Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Numerical Study of Flow Characteristics Across Circular Cylinders and Sliced Cylinders of Type-D and Type-I Near Flat Walls

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

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

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 01 Januari 2026
Direvisi dari 09 April 2026
Diterima 28 Juni 2026
Dipublikasi 30 Juni 2026

Keywords:
silinder sirkular;
tipe-D;
tipe-I;
rasio *G/D*;
Dinding datar

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v13i01.13819

A B S T R A C T

Numerical simulations using the Ansys Fluent 2025 R2 CFD solver were conducted to investigate the unsteady and incompressible fluid flow characteristics around circular, D-type, and I-type cylinders positioned near a flat wall. The modified geometries for the D-type and I-type cylinders featured a cutting angle (θ_S) of 65°. This study evaluates the flow dynamics across various gap ratios (G/D) between the cylinders and the flat wall, specifically 0.05, 0.0833, and 0.1167. All simulations were performed at a Reynolds number (Re) of 5.3 × 10^4 using the k-ω SST turbulence model. The results indicate that decreasing the gap ratio triggers a significant blockage effect, characterized by flow acceleration (jetting) within the lower gap area. Qualitatively, increasing the G/D ratio is shown to delay flow separation and narrow the wake region. Visualizations of velocity and vorticity magnitude confirm that the interaction between the wall boundary layer and the cylinder's shear layer at small gaps inhibits organized vortex formation, although flow stability improves as the gap distance increases.

A B S T R A K

Simulasi numerik menggunakan *solver* CFD Ansys Fluent 2025 R2 dilakukan untuk mengkaji karakteristik aliran fluida *unsteady* dan *incompressible* di sekitar silinder sirkular, tipe-D, dan tipe-I yang diletakkan di dekat dinding datar. Geometri silinder tipe-D dan tipe-I dimodifikasi dengan sudut irisan (θ_S) sebesar 65°. Penelitian ini mengevaluasi dinamika aliran pada berbagai variasi rasio jarak celah (*gap ratio*) antara silinder dan dinding datar (*G/D*), yaitu 0,05; 0,0833; dan 0,1167. Seluruh simulasi dijalankan pada bilangan Reynolds (Re) = 5.3 × 10^4 dengan menerapkan model turbulensi k-ω SST. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan rasio jarak celah memicu munculnya *blockage effect* yang signifikan, yang ditandai dengan percepatan aliran (*jetting*) di area celah bawah. Secara kualitatif, peningkatan rasio *G/D* terbukti mampu menunda pemisahan aliran dan merampingkan daerah *wake*. Visualisasi *velocity magnitude* dan *vorticity magnitude* mengonfirmasi bahwa interaksi antara lapisan batas dinding dan lapisan geser silinder pada celah sempit menghambat pembentukan pusaran yang teratur, namun stabilitas aliran kembali meningkat seiring dengan bertambahnya jarak celah.

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

E-mail Coresponden : bantacut@unsam.ac.id
© 2026 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

1. Pendahuluan

Interaksi antara aliran fluida dan silinder sirkular merupakan permasalahan fundamental dalam mekanika fluida yang memiliki aplikasi luas pada bidang rekayasa, seperti pilar jembatan, pipa lepas pantai, dan penukar kalor. Pada aliran dua dimensi, keberadaan silinder sirkular memicu fenomena kompleks berupa separasi lapisan batas dan pelepasan vorteks (*vortex shedding*), yang berkontribusi terhadap peningkatan gaya hambat serta berpotensi menimbulkan getaran struktural dan kerugian energi (1)(2). Seiring meningkatnya kebutuhan akan struktur lepas pantai dan sistem energi terbarukan, modifikasi geometri *bluff body*, termasuk silinder teriris, menjadi pendekatan penting untuk meningkatkan kinerja aerodinamika dan menjamin keselamatan struktur.

Berbagai penelitian eksperimental dan visualisasi aliran telah mengkaji karakteristik aliran di sekitar silinder yang ditempatkan dekat dinding datar (3–6). Studi-studi tersebut menitikberatkan pada pengaruh rasio celah (*G/D*) dan posisi silinder di dalam lapisan batas dinding terhadap gaya aerodinamika (7–11). Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun rasio celah memengaruhi gaya hambat dan gaya angkat, ketebalan lapisan batas dinding memiliki pengaruh yang lebih dominan terhadap karakteristik gaya hambat. Selain itu, visualisasi aliran mengidentifikasi beberapa rezim aliran yang berbeda seiring perubahan rasio celah, mulai dari pelepasan vorteks yang tidak teratur pada celah sangat sempit hingga kondisi aliran yang relatif stabil tanpa separasi lapisan batas dinding pada celah yang lebih besar.

Modifikasi bentuk silinder sirkular menjadi silinder teriris tipe-D dan tipe-I telah dilaporkan sebagai salah satu metode efektif untuk mengendalikan gaya aerodinamika (12). Efektivitas metode ini sangat bergantung pada sudut irisan, karena perbedaan sudut menghasilkan pola separasi aliran yang berbeda. Keberadaan dinding datar semakin memperumit perilaku aliran, di mana beberapa konfigurasi silinder teriris menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap variasi jarak celah dibandingkan silinder sirkular (13–15). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh gabungan antara geometri silinder dan kedekatannya terhadap dinding perlu dikaji secara lebih mendalam.

Studi numerik yang divalidasi dengan data eksperimen juga telah dilakukan untuk menganalisis karakteristik aliran di sekitar silinder teriris tipe-I yang ditempatkan dekat dinding datar pada bilangan Reynolds menengah. Hasil penelitian tersebut menunjukkan terbentuknya pola aliran yang tidak simetris antara sisi atas dan bawah silinder, yang berkaitan erat dengan efek penyumbatan (*blockage effect*) pada celah sempit, sehingga sebagian besar aliran terdorong melewati sisi atas silinder (16).

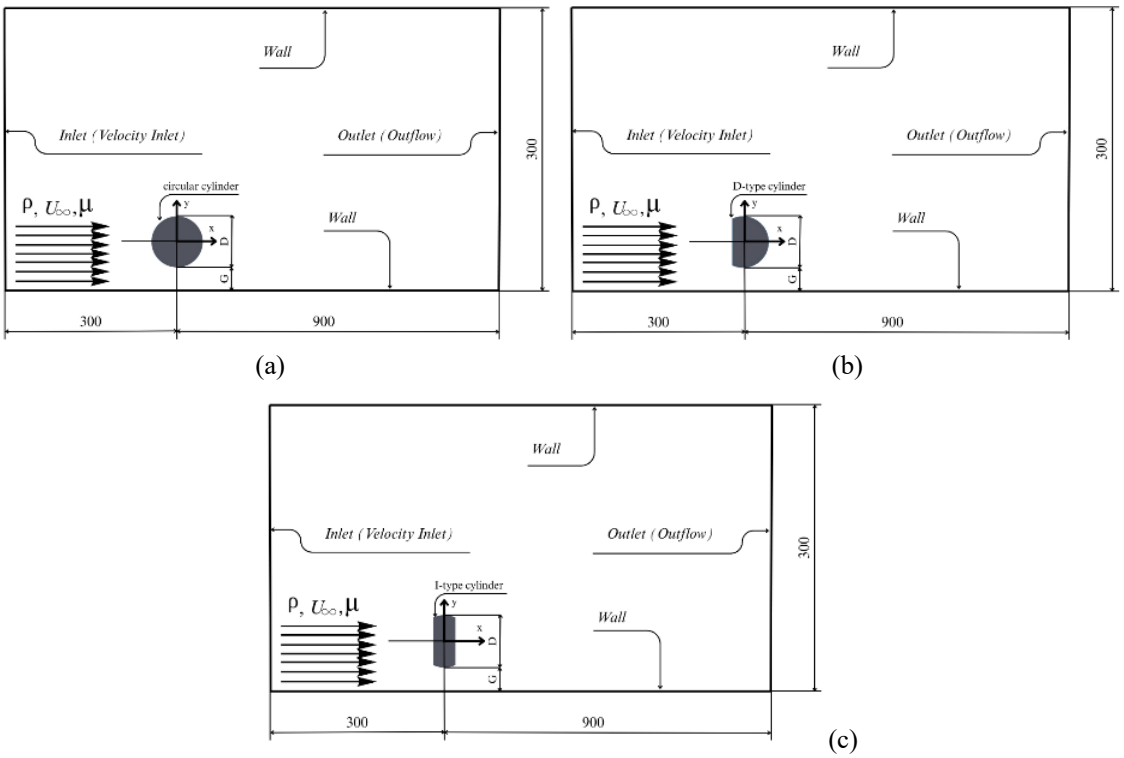
Berdasarkan temuan-temuan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara numerik karakteristik aliran di sekitar silinder sirkular serta silinder teriris tipe-D dan tipe-I dengan sudut irisan 65° yang ditempatkan dekat dinding datar. Pengaruh variasi rasio celah (*G/D*) dianalisis secara sistematis untuk menjelaskan bagaimana modifikasi geometri dan kedekatan terhadap dinding secara bersamaan memengaruhi struktur aliran dan karakteristik aerodinamika, pada bilangan Reynolds $Re = 5.3 \times 10^4$.

2. Metode

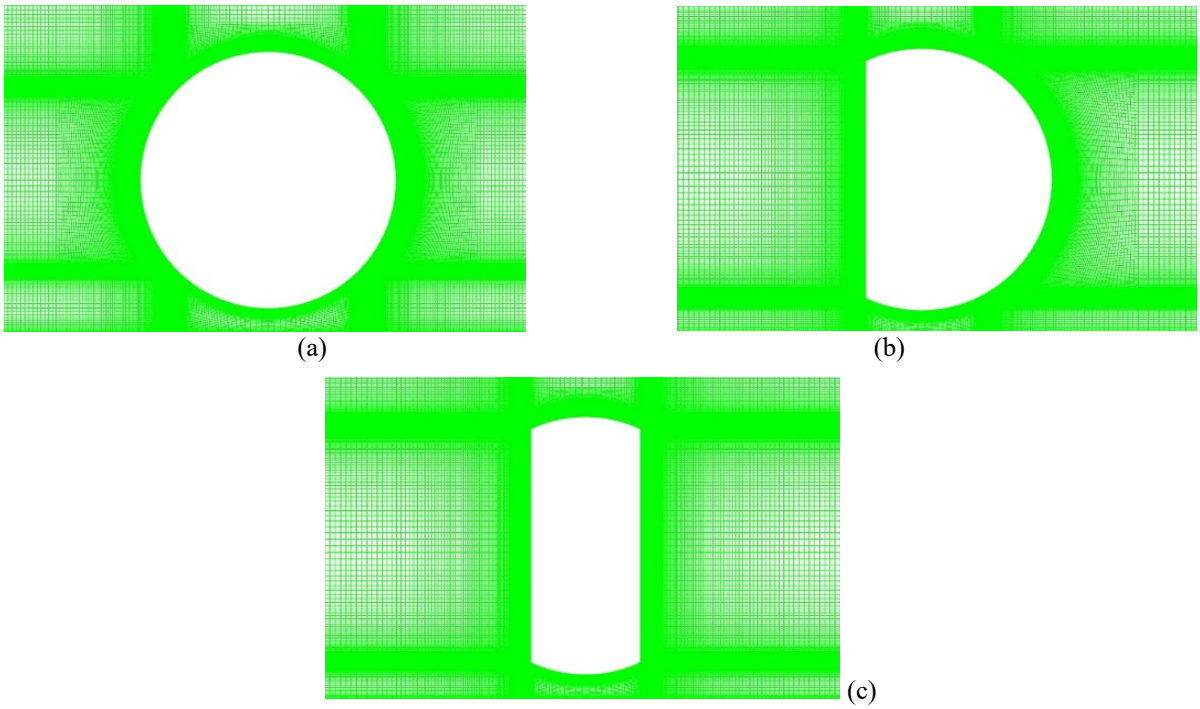
Skema penelitian pada **Gambar 1** memperlihatkan domain simulasi numerik silinder sirkular serta silinder teriris tipe-D dan tipe-I yang ditempatkan di dekat dinding datar. Jarak silinder terhadap dinding divariasikan melalui rasio *G/D* sebesar 0,05; 0,0833; dan 0,1167. Silinder teriris memiliki sudut irisan 65° dengan diameter 60 mm. Simulasi dilakukan pada domain berukuran 300 × 1.200 mm dengan bilangan Reynolds $Re = 5.3 \times 10^4$.

Gambar 2 menampilkan struktur meshing yang diterapkan pada domain simulasi. Mesh dibuat lebih rapat di sekitar permukaan silinder dan daerah celah antara silinder dan dinding untuk menangkap gradien kecepatan dan tekanan secara akurat, sementara mesh yang lebih kasar digunakan di area jauh dari silinder guna mengoptimalkan efisiensi komputasi (17)(18). Transisi kerapatan mesh diatur secara bertahap untuk menjaga kestabilan numerik dan kualitas solusi.

Simulasi numerik dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Tahap *pre-processing* meliputi pembuatan geometri, pengaturan mesh, dan penetapan kondisi batas menggunakan ANSYS Gambit 2.4.6. Proses perhitungan numerik dijalankan pada tahap *processing* menggunakan ANSYS Fluent 2025 R2 hingga solusi mencapai konvergen. Selanjutnya, tahap *post-processing* digunakan untuk menganalisis hasil simulasi melalui data kuantitatif dan visualisasi aliran berupa *velocity magnitude* dan *vorticity magnitude* yang dilengkapi dengan garis aliran (1)(19).



Gambar 1. Domain simulasi numerik (a) Silinder Sirkular; (b) Silinder Tipe-D; (c) Silinder Tipe-I



Gambar 2. Bentuk meshing (a) Silinder Sirkular; (b) Silinder Tipe-D; (c) Silinder Tipe-I

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan analisis mendalam terhadap data kuantitatif dan kualitatif hasil simulasi. Karakteristik interaksi aliran fluida diidentifikasi melalui distribusi koefisien tekanan (C_P) pada permukaan silinder sirkular, tipe-D, dan tipe-I, serta pada permukaan dinding datar (*flat-wall*), yang masing-masing ditampilkan pada **Gambar 3 (a, b, c)** nilai C_P tersebut diperoleh dari pengolahan data numerik menggunakan CFD solver Ansys Fluent 2025 R2 dengan rumus sebagai berikut:

$$C_P = \frac{P_C - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty^2} \qquad (1)$$

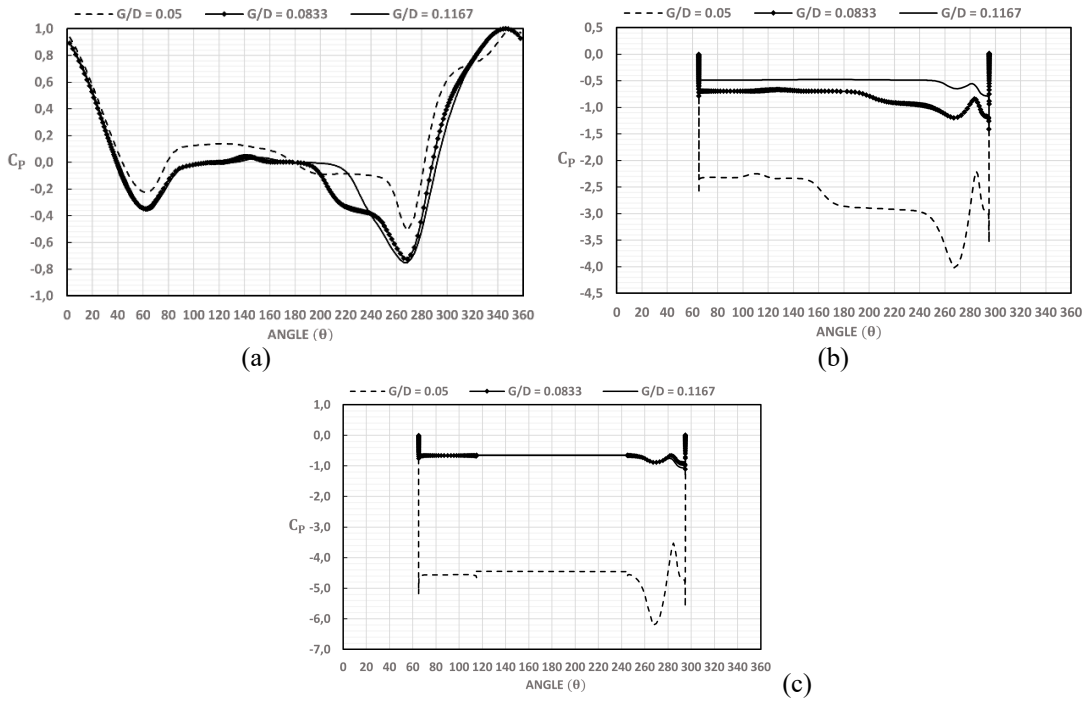
Dalam persamaan tersebut, P_C merepresentasikan tekanan lokal pada permukaan silinder maupun dinding datar. Sementara itu, P_∞ menyatakan tekanan statis aliran bebas (*free-stream static pressure*), dan $\frac{1}{2}\rho_\infty^2$ didefinisikan sebagai tekanan dinamik pada kondisi *free-stream*.

Selain data kuantitatif, penelitian ini juga menyajikan data kualitatif berupa visualisasi aliran melalui magnitude velocity dan magnitude vorticity pada **Gambar 4** sampai dengan **Gambar 9**. Visualisasi ini bertujuan untuk memberikan penjelasan komprehensif mengenai fenomena interaksi aliran saat melewati susunan silinder (sirkular dan tipe-I 65°) yang dipengaruhi oleh keberadaan dinding datar (*flat-wall effect*), baik pada sisi atas maupun sisi bawah permukaan silinder.

Analisis distribusi koefisien tekanan pada silinder sirkular mengungkapkan bahwa rasio jarak antar silinder (*G/D*) memegang peranan krusial dalam menentukan karakteristik aerodinamika di permukaan silinder. Secara mendasar, titik stagnasi ($C_P = 1$) konsisten ditemukan pada posisi $\theta = 0°$, yang menandakan titik pertemuan fluida dengan tekanan tertinggi. Pada konfigurasi *G/D* = 0.05, penyempitan jalur aliran atau *streamtube* memaksa fluida berakselerasi hingga mencapai tekanan minimum C_P = -0,2 pada sudut θ = 60°. Munculnya *adverse pressure gradient* setelah fase ini memicu pemisahan aliran (*flow separation*) pada rentang θ = 245° hingga 270°. Fenomena tersebut menciptakan daerah *wake* yang luas akibat efek sumbatan (*blockage*), yang perlahan menyusut dan menjadi lebih stabil seiring dengan bertambahnya jarak antar silinder.

Perubahan geometri menjadi silinder teriris Tipe-D mengakibatkan pergeseran karakteristik tekanan yang cukup drastis, di mana titik stagnasi bergeser ke sudut θ = 65° dengan nilai $C_P = 0$. Irisan ini menginduksi akselerasi aliran yang jauh lebih intens di sepanjang sisi bawah silinder dibandingkan profil sirkular standar. Sensitivitas tekanan terhadap jarak antar silinder terlihat sangat nyata pada nilai C_{Pmin} yang merosot hingga -4,0 pada *G/D* = 0.05 namun meningkat ke angka -1,0 saat jarak diperlebar menjadi *G/D* = 0.1167. Hal ini mengonfirmasi bahwa penambahan jarak secara efektif memitigasi interferensi aliran permukaan. Selain itu, keterlambatan pemulihan tekanan pada konfigurasi rapat mempertegas ketidakstabilan aliran di area belakang, yang pada gilirannya meningkatkan gaya hambat secara signifikan.

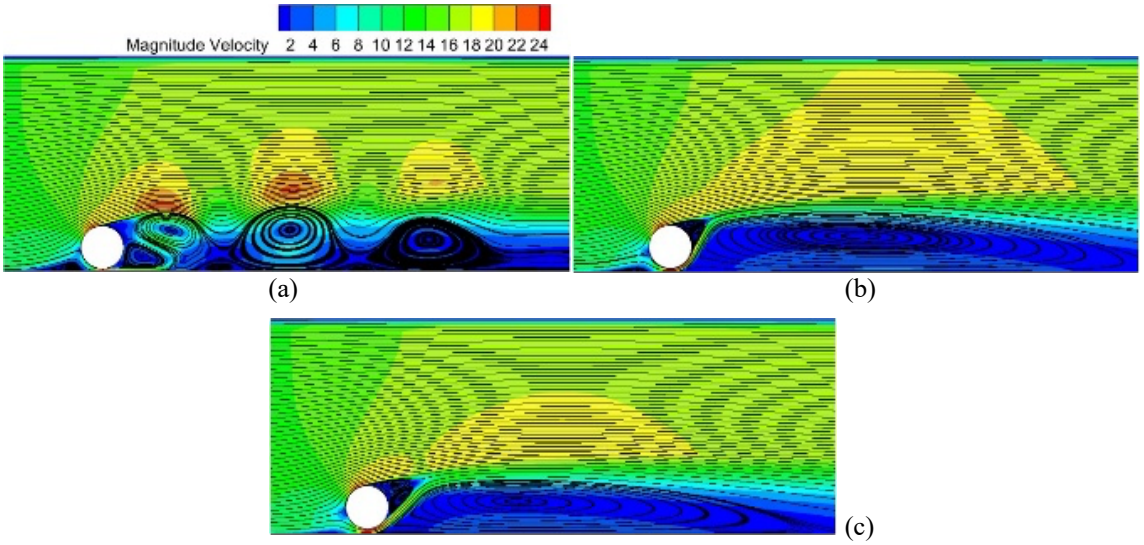
Sementara itu, silinder teriris Tipe-I menunjukkan fluktuasi tekanan paling ekstrem akibat pengaruh irisan ganda di sisi depan dan belakang. Meskipun lokasi titik stagnasi serupa dengan Tipe-D, kehadiran irisan ganda memicu efek hisap (*suction*) yang luar biasa kuat, tercermin dari nilai C_{Pmin} yang menyentuh angka -6,5 pada konfigurasi *G/D* = 0.05. Penajaman akselerasi lokal oleh irisan depan, yang dipadukan dengan hambatan pemulihan tekanan oleh irisan belakang, menciptakan gradien tekanan negatif yang sangat curam. Secara keseluruhan, perbandingan antara ketiga model ini menegaskan bahwa sinergi antara modifikasi geometris irisan dan reduksi celah antar silinder secara kolektif memperluas zona separasi dan memperkuat intensitas turbulensi di belakang struktur.



Gambar 3. Distribusi koefiisien tekanan (C_P) (a) Silinder Sirkular; (b) Silinder Tipe-D; (c) Silinder Tipe-I

Hasil kuantitatif pada **Gambar 3** diperkuat oleh visualisasi aliran berupa *velocity magnitude*, dan *vorticity magnitude* pada konfigurasi silinder sirkular silinder teriris Tipe-D dan silinder teriris tipe-I di dekat dinding datar. Seluruh visualisasi dianalisis pada variasi jarak celah *G/D* = 0,05, 0,0833 dan 0,1167.

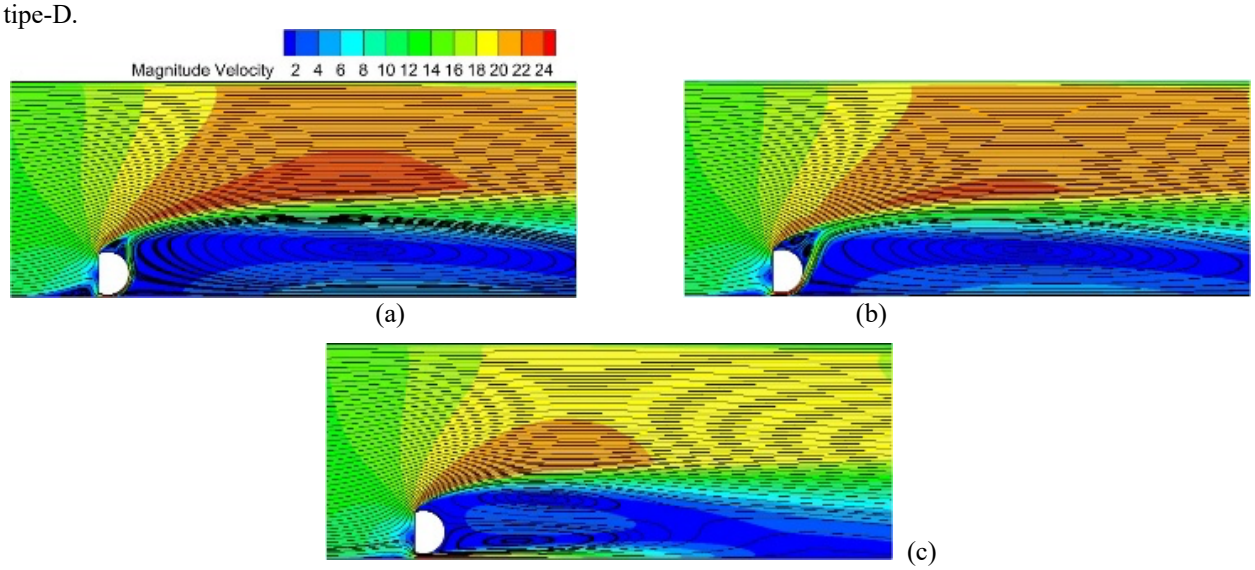
Visualisasi aliran berupa *velocity magnitude* pada Gambar 4(a)–(c) untuk silinder sirkular menunjukkan perubahan karakter aliran yang signifikan seiring peningkatan rasio *G/D* akibat pengaruh dinding datar. Pada *G/D* = 0.05 aliran bersifat *unsteady* dan ditandai oleh *vortex shedding* asimetris serta periodik, dengan zona kecepatan rendah yang tersusun berselang-seling di daerah *wake* akibat gradien kecepatan yang tajam pada celah sempit dan interaksi dengan *boundary layer* dinding. Pada *G/D* = 0.0833, pola aliran cenderung stabil dan simetris, ditunjukkan oleh terbentuknya *wake* tertutup dengan resirkulasi yang mantap tanpa indikasi pelepasan *vortex*, sehingga karakter aliran merepresentasikan kondisi rata-rata waktu. Sementara itu, pada *G/D* = 0.1167, pengaruh dinding semakin melemah dan aliran didominasi oleh *wake* resirkulasi tunak yang berukuran lebih besar dan hampir simetris, dengan karakteristik yang mendekati aliran di sekitar silinder sirkular pada kondisi aliran bebas.



(a) (b) (c)

Gambar 4. Visualisasi aliran berupa *velocity magnitude* melintasi silinder sirkular dekat dinding datar(a) *G/D* = 0.05; (b) *G/D* = 0.0833; (c) *G/D* = 0.1167

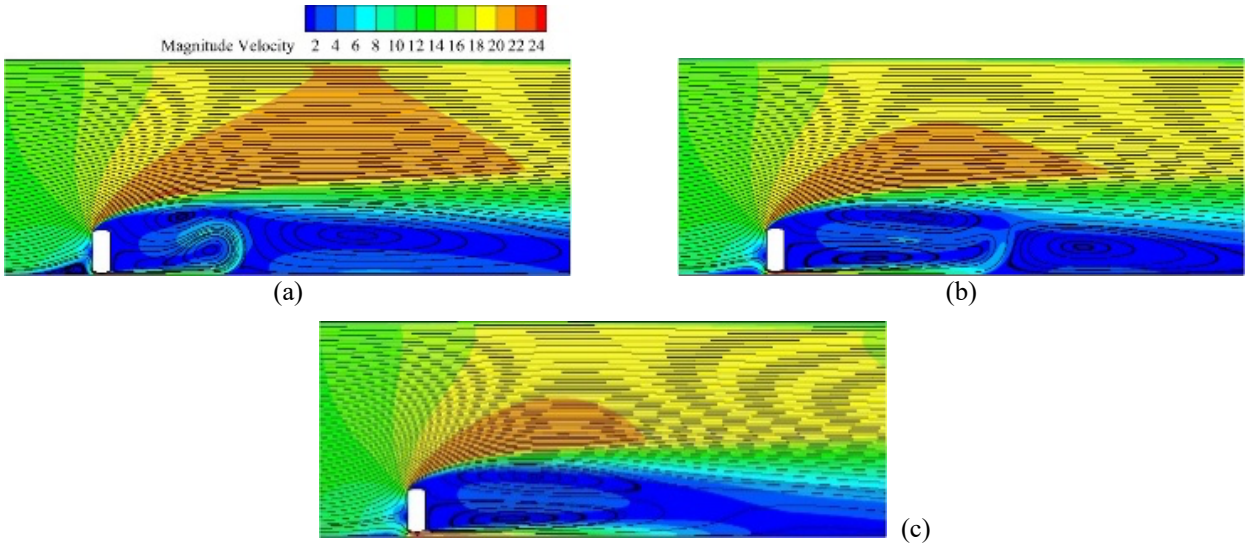
Viisualisasi *velocity magnitude* pada **Gambar 5** memperlihatkan karakteristik aliran di sekitar silinder teriris tipe-D yang ditempatkan dekat dinding datar. Aliran utama terbagi menjadi dua jalur, yaitu mengalir di atas permukaan silinder dan melalui celah antara silinder dan dinding. Pada sisi atas, aliran mengalami percepatan yang signifikan, sedangkan pada sisi bawah terbentuk efek jetting yang kuat akibat penyempitan celah, terutama pada *G/D* = 0.05. Seiring peningkatan jarak celah menjadi *G/D* = 0.0833 dan 0.1167, intensitas jetting menurun karena melemahnya pengaruh dinding. Geometri irisan 65° memicu pemisahan aliran yang tajam di sisi hilir, membentuk *wake* resirkulasi simetris dengan *velocity magnitude* rendah. Panjang *wake* teramati semakin pendek dengan bertambahnya *G/D*, yang mengindikasikan pemulihan tekanan yang lebih cepat akibat injeksi momentum dari aliran jetting ke dalam *wake*. Interaksi antara shear layer atas, aliran jetting di celah, dan boundary layer dinding sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 berperan penting dalam memodifikasi struktur *wake* dan memengaruhi karakteristik aerodinamika silinder tipe-D.



(a) (b) (c)

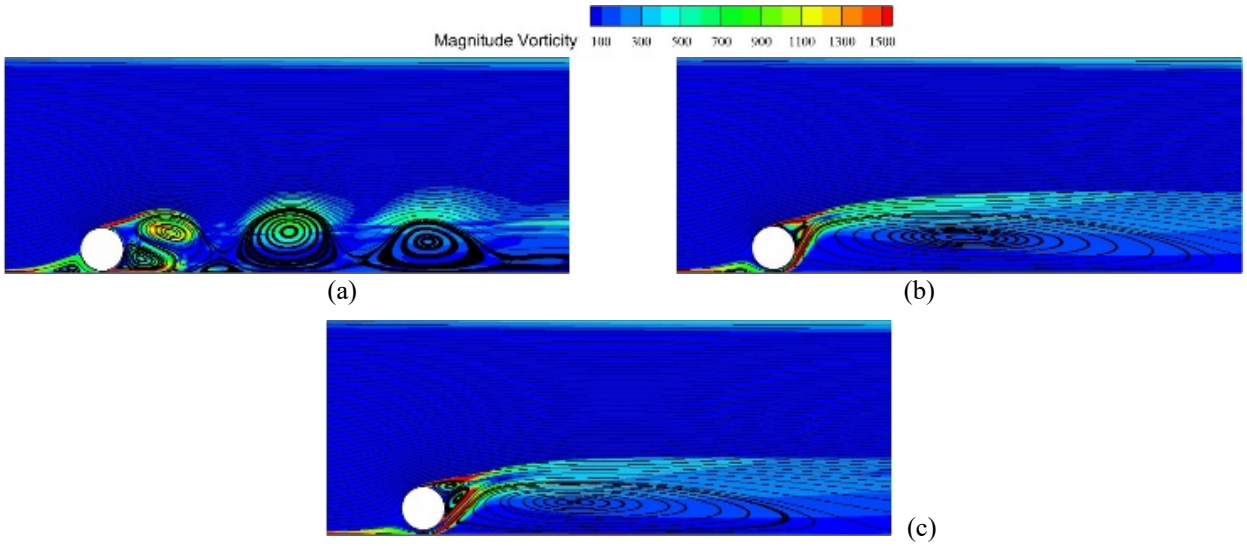
Gambar 5. Visualisasi aliran berupa *velocity magnitude* melintasi silinder Tipe-D dekat dinding datar(a) *G/D* = 0.05; (b) *G/D* = 0.0833; (c) *G/D* = 0.1167

Visualisasi kontur *velocity magnitude* pada **Gambar 6** menyajikan karakteristik dinamika aliran di sekitar silinder teriris tipe-I yang berinteraksi dengan dinding datar. Teramati adanya zona stagnasi di area hulu silinder, yang ditandai dengan nilai kecepatan mendekati nol. Pasca melewati titik tersebut, aliran mengalami akselerasi di sepanjang permukaan silinder akibat gradien tekanan, terutama pada sisi atas dan bawah. Di area hilir, fenomena separasi aliran memicu terbentuknya zona *wake* berkecepatan rendah yang didominasi oleh sepasang pusaran resirkulasi yang kontras. Struktur pusaran ini dikelilingi oleh arus berkecepatan tinggi, yang secara signifikan memengaruhi hambatan tekanan. Analisis terhadap variasi celah menunjukkan bahwa pengaruh dinding paling intens terjadi pada G/D = 0,05, di mana perkembangan vorteks terhambat dan zona *wake* mengalami kompresi vertikal. Sebaliknya, pada G/D = 0,0833 dan 0,1167, struktur pusaran cenderung stabil, mengindikasikan berkurangnya interferensi dinding terhadap perkembangan aliran belakang.



Gambar 6. Visualisasi aliran berupa *velocity magnitude* melintasi silinder Tipe-I dekat dinding datar(a) G/D = 0.05; (b) G/D = 0.0833; (c) G/D = 0.1167

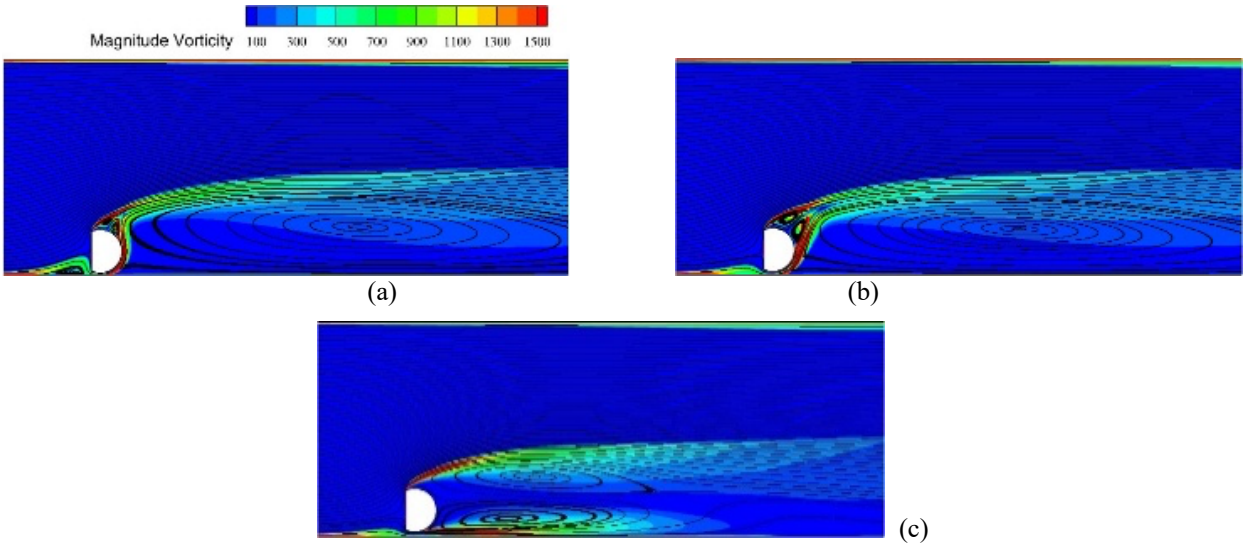
Gambar 7 memperlihatkan distribusi *vorticity magnitude* di sekitar silinder sirkular pada berbagai rasio G/D. Pada G/D = 0.05, pengaruh dinding sangat dominan sehingga aliran bersifat tak tunak dengan *vortex shedding* yang jelas, ditandai oleh interaksi langsung antara *shear layer* bawah dan *boundary layer* dinding yang menghasilkan distribusi vortisitas tidak simetris. Pada G/D = 0.0833, efek dinding masih terlihat namun mulai melemah, dengan terbentuknya vorteks dominan di daerah hilir dan struktur *wake* yang lebih terkendali. Sementara itu, pada G/D = 0.1167, pengaruh dinding menjadi minimal sehingga pola aliran menyerupai silinder tunggal, dengan *wake* yang lebih simetris dan vortisitas maksimum terkonsentrasi di sepanjang *shear layer* hasil separasi.



Gambar 7. Visualisasi aliran berupa *vorticity magnitude* melintasi silinder sirkular dekat dinding datar(a) G/D = 0.05; (b) G/D = 0.0833; (c) G/D = 0.1167

Gambar 8 memperlihatkan kontur *vorticity magnitude* di sekitar silinder teriris tipe-D yang ditempatkan dekat dinding datar pada variasi rasio G/D. Nilai vortisitas tertinggi terkonsentrasi di sepanjang *shear layer* yang terlepas

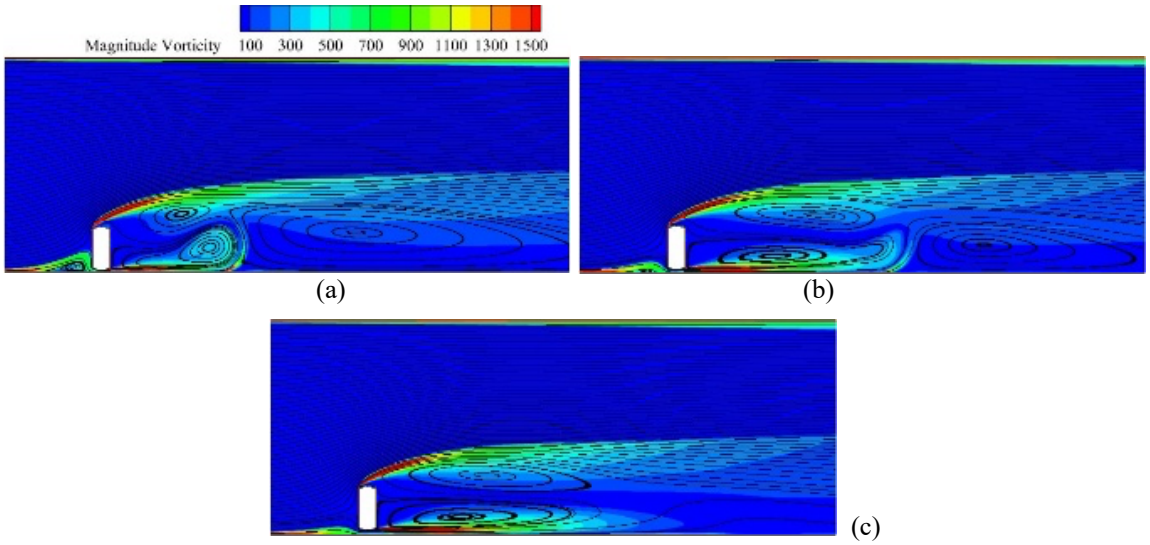
dari permukaan silinder, terutama pada sisi atas yang melengkung dan sudut tajam bagian bawah akibat efek irisan. Pada *G/D* = 0.05, pengaruh dinding sangat kuat sehingga *wake* terkompresi secara vertikal dan pusaran utama terbentuk dekat silinder, dengan perkembangan *shear layer* bawah yang terhambat. Ketika *G/D* meningkat menjadi 0.0833, *wake* mulai berkembang meskipun masih menunjukkan ketidaksimetrian akibat dominasi *shear layer* atas. Pada *G/D* = 0.1167, pengaruh dinding semakin berkurang, memungkinkan struktur vortisitas di daerah hilir berkembang lebih bebas dan membentuk pola pelepasan pusaran yang lebih jelas, menyerupai karakteristik aliran *bluff body* dengan interferensi dinding yang minimal.



(a) (b) (c)

Gambar 8. Visualisasi aliran berupa *vorticity magnitude* melintasi silinder Tipe-D dekat dinding datar(a) *G/D* = 0.05; (b) *G/D* = 0.0833; (c) *G/D* = 0.1167

Gambar 9 menampilkan kontur *vorticity magnitude* di sekitar silinder teriris tipe-I yang ditempatkan dekat dinding datar pada variasi rasio *G/D*. Pada *G/D* = 0.05, pengaruh dinding sangat kuat sehingga *shear layer* bawah terhambat dan pusaran di sisi bawah berkembang lebih kecil dibandingkan sisi atas, menghasilkan distribusi vortisitas yang sangat asimetris. Ketika *G/D* meningkat menjadi 0.0833, interaksi dengan dinding mulai melemah, ditandai oleh perkembangan pusaran atas dan bawah yang lebih seimbang serta struktur *wake* yang lebih stabil. Pada *G/D* = 0.1167, pola vortisitas menunjukkan tingkat simetri yang tinggi dengan *wake* yang terorganisir dan memanjang ke hilir, menyerupai karakteristik aliran di sekitar silinder bebas. Hasil ini menegaskan bahwa peningkatan jarak celah mengurangi *ground effect* dan memungkinkan proses pelepasan pusaran pada silinder tipe-I berlangsung lebih bebas dan stabil.



(a) (b) (c)

Gambar 9. Visualisasi aliran berupa *vorticity magnitude* melintasi silinder Tipe-I dekat dinding datar(a) *G/D* = 0.05; (b) *G/D* = 0.0833; (c) *G/D* = 0.1167

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan model turbulensi k-ω SST pada bilangan Reynolds Re = 5.3×10^4, penelitian mengenai karakteristik aliran fluida di sekitar silinder sirkular, tipe-D, dan tipe-I di dekat dinding datar ini menghasilkan beberapa simpulan utama sebagai berikut:

1. Jarak celah antara silinder dan dinding datar merupakan faktor kritis yang menentukan dinamika aliran. Pada rasio celah sempit (*G/D* = 0,05), terjadi efek penyumbatan (*blockage*) yang kuat disertai fenomena *jetting* di bawah silinder, sementara peningkatan rasio *G/D* secara bertahap menormalisasi pola aliran menuju kondisi aliran bebas.
2. Modifikasi geometri melalui pemotongan sudut 65° pada tipe-D dan tipe-I secara signifikan mengubah profil tekanan dibandingkan silinder sirkular. Silinder tipe-I menunjukkan fluktuasi tekanan paling tajam dengan nilai C_{Pmin} terendah, yang mengindikasikan adanya intensitas hisapan (*suction*) ganda pada sisi irisan akibat interaksi aliran dengan dinding.
3. Penggunaan sudut irisan 65° memicu terjadinya pemisahan aliran yang lebih dini. Visualisasi menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya rasio *G/D*, pengaruh interferensi dinding datar melemah, yang ditandai dengan perampingan daerah aliran belakang (*wake region*) dan pemulihan tekanan yang lebih stabil.
4. Pada konfigurasi celah terdekat, interaksi antara lapisan batas dinding (*wall boundary layer*) dengan lapisan geser silinder bagian bawah mengganggu simetri pelepasan pusaran. Mekanisme pelepasan pusaran (*vortex shedding*) yang lebih stabil dan teratur baru terbentuk kembali ketika jarak celah cukup lebar untuk meminimalkan gangguan dari dinding datar.

DAFTAR PUSTAKA

1. 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).
2. Yusup I, Cut B, Widodo SB. NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH FOUR CIRCULAR CYLINDERS ARRANGED IN-LINE SQUARE WITH AN DISTURBING BODY. 2024;3.
3. Ramamurthy AS, Lee PM. Wall Effects on Flow Past Bluff Bodies. Journal of Sound and Vibration (1973). 1973;31(4):443–51.
4. Zdravkovich MM. Forces on a circular cylinder near a plane wall. 1985.
5. Lei C, Cheng L, Kavanagh K. Re-examination of the effect of a plane boundary on force and vortex shedding of a circular cylinder. Vol. 80, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1999.
6. Choi JH, Lee SJ. Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary Layer. J Fluids Struct. 2000;14:697–709.
7. Price SJ, Sumner D, Smith JG, Leong K, Paidoussis MP. Flow Visualization Around a Circular Cylinder Near to a Plane Wall. J Fluids Struct. 2002;16:175–91.
8. Lin WJ, Lin C, Hsieh SC, Dey S. Flow Characteristics around a Circular Cylinder Placed Horizontally above a Plane Boundary. J Eng Mech. 2009;697–716.
9. Nishino T, Roberts GT, Zhang X. Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect. J Fluids Struct. 2008 Jan;24(1):18–33.
10. Wang XK, Gong K, Liu H, Zhang JX, Tan SK. Flow around four cylinders arranged in a square configuration. J Fluids Struct. 2013 Nov;43:179–99.
11. Yuwono T, Widodo WA, Mirmanto H, Fahreza F. Plane Wall Effect of Flow around Two Circular Cylinders in Tandem Arrangement. 2011 Feb;22.
12. Aiba S, Watanabe H. Flow Characteristic of a Bluff Body Cut from a Circular Cylinder. Journal of Fluid Engineering. 1997 Jun;119:453–4.
13. Igarashi T, Shiba Y. Drag Reduction for D-Shape and I-Shape Cylinders (Aerodynamic Mechanism of Reduction of Drag). JSME International Journal. 2006;49(4):1036–42.
14. Yuwono T, Widodo WA. Karakteristik Aliran Melintasi Silinder Teriris Tipe-D di Dekat Dinding Datar. In: Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII. Semarang; 2009.
15. Suprapto, Syuriadi A, Yuwono T, Aries W. Studi Ekperimental Karakterisitik Aliran pada Silinder Teriris Tipe-D yang Tersusun side by side akibat Pengaruh Sudut Stagger dan Jarak antara Silinder. In: Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VI. 2007. p. 226–33.
16. Yuwono T, Tohir A, Purwanto. Numerical Study of Flow Characteristics Around An I-Type Cylinder 53° Near a Plane Wall. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences [Internet]. 2016 Jan;11(2):841–5. Available from: www.arpnjournals.com

17. Cut B, Sutardi, Widodo WA. Numerical investigation of flow behaviour across three circular cylinders in a stagger arrangement. AIP Conf Proc. 2023 Aug 8;2431(1):140003.
18. Cut B, Sutardi, Widodo WA. Dynamic behavior of flow through three circular cylinders in staggered arrangement with three disturbance bodies around the upstream cylinder. Journal of Mechanical Engineering. 2023;20.
19. Sidaruk A, Cut B, Arif Z. Phenomenon Of Flow Through Four Circular Cylinders Arranged In- Line Square. 2025;3:0–8.