



Studi numerik aliran melalui struktur persegi dengan model turbulen *Large Eddy Simulation (LES)*

Mohammad Abdirizal Bahmid¹, La Ode Ahmad Barata^{2*}, Budiman Sudia²

¹ Program Sarjana Teknik Mesin Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia 93232

² Jurusan Teknik Mesin, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

Riwayat Artikel:

Diajukan: 16/05/2026

Diterima: 09/06/2026

Daring: 10/06/2026

Terbit: 30/06/2026

Kata Kunci:

Silinder persegi

Gaya-gaya aerodinamis

Aliran fluida

Bilangan Strouhal

Tekanan statis

Keywords:

Square cylinder

Aerodynamics forces

Fluid flow

Strouhal number

Static pressure

Abstrak

Perilaku aliran fluida yang melewati struktur berpotensi menimbulkan dampak buruk seperti memicu kebisingan, getaran, dan stabilitas struktur. Karenanya, analisis karakteristik alirannya menjadi penting dalam bidang rekayasa aerodinamika. Penelitian ini membahas studi numerik karakteristik aliran fluida yang melewati struktur persegi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan model turbulen *Large Eddy Simulation (LES)*. Simulasi dilakukan menggunakan *ANSYS Fluent 17.2* dengan variasi sudut serang aliran $\alpha = 0^\circ$ dan $\alpha = -30^\circ$ pada bilangan Reynolds 10^4 . Analisis difokuskan pada distribusi kecepatan, tekanan, tegangan aliran, vortisitas, serta parameter aerodinamis berupa koefisien drag (*CD*), koefisien tekanan dasar (*-CPb*), dan bilangan *Strouhal* (*St*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan sudut serang mempengaruhi karakteristik aliran secara signifikan. Pada $\alpha = 0^\circ$, pola aliran bersifat simetris dengan pembentukan vortex shedding yang stabil di daerah wake. Sedangkan pada $\alpha = -30^\circ$, medan aliran menjadi asimetris akibat pergeseran titik stagnasi dan separasi aliran yang menyebabkan peningkatan turbulensi dan pelebaran wake. Nilai koefisien drag meningkat dari 2.05 menjadi 2.34, sedangkan bilangan *Strouhal* menurun dari 0.128 menjadi 0.115. Distribusi tekanan dan tegangan menunjukkan peningkatan efek hisapan pada sisi hilir struktur yang berdampak pada kenaikan gaya hambat dan gaya angkat. Hasil validasi menunjukkan kesesuaian yang baik dengan penelitian numerik dan eksperimen sebelumnya. Dengan demikian, model *LES* mampu memberikan prediksi karakteristik aliran turbulen secara akurat pada struktur *bluff body* berbentuk persegi.

Abstract

The behavior of fluid flow around a structure may lead to undesirable effects, including noise generation, vibrations, and structural instability. Consequently, the analysis of flow characteristics plays a crucial role in aerodynamic engineering applications. This study presents a numerical investigation of fluid flow characteristics around a square structure using *Computational Fluid Dynamics (CFD)* with the *Large Eddy Simulation (LES)* turbulence model. Simulations were performed using *ANSYS Fluent 17.2* with variations of flow angle of attack at $\alpha = 0^\circ$ and $\alpha = -30^\circ$ under Reynolds number 10^4 . The analysis focused on velocity distribution, pressure distribution, flow stress, vorticity, and aerodynamic parameters including drag coefficient (*CD*), base pressure coefficient (*-CPb*), and *Strouhal* number (*St*). The simulation results indicate that the angle of attack significantly affects the flow characteristics around the square cylinder. At $\alpha = 0^\circ$, the flow field remains symmetric with stable vortex shedding formation in the wake region. Meanwhile, at $\alpha = -30^\circ$, the flow becomes asymmetric due to the shift of stagnation points and flow separation, leading to increased turbulence intensity and wake expansion. The drag coefficient increased from 2.05 to 2.34, while the *Strouhal* number decreased from 0.128 to 0.115. Pressure and stress distributions reveal stronger suction effects in the downstream region, contributing to higher drag and lift forces. Validation results demonstrate good agreement with previous numerical and experimental studies. Therefore, the *LES* model is considered capable of accurately predicting turbulent flow characteristics around square bluff body structures.

*Korespondensi: ahmad.barata@uho.ac.id



Pendahuluan

Aliran fluida melalui suatu bodi merupakan fenomena yang sering kita temui dalam kehidupan. Bentuk bodi yang berbeda akan menghasilkan karakteristik aliran fluida yang berbeda dan sangat berpengaruh terhadap fungsi dari bentuk bodi tersebut. Penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan desain aerodinamika yang optimal, walaupun sampai saat ini para peneliti belum menemukan cara yang tepat untuk menganalisis struktur aliran. Ilmu perancangan tentang mekanika fluida telah dikembangkan melalui pemahaman mengenai sifat-sifat fluida. Fluida merupakan zat yang berubah bentuk secara kontinu (terus-menerus) bila terkena tegangan geser, betapapun kecilnya tegangan geser itu. Aliran fluida yang melalui bentuk geometri yang cukup sederhana seperti persegi atau silinder bundar diperkirakan memiliki medan aliran yang lebih sederhana dibandingkan aliran yang melalui sebuah bentuk yang kompleks seperti pesawat terbang atau mobil. Walaupun demikian, bahkan benda dengan bentuk paling sederhana sekalipun menghasilkan aliran yang kompleks [1], [2].

Metode numerik dengan *Computational Fluid Dynamics (CFD)* merupakan analisa sistem yang mencakup aliran fluida, perpindahan panas dengan menggunakan simulasi yang dibantu perangkat komputer. Perangkat ini tidak hanya mampu memberikan analisis data tetapi juga visualisasi. Melalui metode numerik, beberapa skenario dapat dilakukan sesuai dengan kebutuhan model dengan biaya rendah dan fleksibilitas tinggi yang mana hal ini sulit ditemukan dalam eksperimen [3], [4].

Aliran disekitar *buff body* telah menarik minat yang cukup besar dan telah diselidiki secara ekstensif. Silinder persegi atau persegi panjang telah digunakan pada banyak struktur arsitektur seperti bangunan, geladak jembatan, monumen, dan penukar panas. Silinder persegi biasanya menyebabkan perilaku aliran tidak stabil sesaat ketika aliran berada di sekelilingnya sehingga menyebabkan terjadi beberapa fenomena *unsteady* antara lain separasi, gelembung separasi, ketidakstabilan *shear-layer*, *vortex shedding* dan lain-lain terjadi ketika aliran bergerak mengelilingi silinder [5], [6].

Upaya peningkatan dan optimalisasi desain geometri struktur yaitu dengan memahami aliran yang melalui struktur dan efek yang dihasilkannya. Ini dapat dilakukan dengan menggunakan metode numerik atau eksperimental. Kemajuan besar dalam dinamika fluida komputasi ditambah dengan pengurangan biaya perangkat keras komputasi, metode numerik terus meningkatkan bagiannya dalam proses desain. Namun, karena tingginya kompleksitas aliran turbulen utamanya pada bilangan Reynold tinggi, perusahaan mobil masih mengandalkan perpaduan antara simulasi numerik dan data terowongan angin dalam proses desain mereka. Data eksperimental secara konsisten digunakan untuk memvalidasi dan memverifikasi akurasi model numerik [7], [8].

Model turbulen LES telah berkontribusi pada perkembangan industri aerodinamika mobil, pesawat, dan kereta api sehingga berperan penting pada simulasi sistem yang memungkinkan kontrol turbulensi, yang akan menjadi sumber utama penghematan energi di masa depan. Dalam LES kontribusi struktur pembawa energi lebih besar terhadap momentum, dan transfer energi dihitung dengan tepat sehingga hanya efek dari skala turbulensi terkecil yang dimodelkan. Karena skala yang kecil cenderung lebih homogen dan universal dan kurang terpengaruh oleh kondisi batas dibandingkan skala besar seperti model RANS [9], [10].

Fenomena aliran yang melalui struktur menjadi aspek yang diperhatikan dengan serius di bidang rekayasa karena keterkaitannya dalam masalah-masalah keteknikan seperti stabilitas struktur, efek perpindahan panas, kelelahan material, getaran, akustik, kendali polusi pada cerobong, gedung pencakar langit, dan lain-lain. Pengujian model struktur baik 2D maupun 3D yang dilakukan secara eksperimental dan atau pendekatan numerik telah membantu banyak perancang dalam mendesain model struktur sesuai dengan fungsi dan karakteristik lingkungan. Respon dinamis kegagalan dan masalah stabilitas struktur memiliki kaitan erat dengan perilaku fluida yang melewati suatu penampang struktur. Karakteristik aliran yang melalui prisma persegi panjang dengan ujung bebas diteliti secara numerik oleh [11] dengan menggunakan model turbulen LES pada bilangan Reynolds $Re = 22000$. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa respon dinamis prisma mempengaruhi karakteristik aliran yang melalui model uji dimana hal ini ditunjukkan dengan adanya perubahan area/intensitas vortex aliran, vector kecepatan, *velocity vector*, komponen gaya, dan komponen lainnya.

Penelitian terdahulu yang disebutkan di atas secara numerik telah mengamati bentuk pola aliran yang terjadi di sekitar benda yang berpengaruh terhadap gaya aerodinamik struktur suatu benda, seperti *coefficient drag*, *coefficient lift*, *coefficient pressure* dan komponen kecepatan, dengan bervariasi jarak antara silinder dengan dinding datar, posisi penempatan silinder pada lapis batas. Namun demikian, kompleksitas aliran dinamika fluida dan solusi penyelesaian numerik yang dinamis, maka studi tentang perilaku aliran masih tetap relevan untuk dikaji. Dengan demikian, penelitian ini dirancang untuk menganalisis karakteristik aliran melalui benda persegi dengan dua variasi sudut serang aliran fluida, α . Komponen-komponen gaya u , C_d , $-C_{pb}$, C_l dan St dianalisis dalam penelitian ini.

Metode Numerik

Penelitian ini mensimulasikan perilaku aliran melewati struktur persegi menggunakan *software CFD Ansys fluent 17.2* dengan model turbulen *Large Eddy Simulation (LES)* dengan variasi *angle of attack* dan menghubungkan hasil tersebut ke validasi numerik lainnya.

Persamaan yang digunakan

Persamaan *Navier-Stokes* adalah bentuk diferensial dari Hukum Kedua Newton tentang gerakan. Persamaan gerak yang paling lengkap untuk elemen fluida berviskositas dalam medan gravitasi adalah persamaan *Navier-Stokes*. Tegangan-tegangan viskos sebanding dengan kelajuan deformasi untuk fluida Newtonian [12], [13].

Persamaan *Navier-Stokes* pada sumbu x, y, dan sumbu z; dapat dilihat pada persamaan (1-3).

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Persamaan kontinuitas merupakan prinsip persamaan (4) yang didapatkan pada hukum kekekalan massa, yang menjelaskan tentang laju perubahan massa pada sebuah sistem terhadap waktu yang sama dengan nol, maka persamaan kontinuitas dapat ditulis seperti pada sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Persamaan (5) momentum merupakan prinsip dari hukum newton II yang menyatakan bahwa besarnya keseluruhan gaya-gaya yang bekerja pada sistem.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \mathbf{V} + \rho(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \Sigma F \quad (5)$$

Seluruh persamaan terkait di atas diselesaikan dengan pendekatan metode volume hingga ANSYS FLUENT 17.2. Model turbulen yang digunakan pada penelitian ini adalah *Large Eddy Simulation (LES)*. Pengaturan simulasi yang menentukan beberapa aspek yang diperlukan dalam simulasi seperti bentuk solver yang dipilih, material, jenis viskos, dan lain-lain sesuai dengan asumsi yang dilakukan. **Tabel 1** dan **2** menunjukkan pengaturan simulasi yang dilakukan. Jenis aliran yang telah ditentukan sebelumnya juga diatur pada bagian ini di dalam FLUENT. Untuk menganalisis perilaku aliran, penelitian ini dilakukan memodelkan variasi sudut serang α (*angle of attack*) aliran udara.

Tabel 1. Pengaturan simulasi

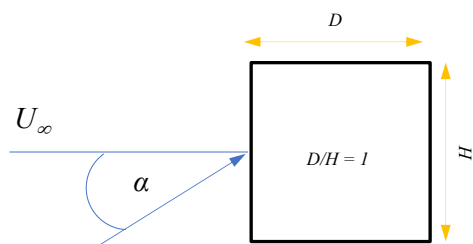
Aspek	Pengaturan
Model Solver (<i>Solver Model</i>)	<i>Pressure based, 3D, Transient</i>
Model Viskos (<i>Viscous Model</i>)	<i>Turbulent Large eddy simulation (LES)</i>
Material	<i>Air with constant density, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$</i>
Kondisi Operasi (<i>Operating Condition</i>)	<i>101325 Pa</i>
Inisiasi (<i>Initialize</i>)	<i>Velocity Inlet</i>
<i>Residual Monitor</i>	<i>10^{-6}</i>

Tabel 2. Parameter simulasi

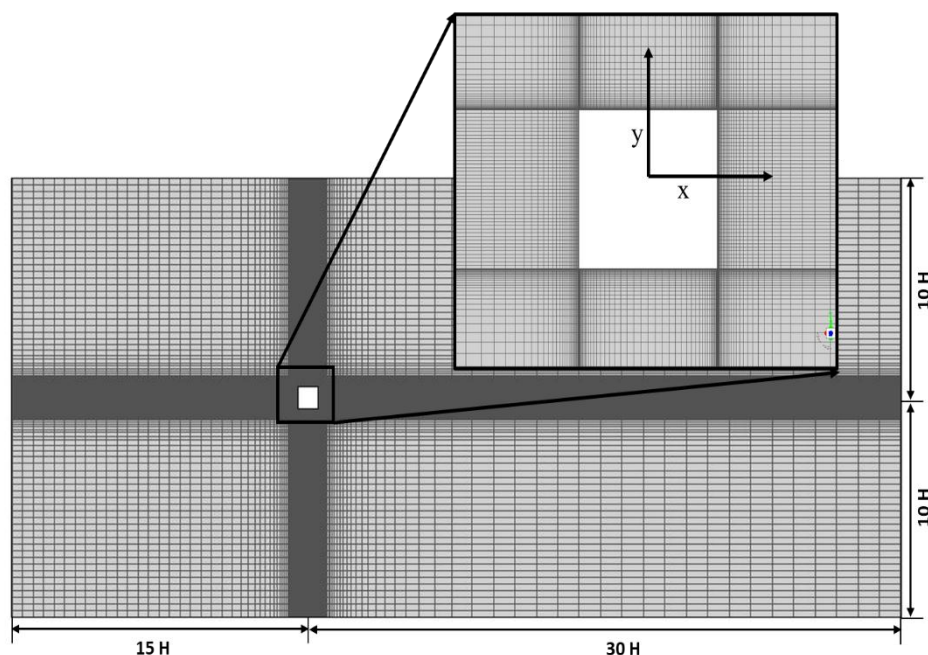
Parameter	Pengaturan Simulasi
<i>Pressure - velocity coupling</i>	<i>PISO</i>
<i>Spatial Discretization</i>	<i>-</i>
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
<i>Momentum</i>	<i>Bounded Central Differencing</i>
<i>Solution Initialization</i>	<i>Hybrid Initialization</i>
<i>Transient formulation</i>	<i>First Order Implicit</i>
<i>Time Step</i>	<i>0.0005</i>

Model Geometri

Model geometri dan dimensi yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1** yakni geometri persegi, dengan dimensi $H = D = 40 \text{ mm}$. Model uji disimulasikan dengan domain seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2**. Diskritisasi domain menggunakan model *mesh* struktur yang dikonstruksi menggunakan ICEM dengan jumlah *grid/node* seperti ditunjukkan pada **Tabel 3**.



Gambar 1. Skema model uji



Gambar 3. Domain simulasi model uji

Grid Independency Test

Pengecekan konvergensi *mesh* dari model komputasi numerik dapat dilakukan dengan *mesh dependency test*, yang menguji efek dari variasi jumlah *mesh* terhadap parameter kunci dari model yang dianalisis. **Tabel 3.** beberapa *mesh* yang digunakan dalam percobaan sebuah geometri *square* model turbulente LES. Pada *meshing 1* menunjukkan jumlah *meshing* yang paling renggang atau *mesh* yang cukup kasar untuk digunakan yaitu dengan jumlah 70.000 *nodes*. Sedangkan untuk *mesh* yang memiliki kerapatan *grid* atau *mesh* yang halus terdapat pada jumlah 300.000 *nodes*. Sehingga dapat dilihat pada **Tabel 3.** bahwa *meshing 1* memiliki nilai CD , CP , CL yang relatif kecil dibanding yang lain, sedangkan untuk *meshing 5* memiliki tingkat kerapatan *grid* yang sangat halus sehingga daya waktu yang digunakan pada proses komputasi (*running*) memakan waktu yang cukup lama. Untuk itu pemilihan *meshing 3* digunakan sebagai parameter uji cukup tepat. Hal ini karena mempunyai nilai parameter yang mendekati hasil dari peneliti terdahulu, dan juga daya waktu proses komputasi yang digunakan lebih singkat dibandingkan pada *mesh 4* dan *5*.

Tabel 3 Grid Independency Test				
Mesh	Nodes	CD	-CPb	CL
Mesh 1	70000	1.98	-1.28	-0.2
Mesh 2	10000	2.06	-1.34	0.007
Mesh 3	150000	2.05	-1.38	-0.009
Mesh 4	225000	2.10	-1.39	-0.008
Mesh 5	300000	2.10	-1.39	0.009

Numerik vs Eksperimen

Tabel 4. menunjukkan data hasil penelitian secara numerik maupun eksperimen dengan membandingkan hasil penelitian yang telah diteliti sebelumnya baik secara numerik maupun eksperimen untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

Tabel 4. Numerik vs Ekperimen

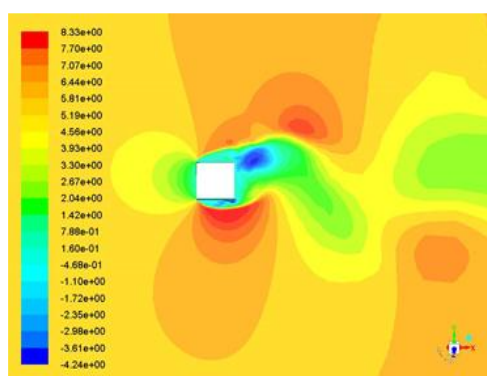
Nama	D/H	Cd	-Cpb	St	Re	Model
Mizukami [14]	1.0	2.15	1.43	0.12	2.2×10^4	LES 3D
Knisley [15]	1.0	2.03-2.20	-	0.13	2.2×10^4	Exp.
Barata [16]	1.0	2.01	1.30	0.12	10^4	RANS
Penelitian ini	1.0	2.05	1.37	0.12	10^4	LES

Hasil dan Pembahasan

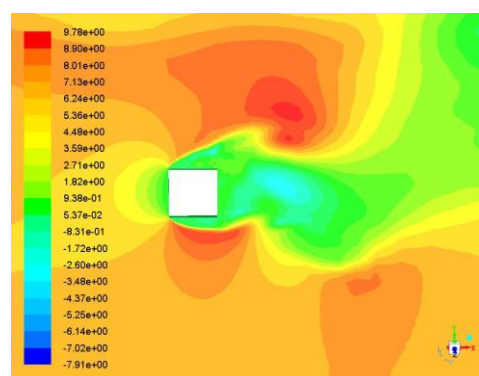
Vektor Kecepatan

Gambar 4 menggambarkan kontur kecepatan aliran fluida di sekitar silinder persegi pada dua sudut serang yang berbeda. Visualisasi ini sangat penting untuk memahami perilaku aerodinamis dan pembentukan struktur jejak aliran pada aliran di sekitar silinder.

Pada sudut serang, $\alpha = 0^\circ$, aliran bersifat simetris relatif terhadap garis tengah horizontal persegi. Saat fluida mendekati permukaan depan, fluida mencapai titik stagnasi di mana kecepatannya nol. Aliran kemudian berakselerasi dengan cepat di sekitar sudut-sudut silinder. Akibat gradien tekanan yang berlawanan dan geometri yang tajam, pemisahan aliran terjadi di tepi depan. Hal ini mengakibatkan pembentukan deretan pusaran *von Kármán* simetris di ekor aliran. Wilayah dengan warna biru di belakang silinder menandakan zona kecepatan rendah di mana terjadi sirkulasi aliran ulang, sementara daerah merah di tepi atas dan bawah menandakan aliran berkecepatan tinggi di mana garis aliran ini mengalami efek kompresi.



(a) Kontur kecepatan sudut, u ($\alpha = 0^\circ$)



(b) Kontur kecepatan, u ($\alpha = -30^\circ$)

Gambar 4. Kontur kecepatan, u pada sudut dua sudut serang berbeda

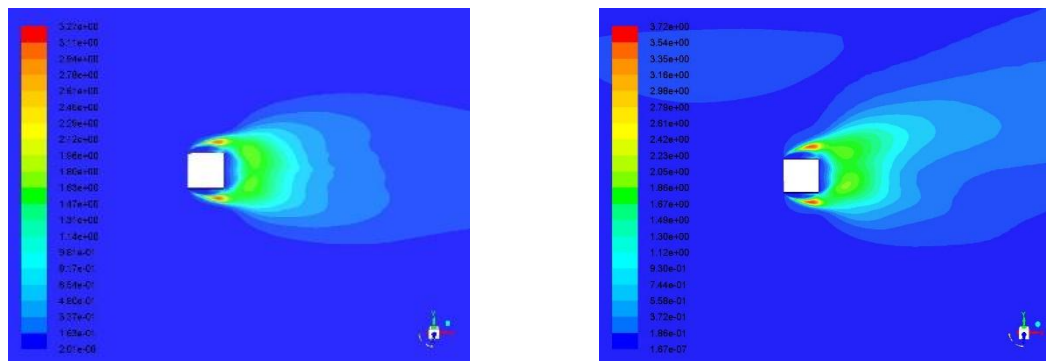
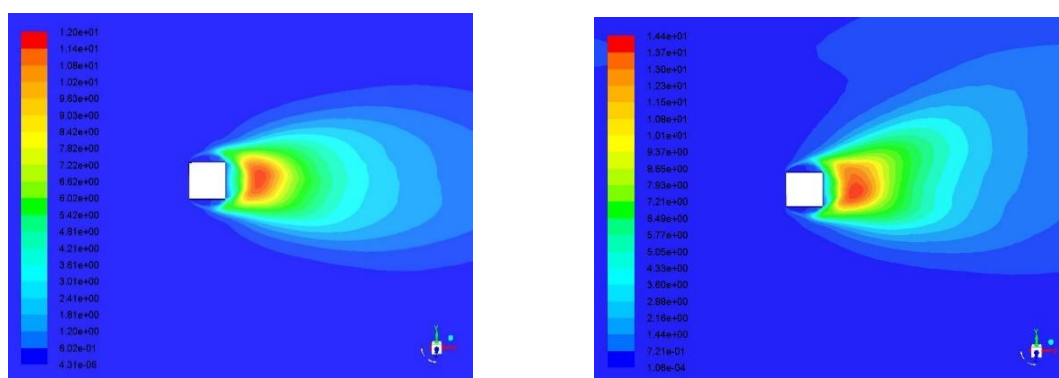
Ketika sudut serang diubah menjadi $\alpha = 30^\circ$, kesimetrican medan aliran terganggu. Titik stagnasi bergeser ke sudut depan bagian bawah. Percepatan aliran tidak lagi seragam, sedangkan permukaan atas mengalami peningkatan kecepatan yang lebih signifikan dibandingkan permukaan bawah, seperti yang ditunjukkan oleh kontur merah-oranye yang lebih besar di bagian atas. Jejak aliran menjadi miring dan asimetris, mencerminkan perubahan karakteristik gaya angkat dan gaya hambat. Titik-titik pemisahan bergeser, dan frekuensi pelepasan pusaran, yang ditandai oleh bilangan Strouhal, kemungkinan berubah akibat perubahan luas depan efektif yang dihadapi aliran.

Transisi kemiringan sudut serang aliran menunjukkan bahwa orientasi aliran yang mengenai struktur secara signifikan memengaruhi perilaku lapisan batas. Pada $\alpha = 0$, hambatan terutama ditentukan oleh perbedaan tekanan antara permukaan depan dan belakang. Pada $\alpha = -30$, luas proyeksi meningkat, yang biasanya menyebabkan koefisien hambatan yang lebih tinggi. Selain itu, asimetri dalam distribusi kecepatan menciptakan ketidakseimbangan tekanan antara permukaan atas dan bawah, yang menghasilkan gaya angkat yang tidak nol. Skala kecepatan di sebelah kiri menunjukkan bahwa kecepatan lokal maksimum meningkat dari sekitar 8.33 menjadi 9.78 m/s seiring perubahan sudut, yang mengindikasikan percepatan lokal yang lebih intens di sekitar sudut benda pada sudut kemiringan aliran fluida.

Data hasil simulasi numerik yang ditampilkan dan dianalisis pada penelitian ini adalah grafik profil kecepatan aliran yang melalui bentuk geometri persegi dengan variasi sudut serang. Grafik profil kecepatan aliran dapat dilihat pada **Gambar 5**. Profil kecepatan aliran pada arah sumbu-x pada benda persegi yang diuji mengalami penurunan kecepatan yang terjadi dikarenakan benturan aliran dan kenaikan tekanan pada saat aliran melewati model geometri yang diuji.

Distribusi tegangan aliran

Kontur tegangan normal (**Gambar 5**) merepresentasikan gaya akibat tekanan yang bekerja tegak lurus terhadap permukaan silinder persegi. Pada sudut serang aliran, $\alpha = 0^\circ$, distribusi bersifat simetris terhadap garis tengah horizontal. Wilayah tegangan medan aliran tinggi (merah/oranye) terpusat pada titik stagnasi di sisi depan silinder, di mana kecepatan fluida turun menjadi nol dan energi kinetik diubah menjadi tekanan statis. Pada $\alpha = -30^\circ$, pola simetris tersebut memisah. Titik stagnasi bergeser ke arah sudut bawah dari sisi yang menghadap aliran udara. Wilayah *wake* di belakang silinder menunjukkan distribusi tegangan rendah yang lebih luas, mengindikasikan terbentuknya gelembung separasi (*separation bubble*) dan aliran turbulen yang mengindikasikan kenaikan gaya hambat.

(a) Kontur Tegangan Normal, $\alpha = 0^\circ$ (b) Kontur Tegangan Normal $\alpha = -30^\circ$ **Gambar 5.** Kontur Tegangan normal sudut serang (α)(a) Kontur Tegangan Geser, $\alpha = 0^\circ$ (b) Kontur Tegangan Geser, $\alpha = -30^\circ$ **Gambar 6.** Kontur Tegangan Geser sudut dua variasi sudut serang (α)

Kontur tegangan geser pada **Gambar 6** merepresentasikan gaya viskos yang bekerja secara tangensial (sejajar) terhadap permukaan, yang utamanya dipicu oleh gradien kecepatan di dalam area lapisan batas (*boundary layer*). Untuk kedua sudut aliran tersebut, tegangan geser maksimum terjadi pada sudut-sudut tajam dari silinder uji. Sudut-sudut ini bertindak sebagai titik singularitas di mana medan aliran dipaksa untuk berakselerasi dengan cepat sebelum akhirnya terpisah terjadi saat separasi aliran. Pada $\alpha = -30^\circ$, besaran tegangan geser meningkat (mencapai sekitar 1.44×10^1 dibandingkan dengan $\alpha = 0^\circ$ yang mencapai 1.20×10^1). Hal ini disebabkan oleh peningkatan luas penampang depan efektif dan pengalihan aliran yang lebih masif ketika fluida bergerak melewati geometri miring (bersudut).

Transisi $\alpha = 0^\circ$ ke $\alpha = -30^\circ$ secara signifikan mengubah kuantitas koefisien gaya-gaya aerodinamika (yakni gaya hambat (*drag*) dan gaya angkat (*lift*)). Pada kasus $\alpha = 0^\circ$, aliran didominasi oleh hambatan yang diinduksi tekanan (*pressure drag*) karena perbedaan tekanan yang besar antara sisi depan dan belakang. Saat sudut serang berubah menjadi $\alpha = 30^\circ$, silinder persegi mulai menghasilkan gaya angkat (*lift*) akibat distribusi tekanan yang tidak simetris antara permukaan atas dan bawah. Area medan aliran *wake*, yang terlihat sebagai "ekor" memanjang pada kontur, merepresentasikan area defisit momentum. Pada $\alpha = -30^\circ$, *wake* tersebut berbelok ke atas, dan intensitas lapisan geser yang terlepas dari sudut-sudut silinder meningkat. Hal ini menunjukkan tingkat *vortex shedding* yang lebih tinggi dan potensi instabilitas *aeroelastik*. Tepi tajam dari persegi memastikan bahwa titik separasi aliran tetap berada di sudut-sudut tersebut, terlepas dari berapa pun bilangan *Reynolds* nya, yang merupakan karakteristik perilaku benda tumpul (*bluff body*).

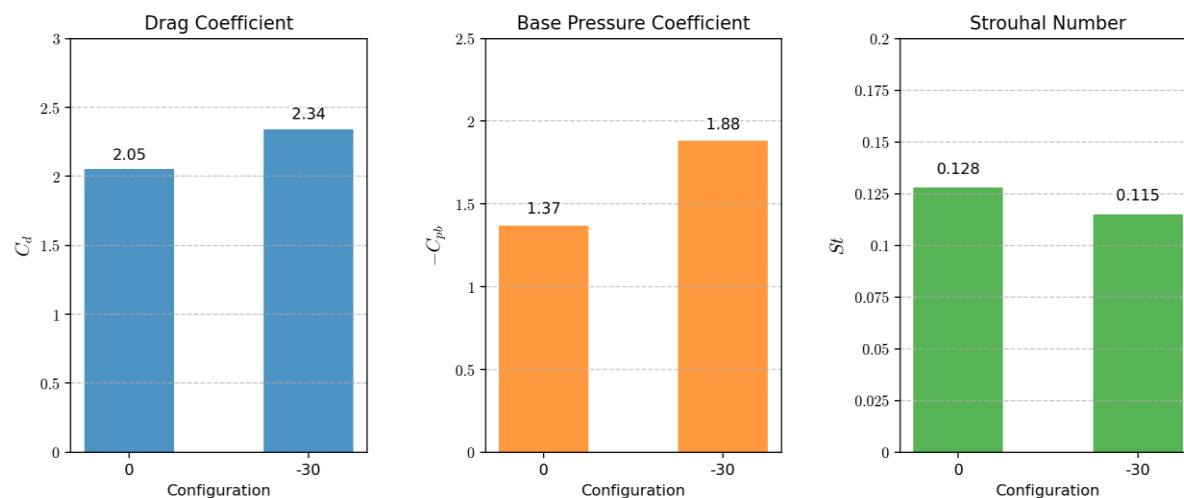
Analisis gaya-gaya aerodinamis aliran fluida

Gambar 7 menunjukkan parameter gaya-gaya aerodinamis aliran fluida yang melewati silinder persegi dengan dua variasi sudut aliran. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa peningkatan signifikan pada koefisien hambat (CD) saat beralih dari konfigurasi 0° ke konfigurasi -30° . Secara spesifik, CD meningkat dari sekitar 2.05 menjadi 2.34. Sejalan dengan itu, besaran koefisien tekanan sisi hilir dasar ($-CP_b$) meningkat dari kira-kira 1.37 menjadi 1.88. Dalam dinamika aliran fluida, gaya hambatan pada benda tumpul (*bluff body*) didominasi oleh hambatan tekanan (*pressure drag*). Koefisien tekanan dasar CP_b adalah ukuran atau kuantitas tekanan negatif di area huilir (*wake region*) di belakang silinder. Nilai CP_b yang lebih tinggi menunjukkan tekanan absolut yang lebih rendah di bagian hilir aliran/area belakang silinder. Hal ini menciptakan perbedaan tekanan yang lebih besar antara sisi hulu (stagnasi) dan sisi hilir, yang secara langsung mengakibatkan peningkatan CD yang teramati.

Bilangan *Strouhal* ($St = f.HU^{-1}$) merepresentasikan kuantitas frekuensi non-dimensional dari pelepasan pusaran aliran (*vortex shedding*). **Gambar 7** menunjukkan bahwa St menurun dari sekitar 0.128 menjadi 0.115 saat $\alpha = -30^\circ$. Relasi terbalik antara koefisien hambatan dan bilangan *Strouhal* adalah fenomena klasik dalam studi aliran di sekitar benda tumpul. Ketika sudut arah aliran disesuaikan ke -30° , titik-titik pemisahan aliran akan bergeser, atau melebar di sisi hilir aliran.

Perilaku aliran di sisi hilir ini dikaitkan dengan naiknya CD karena memindahkan lebih banyak fluida (*entrainment effect*) dan menciptakan zona tekanan rendah yang lebih negatif. Secara bersamaan, dimensi zona aliran di hilir menjadi lebih lebar yang menyebabkan frekuensi pembentukan pusaran Kármán (*Kármán vortex street*) yang lebih rendah. Saat lapisan geser (*shear layers*) terdorong lebih jauh, hal ini membutuhkan waktu lebih lama untuk berinteraksi dan menggulung menjadi pusaran-pusaran diskrit, sehingga mengurangi frekuensi aliran dan parameter St .

Peningkatan $-CP_b$ mengonfirmasi bahwa efek hisapan (tekanan negatif) di aliran belakang silinder lebih kuat pada kasus $\alpha = -30^\circ$. Ini menunjukkan bahwa perubahan sudut datang aliran fluida meningkatkan ketidakstabilan aliran atau turbulensi di dekat aliran belakang, menarik lebih banyak energi dari aliran utama ke dalam struktur aliran belakang tersebut. Singkatnya, konfigurasi $\alpha = -30^\circ$ mengalami hambatan aerodinamis yang lebih tinggi karena penurunan tekanan yang lebih nyata di sisi belakang silinder dengan zona yang lebih lebar, yang secara inheren beresolusi pada frekuensi karakteristik yang lebih rendah.



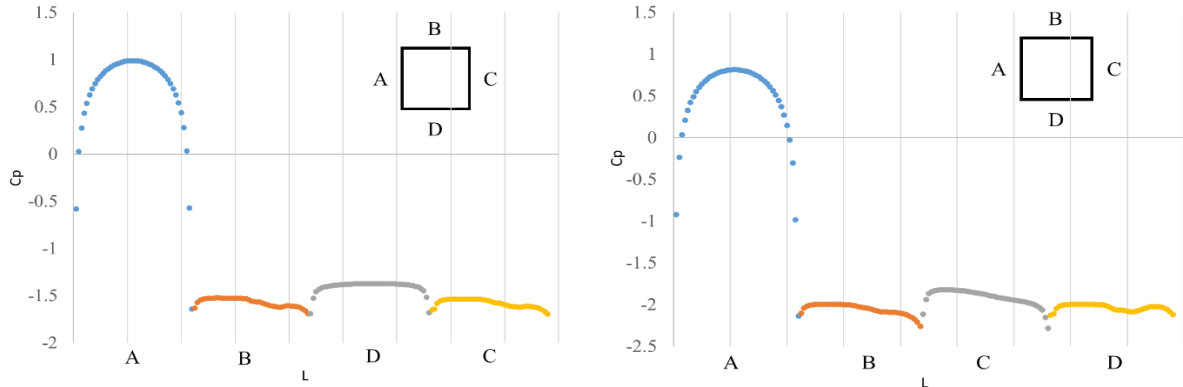
Gambar 7. Komponen gaya aerodinamis aliran

Distribusi Tekanan Aliran

Gambar 8 mengilustrasikan perilaku aerodinamis dari silinder persegi dengan dua sudut serang aliran yang berbeda. Pada sudut serang $\alpha = 0^\circ$, aliran menabrak permukaan A (sisi depan silinder) secara tegak lurus. Koefisien tekanan mencapai nilai maksimum CP sekitar 1.0 pada titik stagnasi yang terletak di pusat permukaan A. Saat aliran mencapai sudut tajam dari persegi tersebut, terjadi pemisahan aliran (*flow separation*). Hal ini menyebabkan terbentuknya gelembung pemisahan (*separation bubble*) yang besar dan zona *wake* (daerah aliran belakang) bertekanan rendah. Kuantitas CP pada sisi samping (B dan D) serta permukaan belakang (C) bernilai negatif secara signifikan,

biasanya berkisar antara -1.5 hingga -2.0, yang menunjukkan adanya zona hisapan atau vakum (*suction*) yang tinggi.

Ketika arah aliran fluida membentuk sudut 30°, pola simetritas aliran berubah. Titik stagnasi bergeser di sepanjang permukaan A, dan distribusi tekanan menjadi asimetris. Permukaan A: Tekanan puncak tetap mendekati $CP = 1.0$, tetapi distribusinya miring ke arah sudut depan. Puncak zona hisapan: gradien tekanan menjadi lebih ekstrem di tepi depan. Pada permukaan B, hisapan meningkat



(a) Grafik Distribusi Tekanan 0°

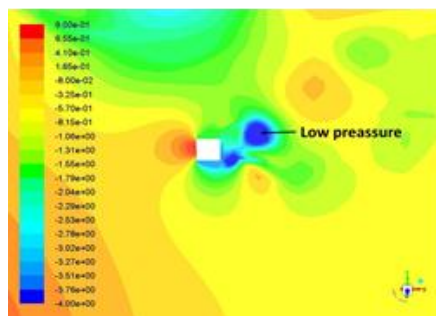
(b) Grafik Distribusi Tekanan -30°

Gambar 8. Distribusi tekanan dengan sudut serang 0° dan -30°

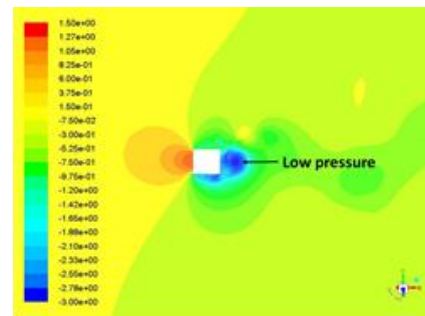
(CP lebih negatif) dibandingkan dengan kasus $\alpha = 0^\circ$ karena aliran harus berakselerasi lebih cepat di sekitar sudut efektif yang lebih tajam.

Area *wake* aliran merupakan zona tekanan rendah pada plot kontur **Gambar 9**, yang menunjukkan struktur *wake* yang bias. Distribusi tekanan yang asimetris antara permukaan atas dan bawah menghasilkan gaya angkat yang tidak bernilai nol, berbeda dengan kasus $\alpha = 0^\circ$ yang mana hal membentuk pola simetris.

Perubahan arah aliran fluida relatif terhadap benda silinder dari 0° ke 30° secara signifikan mengubah parameter koefisien aerodinamis. Sudut tajam pada silinder persegi memastikan bahwa aliran tetap terpisah terlepas dari sudutnya, namun besaran dan distribusi tekanan hisap sangat sensitif terhadap sudut datang aliran. Sifat ssimetris ini merupakan pemicu utama meningkatnya hambatan (*drag*) dan timbulnya gaya angkat dalam aerodinamika benda tumpul (*bluff body*) sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya.



(a) Kontur Tekanan 0°



(b) Kontur Tekanan -30°

Gambar 9. Kontur distribusi tekanan dengan sudut serang 0° dan -30°

Gambar 10 mengilustrasikan kontur vortisitas aliran di sekitar silinder persegi pada dua sudut serang yang berbeda. Vortisitas ω , didefinisikan sebagai adalah ukuran vektor dari rotasi lokal elemen fluida, yang didefinisikan sebagai tanda *curl* dari medan kecepatan u [12], [17]:

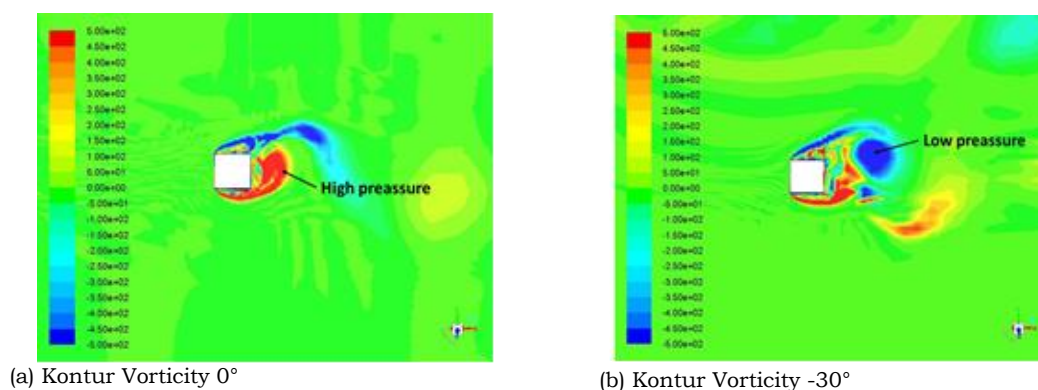
$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u}$$

Pada aliran dua dimensi dengan bidang koordinat xy , vortisitas tegak lurus terhadap bidang tersebut (sepanjang sumbu- z):

$$\omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

Kontur vortisitas pada gambar 10 menunjukkan wilayah dengan vortisitas positif tinggi (merah) dan negatif (biru), yang mewakili rotasi searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam yang dihasilkan oleh pemisahan lapisan batas (*boundary layer*) pada sudut tajam persegi. Pada $\alpha = 0^\circ$, aliran bersifat simetris terhadap garis tengah horizontal persegi. Pemisahan aliran terjadi pada tepi depan atau tepi belakang yang mana sifat ini dipengaruhi oleh bilangan Reynolds. **Gambar 10** juga menunjukkan pembentukan *Von Kármán vortex street*, di mana pusaran yang bergantian dilepaskan ke dalam medan zona aliran hilir (*wake*).

Pada saat sudut datang aliran -30° , simetrisitas aliran terputus. Luas penampang *frontal* efektif meningkat, menyebabkan zona jejak aliran (*wake*) menjadi lebih lebar. Titik stagnasi bergeser, dan titik-titik pemisahan aliran menjadi asimetris. Pusaran dengan *Low pressure* menunjuk ke inti dari pusaran besar yang terlepas. Berdasarkan prinsip *Bernoulli*, kecepatan rotasi yang tinggi pada inti pusaran menghasilkan penurunan tekanan yang signifikan. Zona bertekanan rendah ini merupakan pendorong utama terjadinya nada aeolian (*aeolian tones*) dan getaran struktural yang dikenal sebagai *Vortex-Induced Vibrations (VIV)*, dimana prinsip ini erat kaitannya dalam aplikasi teknik, seperti desain gedung, jembatan, struktur lepas pantai [18], [19], sistem pembangkit daya [9]. Asimetrisitas *vortex* tersebut menginduksi gaya angkat (*lift force*) rata-rata yang tidak nol dan meningkatkan koefisien hambat (*drag coefficient*) karena lebar zona medan aliran, *wake* yang lebih besar serta perbedaan tekanan yang besar antara sisi depan dan sisi belakang silinder.



Gambar 10. Kontur *vorticity* pada silinder dengan sudut serang 0° dan -30°

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menganalisis karakteristik aliran fluida yang melewati struktur persegi menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan model turbulen *Large Eddy Simulation (LES)*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan sudut serang aliran memberikan pengaruh signifikan terhadap pola aliran, distribusi tekanan, tegangan, pembentukan vortex, serta gaya-gaya aerodinamis yang terjadi di sekitar struktur persegi. Pada sudut serang $\alpha = 0^\circ$, aliran cenderung bersifat simetris dengan pembentukan pola vortex shedding yang teratur di daerah wake. Sementara itu, pada sudut serang $\alpha = -30^\circ$, medan aliran menjadi asimetris akibat pergeseran titik stagnasi dan perubahan titik separasi aliran. Kondisi ini menyebabkan peningkatan luas wake, intensitas turbulensi, serta terbentuknya distribusi tekanan yang tidak merata antara sisi atas dan bawah struktur.

Analisis aerodinamis menunjukkan bahwa perubahan sudut serang dari 0° ke -30° meningkatkan nilai koefisien drag (*CD*) dari sekitar 2.05 menjadi 2.34 serta meningkatkan nilai tekanan dasar (*-CPb*) akibat bertambahnya efek hisapan pada sisi hilir struktur. Sebaliknya, bilangan *Strouhal* mengalami penurunan yang mengindikasikan frekuensi vortex shedding menjadi lebih rendah akibat pelebaran zona wake. Kontur tegangan normal, tegangan geser, dan vortisitas juga memperlihatkan peningkatan ketidakstabilan aliran pada sudut serang miring.

Hasil validasi numerik menunjukkan bahwa simulasi *LES* yang digunakan memiliki kesesuaian yang baik terhadap data penelitian terdahulu baik secara numerik maupun eksperimen. Dengan demikian, model *LES* dinilai mampu memprediksi karakteristik aliran turbulen di sekitar *bluff body* secara cukup akurat. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan desain aerodinamis struktur teknik seperti bangunan, jembatan, kendaraan, dan sistem rekayasa lainnya yang dipengaruhi oleh fenomena aliran fluida turbulen.

Daftar Pustaka

- [1] S. Tiwari, M. Swaminathan, S. Santhosh Eashwar, Harender, and D. B. Singh, "Performance enhancement of the photovoltaic system with different cooling methods," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 30, pp. 45107–45130, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-20330-x.
- [2] J. Liu, B. Yan, Y. Gao, X. Zhang, and Y. Pei, "Study on Characteristics of Aeolian Vibration of Conductor Lines Considering Coupling Between Conductor Motion and Vortex Excitation," *Int. J. Appl. Mech.*, vol. 17, no. 03, pp. 24–26, Mar. 2025, doi: 10.1142/S1758825125500115.
- [3] F. Duan and J. Wang, "Fluid-structure-sound interaction in noise reduction of a circular cylinder with flexible splitter plate," *J. Fluid Mech.*, vol. 920, no. June, 2021, doi: 10.1017/jfm.2021.403.
- [4] Z. Hu, J. Wang, Y. Sun, and K. Lin, "The Suppression of Flow-Induced Vibrations for a Single and Two Tandem-Arrangement Cylinders Using Three Splitter Plates," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 9, 2024, doi: 10.3390/jmse12091487.
- [5] Y. Niu and B. A. Younis, "Computational study and field implementation of methods for the control of vortex shedding from a bridge caisson," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 19, no. 1, 2025, doi: 10.1080/19942060.2025.2504677.
- [6] Y. Liu, Y. Li, J. Li, J. Zhou, and X. Qiu, "The wake characteristics and hydrodynamic forces of a near-wall circular cylinder with the splitter plate," *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 38, no. 33, 2024, doi: 10.1142/S0217984924503160.
- [7] W. Oberkampf, "Concepts and Practice of Verification, Validation, and Uncertainty Quantification," 2013. [Online]. Available: papers://flf22675-95a4-4828-aca2-0d710de1e56f/Paper/p5673
- [8] W. L. Oberkampf and M. F. Barone, "Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics," *J. Comput. Phys.*, vol. 217, no. 1, pp. 5–36, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jcp.2006.03.037.
- [9] L. O. A. Barata and S. Samhuddin, "Karakteristik pemanen daya listrik berbasis getaran struktur," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 911–919, Jan. 2023, doi: 10.21776/jrm.v13i3.1268.
- [10] F. R. Armin, L. O. A. Barata, and La Hasanudin, "Analisa Numerik Aliran melewati Penampang 2D menggunakan Model Turbulen uRANS," *Enthalpy J. Ilm. Mhs. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, pp. 113–121, 2025, doi: 10.55679/enthalpy.v10i2.3.
- [11] La Ode Ahmad Barata, Takahiro Kiwata, Aditya Rachman, Samhuddin, and nanang endriatno, "Numerical Investigation of Flow Around Finite Height Rectangular," *CFD Lett.*, vol. 15, no. 6, pp. 154–175, Apr. 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.6.154175.
- [12] T. Kajishima and K. Taira, *Computational Fluid Dynamics*, no. 9783319762333. Cham: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-45304-0.
- [13] ANSYS Inc., "Ansys Fluent 18.2 Tutorial Guide," ANSYS Inc., vol. 15317, no. Agustus, 2017.
- [14] S. Mizukami, "Study on the flow around the elastic supported prism and the vibration dynamics of the flow (in Japanese)," Kanazawa University, 2017.
- [15] C. W. Knisely, "Strouhal numbers of rectangular cylinders at incidence: A review and new data," *J. Fluids Struct.*, vol. 4, no. 4, pp. 371–393, Jul. 1990, doi: 10.1016/0889-9746(90)90137-T.
- [16] L. O. A. Barata, T. Kiwata, Sudarsono, S. Alfat, N. Endriatno, and R. Wijayanto, "Flow Structure Control over the Square Cylinder with Inclined Splitter Plate: A Pathway to Conserving Energy," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 12986–13001, Nov. 2025, doi: 10.15282/ijame.22.4.2025.11.0988.
- [17] H. Versteeg and W. Malalasekera, *Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd ed. Pearson Education Limited, 2010.
- [18] J. Zhou, X. Qiu, J. Li, and Y. Liu, "Effects of a short splitter plate on the wake characteristics and vortex evolution of flow around a circular cylinder in proximity to a wall," *J. Fluid Mech.*, vol. 1016, August, 2025, doi: 10.1017/jfm.2025.10301.
- [19] C. Wang, Q. Wen, S. Zhou, X. Hua, and Z. Huang, "Effects of end condition and aspect ratio on vortex-induced vibration of a 5: 1 rectangular cylinder," *J. Fluids Struct.*, vol. 109, no. January, p. 103480, 2022, doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103480.

Ucapan penghargaan

"Tidak tersedia"

Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam publikasi artikel ini. Semua penulis menyetujui penerbitan artikel ini.

Lampiran

"Tidak tersedia"