kedua silinder yang sudah cukup terpisah sehingga perilaku aliran mendekati silinder tunggal, ditambah dengan adanya efek saluran sempit (*streamlining*) di antara silinder yang mempercepat aliran dan mengurangi gaya hambat.

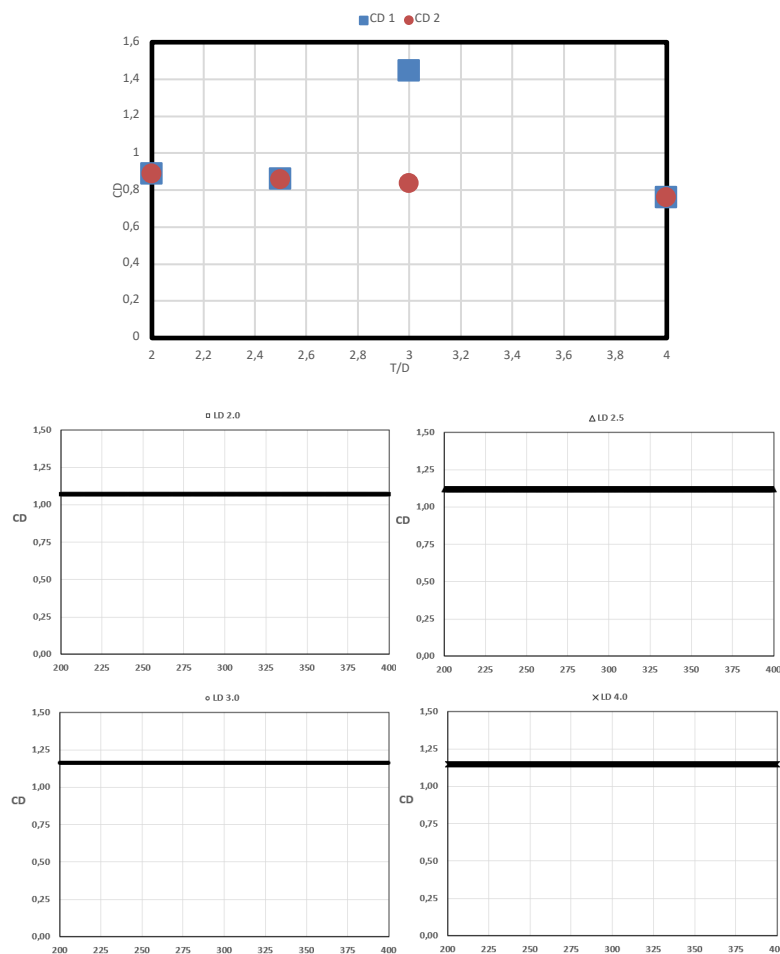


Gambar 4 Grafik fluktuasi koefisien *drag* pada silinder atas

Koefisien Hambat C_D 2 silinder hilir (bawah) dalam konfigurasi dua silinder terusun *in-line* sebagai fungsi dari rasio jarak antar-silinder, T/D . Mirip dengan silinder hulu, grafik C_D 2 untuk semua variasi T/D (2.0, 2.5, 3.0, 4.0) menunjukkan nilai yang sangat stabil tanpa adanya fluktuasi besar, yang mengindikasikan bahwa aliran tunak (*steady-state*) telah tercapai dan tidak ada pelepasan vorteks periodik. Pada jarak T/D 2.0 dan 2.5, silinder hilir sepenuhnya berada dalam daerah *wake* bertekanan rendah dari silinder hulu, sehingga mengalami efek peredaman hambatan (*drag reduction*) yang kuat atau "*shielding effect*", menghasilkan nilai C_D 2 yang rendah dan stabil, yaitu 0.888 dan 0.862 secara berturut-turut. Namun, pada jarak yang sedikit lebih besar, T/D 3.0, terjadi kenaikan C_D 2 yang sangat signifikan hingga nilai tertinggi 1.447. Kenaikan ekstrem ini diyakini disebabkan oleh aliran *wake* dari silinder hulu yang menyambung kembali (*reattachment*) ke permukaan silinder hilir pada titik kritis, yang menciptakan daerah tekanan yang sangat rendah di bagian belakang, sehingga meningkatkan *drag* jauh melampaui nilai silinder tunggal. Akhirnya, pada jarak T/D 4.0, terjadi penurunan *drag* yang signifikan ke nilai terendah 0.762. Pada jarak ini, silinder hilir masih mendapat efek *shielding* yang optimal dari *wake* silinder hulu (kecepatan aliran yang sampai lebih rendah), namun jarak yang cukup jauh mencegah terjadinya efek *reattachment* yang merugikan seperti pada $T/D = 3.0$ sehingga mencapai *drag* yang paling rendah dalam seri pengujian ini.

3.3 Disturbusi Koefisien Gaya Angkat

Gambar 5 merupakan Koefisien Angkat C_L 1 silinder hulu (atas) dalam konfigurasi dua silinder tersusun *in-line* sebagai fungsi dari rasio jarak antar-silinder, T/D . Pada jarak terdekat T/D 2.0, nilai C_L 1 memiliki fluktuasi kecil (0.1 hingga 0.2) dengan rata-rata 0.138, menunjukkan gaya angkat bersifat kuasi-stabil yang disebabkan oleh turbulensi kecil. Nilai positif ini mengindikasikan tekanan yang lebih besar di bagian bawah silinder atas. Sebaliknya, pada jarak yang sedikit lebih besar, T/D 2.5 dan T/D 3.0, terjadi osilasi yang kuat dan teratur dengan amplitudo besar (dari -0.3 hingga +0.4 pada T/D 2.5), yang merupakan ciri khas dari pelepasan vorteks (*vortex shedding*) yang terorganisir dan berinteraksi. Meskipun terjadi fluktuasi gaya angkat instan yang signifikan pada kedua jarak ini, nilai rata-rata C_L 1 sangat kecil (0.076 dan 0.055), menunjukkan bahwa secara rata-rata tidak ada gaya angkat bersih yang dominan ke satu arah. Akhirnya, pada jarak terjauh T/D 4.0, interaksi pusaran antar-silinder menjadi lemah, menyebabkan fluktuasi C_L 1 berkurang drastis dengan amplitudo yang sangat kecil (-0.05 hingga +0.05) dan nilai rata-rata yang mendekati nol (0.024). Hal ini menunjukkan distribusi tekanan di sekitar silinder atas hampir seimbang, sehingga gaya angkat bersih menjadi sangat minim.

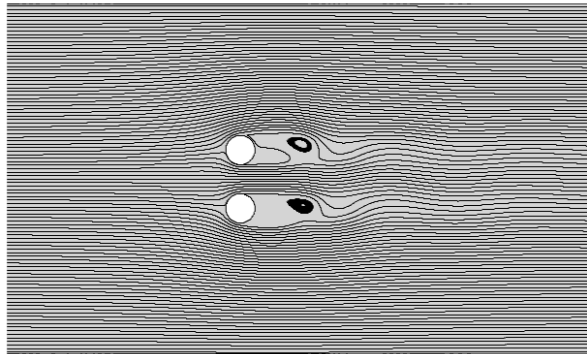


Gambar 5 Grafik fluktuasi koefisien *lift* pada silinder atas

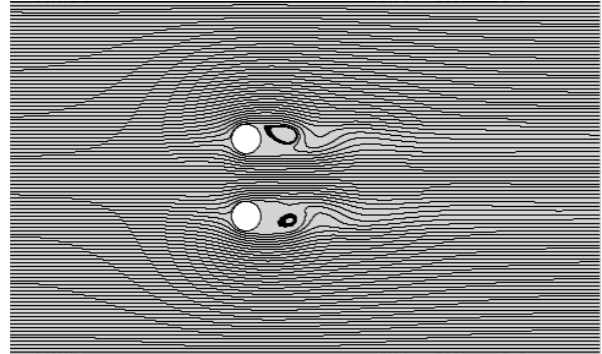
Koefisien angkat (C_L 2) atau silinder bawah sebagai fungsi dari rasio jarak T/D , di mana secara konsisten pada semua jarak (2.0, 2.5, 3.0, dan 4.0), gaya angkat bersih rata-rata selalu mengarah ke bawah (nilai C_L 2 negatif). Pada jarak terdekat, T/D 2.0, gaya angkat ke bawah adalah yang terkuat (C_L 2 rata-rata -0.138), disertai fluktuasi periodik yang menunjukkan adanya pelepasan vorteks (*vortex shedding*) yang stabil. Seiring dengan bertambahnya jarak antar-silinder, gaya angkat bersih ke bawah terus berkurang (nilai absolut C_L 2 mengecil), dari -0.074 pada T/D 2.5, menjadi -0.053 pada T/D 3.0, hingga mencapai nilai absolut terkecil -0.024 pada T/D 4.0. Penurunan yang stabil ini mengindikasikan bahwa pengaruh interaksi fluida dari silinder hulu (atas) terhadap silinder hilir (bawah) semakin

lemah seiring dengan bertambahnya jarak, menyebabkan aliran di sekitar silinder hilir semakin mendekati perilaku aliran pada silinder tunggal dan mengurangi gaya angkat bersih ke bawah.

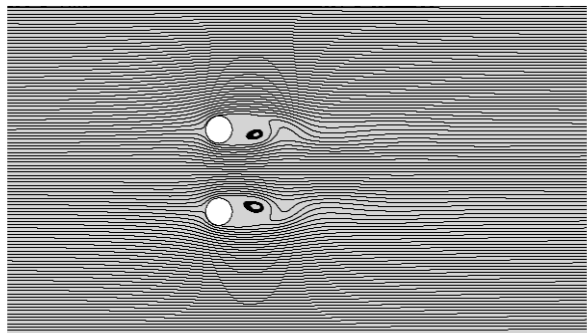
3.4 Kontur Aliran *Velocity Pathline*, *Velocity Magnitude*, *Vorticity Magnitude*, *Turbulensi Intensitas*



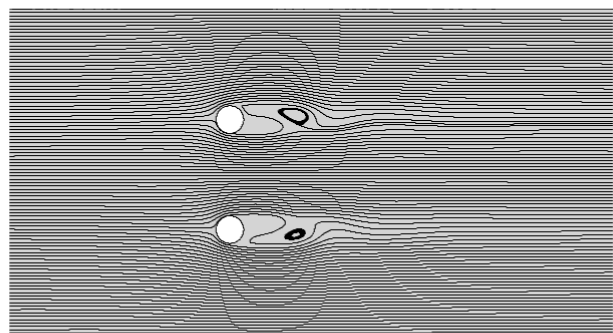
(a)



(b)

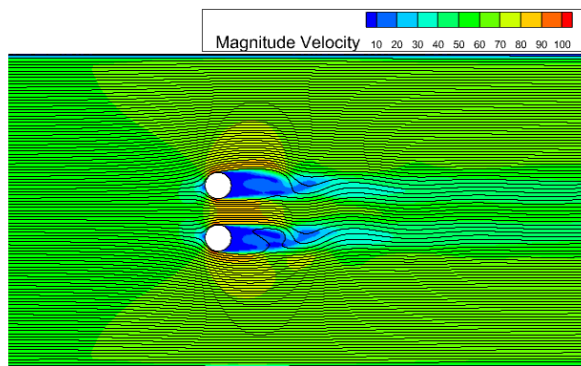


(c)

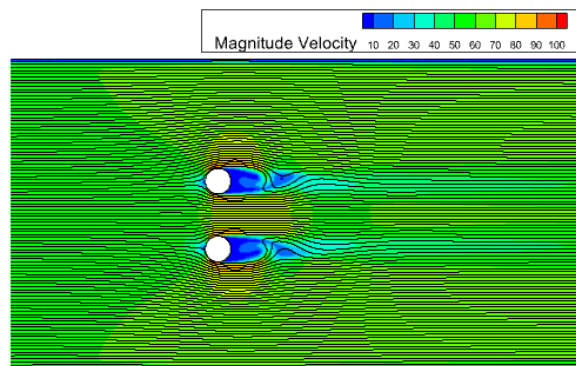


(d)

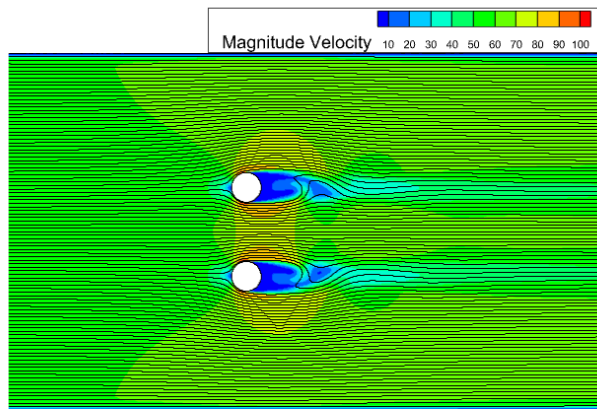
Velocity Pathline (A)



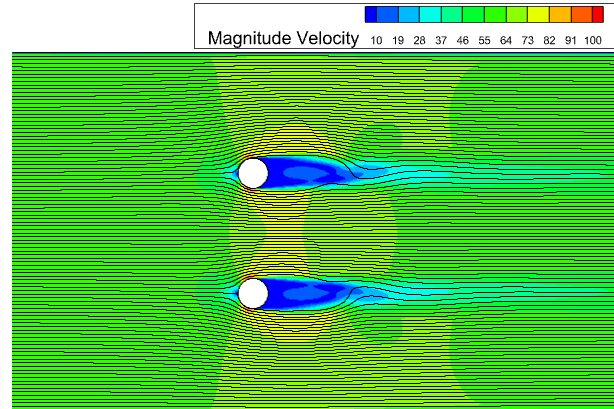
(a)



(b)

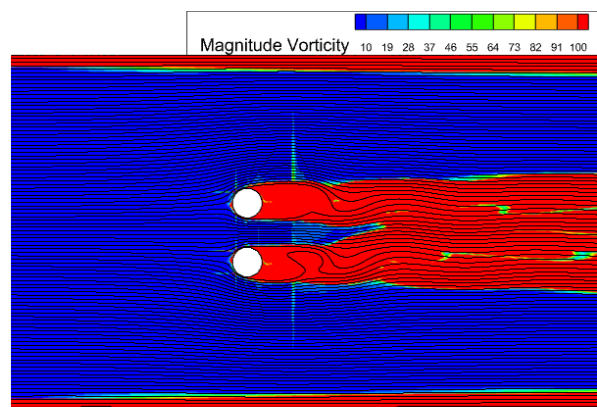


(c)

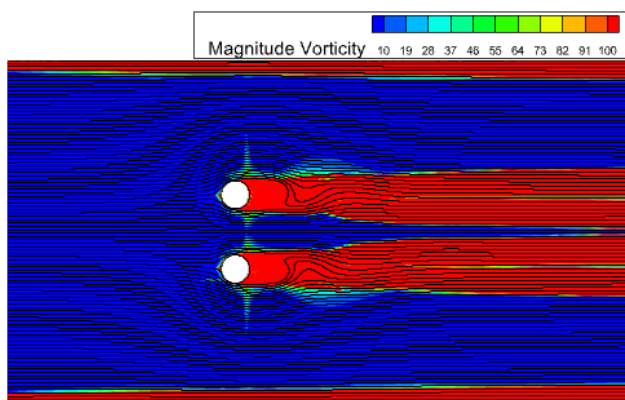


(d)

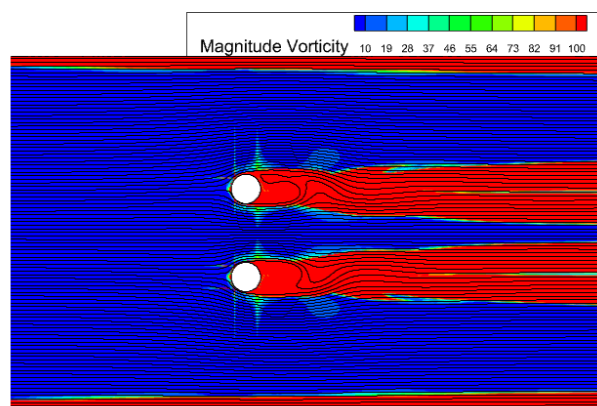
Velocity Magnitude (B)



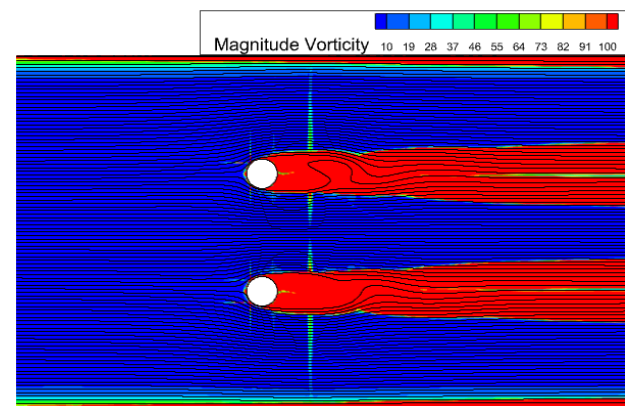
(a)



(b)

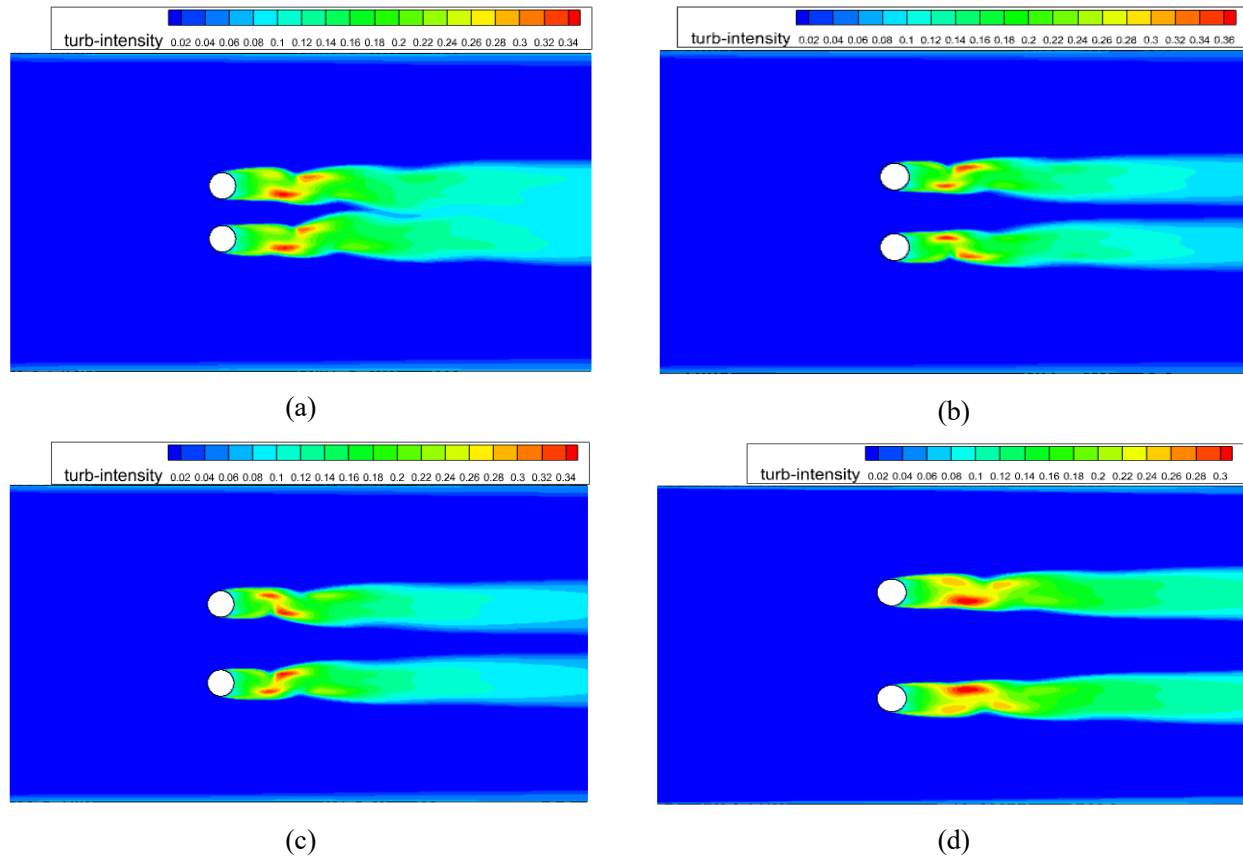


(c)



(d)

Vorticity Magnitude (C)



Turbulent Intensity (D)

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

Analisis distribusi koefisien tekanan (C_P), koefisien hambat (C_D), dan koefisien angkat (C_L) pada konfigurasi dua silinder tersusun *in-line* dengan variasi jarak transversal (T/D) mengungkapkan adanya interaksi aerodinamika yang kompleks dan signifikan antara kedua silinder, terutama dalam saluran sempit. Secara umum, semua variasi T/D menunjukkan bahwa koefisien hambat C_D 1 dan C_D 2 pada kedua silinder memiliki nilai yang sangat stabil dan tidak menunjukkan adanya pelepasan vorteks periodik (*vortex shedding*), yang mengindikasikan bahwa interaksi kedua silinder efektif menstabilkan pola aliran. Namun, nilai C_D berfluktuasi drastis berdasarkan jarak: C_D mencapai nilai tertinggi (1.447) pada T/D 3.0 untuk kedua silinder disebabkan oleh *wake* yang mulai terpisah pada silinder 1 dan 2, kemudian untuk nilai C_D terendah (0.762) terjadi pada T/D 4.0 akibat dari *bloccket effect*. Sementara itu, perilaku koefisien angkat C_L lebih dinamis; untuk C_L 1 menunjukkan osilasi kuat dan teratur (tanda *vortex shedding* terorganisir) pada jarak T/D 2.5 dan 3.0, meskipun gaya angkat bersih rata-ratanya mendekati nol. Sebaliknya, pada silinder 2 (C_L 2) secara konsisten memiliki gaya angkat yang lebih kecil (nilai negatif) pada semua jarak, dengan nilai absolutnya berkurang secara progresif seiring dengan meningkatnya jarak T/D . Secara keseluruhan, jarak T/D 4.0 menghasilkan performa paling efisien untuk C_D dan C_L , sedangkan jarak T/D 3.0 adalah kondisi paling tidak menguntungkan dengan C_D tertinggi, kondisi ini menunjukkan bahwa jarak optimal antar-silinder sangat penting dalam desain struktur yang bertujuan untuk mengurangi gaya hambat (C_D) dan gaya angkat (C_L).

DAFTAR PUSTAKA

1. Zdravkovich MM. The effects of interference between circular cylinders in cross flow††An earlier version as originally presented as an invited paper, entitled “Forces on pipe clusters”, at the International Symposium on Separated Flow around Marine Structures, Norwegian . J Fluids Struct. 1987;1(2):239–61.
2. Chen SS, Jendrzeczyk JA. Fluid excitation forces acting on a square tube array. J Fluids Eng Trans ASME. 1987;109(4):415–23.
3. Sumner D. Two circular cylinders in cross-flow: A review. J Fluids Struct [Internet]. 2010;26(6):849–99. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2010.07.001>
4. J. Lin MITTGNN. NII-Electronic Library Service. Chem Pharm Bull. 2002;(43):2091.
5. Cut B, Akram R, Iskandar, Rahman A, Zulfri M, Nazaruddin. Experimental Review on Influence of Inlet Disturbance Body (IDB) at 30° Against Inhibitory Force Reduction on Three Circular Cylinders with Composed of Stagger (Variation L/D(constant=2), T/D = 1.5, 2, 3 & 4). IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2019;536(1).
6. The S, Number E. Kinematics and Dynamics of Sphere. 2001;(February):575–85.
7. Cut B, Sutardi, Widodo WA. Numerical investigation of flow behaviour across three circular cylinders in a stagger arrangement. AIP Conf Proc [Internet]. 2023 Aug 8;2431(1):140003. Available from: <https://doi.org/10.1063/5.0114302>
8. Tambunan MF, Cut B, Abdullah NA. Numerical Analysis of the Wake Interactions Between Two Tandem Cylinders at a Reynolds Number of 1×10^5 . 2025;
9. Rehim F, Aloui F, Nasrallah S Ben, Doubriez L, Legrand J. Experimental investigation of a confined flow downstream of a circular cylinder centred between two parallel walls. J Fluids Struct. 2008;24(6):855–82.
10. Oruç V. Strategies for the applications of flow control downstream of a bluff body. Flow Meas Instrum. 2017;53:204–14.
11. Carini M, Giannetti F, Auteri F. On the origin of the flip-flop instability of two side-by-side cylinder wakes. J Fluid Mech. 2014;742:552–76.
12. Yusup I, Cut B, Widodo SB. NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH FOUR CIRCULAR CYLINDERS ARRANGED IN-LINE SQUARE WITH AN DISTURBING BODY. 2024;3.
13. Tu J, Tan X, Deng X, Han Z, Zhang M, Li Z, et al. Dynamic responses and flow-induced vibration mechanism of three tandem circular cylinders in planar shear flow. Ocean Eng [Internet]. 2020;199(January):107022. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107022>
14. Wijarnarko D, Widodo WA. STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI SILINDER SIRKULAR. 2018;(June 2013).
15. Sidaruk A, Cut B, Arif Z. Phenomenon Of Flow Through Four Circular Cylinders Arranged In- Line Square. 2025;3:0–8.