Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Phenomenon Of Flow Through Four Circular Cylinders Arranged In-Line Square

Arif m Sidaruk [1], Banta Cut[2*], Zainal Arif[3]

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

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 18 Mei 2025
Direvisi dari 28 Mei 2025
Diterima 01 Juni 2025
Dipublikasi 30 Juni 2025

***Keywoard's*:**
Silinder sirkular;
bodi pengganggu;
transition k-kl omega;
koefisien gaya angkat;
koefisien gaya hambat.

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v12i01.11828

A B S T R A C T

The development and application of circular cylinders are extensively used in various fields of engineering. These applications include the construction of offshore support pipelines, subsea pipeline networks, and shell-and-tube heat exchangers. Previous research has consistently shown that drag force, lift force, and vortex shedding occur when fluid flows past these cylinder arrangements. Consequently, further investigations have been conducted through numerical simulations, primarily aiming to mitigate these undesirable phenomena of drag, lift, and vortex shedding within the circular cylinder arrangements. This study focuses on four circular cylinders arranged in an in-line square configuration. The main cylinder diameter (D) is 25 mm, while the diameter of the disturbing body (BP) (d) is 4 mm, resulting in a diameter ratio (d/D) of 0.16. This cylinder arrangement was positioned within a narrow square channel with cross-sectional dimensions of H = 300 mm and L = 1500 mm. The setup had a blockage ratio of 25% and was tested at a Reynolds number (Re) of 5.0×10^4, based on the cylinder diameter. For the study, three variations of Inlet Disturbance Bodies (IDB) were placed at angles of $\theta = 0°$, 90°, and 270° in front of the two upstream cylinders, maintaining a gap ratio (G/D) of 0.16 relative to the circular cylinders. This numerical simulation research was carried out using 2D Unsteady-RANS via Ansys Fluent Student R2021 software. A structured mesh was employed for meshing, and the k-ω-SST model was selected for turbulence modeling. The findings of this research indicate that both the distance (L/D) and the implementation of three IDBs significantly influence the drag coefficient observed on the four circular cylinders arranged in an in-line square formation. Specifically, the addition of three IDBs around the two upstream cylinders at angles of 0°, 90°, and 270° proved to be highly effective in reducing the drag coefficient (CD) on cylinder 3 (downstream top) and cylinder 4 (downstream bottom).

A B S T R A K

Pengembangan Aplikasi silinder sirkular di dalam dunia keteknikan telah banyak digunakan, diantaranya untuk konstruksi pipa penyangga lepas pantai, jaringan pipa bawah laut dan *shell&tube heat exchanger*. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan adanya gaya hambat, gaya angkat dan *vortex shedding* yang timbul ketika aliran fluida melewati susunan silinder tersebut, sehingga dilakukan penelitian lebih lanjut secara simulasi numerik, yang bertujuan untuk mengurangi gaya hambat, gaya angkat dan *vortex shedding* pada susunan silinder sirkular tersebut.Variasi dalam penelitian ini adalah 4 (empat) buah silinder sirkular tersusun in-line square dengan diameter silinder utama (D = 25 mm) dan diameter bodi pengganggu (BP) (d = 4 mm), dimana rasio diameter nya (d/D) = 0,16. Susunan silinder tersebut ditempatkan dalam saluran sempit berpenampang bujur sangkar dengan luas penampang (H = 300 mm dan L= 1500 mm), dengan blockage ratio nya 25% yang diuji pada Re = 5.0 x 10^4 berbasis diameter silinder. Variasi 3 Inlet Disturbance Bodi (IDB) ditempatkan pada sudut θ = 0°, 90° & 270° didepan 2 (dua) silinder upstream dengan jarak gap (G/D) = 0,16 terhadap silinder sirkular. Penelitian simulasi numerik ini dilakukan dengan 2D Unsteady-RANS menggunakan software Ansys Fluent Student R2021, dengan jenis meshingnya structure mesh dan model turbulensinya adalah k-ω-SST.Hasil penelitian menunjukkan jarak (L/D) dan penggunaan 3 IDB sangat mempengaruhi koefisien gaya hambat yang terjadi pada 4 silinder sirkular tersusun In-Line Square. Penambahan 3 IDcumaB di sekeliling dua silinder upstream pada sudut 0º, 90º dan 270º, sangat efektif untuk mereduksi CD pada silinder 3 (*downstream* atas) dan silinder 4 (*downstream* bawah).

© 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

Aliran fluida yang melewati *bluff body* merupakan fenomena yang sering kita temui dalam kehidupan sehari-hari dan sangat berpengaruh terhadap gaya hambat dan gaya angkat yg terjadi (1). Salah satu bentuk geometri *body* yang banyak digunakan pada aplikasi *engineering adalah* silinder sirkular dengan berbagai macam susunan seperti *in-line, tandem, staggered,* atau *square arrays*. Aplikasinya di dunia *engineering* seperti tiang listrik, tiang pancang lepas pantai, jaringan pipa bawah laut, dan juga untuk alat penukar kalor (2). Bentuk dan susunan silinder yang berbeda akan menimbulkan gaya angkat (*lift force*) dan gaya hambat (*drag force*) yang berbeda, dimana biasanya dalam aplikasi teknik gaya *drag* tidak diinginkan. Besarnya gaya tersebut dipengaruhi oleh letak titik separasi pada *bluff bodi* (3). *Life force* (gaya angkat) biasanya menyebabkan efek getaran atau vibrasi pada kontruksi sehingga mengurangi kekuatan material, sedangkan *drag force* (gaya hambat) adalah variabel yang menyebabkan terjadi tekanan dan gesekan (4). Untuk mendapatkan performa terbaik dengan gaya hambat yang kecil pada suatu aliran fluida yang melewati *bluff body*, maka salah satu upaya yakni pemberian *inlet disturbance body* yang bertujuan untuk menunda letak titik separasi pada bodi utama. Pada prinsipnya diduga kandungan vortisitas pada *shear layer* yang dihasilkan oleh *upstream disturbance body* akan mampu mempercepat terbentuknya *boundary layer* turbulen. Adanya dominasi lapis batas turbulen pada permukaan bodi utama menyebabkan terjadinya penundaan separasi lebih ke belakang.

Silinder sirkular, sebagai contoh *bluff body*, memiliki perubahan tekanan yang kuat saat aliran fluida melewatinya. Aliran di sekitar silinder sangat kompleks, mengalami transisi dari laminar ke turbulen dan kemudian terpisah dan membentuk pusaran (5). Penambahan *bodi pengganggu* di depan silinder sirkular dapat mengurangi gaya hamba. Contohnya, penggunaan *airfoil* NACA0024 dapat mengurangi gaya hambat maksimum hingga 30,17% (6). Bodi pengganggu efektif mengurangi *pressure drop* pada silinder sirkular, dengan konfigurasi terbaik pada sudut 20˚ dan 30˚, juga dipengaruhi dengan ukuran silinder dan bilangan Reynolds (7), (8).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan gangguan, seperti silinder sirkular, di depan silinder utama dapat memengaruhi aliran fluida dan gaya yang bekerja pada silinder *upastream* (9),(10). Penggunaan dua silinder pengganggu dengan variasi sudut tertentu dapat menyebabkan fenomena *reattachment*, yaitu penundaan pemisahan aliran. Penelitian lain mengklasifikasikan model aliran tiga silinder melingkar dalam susunan segitiga sama sisi dengan variasi sudut putar dan jarak antar silinder (11). Hasilnya menunjukkan bahwa sudut putar sangat memengaruhi distribusi tekanan, lapisan geser, dan *wake* pada silinder *downstream*. Efek rasio jarak antar silinder juga diidentifikasi, termasuk fenomena *reattachment* pada silinder *downstream*.

Penelitian tentang tiga silinder yang disusun secara *equidistanly* dalam aliran seragam (12), (13), (14), menunjukkan bahwa pada rasio jarak kecil, interaksi aliran antar silinder sangat kuat. Ketika dua silinder berada berdampingan, baik di hulu maupun hilir, aliran menjadi tidak simetris, dan koefisien *lift* dan *drag* kedua silinder tidak selalu sama. Sudut serang terhadap aliran sangat memengaruhi koefisien *drag* dan *lift*, arah gaya, dan model aliran. Pada rasio jarak yang lebih besar, pengaruh antar silinder berkurang.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, muncul ide untuk melakukan penelitian lebih lanjut melalui simulasi numerik tentang aliran fluida melintasi empat silinder sirkular yang terssun *in-line square* dengan variasi bilangan Reynolds. Penelitian ini difokuskan pada upaya mengurangi gaya hambat (CD) yang terjadi pada susunan silinder tersebut dengan menggunakan bodi pengganggu.

2. Metode

Skema penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada **Gambar 1** di bawah ini, yang menunjukkan domain simulasi numerik empat silinder sirkular yang tersusun in-line square dengan bodi pengganggu di depan silinder upstream (15). Jarak antar silinder divariasikan dengan menggunakan rasio L/D sebesar 1.5; 2.0; 3.0; dan 4.0, serta nilai bilangan Reynolds yang digunakan adalah $5.0x10^4$ dan $1.5x10^5$ Selain itu, penempatan *inlet disturbance body* pada sudut θ = 0°; 90 ° & 270° yang ditempatkan di sekeliling slinder *upstream* atas dan bawah yang tersusun *in-line square.*

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

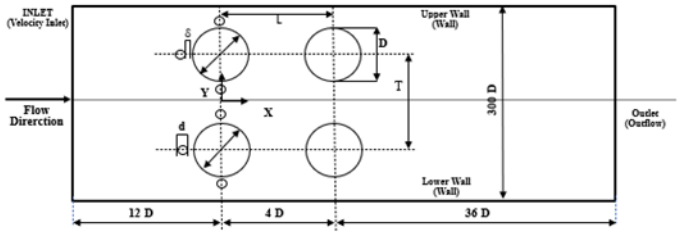
Sebelum melakukan penelitian dan perencaan simulasi yang akan dibuat terlebih dahulu dilakukan review jurnal sebagai data pendukung utama untuk melakukan penelitian ini serta berkonsultasi dengan dosen pembimbing saat

akan melakukan penelitian. Adapun waktu penelitian ini mulai dilakukan pada bulan April – Juni 2024 di laboratorium terpadu Universitas Samudra.

2.2. Simulasi Numerik

Dalam metode simulasi numerik, terdapat tiga tahapan yang umum dilakukan: *pre-processing, processing*, dan *post-processing*. *Pre-processing* adalah tahapan di mana dilakukan pemodelan atau pengaturan domain untuk simulasi numerik. *Processing* adalah tahap perhitungan iteratif yang bertujuan untuk mendapatkan solusi numerik. Sedangkan *post-processing* adalah tahap di mana data hasil penyelesaian simulasi numerik dianalisis dan diekstraksi dalam bentuk data kuantitatif dan kualitatif. Untuk menjalankan ketiga tahapan tersebut, Anda dapat menggunakan dua software, yaitu *Gambit versi 2.4.6* dan *Ansys Fluent versi 19.1*. Pembuatan domain simulasi numerik (*pre-processing*) dapat dilakukan menggunakan *software ANSYS Gambit versi 2.4.6.* Prosesnya dimulai dengan pembuatan titik-titik dalam domain penelitian yang diinginkan, kemudian titik-titik tersebut dihubungkan dengan garis-garis untuk membentuk geometri yang diinginkan. Setelah itu, garis-garis tersebut dihubungkan untuk membentuk *face* atau permukaan. Sesudah permukaan terbentuk, langkah selanjutnya adalah melakukan proses meshing dengan menentukan kerapatan mesh yang dibutuhkan. Setelah meshing selesai, *boundary condition* atau kondisi batas pada domain tersebut dapat ditentukan. Terakhir, domain yang telah dibuat dapat diekspor ke dalam format file *msh* agar dapat digunakan pada tahap *processing* selanjutnya.

Tahap *processing* dilakukan menggunakan *software ANSYS Fluent versi 19.1*. Pada tahap ini, file msh yang diperoleh dari *pre-processing* digunakan sebagai input untuk melakukan perhitungan numerik. Proses perhitungan ini dilakukan secara iteratif dengan menggunakan metode yang sesuai dengan fenomena yang akan disimulasikan. Selama proses iterasi, solusi numerik akan diperoleh dan diverifikasi. Setelah tahap *processing* selesai, tahap terakhir adalah *post-processing*. Pada tahap ini, data hasil penyelesaian simulasi numerik diekstraksi dan dianalisis. *Software ANSYS Fluent versi 19.1* juga menyediakan berbagai fasilitas untuk melakukan visualisasi data, analisis aliran, dan pengambilan data kuantitatif dan kualitatif yang relevan. Dengan menggunakan kedua software tersebut, Anda dapat melakukan simulasi numerik dari awal hingga akhir, mulai dari *pre-processing, processing,* hingga *post-processing,* untuk memperoleh informasi yang diinginkan mengenai fenomena yang sedang diteliti. Tahap terakhir (*post-processing*) adalah tahapan pengambilan data- data hasil simulasi berupa data kuantitatif seperti data C_D, *CL, Vortex shedding*, *intensitas turbulensi* dan *VIV* pada 4 silinder sirkular dan di dinding atas dan bawah serta data kualitatif berupa data velocity vector, kountur tekanan, maupun data pathline.



Gambar 1. Domain Simulasi Numerik

3. Hasil dan Pembahasan

Adapun hasil penelitian yang ditampilkan merupakan penjelasan tentang hasil penelitian berupa data *grid* independensi, koefisien tekanan (Cp) pada tiga permukaan silinder sirkular dalam susunan *In-Line Square,* profil kecepatan, visualisasi aliran berupa *velocity magnitude*, koefisien gaya hambat (C_D), koefisien gaya angkat (C_L).

3.1. Validasi Grid Independensi

Setelah dilakukan simulasi numerik terhadap 5 (lima) jenis kerapatan meshing, selanjutnya hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk Y^+ dan juga dalam bentuk koefisien gaya hambat. Tujuan dari ditampilkan data tersebut adalah untuk melihat error terkecil dari 5 (lima) variasi meshing tersebut.

Tabel 1. *Grid* Independensi Y^+

No.	Nodes	Y+ Maksimum	Y^+ Minimum	Y^+ Average
Mesh A	50.237	5.793	0.199	3.291
Mesh B	100.782	5.721	0.141	3.395
Mesh C	200.490	4.276	0.112	2.176
Mesh D	300.164	4.120	0.112	2.159
Mesh E	400.650	4.119	0.111	2.158

Tabel 2. *Grid* Independensi Gaya Hambat

No.	Nodes	C_D Sil 1	C_D Sil 2	C_D Sil 3	C_D Sil 4
Mesh A	50,237	1.452	1.453	-0.395	-0.547
Mesh B	100,782	1.456	1.458	-0.650	-0.649
Mesh C	200,490	1.450	1.414	-0.743	-0.747
Mesh D	300,164	1.487	1.499	-0.742	-0.746
Mesh E	400,650	1.499	1.50	-0.737	-0.731

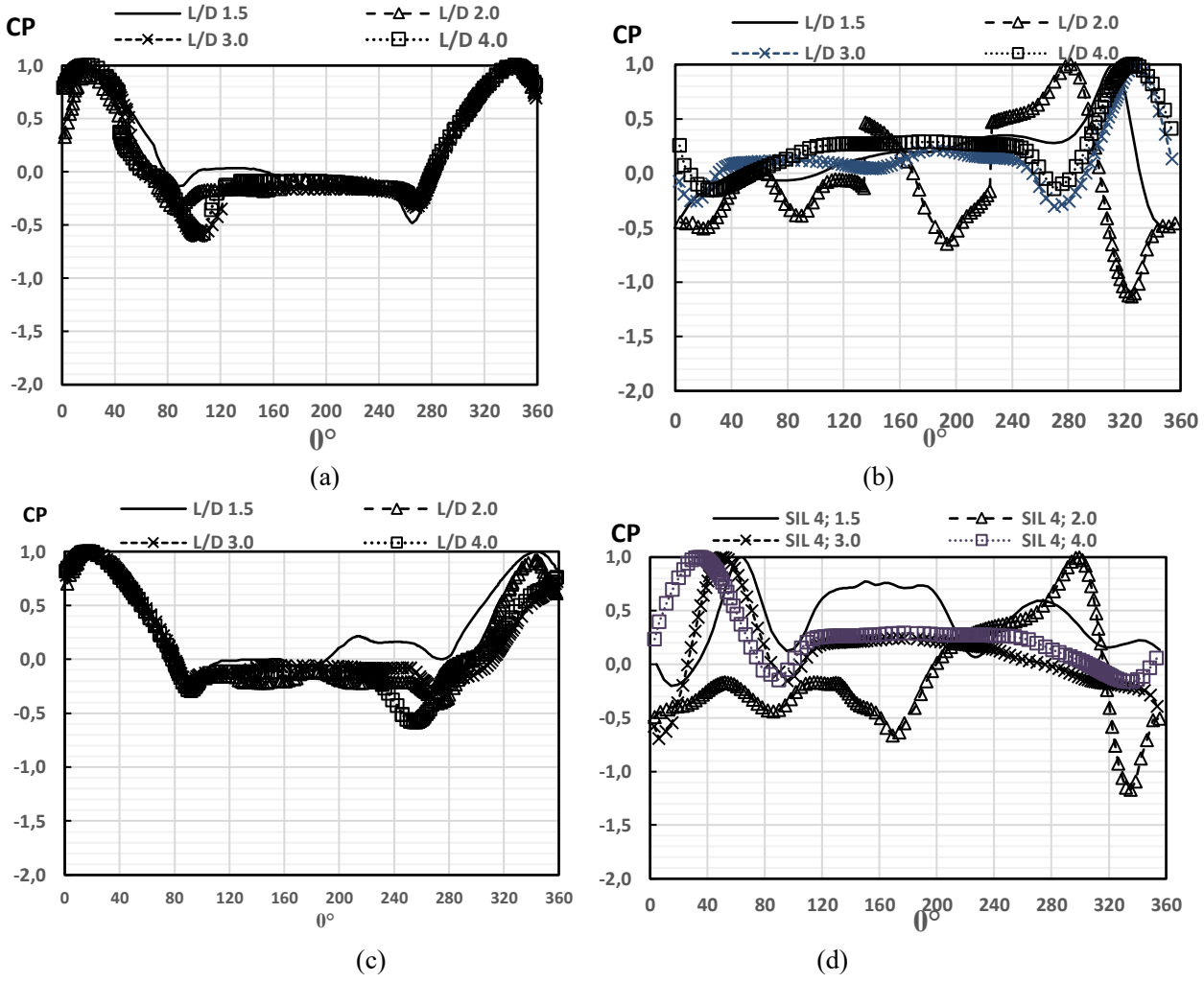
Hasil simulasi numerik terhadap 5 (lima) jenis *meshing* menunjukkan bahwa *mesh* C dengan kerapatan meshing mencapai 200,490 memberikan hasil error yang lebih kecil yaitu 0.112. Sedangkan *mesh* A dan *mesh* B dengan *meshing* yang lebih jarang, errornya jauh lebih besar. Untuk mesh D dan E walaupun hasilnya menunjukkan bahwa errornya lebih kecil dari mesh D yaitu 0.112 dan 0.111, akan tetapi meshingnya jauh lebih rapat yaitu mencapai 400.000. Jumlah meshing sangat mempengarungi lamanya waktu yang dibutuhkan untuk dilakukan simulasi numerik, sehingga dipakai *mesh* C. Begitu juga dengan hasil *grid* independensi dari koefisien gaya hambat yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut, menunjukkan bahwa error terkecil dari 5 (lima) jenis meshing yang digunakan, nilai error terkecilnya terjadi pada *running* dengan kerapatan meshing adalah 200,490 yaitu nilai CD nya adalah yang terkecil untuk semua silinder sirkular

3.2. Distribusi Koefisien Tekanan Empat Silinder Sirkular Yang Tersusun In-Line Square Dengan Bodi Pengganggu Pada Variasi L/D

Pada konfigurasi 4 silinder sirkular yang tersusun In-Line Square dengan penambahan 3 bodi pengganggu (BP) di sekeliling silinder upstream 1 dan upstream 2, distribusi koefisien tekanan (Cp) pada jarak L/D = 2.0 menunjukkan karakteristik dimana titik stagnasi pada silinder 1 dan 2 tidak tepat berada pada sudut 0º, melainkan pada sudut 24º, dengan nilai Cp maksimum sebesar 1. Keseragaman nilai Cp pada silinder 1 dan 2 disebabkan oleh aliran *freestream* yang belum terganggu dan posisi silinder yang seragam. Ketika aliran berinteraksi dengan bodi pengganggu dan

mengalami percepatan akibat melewati area yang sempit (streamtube). Percepatan ini menyebabkan penurunan drastis pada nilai Cp hingga mencapai minimum pada sudut 88° (Cp_min = -1,79) untuk silinder 1. Selanjutnya, aliran melambat karena pengaruh *boundary layer* dan tegangan geser, hingga akhirnya mengalami separasi pada sudut 96° (sisi atas) dan 266° (sisi bawah) dengan nilai Cp rata-rata -1,53. Keberadaan bodi pengganggu pada sudut 90° dan 270° menyebabkan lendutan pada grafik distribusi Cp di belakang silinder 1 dan 2 (sudut 180°), yang menandakan perlambatan signifikan dan peningkatan koefisien tekanan.

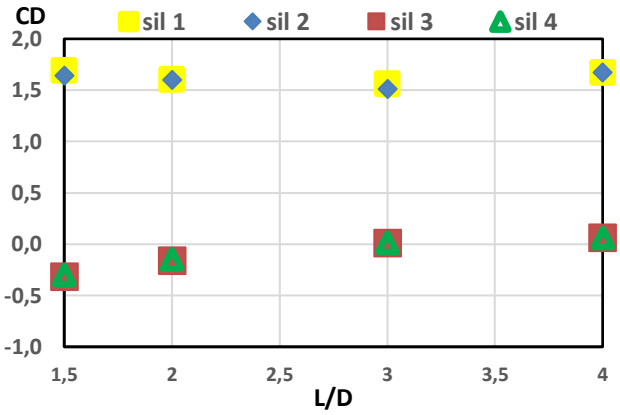
Distribusi koefisien tekanan (Cp) pada silinder 3 (downstream atas) dan silinder 4 (downstream bawah) menunjukkan perbedaan yang signifikan. Perbedaan ini terlihat baik pada posisi titik stagnasi maupun pada nilai koefisien tekanan maksimumnya. Pada silinder 3 (Downstream Atas), nilai Cp maksimumnya tidak mencapai 1, melainkan hanya 0,92 pada sudut 10°. Hal ini disebabkan karena aliran yang telah terpisah dari silinder 1 dan 2 mempengaruhi silinder 3, sehingga aliran tidak mencapai nilai maksimumnya. Untuk Silinder 4 (Downstream Bawah), titik stagnasinya masih mencapai nilai maksimum 1, tetapi terjadi pada sudut 351°. Perbedaan distribusi tekanan (Cp) pada silinder 3 dan 4 disebabkan oleh pengaruh aliran yang telah terpisah dari silinder 1 dan 2. Aliran yang terpisah ini menyebabkan gangguan pada aliran yang menuju silinder 3, sehingga nilai Cp maksimumnya tidak tercapai. Sementara itu, silinder 4 masih menerima aliran yang relatif tidak terganggu, sehingga titik stagnasinya masih mencapai nilai maksimum. Aliran yang terpisah dari silinder upstream (1 dan 2) memberikan dampak yang berbeda pada silinder downstream (3 dan 4). Silinder 3 mengalami penurunan nilai Cp maksimum, sementara silinder 4 masih mencapai nilai stagnasi maksimum meskipun pada sudut yang berbeda. Hal ini menunjukkan kompleksitas interaksi aliran pada konfigurasi silinder dengan bodi pengganggu.



Gambar 2. (a) Grafik Distribusi Koefisien tekanan pada Silinder 1, (b) pada Silinder 2, (c) pada Silinder 3, dan (d) pada Silinder 4

3.3. Distribusi Koefisien Gaya Hambat

Berikut menyajikan hasil simulasi numerik mengenai distribusi koefisien gaya hambat (CD) pada 4 silinder sirkular yang tersusun In-Line Square. Simulasi ini menggunakan 3 bodi pengganggu (BP) yang ditempatkan di sekeliling silinder 1 (upstream) pada sudut θ = 0°, 90°, dan 270°. Variasi jarak longitudinal antar silinder (L/D) yang digunakan adalah 1.5, 2.0, 3.0, dan 4.0.



Gambar 3. Grafik korfisien gaya hambat variasi jarak longitudional anatar silinder (L/D)

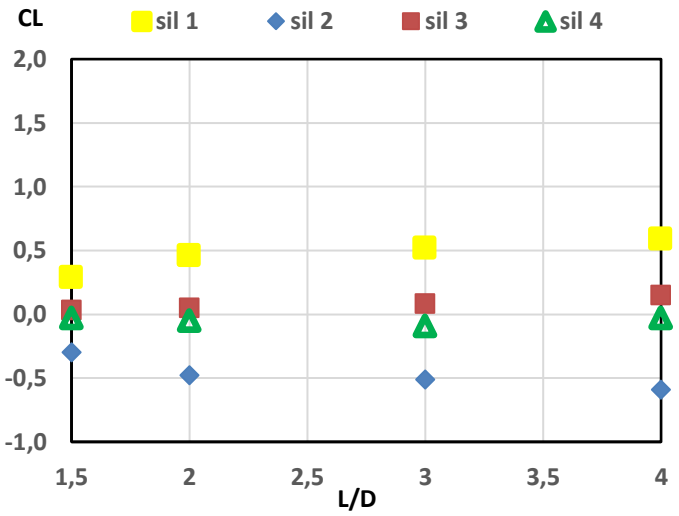
Tabel 3 berikut memperlihatkan nilai koefisien gaya hambat (CD) untuk semua silinder sirkular yang tersusun *in-line square* dengan variasi jarak L/D = 1.5, 2.0, 3.0, dan 4.0. Penggunaan bodi pengganggu (BP) sangat efektif dalam mengurangi koefisien gaya hambat (CD) pada silinder 3 dan 4 (downstream atas dan bawah). Nilai CD terendah dicapai pada jarak L/D = 1.5, yaitu -0.363 untuk silinder 4 dan -0.324 untuk silinder 3. Pada jarak L/D lainnya, nilai CD juga jauh lebih kecil dibandingkan dengan silinder 1 dan 2 (upstream atas dan bawah). Meskipun efektif mengurangi CD pada silinder downstream, penggunaan bodi pengganggu di sekitar silinder upstream (pada sudut 0°, 90°, dan 270°) menyebabkan blokade aliran. Blokade ini meningkatkan distribusi koefisien tekanan di sekitarnya, yang berujung pada peningkatan nilai CD pada silinder 1 dan 2. Penggunaan bodi pengganggu memberikan manfaat signifikan dalam mengurangi gaya hambat pada silinder downstream. Namun, penempatan dan konfigurasi bodi pengganggu perlu dioptimalkan untuk meminimalkan dampak negatifnya terhadap silinder upstream.

Tabel 3. Nilai Koefisien Gaya Hambat

Nama	L/D 1.5	L/D 2.0	L/D 3.0	L/D 4.0
SIL 1	1.691	1.605	1.564	1.676
SIL 2	1.641	1.608	1.514	1.679
SIL 3	-0.324	-0.168	0.011	0.066
SIL 4	-0.363	-0.152	0.001	0.067

3.4. Distribusi Koefisien Gaya Angkat

Distribusi koefisien gaya angkat (C_L) pada 4 silinder sirkular dengan penambahan bodi pengganggu (BP) di sekitar silinder upstream pada sudut θ = 0º, 90º, dan 270º menunjukkan pola yang menarik. Silinder 1 (Upstream Atas) dan Silinder 3 (Downstream Atas) nilai koefisien gaya angkat (C_L) keduanya bernilai positif. Silinder 2 (Upstream Bawah) dan Silinder 4 (Downstream Bawah) nilai koefisien gaya angkat (CL) keduanya bernilai negatif



Gambar 4. Grafik korfisien gaya angkat variasi jarak longitudional anatar silinder (L/D)

Nilai koefisien gaya angkat (CL) pada keempat silinder juga menunjukkan fluktuasi, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4** berikut. Fluktuasi ini mengindikasikan adanya perubahan gaya angkat yang tidak stabil pada masing-masing silinder.

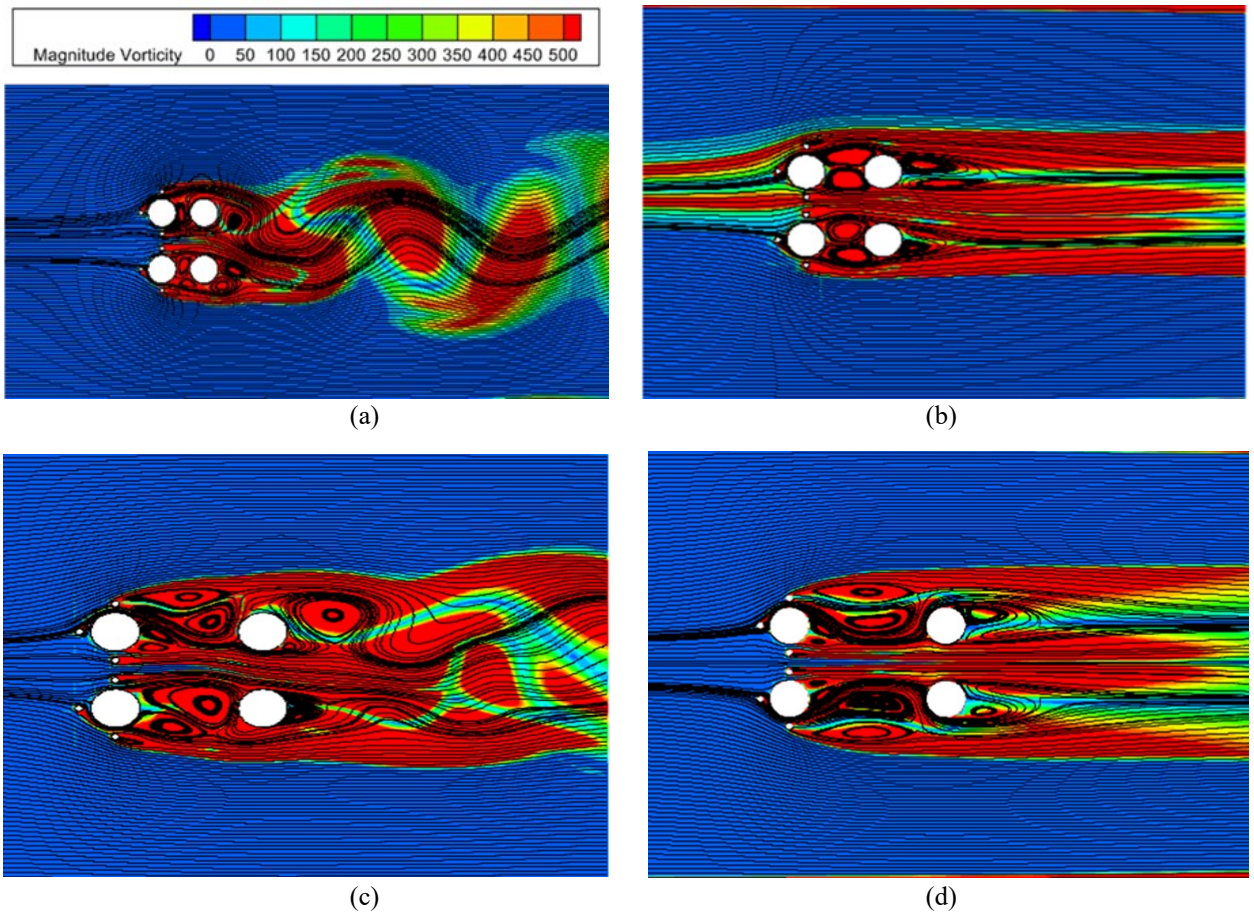
Tabel 4. Nilai Koefisien Gaya Angkat

Nama	L/D 1.5	L/D 2.0	L/D 3.0	L/D 4.0
SIL 1	0.293	0.461	0.523	0.596
SIL 2	-0.303	-0.487	-0.513	-0.597
SIL 3	0.030	0.052	0.088	0.157
SIL 4	-0.302	-0.054	-0.095	-0.032

3.5. Analisa Kontur Vortisity Aliran Melintasi 4 Silinder Sirkular Tersusun In-Line Square Dengan Bodi Pengganggu

Kontur vortisitas pada aliran yang melintasi susunan *bluff body* yang terdiri dari 4 silinder sirkular yang tersusun *in-line square*. Simulasi ini menggunakan 3 bodi pengganggu yang ditempatkan di sekeliling silinder 1 (upstream) pada sudut θ = 0º, 90º, dan 270º. Kontur vortisitas ditampilkan berdasarkan variasi jarak (L/D = 1.5, 2.0, 3.0, dan 4.0) untuk keempat silinder. Hasil simulasi menunjukkan adanya *wake region* (daerah pusaran) yang terbentuk di belakang silinder 1 dan 2 untuk semua variasi jarak L/D. Pada jarak L/D = 1.5 dan 2.0, *wake* ini masih sangat mempengaruhi silinder 3 dan 4. Namun, pada jarak L/D = 3.0 dan 4.0, mulai terbentuk *vortex shedding* (pelepasan pusaran) akibat aliran yang terlepas dari silinder 1 dan 2, meskipun belum sempurna dan masih mengenai silinder 3 dan 4. Pada jarak L/D yang lebih besar (3.0 dan 4.0), terlihat perbedaan kecepatan dari kontur vortisitas pada silinder 1, 2, 3, dan 4. Perbedaan ini ditandai dengan perbedaan warna, di mana warna yang lebih merah menunjukkan kontur vortisitas yang lebih besar Pada aliran *unsteady* (tidakSteady), simulasi ini juga menangkap fenomena pelepasan pusaran yang disebabkan oleh interaksi aliran antara dua lapisan geser (*shear layer*) pada kedua sisi silinder sirkular. Setelah aliran melewati susunan empat silinder, terlihat *vortex shedding* yang terbentuk akibat aliran yang terpisah dari silinder 3 dan 4, maupun dari silinder 1 dan 2. Pada jarak L/D yang lebih besar, vortisitas semakin meningkat dan *vortex shedding* yang terbentuk juga semakin banyak. Vorticity dan *vortex shedding* ini menjadi salah satu penyebab adanya fluktuasi gaya angkat pada keempat silinder. Fenomena *vortex shedding*

tidak terlepas dari bilangan Strouhal, di mana besar kecilnya bilangan ini sangat dipengaruhi oleh frekuensi *vortex shedding*, kecepatan aliran bebas (*free stream*), dan variasi jarak longitudinal antara silinder 1 dan 2 dengan silinder 3 dan 4. Simulasi numerik ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang kompleksitas aliran di sekitar susunan silinder sirkular dengan bodi pengganggu. Jarak antar silinder (L/D) memainkan peran penting dalam mempengaruhi pembentukan *wake*, *vortex shedding*, dan distribusi vortisitas. Fenomena-fenomena ini pada akhirnya mempengaruhi gaya angkat dan gaya hambat yang dialami oleh silinder-silinder tersebut.



Gambar 5. Kontur Vortisity Aliran Melintasi 4 Silinder (a) Pada Variasi Jarak L/D= 1.5, (b) Pada Variasi Jarak L/D= 2.0, (c) Pada Variasi Jarak L/D= 3.0, dan (d) Pada Variasi Jarak L/D= 4.0

4. Kesimpulan

Penggunaan BP disekeliling silinder 1 dan 2 (*upstream* atas dan bawah) pada sudut θ = 0°; 90° dan 120°, mampu mereduksi koefisien gaya hambat (CD) secara signifikan untuk silinder 3 dan 4 (*downstream* atas dan bawah), akan tetapi untuk silinder 1 dan 2 (*upstream* atas dan bawah) nilai CD nya meningkat walau tidak drastis. Terjadinya transisi lapis batas dari shear layer pada silinder sirkular sesudah aliran fluida mengenai bodi pengganggu Penggunaan bodi pengganggu dan variasi jarak L/D pada silinder berefek pada besarnya *vortex shedding* yang di bentuk, dimana semakn besar jarak L/D maka Vortisity semakin meningkat dan *vortex shedding* yang terbentuk semakin bervarasi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh akademisi dari Universitas Samudra yang telah memberikan kontribusi baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini. Terima kasih juga kepada sumber-sumber referensi yang telah membantu dalam pengumpulan data dan penulisan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Flowizard SF, Nugroho GD, Widiharsa FA, Ma M, Mesin JT, Teknik F, et al. DISTRIBUSI ALIRAN BERBAGAI BENTUK DRAG MODEL DENGAN VARIASI KECEPATAN FLUIDA. 2020;10–9.
2. Helmizar. Experimental study of the comparison of the flow around two circular and ellipse cylinder arranged in tandem position with their interaction on the flat wall. 2011;
3. Putra KA, Widodo WA. Studi Eksperimen Karakteristik Lapis Batas Aliran Turbulen Melintasi Empat Silinder Sirkular Tersusun Secara Equispaced dengan Rasio Gap (G / D) = 0 , 2 Dekat Dinding ’ DWDU / ’ GDQ ´. 2014;3(2):0–5.
4. Wailanduw AG, AW PH. Simulasi Numerik Aliran Melintasi Susunan Empat Silinder Sirkular pada Rasio L/D= 3,0 Dekat Dinding. Mesin. 2016;25(1):29–40.
5. Magister P, Keahlian B, Konversi R, Mesin JT, Industri FT. YANG TERSUSUN SECARA EQUILATERAL TRIANGULAR DENGAN PENAMBAHAN INLET FLOW ACROSS THREE CIRCULAR CYLINDER ARRANGED IN EQUILATERAL TRIANGULAR WITH ADDITION OF INLET DISTURBANCE. 2010;
6. Pribadi TMB, Widodo WA. Studi Numerik Aliran Melintas Airfoil Simetris dan Silinder Sirkular yang Tersusun Tandem. 2023;12(3):144–9.
7. Hidayat N, Widodo WA. STUDI EKSPERIMEN REDUKSI PRESSURE DROP SALURAN SEMPIT. 2008;
8. 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).
9. Alam MM, Sakamoto H, Moriya M. Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods. J Fluids Struct. 2003;18(3–4):347–66.
10. Widodo WA, Hidayat N. Experimental study of drag reduction on circular cylinder and reduction of pressure drop in narrow channels by using a cylinder disturbance body. Appl Mech Mater. 2014;493(5):198–203.
11. Gu Z, Sun T. Classification of flow pattern on three circular cylinders in equilateral-triangular arrangements. J Wind Eng Ind Aerodyn. 2001;89(6):553–68.
12. Tatsuno M, Amamoto H, Ishi-i K. Effects of interference among three equidistantly arranged cylinders in a uniform flow. Fluid Dyn Res. 1998;22(5):297–315.
13. 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
14. Cut B, Sutardi, Widodo WA. Dynamic behavior of flow through three circular cylinders in staggered arrangement with three disturbance bodies around the upstream cylinder. J Mech Eng. 2023;20.
15. Yusup I, Cut B, Widodo SB. NUMERICAL STUDY OF FLOW THROUGH FOUR CIRCULAR CYLINDERS ARRANGED IN-LINE SQUARE WITH AN DISTURBING BODY. 2024;3.