

STUDI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS DAN TEGANGAN GESER DINDING UNTUK SILINDER TUNGGAL DENGAN ALIRAN *CROSSFLOW* PADA VARIASI BILANGAN REYNOLDS (Re) = 17.000, 51.000, 85.000, DAN 140.000

*Jeremy Sabam Chrisgar Siregar¹, Berkah Fajar Tamtomo Kiono², Khoiri Rozi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: jeremy1.regar@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini mempelajari pengaruh Bilangan Reynolds terhadap pola dan karakteristik aliran, distribusi tegangan geser dinding dan perpindahan panas konveksi sepanjang permukaan silinder dengan memanfaatkan metode CFD (Computational Fluid Dynamics). Udara pada temperatur 20 °C diasumsikan sebagai fluida incompressible. Variasi Bilangan Reynolds yang digunakan meliputi $Re = 17.000, 51.000, 85.000,$ dan 140.000 . Pemodelan geometri silinder dilakukan pendekatan 2D dengan model turbulensi SST $k-\omega$. Distribusi kecepatan, tekanan statis, koefisien hidrodinamika, Bilangan Strouhal, tegangan geser dinding dan Bilangan Nusselt digunakan sebagai parameter pembanding. Hasil simulasi menunjukkan pada $Re = 17.000, 51.000,$ dan 85.000 menghasilkan skema yang identik untuk setiap parameter pembanding, sedangkan $Re = 140.000$ menghasilkan nilai yang berbeda. Hal ini disebabkan oleh transisi rezim aliran, oleh sebab itu separasi aliran mengalami penundaan. Faktor-faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai tersebut adalah distribusi kecepatan aliran, jarak aliran terhadap titik stagnasi, dan lapisan batas permukaan silinder.

Kata kunci: bilangan reynolds; cfd; perpindahan panas konveksi; silinder; tegangan geser dinding

Abstract

This research investigates the influence of the Reynolds number on the flow patterns and characteristics, wall shear stress distribution, and convective heat transfer along a cylindrical surface using Computational Fluid Dynamics (CFD) methodology. Air at a temperature of 20°C is assumed to be an incompressible fluid. The Reynolds number variations considered are $Re = 17.000, 51.000, 85.000,$ and 140.000 . The 2D geometry modeling of the cylinder is based on the SST $k-\omega$ turbulence model. Parameters for comparison include velocity distribution, static pressure, hydrodynamic coefficients, Strouhal number, wall shear stress, and Nusselt number. Simulation results indicate that at $Re = 17.000, 51.000,$ and 85.000 , identical patterns are observed for each comparative parameter; while at $Re = 140.000$, different values are obtained due to the transition in the flow regime, resulting in delayed flow separation. Factors influencing these variations include flow velocity distribution, flow distance from the stagnation point, and the boundary layer on the cylinder surface.

Keywords: *cfid; convective heat transfer; cylinder; reynolds number; wall shear stress*

1. Pendahuluan

Aliran *crossflow* pada silinder merupakan peristiwa aliran fluida klasik yang terjadi saat fluida mengalir pada silinder dengan sudut serang tertentu. Subjek ini menjadi cukup populer untuk diteliti selama beberapa dekade terakhir, baik secara fundamental maupun pengembangannya [1]. Berbagai implementasi yang memanfaatkan silinder seperti, energi yang diinduksi oleh vortex pada pembangkit, heat exchanger, kabel bawah laut untuk transmisi daya dan telekomunikasi, kendaraan mikro bawah air, dll. Meskipun silinder memiliki geometri yang sederhana, aliran fluida yang melewati silinder dapat menghasilkan pembentukan *boundary layer*, separasi aliran, pembentukan vortex dan turbulensi. Hal tersebut yang menyebabkan pola dan karakteristik aliran fluida pada silinder menjadi cukup kompleks [2]. Akibatnya, interaksi fluida-struktur pada silinder seperti *vortex shedding*, distribusi tegangan geser dan perpindahan panas, juga mendapatkan pengaruh oleh kerumitan aliran fluida tersebut [3].

Penelitian yang mempelajari interaksi fluida-struktur dalam aliran *crossflow* pada silinder menggunakan pendekatan metode numerik ataupun eksperimen secara rutin diteliti selama beberapa dekade. Analisa perpindahan panas pada $Re = 2 \times 10^4$ menggunakan LES (*Large Eddy Simulations*) dengan variasi jarak antara silinder $L/D = 1,5-6$, menghasilkan Bilangan Nusselt pada silinder untuk zona *upstream* lebih tinggi dibandingkan dengan silinder

pada zona *downstream* [4]. Penelitian yang mempelajari pengaruh Bilangan Reynolds dan Bilangan Prandtl dalam menghitung Bilangan Nusselt. Ditemukan bahwa Bilangan Nusselt memiliki ketergantungan terhadap Bilangan Prandtl khususnya pada Bilangan Reynolds rendah [5]. Studi numerik untuk memprediksi Bilangan Nusselt pada permukaan silinder dengan modifikasi $TI = 0.34\%$, model turbulensi $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST- $k-\omega$, dan kondisi aliran *steady* serta *unsteady* pada $Re = 35.950$. Hasil studi menunjukkan modifikasi *turbulent intensity* mampu menurunkan nilai *turbulent kinetic energy* dan *heat transfer* pada silinder. Model turbulen SST- $k-\omega$ memberikan akurasi perhitungan yang baik, sedangkan model turbulen $k-\epsilon$ dan $k-\omega$ memerlukan Bilangan Reynolds yang lebih tinggi untuk meningkatkan akurasi perhitungannya [3].

Selain itu, terdapat studi perbandingan penggunaan *grid* antara *grid quadrilateral* dengan *triangular* pada $Re = 17.000$. Pemodelan geometri menggunakan bentuk 2D dan model turbulen SST- $k-\omega$. Hasil perbandingan antar kedua *grid* tersebut menunjukkan nilai *coefficient drag* dan *coefficient lift* memiliki *error* yang sangat kecil. Namun, *grid triangular* khususnya *grid tri-67* menjadi *grid* yang paling mendekati [6]. Analisa numerik juga dilakukan kepada rezim aliran *sub-critical* dan *critical* pada silinder yang memiliki permukaan halus. Model turbulen yang digunakan dalam penelitian ini adalah LES dan pemodelan geometri silinder dalam bentuk 3D. Hasil simulasi menunjukkan *coefficient drag* saat rezim aliran transisi dari *sub-critical* menuju *critical* mengalami penurunan secara signifikan [1].

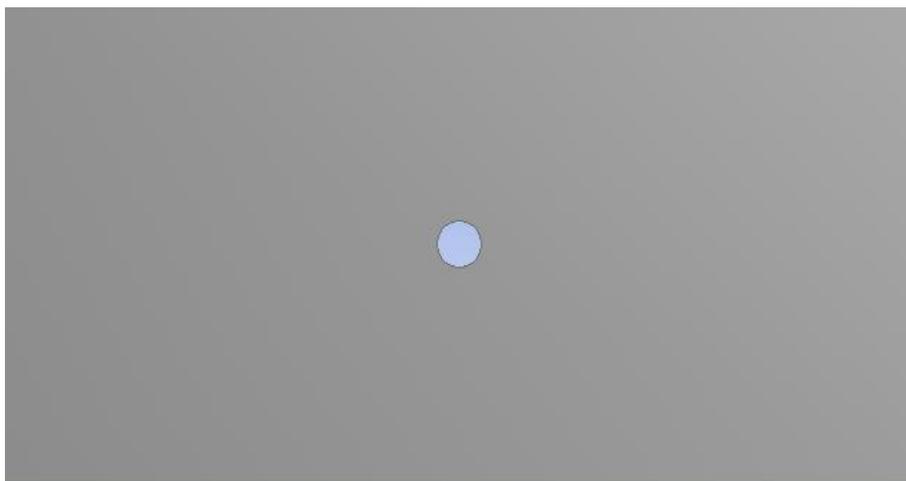
Dalam penelitian ini menekankan peranan Bilangan Reynolds untuk melihat interaksi fluida-struktur pada silinder khususnya pada rezim aliran *sub-critical* dengan rentang $300 \leq Re \leq 2 \times 10^5$. Pada rezim tersebut, terbentuk *laminar boundary layer* yang terseparasi pada zona *upstream* silinder. Hal ini diakibatkan adanya *turbulent wake*, separasi *shear layer*, dan *periodic vortex* [7]. Apabila aliran fluida mengalami kondisi *periodic vortex*, maka nilai Bilangan Nusselt dan *wall shear stress* akan meningkat [8].

Oleh sebab itu, perlu dilakukan studi lanjutan, khususnya pada kondisi rezim aliran *sub-critical*. Studi lanjutan ini untuk menganalisis interaksi fluida-struktur dengan meningkatnya kompleksitas aliran fluida [9]. Penelitian ini menjadi sangat krusial dilakukan untuk mencegah kegagalan komponen struktural akibat kelelahan atau gesekan oleh gaya yang bekerja pada permukaan silinder [10]. Dengan begitu, dapat dilakukan modifikasi dan optimalisasi pada komponen struktural serta peningkatan efisiensi pada sistem kerja komponen yang akan menggunakan silinder [11].

Penelitian ini akan berfokus untuk mempelajari interaksi fluida-struktur seperti: *vortex shedding*, tegangan geser dan perpindahan panas yang terjadi dalam aliran *crossflow* pada silinder tunggal simetris. Metode yang digunakan dalam penelitian adalah metode numerik atau CFD. Aliran *crossflow* fluida yang akan diteliti berada pada rezim aliran *sub-critical* dengan variasi Bilangan Reynolds yakni $Re = 17.000, 51.000, 85.000, \text{ dan } 140.000$. Selain itu, model turbulensi yang digunakan adalah SST $k-\omega$ dengan pemodelan geometri silinder dalam bentuk 2D.

2. Metode Simulasi

Software ANSYS Fluent 2020 R1 digunakan sebagai alat bantu metode CFD dalam penelitian ini. Geometri silinder dibuat dalam bentuk 2D, sedangkan domain komputasi yang digunakan menyerupai *ducting* berbentuk balok. Gambar 1 menunjukkan domain komputasi dan geometri silinder pengujian dan Tabel 1 menunjukkan detail dimensi pada silinder dan domain komputasi.



Gambar 1. Model 2D domain komputasi dan silinder.

Tabel 1. Dimensi silinder dan domain komputasi.

No.	Nama Bagian	Ukuran (mm)
1.	Diameter Silinder	29
2.	Panjang Domain Komputasi	600
3.	Lebar Domain Komputasi	300

Domain komputasi silinder terdiri atas empat kondisi batas yang dapat dilihat pada Tabel 2. Penentuan kondisi batas diperlukan untuk menyesuaikan domain dengan fenomena fisik secara nyata. Dalam proses *meshing*, *Mesh* yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan *grid triangular* pada permukaan domain komputasi dan *grid quadrilateral* pada lapisan batas silinder. Ukuran *element sizing* pada *face* domain komputasi sebesar 5 mm. Sedangkan *element size* pada *edge* lapisan batas silinder sebesar 3 mm.

Fitur *inflation layer* ditambahkan untuk meningkatkan ketelitian dalam menangkap daerah pada lapisan batas silinder. Nilai *inflation* masing-masing diantaranya, *maximum layers first layer height* sebesar 30, *growth rate* sebesar 1,1, dan *first layer height* sebesar 0,266 mm. Kondisi fluida dan silinder menggunakan kondisi pada penelitian sebelumnya yang dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Kondisi batas domain komputasi.

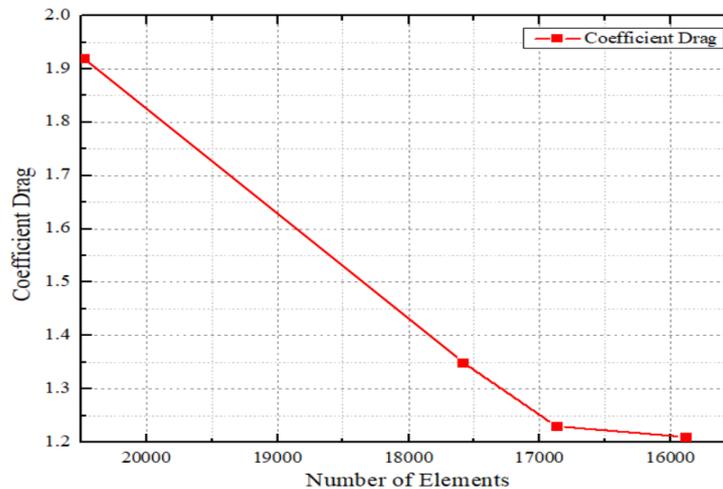
No.	Boundary Name	Boundary Type
1.	Inlet	Velocity-inlet
2.	Outlet	Pressure-outlet
3.	Cylinder	Wall
4.	Symmetry	Wall

Tabel 3. Parameter kondisi fluida dan benda uji.

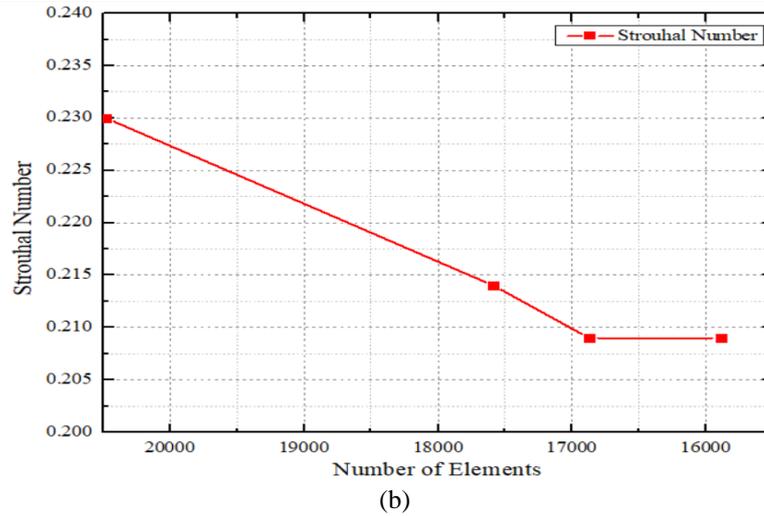
No.	Parameter	Satuan
1.	Material fluida (udara)	K
2.	Material solid (aluminium)	K
3.	Inlet	101325 Pa 8,88 (Re = 17.000); 26,66 (Re = 51.000); 44,43 (Re = 85.000); 73,18 (Re = 140.000); m/s
4.	Cylinder	3353,6 (8,88 m/s); 6416,8 (26,66 m/s); 8842,4 (44,43 m/s); 12698,4 (73,18 m/s) W/m ²

Coupled, least squares cell based dan *second order* digunakan sebagai pengaturan untuk *solution methods*, sedangkan pengaturan untuk *solution control* dalam kondisi *default*. Kriteria konvergensi berada pada nilai 10^{-4} untuk semua nilai, 10^{-7} untuk *energy*, 10^{-5} untuk *omega*, dan *hybrid initialization*.

Grid independent dilakukan untuk mengukur pengaruh *element mesh* dan grid terhadap hasil simulasi. Terdapat dua jenis nilai yang diuji pada *grid independent* yakni Bilangan Strouhal dan *coefficient drag*. Jumlah *element size* Re = 17.000 yang paling optimum didapatkan oleh *grid independent* pada nilai Bilangan Strouhal dan *coefficient drag* adalah 15.885. Hasil *grid independent* dapat dilihat pada Gambar 2.

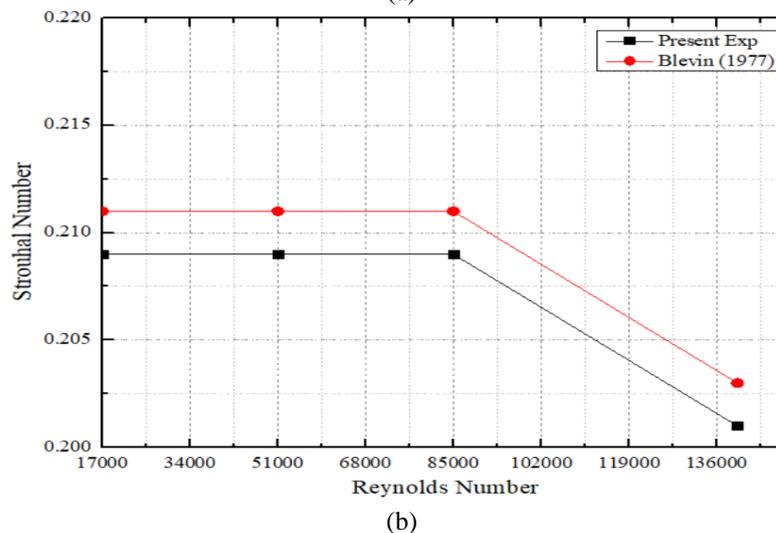
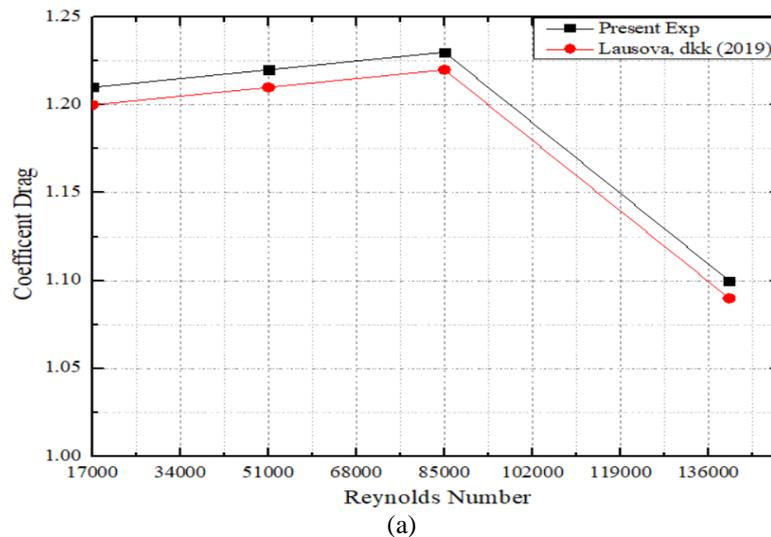


(a)



Gambar 2. Grafik *grid independent* (a) *coefficient drag*, (b) Bilangan Strouhal.

Validasi dilakukan untuk memastikan hasil simulasi sudah sesuai dengan data penelitian sebelumnya. Hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil penelitian numerik yang telah dilakukan [6] [12]. Penelitian tersebut melakukan simulasi numerik untuk mengetahui *coefficient drag*, Bilangan Strouhal, pengaruh *grid* dan *time steps size* pada $Re = 17.000$. Masing – masing uji validasi menghasilkan *margin error* sebesar 0,3 % untuk *coefficient drag* dan 0,9 % untuk Bilangan Strouhal. Hasil validasi dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



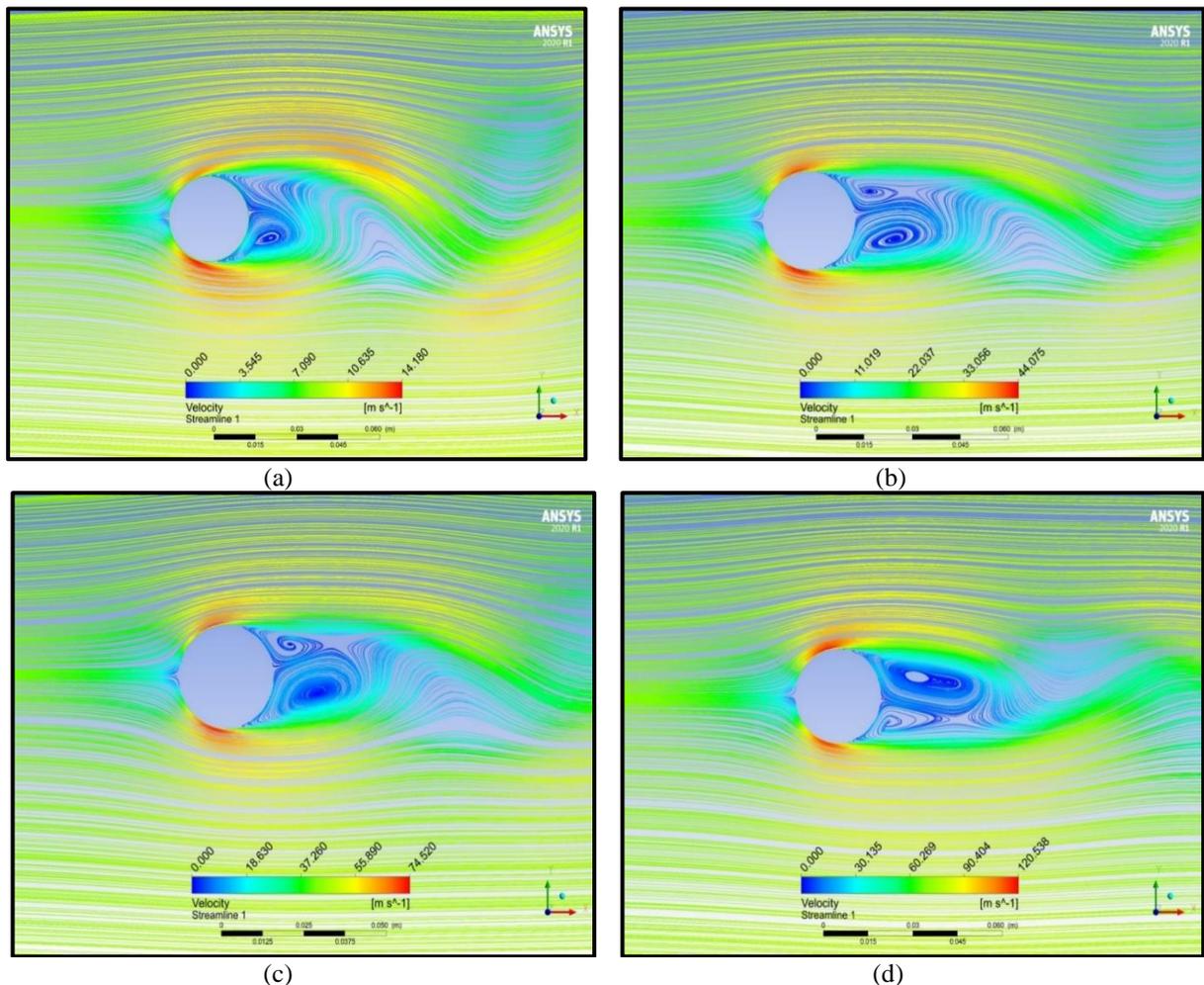
Gambar 3. Grafik validasi rata-rata (a) *coefficient drag*, (b) Bilangan Strouhal..

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 4 menunjukkan hasil – hasil struktur dan distribusi kecepatan aliran pada $Re = 17.000, 51.000, 85.000,$ dan 140.000 . Teramati ukuran *vortex* yang terbentuk di belakang silinder memiliki pola tidak beraturan dan tidak simetris antara zona *upstream* dengan zona *downstream*. Pada masing – masing zona permukaan silinder terdapat peningkatan ukuran *vortex* ketika variasi Bilangan Reynolds meningkat. Akan tetapi, $Re = 140.000$ menghasilkan ukuran *vortex* di zona *upstream* justru lebih besar dibanding dengan ukuran *vortex* di zona *downstream*.

Distribusi kecepatan aliran yang dihasilkan oleh simulasi pada keempat varian Re diantaranya, kecepatan aliran minimum pada saat titik stagnasi permukaan depan silinder $\theta = 0^\circ$. Aliran mengalami percepatan hingga maksimum saat $\theta = 34^\circ$ untuk $Re = 17.000, 51.000,$ dan 85.000 , sedangkan $Re = 140.000$, pada sudut $\theta = 46^\circ$ untuk. Perlahan aliran mengalami perlambatan hingga mencapai perlambatan maksimum pada titik separasi aliran $\theta = 81^\circ$ pada $Re = 17.000, 51.000,$ dan 85.000 . Pada $Re = 140.000$, terjadi pada sudut $\theta = 92^\circ$. Saat aliran fluida telah melewati titik separasi aliran hingga mencapai sudut $\theta = 180^\circ$, percepatan aliran berangsur-angsur konstan. Fenomena distribusi kecepatan yang sama terjadi pada rentang $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, kemudian membentuk separasi aliran pada bagian *downstream* permukaan silinder.

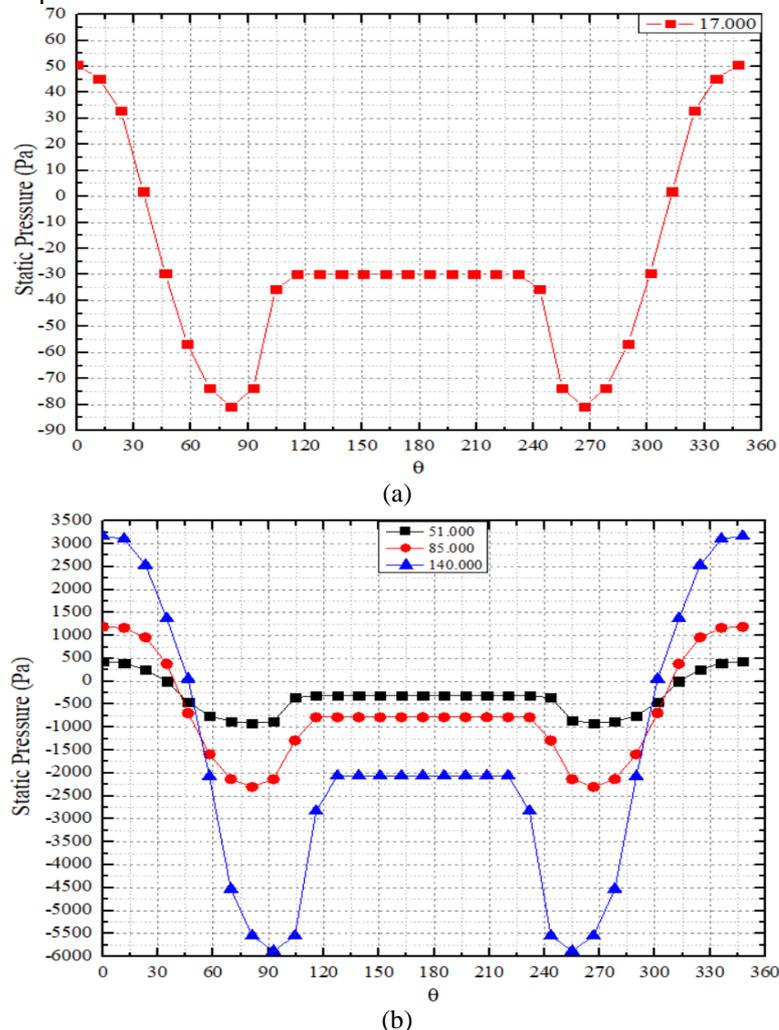
Secara umum untuk keempat varian Bilangan Reynolds tersebut, $Re = 17.000, 51.000,$ dan 85.000 memiliki struktur aliran dan distribusi kecepatan yang hampir serupa. Hanya $Re = 140.000$ yang mengalami perbedaan. Perbedaan yang terlihat seperti pola *vortex shedding*, nilai maksimum kecepatan aliran, hingga titik separasi aliran. Hal ini terjadi akibat peningkatan nilai secara signifikan untuk Bilangan Reynolds-nya. Pengaruh ini menyebabkan momentum fluida juga meningkat. Oleh sebab itu, aliran menjadi semakin turbulen (tidak stabil) dan lapisan batas pada permukaan silinder semakin cepat mengalami transisi menuju lapisan turbulen. Lapisan turbulen yang tebal tersebut, memiliki kemampuan dalam mengatasi gaya gesekan antar fluida dengan lapisan batas. Dengan begitu, proses separasi aliran dapat berlangsung lebih lama, sehingga mempengaruhi struktur dan distribusi kecepatan alirannya.



Gambar 4. Streamline aliran pada variasi (a) $Re = 17.000,$ (b) $Re = 51.000,$ (c) $Re = 85.000,$ dan (d) $Re = 140.000$.

Gambar 5 memperlihatkan hasil simulasi distribusi tekanan statis pada keempat varian Re. Pola distribusi tekanan statis yang dihasilkan oleh $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 , memiliki pola distribusi yang sama. Kesamaan pola dapat terlihat pada titik stagnasi $\theta = 0^\circ$, tekanan statis mencapai nilai maksimum. Sisi tepi permukaan silinder, didapati nilai tekanan statis berangsur – angsur turun. Penurunan maksimal nilai tekanan statis terjadi ketika aliran terseparasi pada sudut $\theta = 81^\circ$. Setelah aliran terseparasi, distribusi tekanan statis akan meningkat kembali seiring menurunnya aliran hingga mendekati titik stagnasi permukaan belakang silinder yakni $\theta = 180^\circ$. Akan tetapi, kenaikan nilai tekanan statis yang terjadi cenderung konstan. Selanjutnya untuk distribusi tekanan statis pada rentang sudut $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ akan memiliki pola distribusi yang sama. Perbedaan pola distribusi tekanan statis yang dihasilkan oleh variasi $Re = 140.000$. Meskipun nilai maksimum tekanan statis tetap berada pada titik stagnasi $\theta = 0^\circ$, penurunan nilai tekanan statis untuk sisi tepi permukaan diperoleh saat sudut $\theta = 92^\circ$. Selain itu, ketika aliran telah melewati titik separasi, panjang rentang kenaikan nilai tekanan statis secara konstan juga menjadi lebih pendek.

Pola distribusi tekanan statis yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh peranan *favourable pressure gradient* dan *adverse pressure gradient*. *Favourable pressure gradient* akan terjadi ketika tekanan statis mengalami penurunan nilai serinig meningkatnya jarak dari titik stagnasi. Tentunya pengaruh ini membantu aliran mengalir dalam kondisi kecepatan tinggi dan tetap stabil. Sedangkan, *Adverse pressure gradient* akan terjadi ketika tekanan statis mengalami kenaikan nilai. Pengaruh tersebut membuat aliran menjadi tidak stabil dan mengalami perlambatan. Akibatnya, pada titik tertentu lapisan batas tidak mampu lagi menahan gradien tersebut sehingga terjadi separasi aliran. Oleh sebab itu, terdapat korelasi antara distribusi tekanan statis dengan kecepatan aliran. Apabila tekanan statis mencapai nilai maksimum, maka kecepatan aliran akan bernilai minimum.



Gambar 5. Distribusi tekanan statis sepanjang permukaan silinder pada variasi (a) $Re = 17.000$, (b) $Re = 51.000$, $Re = 85.000$, dan $Re = 140.000$.

Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan frekuensi *vortex shedding* dan Bilangan Strouhal oleh simulasi. Rezim aliran *sub-critical* memiliki rata-rata nilai Bilangan Strouhal, $S_t \approx 0,21$ [12]. Hasil simulasi perhitungan Bilangan Strouhal pada $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 menunjukkan nilai relatif konstan berkisar $S_t \approx 0,209$. Sedangkan, pada $Re = 140.000$ terjadi penurunan nilai Bilangan Strouhal yakni berkisar $S_t \approx 0,203$. Validasi yang didapatkan memiliki tendensi yang sama dan menghasilkan *margin error* = 0,9 %.

Tabel 4. Perhitungan frekuensi *vortex shedding* dan Bilangan Strouhal.

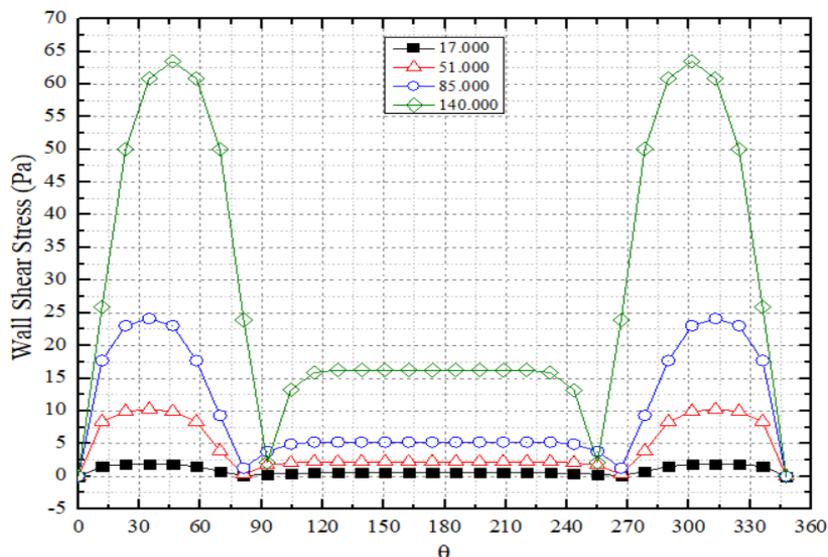
Bilangan Reynolds	Kecepatan Aliran (m/s)	Frekuensi Vortex Shedding (Hz)	Bilangan Strouhal (Present Exp)	Bilangan Strouhal Blevin (1977)
17.000	8,88	64,30	0,209	0,211
51.000	26,66	193,05	0,209	0,211
85.000	44,43	321,73	0,209	0,211
140.000	73,18	512,34	0,201	0,203

Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan *coefficient drag* untuk keempat varian. Pada $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 , memperlihatkan nilai koefisien hambat mengalami peningkatan meskipun tidak signifikan. Sedangkan pada $Re = 140.000$, ditemukan adanya penurunan nilai yang terjadi pada koefisien hambat. Penurunan ini disebabkan oleh proses transisi rezim aliran. Dampak transisi tersebut menghasilkan perubahan ukuran *wake* pada zona *downstream* yang mengecil, sedangkan ukuran *wake* untuk zona *upstream* lebih besar seperti yang terlihat pada Gambar 4 (d). Fenomena ini disebut sebagai *drag crisis*, dikarenakan terjadi penurunan nilai koefisien hambat secara signifikan pada $Re \geq 10^5$. Hasil simulasi ini kemudian dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan hasil konsisten. Hal ini dapat dilihat pada hasil perbandingan antar kedua penelitian tersebut memiliki *margin error* sebesar 0,3 %.

Tabel 5. Perhitungan *coefficient drag*.

Bilangan Reynolds	Kecepatan Aliran (m/s)	Coefficient Drag (Present Exp)	Coefficient Drag Lausova, dkk (2019)
17.000	8,88	1,21	1,2
51.000	26,66	1,22	1,21
85.000	44,43	1,23	1,22
140.000	73,18	1,1	1,09

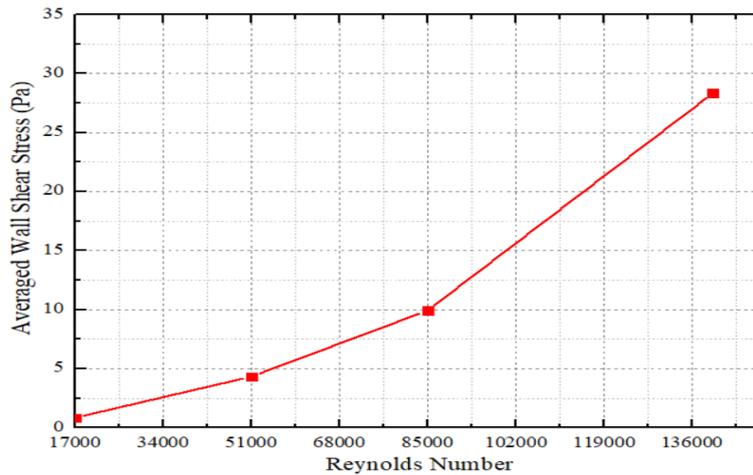
Gambar 6 memperlihatkan skema distribusi tegangan geser pada keempat varian Bilangan Reynolds. Skema distribusi tegangan geser dinding yang dihasilkan oleh $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 memiliki skema distribusi yang serupa. Keserupaan ini dapat dilihat pada titik stagnasi $\theta = 0^\circ$, tegangan geser dinding bernilai nol. Pada sisi tepi permukaan silinder, tegangan geser dinding mengalami kenaikan hingga mencapai nilai maksimum pada sudut $\theta = 34^\circ$. Setelahnya, tegangan geser dinding mengalami penurunan nilai. Penurunan nilai tersebut akan berakhir pada saat aliran terpecah yakni sudut $\theta = 81^\circ$, dimana nilai tegangan geser dinding bernilai minimum. Pada rentang sudut $82^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, tegangan geser dinding kembali mengalami kenaikan nilai. Akan tetapi, kenaikan nilai yang terjadi cenderung konstan. Sedangkan pada rentang sudut $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, distribusi nilai tegangan geser dinding memiliki skema yang serupa. Skema distribusi tegangan geser dinding yang dihasilkan oleh $Re = 140.000$, memiliki perbedaan skema dengan ketiga varian lainnya. Nilai tegangan geser dinding pada sudut $\theta = 0^\circ$, tetap bernilai nol. Namun, faktor transisi rezim aliran pada Bilangan Reynolds tersebut, berimplikasi keterlambatan tegangan geser dinding mencapai nilai maksimum dan nilai minimum. Dimana, nilai maksimum terjadi pada saat sudut $\theta = 46^\circ$ dan nilai minimum pada saat sudut $\theta = 92^\circ$. Selain itu, ketika aliran telah melewati titik separasi aliran, kenaikan nilai tegangan geser dinding secara konstan memiliki rentang sudut yang lebih pendek.



Gambar 6. Distribusi nilai tegangan geser dinding di sepanjang sudut angular permukaan silinder.

Faktor-faktor yang mempengaruhi skema distribusi tegangan geser dinding, diantaranya: kecepatan aliran, ketika tegangan geser dinding bernilai maksimum, maka kecepatan aliran pun bernilai maksimum. Jarak terhadap titik stagnasi, semakin jauh jarak yang ditempuh aliran pada permukaan silinder terhadap titik stagnasi, maka semakin rendah pula nilai tegangan geser dinding yang didapatkan. Rezim aliran, $Re = 140.000$, walaupun masih didalam rezim aliran *sub-critical*, nilai Bilangan Reynolds tersebut sedang mengarah pada transisi rezim aliran menuju rezim aliran *critical*. Oleh sebab itu, $Re = 140.000$ memiliki lapisan batas yang lebih tebal dibandingkan Bilangan Reynolds lainnya, sehingga tertundanya separasi aliran.

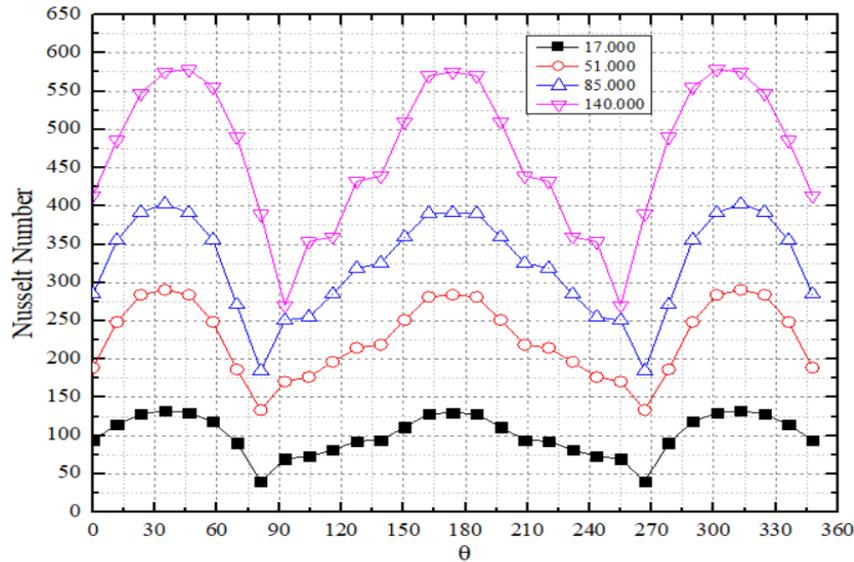
Gambar 7 menunjukkan rata – rata nilai tegangan geser dinding pada variasi $Re = 17.000, 51.000, 85.000,$ dan 140.000 . Semakin meningkatnya Bilangan Reynolds menyebabkan nilai tegangan geser dinding juga meningkat. $Re = 140.000$, menunjukkan peningkatan nilai yang sangat signifikan bedanya. Hal ini menyebabkan Bilangan Reynolds tersebut memberi kompleksivitas karakteristik aliran tambahan. Hasil simulasi kemudian diverifikasi dengan penelitian sebelumnya dengan hasil grafik tendensi yang sama [13].



Gambar 7. Rata – rata nilai tegangan geser dinding setiap variasi Bilangan Reynolds.

Distribusi perpindahan panas konveksi dapat dinyatakan menggunakan Bilangan Nusselt. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai Bilangan Nusselt tidak dipergunakan dalam simulasi ini, diantaranya: Bilangan Prandtl dan temperatur. Hal itu dikarenakan simulasi ini hanya menggunakan satu jenis fluida dan menerapkan kondisi batas yang sama untuk semua varian Re . Dengan begitu, hanya Bilangan Reynolds yang menjadi faktor pengaruh utama.

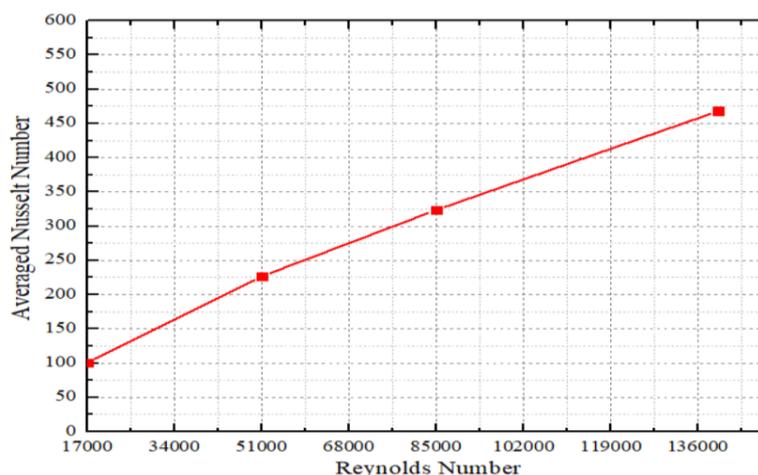
Gambar 8 memperlihatkan hasil simulasi distribusi perpindahan panas konveksi pada rentang sudut $0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$. Skema distribusi perpindahan panas konveksi pada variasi $Re = 17.000, 51.000,$ dan 85.000 , memperlihatkan adanya kesamaan skema. Pada titik stagnasi permukaan depan silinder sudut $\theta = 0^\circ$, Bilangan Nusselt mengalami kenaikan nilai. Kenaikan terus terjadi hingga mencapai nilai maksimum sisi tepi silinder pada sudut $\theta = 34^\circ$. Bilangan Nusselt mengalami penurunan secara signifikan hingga sudut $\theta = 81^\circ$, dimana mencapai nilai minimum. Setelah terjadinya separasi aliran pada silinder, pada rentang sudut $82^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, Nilai Bilangan Nusselt secara angsur meningkat. Skema distribusi perpindahan panas konveksi pada zona *downstream* silinder pada rentang sudut $180^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$, menghasilkan tendensi yang sama dengan zona *upstream*. $Re = 140.000$, memiliki perbedaan skema dengan varian lainnya. Bilangan Nusselt tetap mengalami kenaikan disaat titik stagnasi depan permukaan silinder sudut $\theta = 0^\circ$. Akan tetapi faktor transisi rezim aliran, menghasilkan proses separasi aliran tertunda. Oleh sebab itu, Bilangan Nusselt mencapai maksimum saat sudut $\theta = 46^\circ$ dan nilai minimum saat sudut $\theta = 92^\circ$. Setelahnya pada rentang sudut $93^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$, aliran tetap mengalami kenaikan nilai secara berangsur – angsur.



Gambar 8. Distribusi Bilangan Nusselt di sepanjang sudut angular permukaan silinder.

Faktor – faktor yang mempengaruhi skema distribusi perpindahan panas konveksi, diantaranya: lapisan batas, lapisan batas perkembangan lapisan batas membuat resistansi termal yang dihasilkan akan meningkat. Hal ini dapat dilihat pada daerah tepi silinder dengan kecepatan maksimum, dimana nilai Bilangan Nusselt yang dihasilkan cukup tinggi. Kondisi sebaliknya terjadi apabila lapisan batas semakin tebal dengan kondisi kecepatan minimum. Terlihat pada daerah separasi, dimana lapisan batas laminar mengalami perkembangan menuju lapisan batas turbulen. Nilai Bilangan Nusselt yang dihasilkan cukup rendah. Jarak terhadap titik stagnasi, semakin jauh jarak yang ditempuh aliran pada permukaan silinder terhadap titik stagnasi, maka menyebabkan nilai konduktivitas konveksi dan *heat flux* akan semakin kecil.

Gambar 9 memberikan visualisasi rata-rata Bilangan Nusselt pada keempat varian. Bilangan Reynolds sangat mempengaruhi distribusi perpindahan panas konveksi pada aliran *crossflow* melewati silinder. Peningkatan Bilangan Reynolds, menyebabkan adanya peningkatan nilai Bilangan Nusselt. Pada $Re = 140.000$, memiliki pola tersendiri yang memberikan kompleksivitas karakteristik aliran tambahan jika dibandingkan ketiga varian lainnya. Hasil simulasi distribusi perpindahan panas konveksi ini kemudian divalidasi dengan penelitian sebelumnya [14]. Hasil uji validasi menunjukkan persentase *margin error* sebesar 3%.



Gambar 9. Rata-rata nilai Bilangan Nusselt setiap variasi Bilangan Reynolds.

4. Kesimpulan

Beberapa informasi substansial pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pola dan karakteristik aliran yang dihasilkan oleh $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 , memberikan hasil yang serupa sehingga tidak ada dampak perubahan secara signifikan. Sedangkan $Re = 140.000$, memberikan perbedaan pola dan karakteristik aliran akibat penundaan separasi aliran.
2. Distribusi nilai tegangan geser dinding pada permukaan silinder didapati bahwa, titik stagnasi bernilai nol, daerah tepi silinder bernilai maksimum, daerah separasi bernilai minimum dan daerah setelah separasi bernilai

konstan. Distribusi yang dihasilkan oleh $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 , menciptakan skema distribusi yang identik. Sedangkan $Re = 140.000$, memiliki sedikit perbedaan skema distribusi, mulai dari nilai maksimum, minimum, maupun panjang rentang nilai mencapai kenaikan secara konstan.

3. Distribusi perpindahan panas konveksi menggunakan Bilangan Nusselt pada permukaan silinder didapati, bahwa titik stagnasi bernilai cukup tinggi. Untuk daerah tepi silinder bernilai maksimum, daerah separasi aliran bernilai minimum, dan daerah setelah separasi mengalami kenaikan secara konstan. Distribusi yang dihasilkan oleh $Re = 17.000$, 51.000 , dan 85.000 , juga menghasilkan skema distribusi yang identik. Perbedaan skema distribusi hanya terlihat pada $Re = 140.000$, ketika Bilangan Nusselt mencapai maksimum dan minimumnya.

5. Daftar Pustaka

- [1] Kološ, I., Michalcová, V. And Lausová, L. (2021) 'Numerical Analysis Of Flow Around A Cylinder In Critical And Subcritical Regime', Sustainability (Switzerland), 13(4), Pp. 1–13.A.
- [2] Sonawane, C. Et Al. (2023) 'Numerical Simulation Of Heat Transfer Characteristics Of Circular Cylinder Forced To Oscillate Elliptically In An Incompressible Fluid Flow', Journal Of Thermal Analysis And Calorimetry, 148(7), Pp. 2719–2736.
- [3] Kurniawan, A. (2017). Studi Numerik 2-D Pengaruh Turbulensi Aliran Bebas (Free Stream Tubulence) Terhadap Perpindahan Panas Aliran Crossflow Silinder Sirkular Tunggal Dan Tandem. Prosiding SENIATI, 3(2), E5-1.
- [4] Sharma, V. And Dhiman, A.K. (2012) 'Heat Transfer From A Rotating Circular Cylinder In The Steady Regime: Effects Of Prandtl Number', Thermal Science, 16(1), Pp. 79–91.
- [5] Choi, H., Jeon, W.P., Kim, J., 2008. Control Of Flow Over A Bluff Body. Annu. Rev. Fluid Mech. 40, 113–139.
- [6] Lausová, L., Kološ, I. And Michalcová, V. (2019) 'Comparison Of 2D Grid Simulations For Flow Past Cylinder At High Reynolds Numbers', Civil And Environmental Engineering, 15(1), Pp. 70–78.
- [7] Beaudan, P. & Moin, P. (1994): Numerical Experiments On The Flow Past Circular Cylinders At Sub-Critical Reynolds Numbers. Report No. TF-62, Thermosciences Div., Dept. Of Mech. Engr., Stanford University.
- [8] Sarkar, S., Dalal, A. And Biswas, G. (2011) 'Unsteady Wake Dynamics And Heat Transfer In Forced And Mixed Convection Past A Circular Cylinder In Cross Flow For High Prandtl Numbers', International Journal Of Heat And Mass Transfer, 54(15–16), Pp. 3536–3551.
- [9] Ong, M.C. Et Al. (2009) 'Numerical Simulation Of Flow Around A Smooth Circular Cylinder At Very High Reynolds Numbers', Marine Structures, 22(2), Pp. 142–153.
- [10] Mohd Noor, N. (2015). Analysis Of Vortex Shedding In A Various Body Shapes (Doctoral Dissertation, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia).
- [11] Asyikin, M.T. (2012) 'CFD Simulation Of Vortex Induced Vibration Of A Cylindrical Structure', Norwegian University Of Science And Technology, (June), P. 83.
- [12] Blevins, R.D. (1977) 'Blevins_Rd_1974.Pdf', California Institute Of Technology.
- [13] Labraga, L., Bourabaa, N. And Berkah, T. (2002) 'Wall Shear Stress From A Rotating Cylinder In Cross Flow Using The Electrochemical Technique', Experiments In Fluids, 33(3), Pp. 488–496.
- [14] Sanitjai, S. And Goldstein, R.J. (2004) 'Forced Convection Heat Transfer From A Circular Cylinder In Crossflow To Air And Liquids', International Journal Of Heat And Mass Transfer, 47(22), Pp. 4795–4805.