

STUDI PERPINDAHAN PANAS DAN TEGANGAN GESER DINDING PADA SILINDER BERSIRIP DENGAN ALIRAN *CROSS FLOW* PADA VARIASI BILANGAN REYNOLDS 17.000, 51.000 DAN 85.000

*Adam Fadhillah Haris¹, 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: adam.fharis@gmail.com

Abstrak

Penambahan sirip (*finn*) pada benda merupakan upaya untuk menganalisa struktur aliran dan variabel lain yang saling berhubungan. Prinsip kerja sirip dengan membuat struktur aliran baru yang bernama *vortex*. Studi sekarang ini difokuskan pada variasi model sirip untuk menganalisa karakteristik aliran, tegangan geser dan bilangan Nusselt dengan membagi bagian sirip menjadi *face* dan *side*. Metode penelitian dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan *software* CFD. Geometri dibuat dalam bentuk 3D dengan variasi *leading edge flat*, *sharp* dan *rounded* dengan bilangan $Re = 17.000, 51.000$ dan 85.000 . Hasil simulasi menunjukkan bentuk *leading edge* menggenerasi *vortex* jenis *Longitudinal Vortex* (LV) dengan bentuk dan ukuran yang berbeda-beda. Ukuran terbesar terjadi pada *leading edge flat* dan jumlah terbanyak dimiliki oleh *leading edge rounded*. Semakin besar *vortex* dan nilai Re maka intensitas aliran pada zona resirkulasi dan stagnasi aliran semakin tinggi. Akibatnya nilai rata-rata tegangan geser dan bilangan Nusselt meningkat. Nilai rata-rata tertinggi distribusi tegangan geser pada bagian *face* dan *side* didapat pada bentuk *flat* pada setiap bilangan Reynolds. Bentuk *flat* juga memiliki nilai rata-rata tertinggi pada bagian *face* untuk bilangan Nusselt. Tetapi nilai rata-rata tertinggi bilangan Nusselt pada *side* didapat pada bentuk *sharp*. Nilai maksimal tegangan geser dan bilangan Nusselt pada bagian *side* lebih tinggi dibandingkan pada bagian *face*.

Kata kunci: bilangan reynolds; *longitudinal vortex*; sirip; tegangan geser

Abstract

The addition of fins to objects is an attempt to analyze the flow structure and other related variables. The working principle of fins is to create a new flow structure called a *vortex*. The current study focuses on variations of the fin model to analyze flow characteristics, shear stress and Nusselt number by dividing the fin into faces and sides. The research method was carried out by numerical simulation using CFD software. The geometry is made in 3D with variations of *leading edge flat*, *sharp* and *rounded* with numbers $Re = 17,000, 51,000$ and $85,000$. The simulation results show that the shape of the leading edge generates a *Longitudinal Vortex* (LV) type vortex with different shapes and sizes. The largest size occurs in the *leading edge flat* and the largest number is owned by the *leading edge rounded*. The greater the vortex and the Re value, the higher the flow intensity in the recirculation and stagnation zones. As a result, the average value of shear stress and Nusselt number increases. The highest average value of the shear stress distribution on the face and side is obtained in the flat form at each Reynolds number. The flat shape also has the highest average value on the face for the Nusselt number. But the highest average value of the Nusselt number on the side is obtained in sharp form. The maximum value of shear stress and Nusselt number on the side is higher than on the face.

Keywords: fins; *longitudinal vortex*; reynolds number; shear stress

1. Pendahuluan

Silinder bersirip melingkar (*annular finn cylinder*) merupakan salah satu bentuk geometri yang biasanya digunakan pada sistem penukar kalor seperti pada peralatan elektronik, AC, turbin gas, kompresor dan untuk beberapa pengaplikasian/studi digunakan untuk melihat aspek aliran. Meski memiliki geometri yang sederhana, aliran di sekitar silinder bersirip dengan aliran silang (*cross flow*) menunjukkan karakteristik aliran tiga dimensi yang sangat kompleks [1], [2]. Penambahan sirip membuat panas yang dibuang semakin banyak, tetapi akan menyebabkan hambatan aliran udara. Sehingga, perlu pertimbangan dengan tidak hanya menjadikan peningkatan perpindahan panas sebagai acuan, tetapi bagaimana dapat mencapai efisiensi sirip yang tinggi [2]. Adanya sirip menggenarasi *separation bubble* karena sudut serang yang menyebabkan terjadinya titik separasi pada aliran [3]. *Separation bubble* merupakan *Longitudinal*

Vortex (LV) yang keberadaannya menyebabkan perpindahan panas konveksi tambahan karena adanya *reverse flow*. Sehingga menciptakan gelombang aliran yang menginduksi temperatur dan kecepatan sehingga menyebabkan perpindahan panas tambahan ke benda [4]. Peningkatan perpindahan panas juga dipengaruhi oleh vortisitas sebagai hasil aliran sekunder dimana memiliki putaran kuat yang disebabkan oleh separasi aliran dan gesekan. Peningkatan perpindahan panas pasif dapat dicapai dengan mengurangi ketebalan lapisan batas, putaran dan destabilisasi aliran, dan meningkatkan degradasi suhu di dekat permukaan perpindahan panas [5].

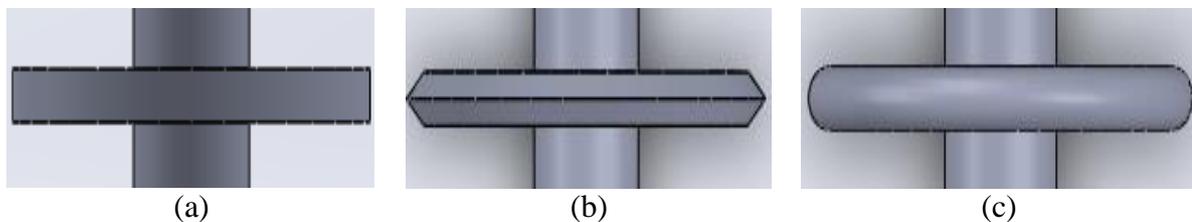
Penelitian mengenai sirip *annular* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Eksperimen langsung dengan terowongan angin untuk menyelidiki sensitivitas koefisien perpindahan panas terhadap sudut serang yang kecil berkisar dari -2° hingga 2° , menunjukkan koefisien perpindahan panas meningkat sekitar 50% pada *face* sirip didepan silinder dan 10% pada *side* disamping silinder dan belakang silinder. Karena pada dua sisi memiliki nilai koefisien perpindahan panas yang tidak jauh berbeda dari sudut serang nol, perpindahan panas keseluruhan tidak dipengaruhi secara signifikan oleh sudut serang yang kecil [6]. Pengukuran tegangan geser juga dilakukan dengan nilai tertinggi terjadi pada pusat *vortex* [7]. Variasi bentuk sirip *plain*, *wavy*, dan *flat* menghasilkan nilai perpindahan panas dengan sirip *flat* memiliki nilai terbaik namun faktor gesekan yang dihasilkan rendah sehingga menyebabkan memiliki efisiensi yang paling rendah. Sirip bentuk *plain* memiliki kinerja perpindahan panas paling sedikit namun karena memiliki *friction factor* yang tinggi sehingga dapat mencapai efisiensi tertinggi. Jadi, sirip *plain* digunakan saat efisiensi diprioritaskan dan *flat* saat perpindahan panas yang tinggi diinginkan [8]. Sementara itu, penelitian menggunakan CFD menunjukkan efek aliran turbulen di belakang silinder yang bertambah besar ketika ditambahkan sirip. Pada silinder polos dan silinder bersirip diperoleh pola aliran yang sama, yaitu peningkatan bilangan Reynolds berbanding terbalik dengan luas daerah pembentukan pusaran [9]. Daerah tegangan geser dengan nilai terbesar pada sirip berada pada hulu di dekat permukaan silinder, bukan pada daerah lintasan *vortex* [10].

Metode eksperimental melibatkan pengukuran langsung fenomena aliran fluida dengan menggunakan alat-alat khusus. Sehingga, eksperimental melibatkan biaya yang mahal dan memakan waktu yang lama. Oleh karena itu, pendekatan CFD menjadi alternatif karena kemampuannya dalam memberikan gambaran aliran fluida yang lebih mendalam. CFD menyelesaikan analisis fluida dengan persamaan pembangunan (*governing equation*) yang meliputi persiapan kontinuitas, momentum dan energi [2]. Model turbulensi juga disisipkan dalam CFD untuk mendefinisikan aliran turbulen fluida. Model turbulensi SST k-omega dipilih karena karakteristik yang baik dalam degradasi tekanan yang berlawanan dan aliran separasi [11].

Meski telah banyak penelitian mengenai aliran *cross flow* yang melewati silinder bersirip baik secara eksperimental langsung atau simulasi numerik. Namun, perlu adanya studi lanjutan untuk memahami lebih detail potensi dengan memasukan aspek lain yang perlu dipertimbangkan. Oleh karena itu dalam studi ini, akan dilakukan simulasi numerik CFD untuk menguji efek sirip *annular* dengan variasi geometri dan bilangan Re. Variabel yang menjadi objektif yaitu *streamline* pola aliran, *wall shear* dan bilangan Nusselt pada permukaan sirip. Hasil studi ini dapat digunakan untuk menjelaskan pola aliran dan nilai perpindahan panas pada permukaan sirip serta dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian lebih lanjut.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Metode CFD digunakan pada penelitian ini dengan menggunakan *software* Ansys Fluent. Geometri dibuat dalam bentuk 3D dengan variasi bentuk *leading edge flat*, *sharp* dan *rounded* [12]. Detail variasi *leading edge* ditunjukkan pada Gambar 1 dan dimensi dari geometri benda uji ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Variasi *leading edge* pada sirip (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded*.

Tabel 1. Dimensi benda uji..

No.	Nama Bagian	Ukuran (mm)
1.	Diameter Sirip	90
2.	Tebal Sirip	10
3.	Panjang Silinder	300
4.	Diameter Silinder	29

Setelah benda uji terbentuk, dilanjutkan dengan menggenerasi domain komputasi dengan ukuran 600 mm x 300 mm x 300 mm (panjang x lebar x tinggi). Kondisi batas juga dibentuk untuk membentuk kondisi pada bagian suatu objek. Kondisi batas ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kondisi batas.

No.	Boundary Name	Boundary Type
1.	Inlet	Velocity-inlet
2.	Outlet	Pressure-outlet
3.	Side	Wall
4.	Face	Wall
5.	Cylinder	Wall
6.	Wall	Wall

Mesh yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan bentuk *polyhedra* pada volume, *surface* dan *face*. Ukuran maksimum *volume mesh* 3,2 mm dan pada *surface mesh* ukuran minimum 1 mm dan maksimum 3,2 mm. Pada sirip menggunakan *face mesh* dengan ukuran 0,5 mm dan ditambahkan *boundary layer inflation* sebanyak 10 lapis untuk meningkatkan keakuratan jika terdapat *streamline* aliran yang terjadi didekat permukaan sirip.

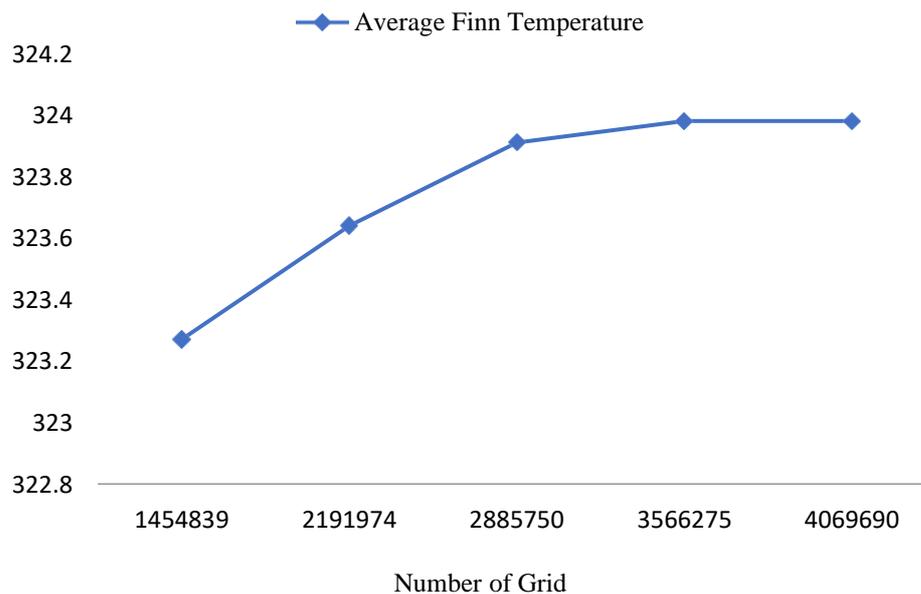
Dalam menjalankan simulasi CFD dibutuhkan kondisi pada fluida dan benda uji untuk menghasilkan variabel yang diinginkan. Beberapa kondisi pada fluida dan benda uji menggunakan kondisi pada penelitian sebelumnya yang ditunjukkan pada Tabel 3 [13].

Tabel 3. Parameter kondisi fluida dan benda uji.

No.	Parameter		
1.	Material fluida (udara)	288	K
2.	Material solid (Stainless Steel)	353	K
3.	Inlet	101325	Pa
		2,78 (Re = 17.000), 8,34 (Re = 51.000), 13,89 (Re = 85.000)	m/s
4.	Sirip	1210.67 (2,78 m/s), 2304.59 (8,34 m/s), 3173.66(13,89 m/s)	W/m ²

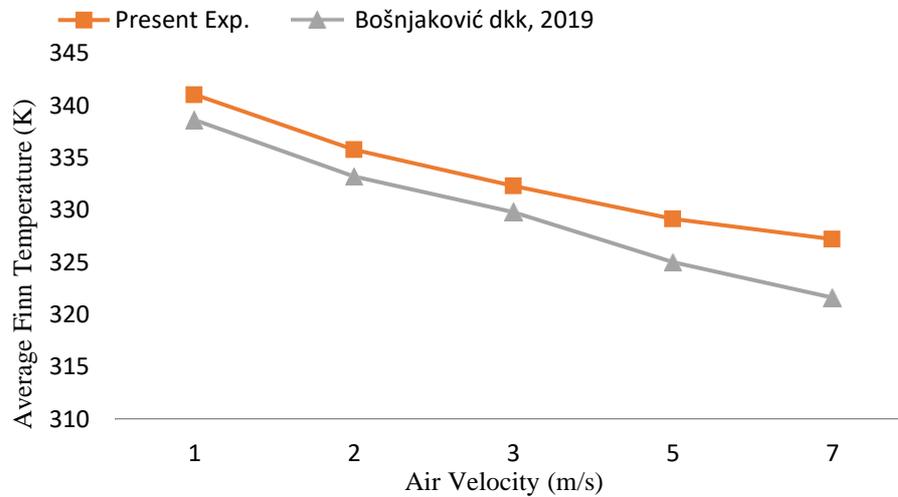
SIMPLE, *Least Squares Cell Based* dan *Second Order* digunakan sebagai *Solution Methods* dan *Solution Control* dalam kondisi default. Kriteria konvergensi berada pada nilai 10^{-3} untuk kontinuitas, 10^{-8} untuk energi dan yang lain menggunakan nilai 10^{-5} dan menggunakan *Hybrid initialization*.

Grid independent dilakukan untuk mendapatkan jumlah grid optimum, yaitu saat jumlah grid tidak mempengaruhi parameter yang ditentukan. Pada studi ini, uji *grid independen* dilakukan pada Re = 85.000 dengan nilai temperatur rata-rata sebagai variabel hasil. Hasil uji *grid independen* memperlihatkan dengan jumlah 2.885.750 grid, nilai temperatur tidak berubah secara signifikan dengan peningkatan jumlah grid seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik *Grid Independent*.

Validasi dilakukan untuk menguji kehandalan dan keberhasilan pengaturan *solver* dengan melakukan perbandingan nilai parameter penelitian saat ini dengan penelitian terdahulu (bosjankovic). Dalam validasi ini nilai parameter yang akan digunakan yaitu temperatur rata-rata pada sirip dengan variasi lima kecepatan 1m/s, 2m/s 3m/s, 5m/s dan 7m/s. Hasil validasi ditunjukkan pada Gambar 3.

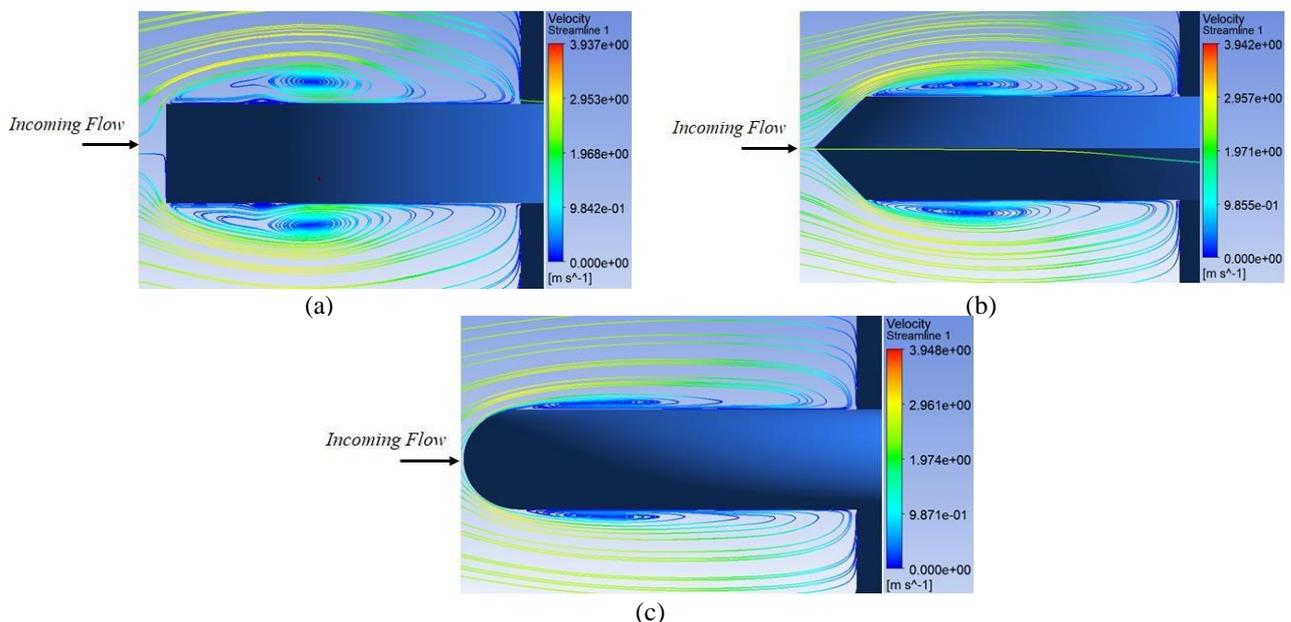


Gambar 3. Grafik validasi rata-rata temperatur pada sirip.

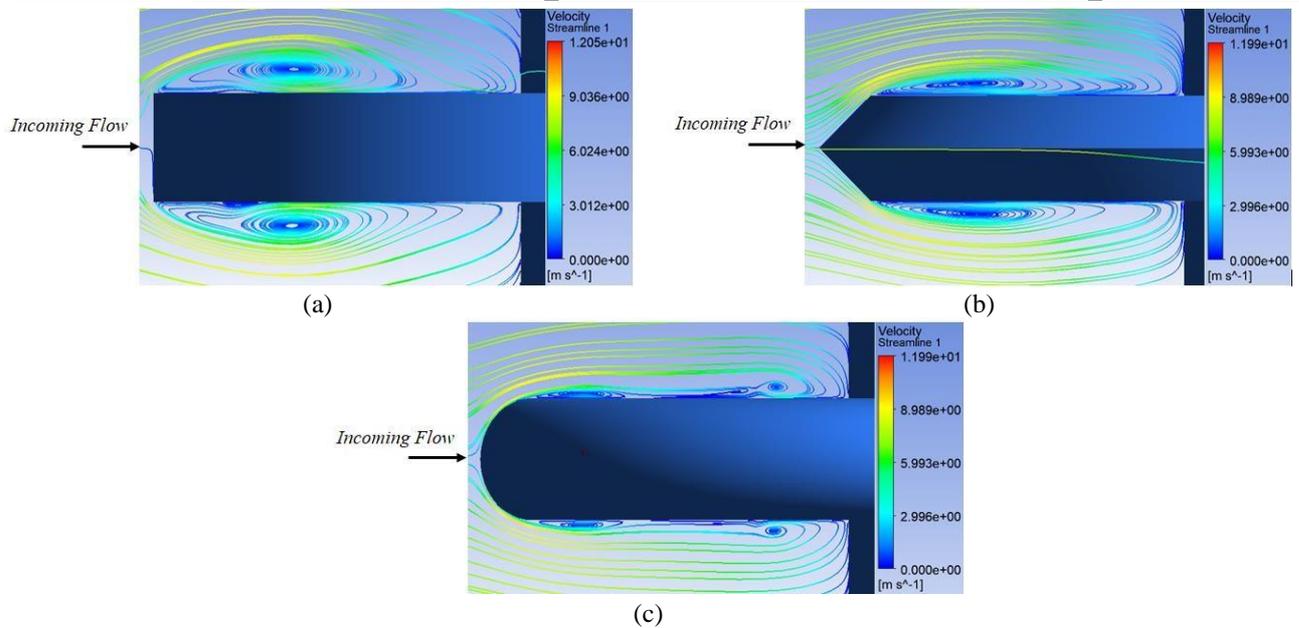
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil-hasil simulasi *streamline* aliran, kontur tegangan geser, kontur bilangan Nusselt dan nilai rata-rata ditampilkan pada bagian ini dengan besar nilai dari masing-masing hasil ditampilkan dengan gradasi warna disamping kanan. Warna biru merepresentasikan nilai rendah dan warna merah merepresentasikan nilai tinggi. Hasil-hasil *streamline* aliran didapatkan perbedaan *streamline* aliran pada ukuran dan jumlah *vortex*. Variasi bentuk *leading edge* tidak menunjukkan perbedaan nilai kecepatan aliran yang signifikan pada Re yang sama. Daerah resirkulasi menghasilkan intensitas aliran tinggi dengan degradasi warna hijau dan daerah stagnasi aliran memiliki intensitas yang rendah dengan degradasi warna biru. Berdasarkan plot untuk $Re = 17.000$ (Gambar 4) menunjukkan bahwa ukuran *vortex* terbesar terdapat pada bentuk *flat* disusul dengan bentuk *sharp* dan *rounded*. Ukuran zona sirkulasi dipengaruhi oleh tinggi aliran dimana bentuk *leading edge flat* menghasilkan tinggi aliran tertinggi. Ukuran *vortex* mempengaruhi kecepatan aliran pada face, semakin besar *vortex* maka zona resirkulasi akan semakin besar pula sehingga kecepatan aliran yang berkontak pada face meningkat dengan degradasi warna hijau.

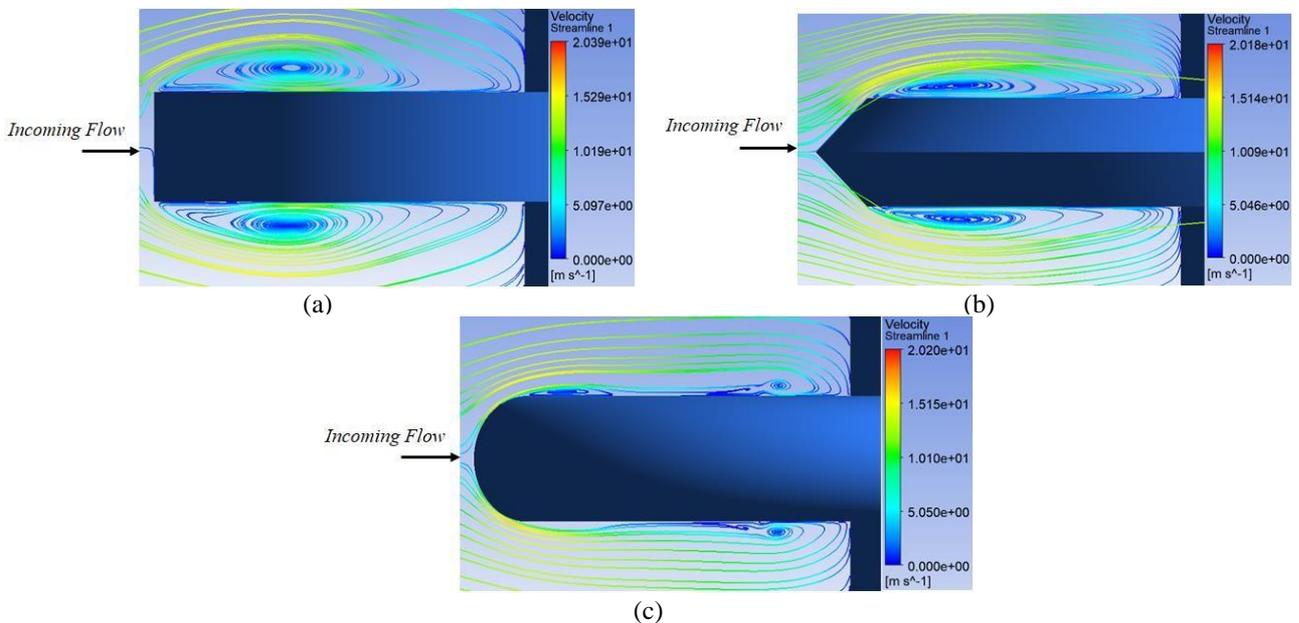
Untuk $Re = 51.000$ (Gambar 5) ditemukan zona aliran yang memiliki bentuk dan jumlah yang sama dengan $Re = 17.000$ pada bentuk *leading edge flat* dan *sharp*. Bentuk yang berbeda ditemui pada *leading edge rounded* dengan ukuran zona sirkulasi yang lebih kecil dan terjadi penggenerasian *vortex* didepan silinder. Hal ini terjadi karena *leading edge rounded* menghasilkan tinggi aliran yang rendah sehingga membentuk titik separasi dan menggenerasi *vortex*. Karena ukuran *vortex* yang terbentuk berukuran kecil, intensitas kecepatan aliran yang dihasilkan bernilai rendah dengan degradasi warna biru. Plot $Re = 85.000$ (Gambar 6) secara visual tidak menunjukkan perbedaan degradasi warna, ukuran dan jumlah pada *vortex* jika dibandingkan dengan $Re = 51.000$.



Gambar 4. Aliran *streamline* pada potongan simetris (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 17.000$.



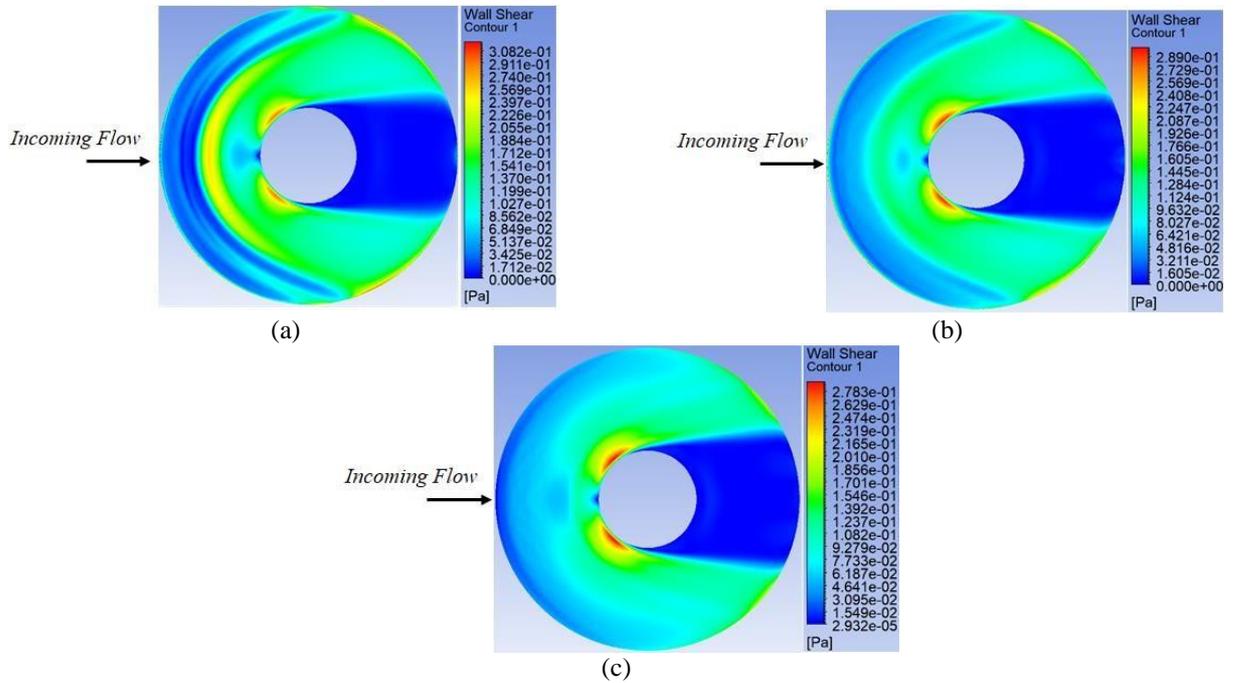
Gambar 5. Aliran *streamline* pada potongan simetris (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 51.000$.



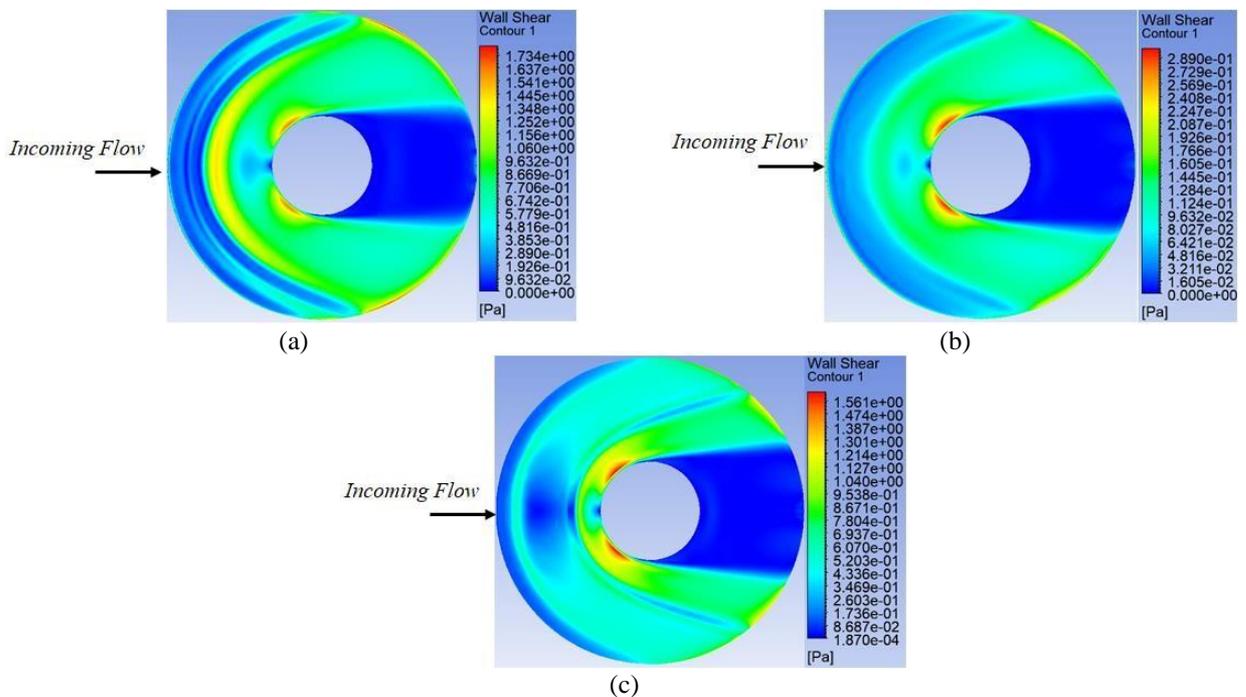
Gambar 6. Aliran *streamline* pada potongan simetris (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 85.000$.

Gambar 7, 8 dan 9 mempresentasikan hasil simulasi distribusi tegangan geser dengan bentuk *leading edge flat* menunjukkan adanya area tambahan nilai Nusselt tinggi dengan degradasi warna kuning. Merujuk pada Gambar 4, 5 dan 6 bagian ini adalah zona resirkulasi, sedangkan area dengan degradasi warna biru diujung *face* merupakan bagian stagnasi aliran. Pada bentuk *leading edge sharp* dan *rounded* tidak ditemukan degradasi warna kuning karena rendahnya intensitas aliran. Plot *leading edge rounded* pada $Re = 51.000$ (Gambar 5 c) dan $Re = 85.000$ (Gambar 6 c) mempunyai degradasi warna biru ditengah yang merupakan daerah stagnasi aliran dari *vortex* didepan silinder. Nilai tegangan geser meningkat seiring dengan naiknya nilai Re .

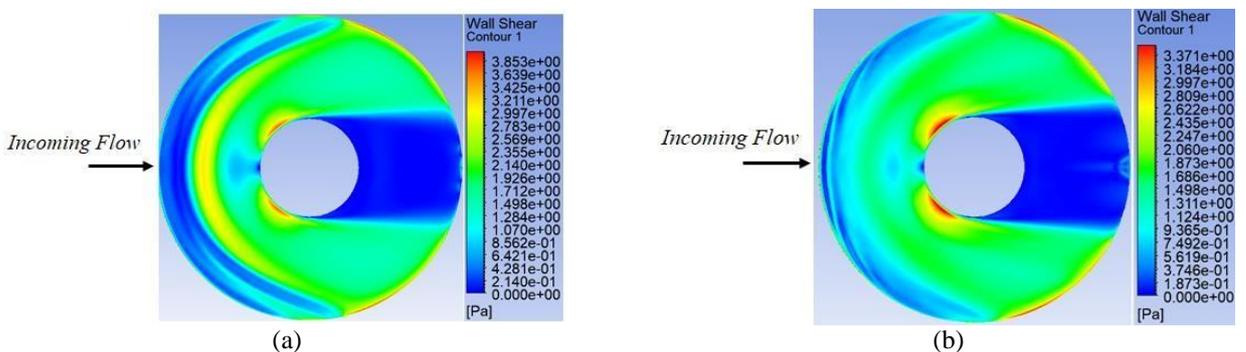
Hasil-hasil simulasi distribusi tegangan geser *side* $Re = 17.000$, 51.000 dan 85.000 dengan *leading edge flat*, *sharp* dan *rounded* ditampilkan pada Gambar 10, 11 dan 12. Penyebaran tegangan geser direpresentasikan dengan degradasi warna disamping kanan plot. Warna biru mempresentasikan nilai tegangan geser rendah dan warna merah mempresentasikan tegangan geser tinggi. Secara keseluruhan, nilai tegangan geser meningkat seiring meningkatnya nilai Re dengan perbedaan degradasi warna yang tidak signifikan. Nilai tegangan geser tinggi terdapat pada sisi kiri dan kanan dibagian depan dan menurun pada bagian belakang. Meski didominasi dengan penurunan, terdapat area yang menunjukkan kenaikan nilai tegangan geser dengan degradasi warna hijau dimana mengindikasikan adanya kenaikan intensitas aliran diarea tersebut.

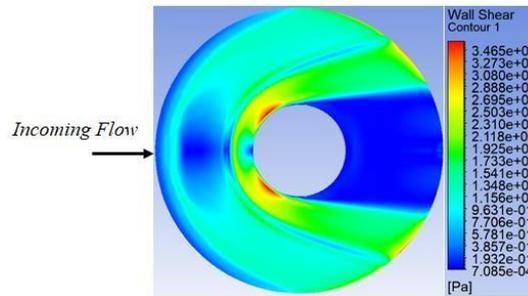


Gambar 7. Kontur distribusi tegangan geser pada face (a) flat (b) sharp (c) rounded dengan $Re = 17.000$.

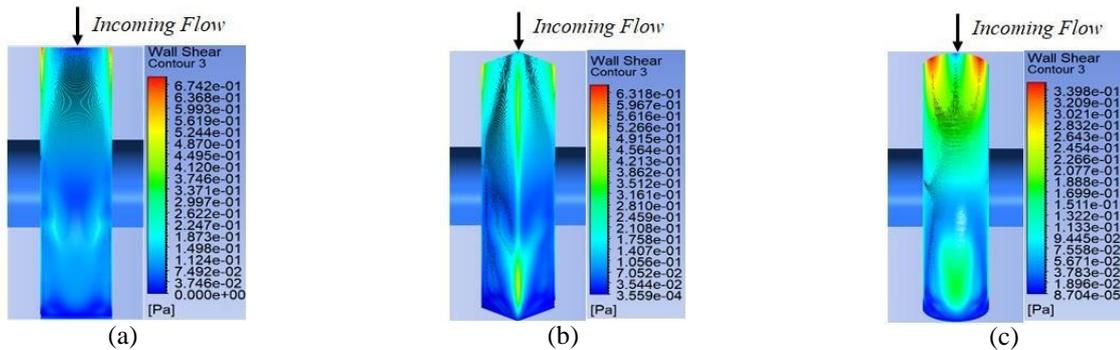


Gambar 8. Kontur distribusi tegangan geser pada face (a) flat (b) sharp (c) rounded dengan $Re = 51.000$.

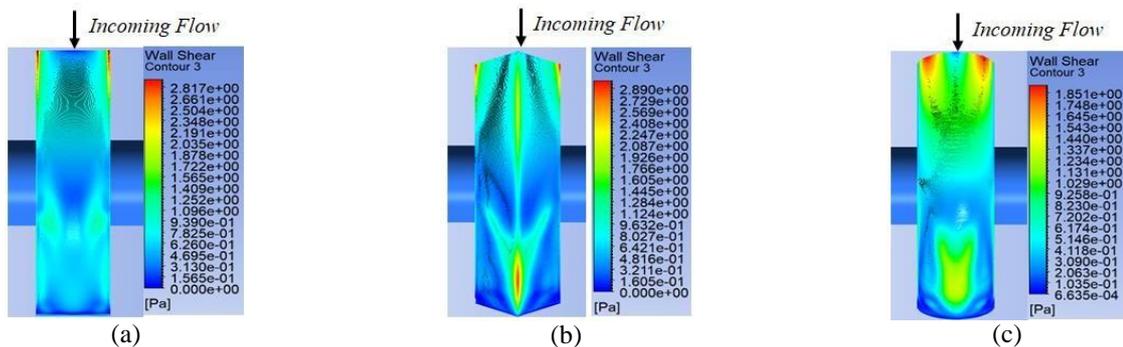




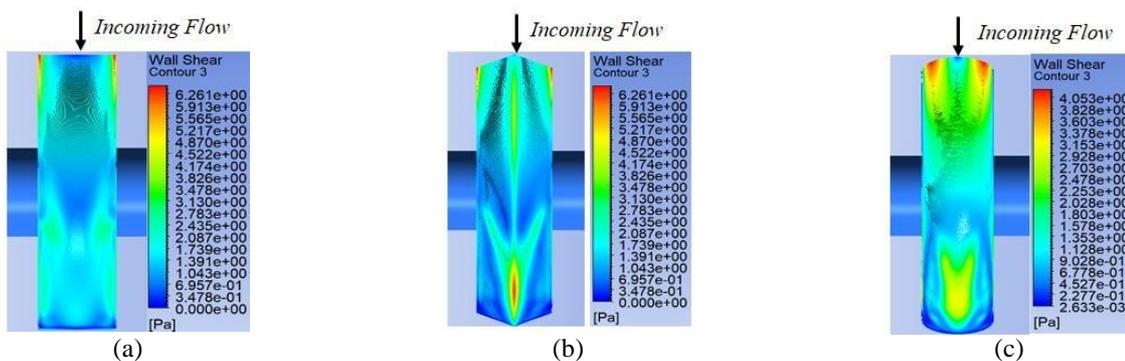
Gambar 9. Kontur distribusi tegangan geser pada *face* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 85.000$.



Gambar 10. Kontur distribusi tegangan geser pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 17.000$

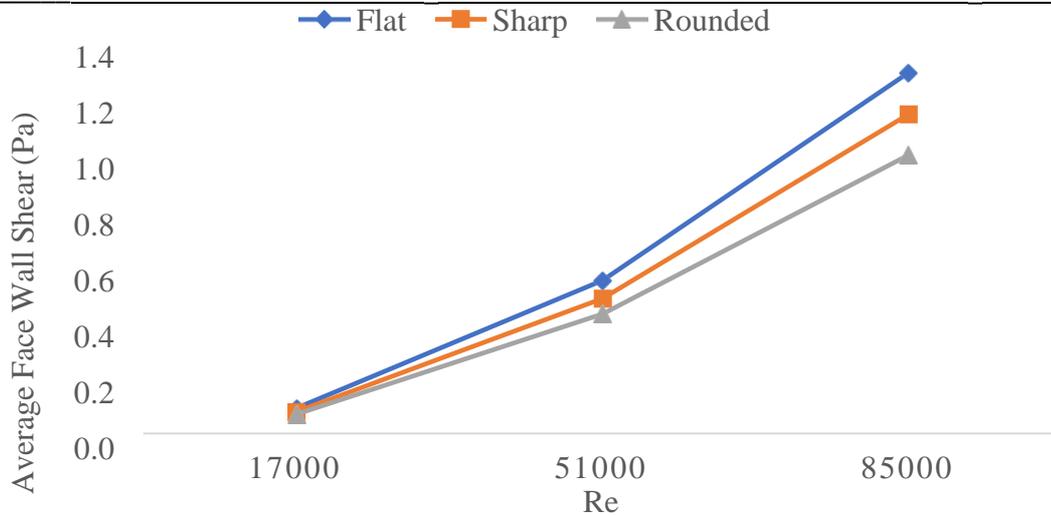


Gambar 11. Kontur distribusi tegangan geser pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 51.000$



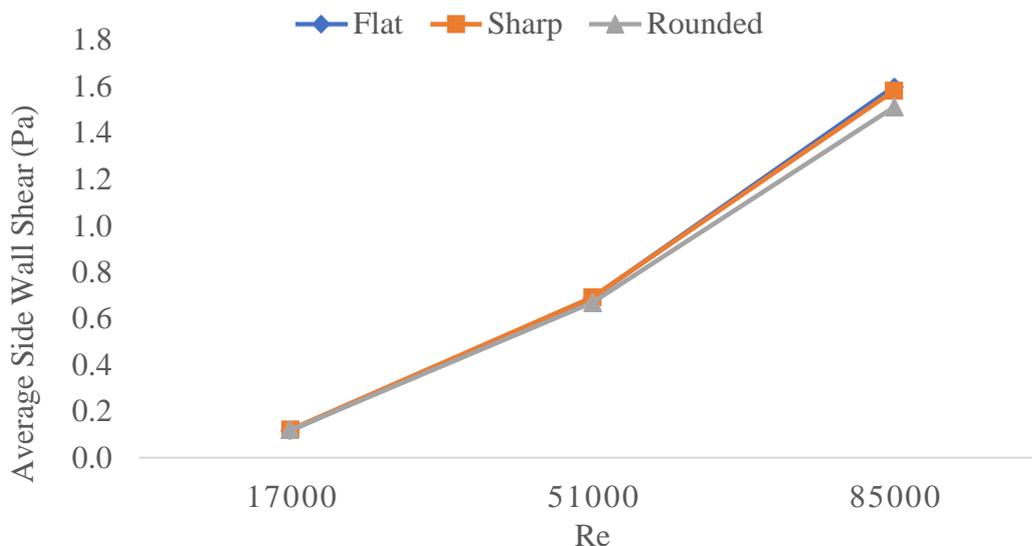
Gambar 12. Kontur distribusi tegangan geser pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 85.000$.

Gambar 13 dan 14 menampilkan hasil simulasi profil rata-rata tegangan geser. Untuk mendapatkan nilai rata-rata tegangan geser, digunakan kalkulator fungsi yang sudah tersedia oleh Fluent. Secara keseluruhan plot profil menunjukkan nilai rata-rata tegangan geser yang meningkat seiring dengan meningkatnya nilai Re . Merujuk ke Gambar 7, 8 dan 9, bentuk *leading edge flat* menghasilkan area tambahan dengan nilai tegangan geser yang tinggi akibat sirkulasi aliran. Area ini terdapat pada bentuk *leading edge sharp* dan *rounded* tetapi memiliki nilai tegangan geser yang kecil. Nilai-nilai tersebut menghasilkan plot profil rata-rata tegangan geser pada *face* (Gambar 13), yang menginformasikan bentuk *leading edge flat* memiliki profil rata-rata tegangan geser tertinggi diikuti bentuk *leading edge sharp* dan *rounded* memiliki profil rata-rata tegangan geser terendah.



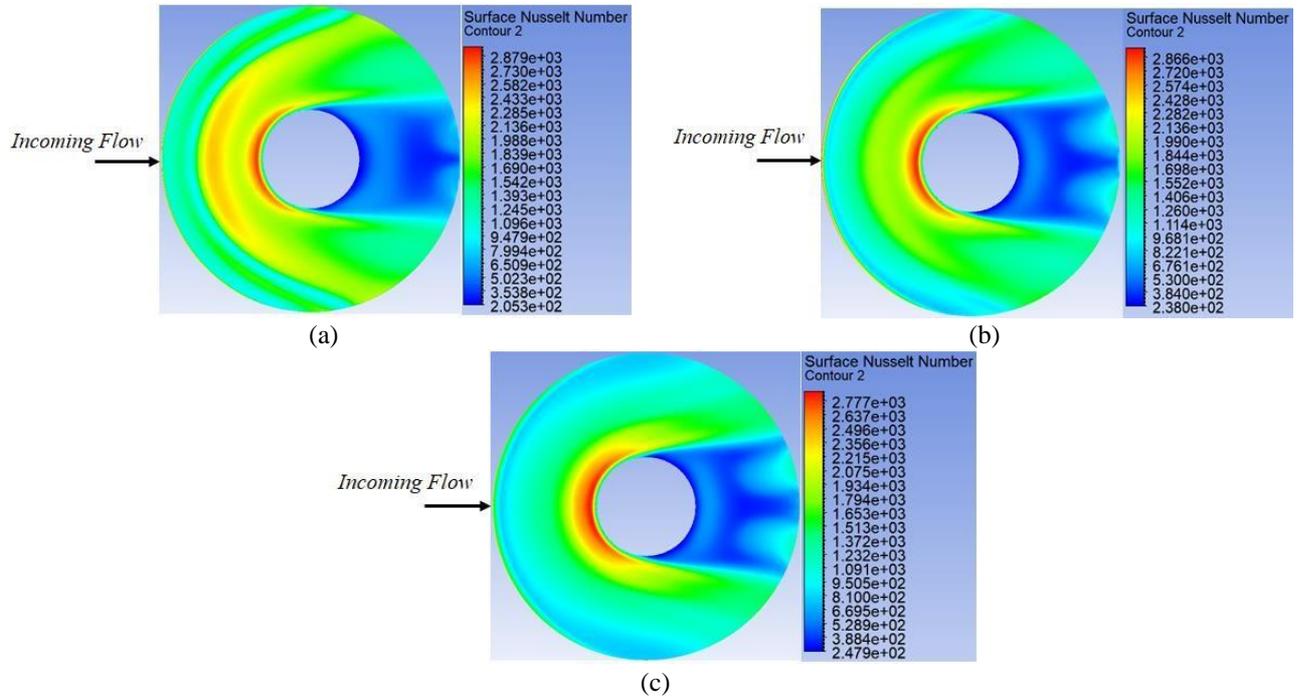
Gambar 13. Profil nilai rata-rata distribusi tegangan geser pada bagian *face*.

Plot Gambar 14 merupakan nilai tegangan geser rata-rata pada bagian *side*, yang menunjukkan nilai rata-rata dari setiap *leading edge* pada masing-masing nilai Re. Nilai rata-rata tegangan geser tidak menunjukkan selisih yang signifikan satu sama lain. Plot tersebut menunjukkan bentuk *leading edge flat* memiliki nilai rata-rata tegangan geser tertinggi diikuti *leading edge sharp* dan *rounded*. Merujuk pada Gambar 10, 11 dan 12, degradasi warna pada *leading edge flat* didominasi oleh degradasi warna biru yang menunjukkan nilai tegangan geser rendah. Tetapi, nilai pada degradasi warna biru pada bentuk *leading edge flat* sama dengan nilai degradasi warna menengah pada *leading edge sharp* dan *rounded*, sehingga memiliki nilai rata-rata yang tinggi.

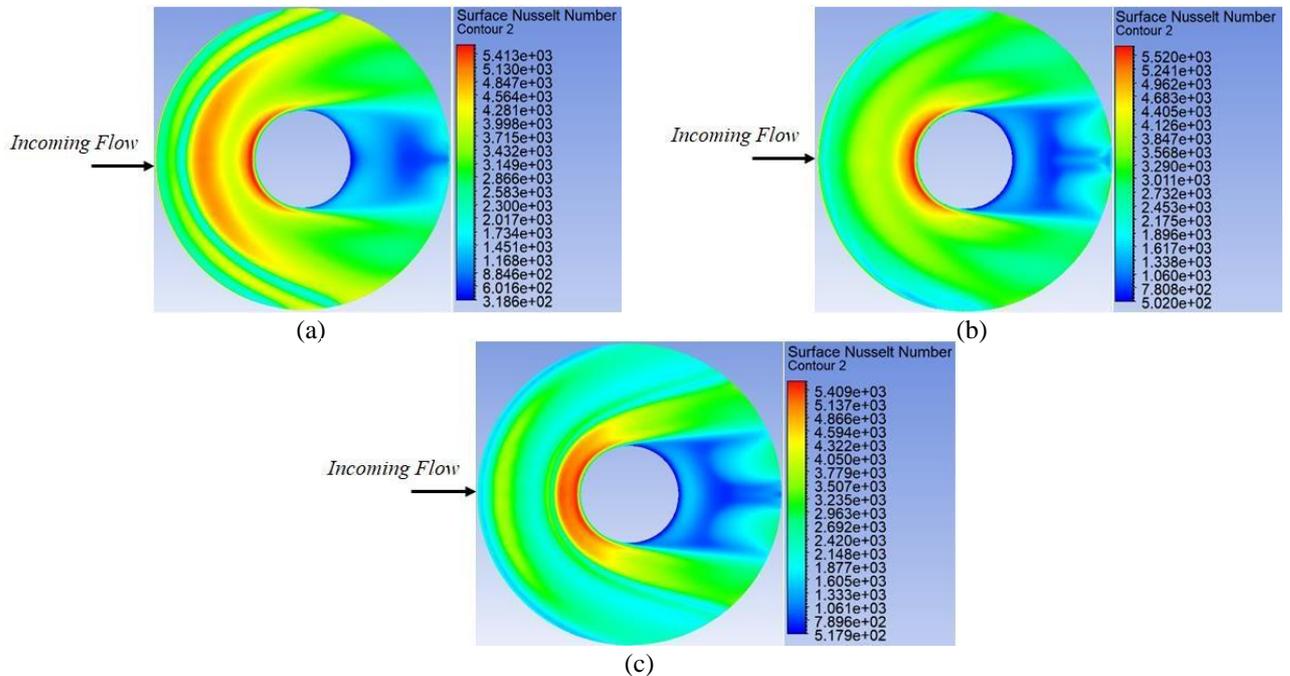


Gambar 14. Profil nilai rata-rata distribusi tegangan geser pada bagian *side*.

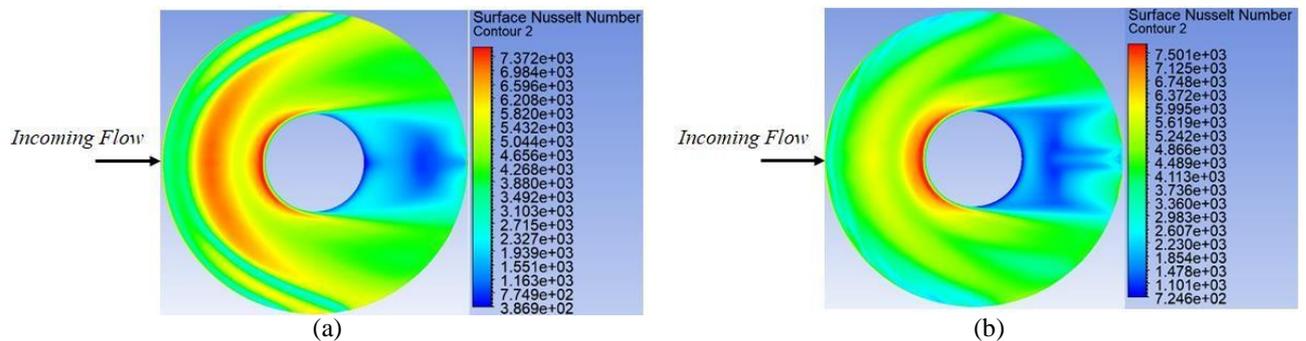
Hasil-hasil simulasi distribusi bilangan Nusselt pada *face* dengan Re = 17.000, 51.000 dan 85.000 dengan variasi *leading edge flat*, *sharp* dan *rounded* ditampilkan pada Gambar 15, 16 dan 17. Secara keseluruhan, nilai Nusselt tinggi terdapat di depan silinder dengan pertambahan luas degradasi warna merah yang tidak signifikan meski terjadi peningkatan nilai Re pada masing-masing bentuk *leading edge*. Merujuk pada Gambar 4, 5 dan 6, *vortex* mempengaruhi distribusi bilangan Nusselt. Hal ini dibuktikan pada area resirkulasi *leading edge flat* memiliki nilai Nusselt tinggi yang semakin meluas seiring dengan bertambahnya nilai Re. Sedangkan, bagian stagnasi aliran memiliki nilai Nusselt yang rendah dengan degradasi warna hijau dan biru. Plot *leading edge sharp* menunjukkan hal serupa, tetapi karena intensitas aliran yang dihasilkan tidak sekuat *leading edge flat*, hanya degradasi warna kuning yang dihasilkan dan meluas dengan meningkatnya nilai Re. Pada plot *leading edge rounded*, efek zona sirkulasi baru terlihat pada Re = 51.000 (Gambar 16 c) dan 85.000 (Gambar 17 c). Dari dua *vortex*, hanya *vortex* pada bagian belakang yang menghasilkan degradasi warna kuning. Degradasi warna kuning yang disebabkan oleh *vortex* pada depan silinder baru terlihat pada Re = 85.000. Area *wake* menunjukkan peningkatan intensitas Nusselt seiring dengan naiknya nilai Re. Hal ini dibuktikan dengan mudarnya degradasi warna biru tua yang beralih menjadi degradasi warna biru muda.

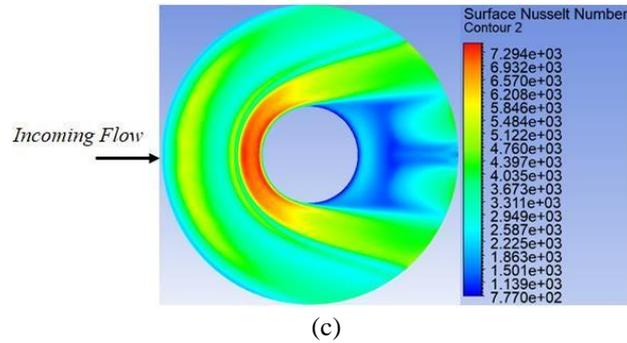


Gambar 15. Kontur distribusi Nusselt pada face (a) flat (b) sharp (c) rounded dengan $Re = 17.000$.



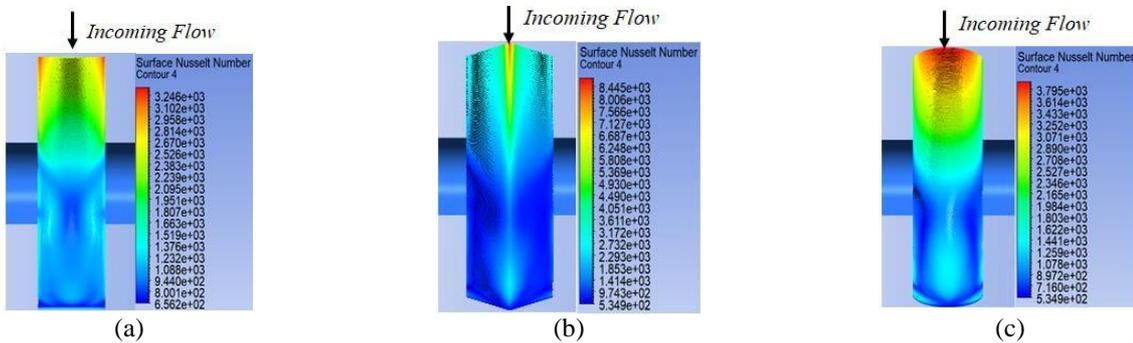
Gambar 16. Kontur distribusi Nusselt pada face (a) flat (b) sharp (c) rounded dengan $Re = 51.000$.



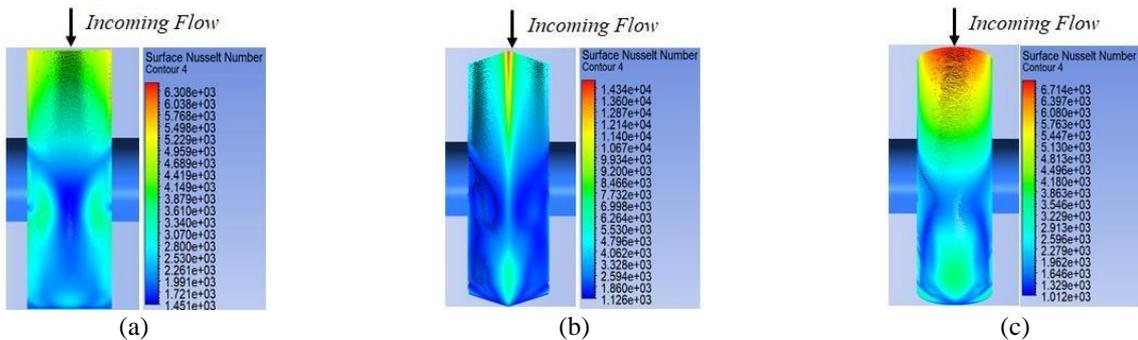


Gambar 17. Kontur distribusi Nusselt pada *face* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 85.000$.

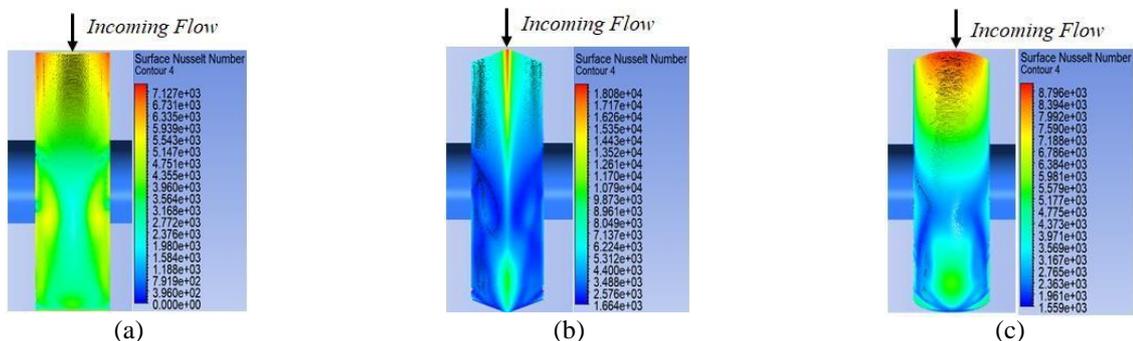
Gambar 18, 19 dan 20 mempresentasikan hasil simulasi bilangan Nusselt. Secara umum, perubahan degradasi warna terjadi pada bagian belakang karena peningkatan nilai Nusselt dengan degradasi warna hijau, meski secara garis besar nilai Nusselt menurun. Area peningkatan nilai Nusselt dengan degradasi warna hijau disebabkan karena intensitas aliran yang meningkat. Area ini semakin lebar dengan peningkatan nilai Re tetapi tidak merubah degradasi warna. Plot tersebut juga menunjukkan letak area nilai Nusselt tinggi yang berbeda-beda pada setiap *leading edge*. Nilai Nusselt tinggi berada pada bagian depan, dengan *leading edge flat* disamping kiri dan kanan, *leading edge sharp* dan *rounded* berada ditengah. Area ini tidak menunjukkan perubahan luas yang signifikan meski terjadi peningkatan nilai Re . Area tersebut menunjukkan bentuk *leading edge* tidak hanya mempengaruhi aliran pada bagian *face* tetapi juga pada *side*.



Gambar 18. Kontur distribusi Nusselt pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 17.000$.

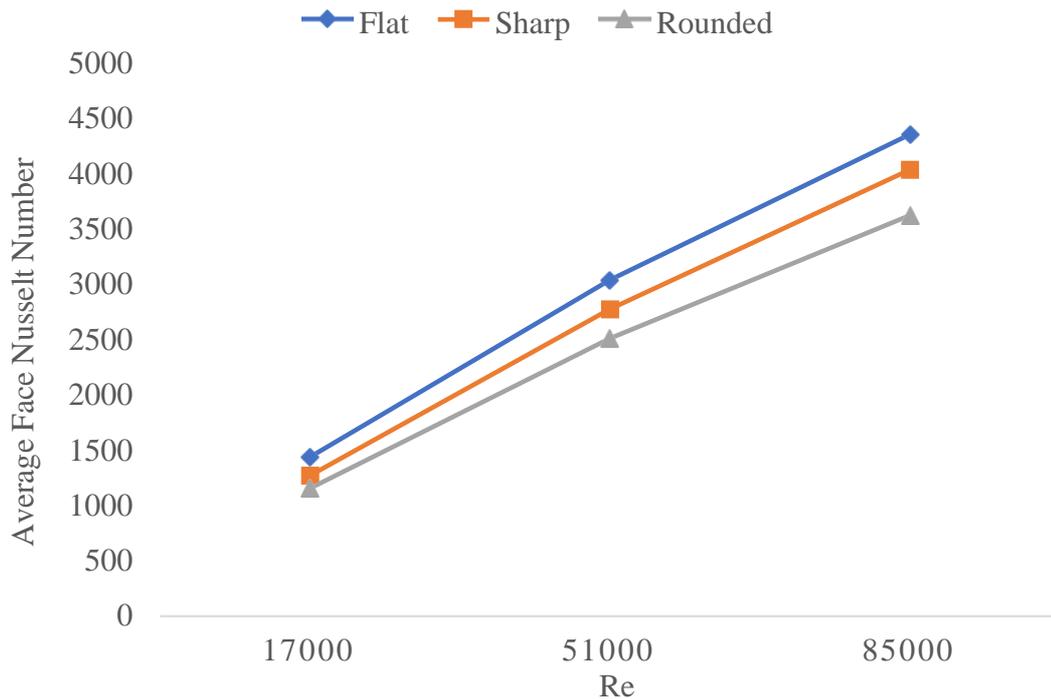


Gambar 19. Kontur distribusi Nusselt pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 51.000$.



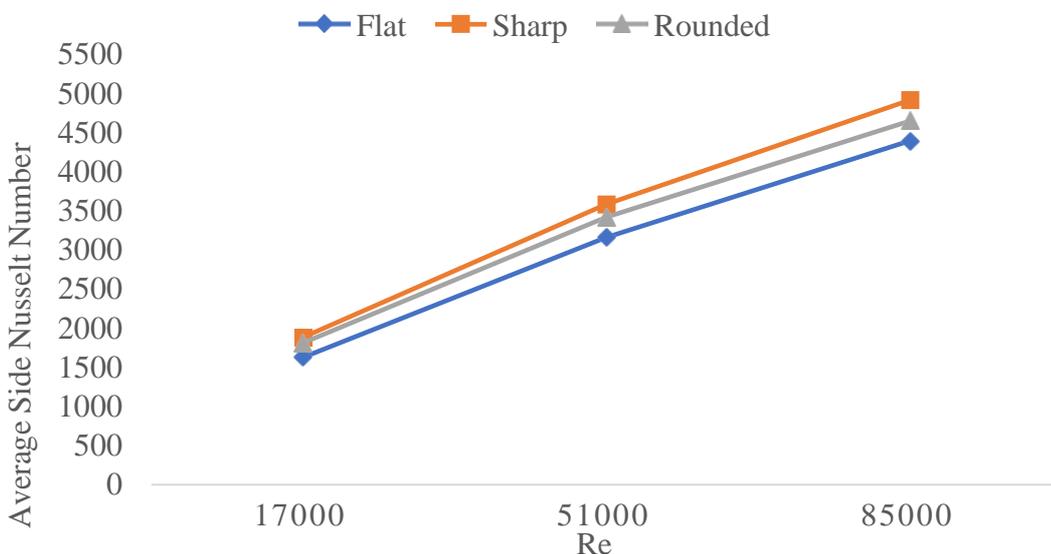
Gambar 20. Kontur distribusi Nusselt pada *side* (a) *flat* (b) *sharp* (c) *rounded* dengan $Re = 85.000$.

Gambar 21 dan 22 menampilkan hasil simulasi profil rata-rata bilangan Nusselt pada tiga variasi *leading edge flat*, *sharp* dan *rounded* dengan $Re = 17.000, 51.000$ dan 85.000 pada *face* dan *side*. Untuk mendapatkan nilai rata-rata bilangan Nusselt, digunakan kalkulator fungsi yang sudah tersedia oleh Fluent. Dari plot untuk ketiga Re yang diuji pada masing-masing *leading edge*, terlihat tren profil rata-rata bilangan Nusselt yang meningkat. Plot profil untuk *face* pada Gambar 21 menunjukkan *leading edge flat* memiliki nilai rata-rata Nusselt tertinggi disetiap kenaikan bilangan Re disusul dengan bentuk *leading edge sharp* dan *rounded*. Berdasarkan tinjauan kembali pada Gambar 15, 16 dan 17, bentuk *leading edge flat* memiliki area tambahan dengan nilai Nusselt yang tinggi akibat resirkulasi aliran pada *vortex*. Area ini juga dimiliki oleh bentuk *leading edge sharp* dan *rounded* tetapi memiliki luas yang lebih kecil dan nilai yang lebih rendah, sehingga nilai rata-rata Nusselt yang dihasilkan lebih kecil.



Gambar 21. Profil rata-rata bilangan Nusselt pada bagian *face*.

Gambar 22 menunjukkan profil rata-rata Nusselt pada bagian *side* dengan bentuk *sharp* memiliki nilai rata-rata bilangan Nusselt tertinggi pada setiap rentang bilangan Re disusul dengan *leading edge sharp* dan *rounded*. Merujuk pada Gambar 18, 19 dan 20 *leading edge sharp* memiliki nilai Nusselt rendah dengan degradasi warna biru yang mendominasi, tetapi nilai pada degradasi warna ini hampir sama dengan nilai skala menengah pada bentuk *leading edge* yang lain.



Gambar 22. Profil rata-rata bilangan Nusselt pada bagian *side*.

4. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan dari studi sekarang ini adalah sebagai berikut:

1. Penambahan sirip menggenerasi *vortex* jenis *Longitudinal Vortex* (LV) pada bagian *face*, dengan bagian resirkulasi menghasilkan intensitas kecepatan aliran yang tinggi dan bagian stagnasi aliran memiliki intensitas kecepatan aliran yang rendah
2. Tinggi aliran yang berbeda dihasilkan setiap variasi *leading edge* sehingga menghasilkan bentuk, ukuran dan jumlah *vortex* yang berbeda sebagai pola aliran. Semakin tinggi aliran, maka semakin besar ukuran dan intensitas aliran *vortex*. Bentuk *flat* memiliki tinggi aliran tertinggi diikuti dengan bentuk *sharp* dan *rounded*. Variasi *leading edge* menghasilkan perbedaan degradasi warna sebagai distribusi nilai tegangan geser dan bilangan Nusselt pada *face* dan *side*. Nilai tegangan geser dan bilangan Nusselt yang tinggi berada disamping dan depan silinder karena fluktuasi positif aliran dan zona resirkulasi, sedangkan pada *face* nilai rendah terletak pada stagnasi aliran dan pada *side* terletak dibelakang.
3. Bilangan Re memengaruhi pola aliran hanya pada *leading edge rounded*, saat $Re = 17.000$ terdapat dua *vortex* dan saat $Re = 51.000$ dan 85.000 terdapat empat *vortex*. Semakin tinggi bilangan Re maka nilai tegangan geser dan bilangan Nusselt pada *face* dan *side* meningkat dan area degradasi warna dengan nilai tegangan geser dan bilangan Nusselt yang tinggi semakin meluas.

5. Daftar Pustaka

- [1] T. A. E. S. Park, "Local convective mass transfer on circular cylinder with transverse annular fins in crossflow," vol. 39, no. 5, hal. 1093–1101, 1996.
- [2] A. Dogan, S. Akkus, M. Engineering, M. Engineering, dan K. Tarihi, "NUMERICAL ANALYSIS OF NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER," hal. 31–41, 2012.
- [3] M. Jahanmiri, "Laminar Separation Bubble : Its Structure , Dynamics and Control Laminar Separation Bubble : Its Structure , Dynamics and Control," 2011.
- [4] M. Fiebig, "VORTICES , GENERATORS AND HEAT TRANSFER," vol. 76, no. February, 1998.
- [5] Y. He dan Y. Zhang, "Advances and Outlooks of Heat Transfer Enhancement by Longitudinal *Vortex* Generators," hal. 1–46.
- [6] E. M. Sparrow, "Effect of angle of attack on the heat transfer coefficient for an annular fin," vol. 29, no. 8, hal. 0–6, 1986.
- [7] A. Bakker, *Lectures on Applied*. 2008.
- [8] G. S. Vorticity, A. Ghanem, dan C. Habchi, "Experimental Investigation on Effect of Fin Shape on the Thermal-Hydraulic Performance of Compact Fin-and-Tube Heat Exchangers Experimental Investigation on Effect of Fin Shape on the Thermal-Hydraulic Performance of Compact Fin-and-Tube Heat Exchangers," 2018, doi: 10.1088/1757-899X/318/1/012070.
- [9] Sudirman dan Ruslim, "Comparison of wake behind finned cylinders with fin pitch variations in cross-flow," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1788, 2017, doi: 10.1063/1.4968267.
- [10] J. Teknik *dkk.*, "PENGAMATAN VISUAL PEMBENTUKAN HORSESHOE *VORTEX* PADA SUSUNAN Abstrak," no. 1, hal. 15–16, 2003.
- [11] "User ' s Guide," no. September, 2006.
- [12] A. V Pasha, P. Jalili, dan D. D. Ganji, "Analysis of unsteady heat transfer of specific longitudinal fins with Temperature-dependent thermal coefficients by DTM," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, hal. 3509–3521, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.11.019.
- [13] M. Bošnjakovi, S. Muhi, Č. Ante, dan M. Živi, "How Big is an Error in the Analytical Calculation of Annular Fin Efficiency?," hal. 1–18, 2019, doi: 10.3390/en12091787.