

Studi Numerik Perpindahan Panas pada *Corrugated Plate Heat Exchanger Chevron Type* dengan Variasi *Corrugation Angle* pada Aliran Turbulen

Shania Amna Sutandyo dan Prabowo

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)

e-mail: niasutandyo@gmail.com

Abstrak—Sistem *oil cooler* menggunakan *heat exchanger* atau alat penukar panas. Salah satu tipe *heat exchanger* yang memiliki performa tinggi yaitu *plate heat exchanger* (PHE) tipe *chevron*. Performa PHE dalam pendinginan oli sangat mempengaruhi performa dari sistem pelumasan yang akan berdampak pula pada performa turbin gas. Salah satu hal yang mempengaruhi performa PHE yaitu dalam aspek desain yaitu salah satunya pada bagian *corrugation angle*-nya. Dalam penelitian ini akan digunakan *flat* dan *corrugated* PHE tipe *chevron* dengan memvariasikan bagian *corrugation angle* pada 25°, 45°, dan 65° yang akan dilakukan pada aliran turbulen. Adapun simulasi yang dilakukan dengan bantuan *software* CFD pada salah satu *channel* fluida dingin dari PHE yang bertujuan untuk melihat bentuk aliran dan perubahan temperatur pada fluida air yang mengalir. Selain itu pada studi ini juga dilihat besarnya bilangan *Nusselt* dan *friction factor* serta nilai *thermal enhancement factor*. Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa penggunaan *corrugated* PHE jauh lebih baik daripada penggunaan *flat* PHE. Kemudian dalam variasi sudut korugasi terlihat bahwasanya semakin besar sudut korugasi yang digunakan maka perpindahan panas yang terjadi semakin cepat serta penurunan tekanan yang semakin besar. Ditinjau dari perbandingan perpindahan panas dan penurunan tekanan antara *flat* dan *corrugated* PHE didapatkan hasil bahwasanya nilai *thermal enhancement factor* pada *corrugated* PHE paling tinggi pada sudut 65° yaitu sebesar 1,94 dan paling rendah pada sudut 25° yaitu sebesar 1,83.

Kata Kunci—CFD, *Corrugated*, *Heat Exchanger*, PHE, *Oil Cooler*.

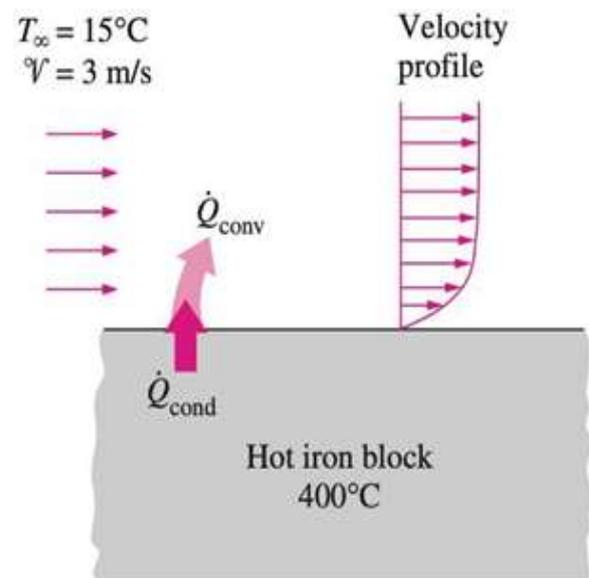
I. PENDAHULUAN

Salah satu bagian utama dari pembangkit tenaga adalah turbin gas. Turbin gas dalam proses kerjanya tentu saja didukung oleh beberapa komponen. Komponen-komponen yang ikut berputar saat turbin gas bekerja memiliki risiko tinggi untuk berdeformasi karena terkena temperatur tinggi dan cepat rusak atau aus karena gesekan. Hal-hal ini dapat diminimalisir dengan adanya sistem pelumasan.

Oli pada sistem pelumasan akan mengalami kenaikan temperatur saat memasuki turbin gas akibat uap panas. Agar oli ini dapat terus disirkulasikan dan digunakan, diperlukan sistem *oil cooler*. Sistem *oil cooler* ini menggunakan *heat exchanger* atau alat penukar panas. Salah satu tipe *heat exchanger* yang biasa digunakan untuk *oil cooler* yaitu *plate heat exchanger* tipe *chevron*. *Plate heat exchanger* (PHE) atau alat penukar panas tipe pelat merupakan tipe alat penukar panas dengan performa yang tinggi dan bentuk yang *compact*. Alat penukar panas tipe ini juga mudah untuk disesuaikan dengan perubahan termal yang diinginkan.

Peningkatan dan penurunan kinerja dari PHE untuk pendinginan oli ini sangat mempengaruhi performa dari

sistem pelumasan yang akan berdampak pula pada performa



Gambar 1. Perpindahan panas secara konveksi di atas pelat datar.

turbin gas. Maka dari itu, dalam mendesain PHE harus diperhatikan dan diperhitungkan setiap detail dari bagian-bagiannya, salah satunya yaitu *corrugation angle*. Nilai dari *corrugation angle* ini dapat mempengaruhi performa dari PHE.

Pada studi ini akan diteliti tentang desain dari *corrugated plate heat exchanger* tipe *chevron* dengan variasi pada bagian *corrugation angle*. Analisa ini dilakukan agar dapat mengetahui desain plat seperti apa yang paling efisien digunakan pada PHE.

A. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan energi dalam medium atau penghantar yang disebabkan oleh adanya gradien temperatur atau perbedaan panas, disertai dengan adanya perpindahan partikel-partikel penghantar tersebut (Gambar 1). Terdapat dua jenis perpindahan panas secara konveksi yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi paksa yaitu perpindahan panas secara konveksi yang alirannya bergerak karena faktor eksternal, seperti kipas dan pompa. Sedangkan untuk konveksi bebas, aliran terjadi karena adanya *buoyancy force*, yang mana karena adanya perbedaan densitas yang disebabkan oleh variasi temperature pada fluida [1].

B. Heat Exchanger

Alat penukar panas atau *heat exchanger* adalah alat yang digunakan untuk menukar panas antara dua fluida pada

temperatur yang berbeda dengan menjaga agar kedua fluida tersebut tidak tercampur. *Compact heat exchanger* merupakan salah satu jenis *heat exchanger* yang secara khusus dirancang untuk mewujudkan luas permukaan perpindahan panas yang besar per satuan volume. *Compact heat exchanger* memungkinkan kita untuk mencapai *heat transfer rates* yang tinggi antara dua fluida dalam volume kecil [2]. Dalam *compact heat exchanger*, fluida biasanya bergerak dengan arah silang, yaitu tegak lurus satu sama lain. Alat penukar panas tipe pelat atau *plate heat exchanger* (PHE) adalah alat penukar panas yang menggunakan pelat logam sebagai media untuk memindahkan panas di antara dua fluida. Alat penukar panas ini termasuk jenis *compact heat exchanger* yang diketahui memiliki keunggulan yaitu bentuknya yang kecil namun penampang panasnya luas dan laju aliran perpindahan panasnya cepat. Lapisan pelat tipis yang digunakan pada PHE, dibentuk pola bergelombang yang timbul pada setiap pelatnya (korugasi). Korugasi yang dibentuk biasanya berbentuk *chevron*, namun terdapat beberapa bentuk korugasi lainnya. Pelat korugasi ini dirangkai sedemikian rupa sehingga korugasi pelat tersebut dengan pelat selanjutnya bersentuhan satu sama lain. Kontak antar korugasi pelat ini yang menghasilkan ketahanan mekanis dari serangkaian PHE tersebut. Saluran air yang terbentuk diantara dua pelat korugasi tersebut ramping dan berkeluk-luk, yang menghasilkan peningkatan pada kecepatan perpindahan panas dan mengurangi *fouling factor* dengan meningkatkan tegangan geser. Terdapat pula *second glide* pada aliran dan peningkatan turbulensi.

C. Computational Fluid Dynamic

Computational fluid dynamic (CFD) merupakan metode numerik untuk menganalisa aliran dan performa dari suatu alat baru dan proses. CFD memungkinkan untuk menganalisa secara detail suatu aliran yang dipadukan dengan perpindahan massa dan panas. Salah satu kelebihan dari CFD yaitu memungkinkannya untuk melihat informasi lokal secara detail dari sistem yang disimulasikan. Dalam hal ini, juga dapat diperoleh temperatur lokal, gerakan partikel, *backmixing*, dan pembentukan gelembung. Informasi-informasi ini dapat diperoleh dengan pemilihan metode yang tepat pada proses CFD [3]. CFD dalam prosesnya memiliki tiga tahapan utama yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*.

D. Penelitian Corrugated Plate Heat Exchanger Terdahulu

Studi numerik dengan menggunakan geometri pelat Vicarb Alfa Laval dilakukan dengan variasi sudut korugasi 30°, 45°, 60°, 72°, dan 80° [4]. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan pada *channel* fluida panas untuk memperoleh bilangan *Nusselt*, *friction factor*, dan *thermal enhancement factor*. Berdasarkan hasil yang didapatkan, Dengan bertambahnya sudut korugasi, maka bilangan *Nusselt* dan *friction factor* bertambah karena adanya kenaikan turbulensi dan *pressure drop* yang semakin tinggi akibat adanya induksi aliran sekunder pada saluran tersebut.

Studi numerik yang dilakukan untuk melihat pengaruh sudut korugasi dan jenis aliran terhadap *streamline* dan persebaran temperatur pada PHE [5]. Penelitian ini dilakukan pada dua *channel* fluida, yaitu *channel* fluida panas dan

channel fluida dingin. Variasi yang dilakukan yaitu kondisi aliran laminar dan turbulen, serta sudut korugasi pada 30°, 45°, 55°, 65°, dan 70°. Dari hasil penelitian ini diketahui bahwa pada bilangan *Reynolds* didapatkan bentuk aliran jenis *helical* dan pada bilangan *Reynolds* 2100 didapatkan bentuk aliran jenis *cross-flow*. Kedua jenis aliran ini kurang lebih dapat hidup berdampingan dalam struktur aliran global. Bagian tengah aliran cenderung berstruktur heliks sedangkan bagian fluida di dekat dinding cenderung mengikuti alur. Lalu, untuk persebaran temperatur pada pelat menunjukkan kecenderungan yang sama dalam distribusi temperatur dengan penurunan temperatur saat mendekati pusat pelat. Perbedaan suhu antara tepi dan bagian tengah pelat dapat mencapai hingga 1,5 K. Perbedaan temperatur sepanjang lebar PHE adalah hasil dari distribusi aliran yang tidak seragam di saluran masuk. Daerah melingkar dengan temperatur rendah ini mencirikan titik kontak antara pelat penukar panas.

E. Calculation Procedure

1) Friction Factor

Dalam studi ini dilakukan analisa *friction factor* pada fluida dalam fungsi *Reynold*. Adapun bilangan *Reynold* didefinisikan dengan Persamaan (1).

$$Re = \frac{G \times D_h}{\mu} \quad (1)$$

Dimana G adalah *maximum mass flux* yang dapat dihitung dengan persamaan (2). D_h merupakan diameter hidraulik yang dapat dihitung dengan persamaan (3).

$$G = \frac{N}{w s \left(\frac{D_h}{2} \right)} \quad (2)$$

$$D_h = 4 \times b \quad (3)$$

Friction factor dihitung dengan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach:

$$f = \Delta P_f \cdot S^2 \cdot \left(\frac{D_h}{L} \right) \cdot 2 \cdot \left(\frac{\rho}{m^2} \right) \quad (4)$$

Dimana S merupakan *flow section* dari *heat exchanger* yang dapat dihitung dengan persamaan (5). L adalah panjang dari *inlet* ke *outlet*. $6P_f$ merupakan *frictional pressure losses* yang dapat dihitung dengan persamaan (6).

$$S = b \times w \quad (5)$$

$$\Delta P_f = \Delta P_t - \Delta P_{i/o} \quad (6)$$

$6P_t$ merepresentasikan total penurunan tekanan, yang mana nilainya didapatkan dari hasil simulasi yang dilakukan. Adapun $6P_{i/o}$ merupakan *inlet/outlet pressure drop* antara *port* dengan *channel* yang dapat dihitung dengan persamaan (7).

$$\Delta P_{i/o} = 1.5 \cdot \frac{G^2}{2 \cdot \rho} \quad (7)$$

Tabel 1.
Geometri pelat untuk simulasi

Geometri Pelat	
Panjang (L)	200 mm
Lebar (w)	110 mm
Corrugation Angle (b)	flat plate, 25°, 45°, dan 65°
Corrugation Amplitude (b)	2.5 mm
Corrugation Pitch (P _c)	10.661 mm
Tebal Pelat (t)	0.6 mm

2) Thermal Enhancement Factor

Perhitungan *thermal enhancement factor* (μ) dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan :

$$\mu = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu^0}\right)}{\left(\frac{f}{f^0}\right)^{\frac{1}{3}}} \tag{8}$$

Dimana Nu^0 dan f^0 secara berturut-turut merupakan bilangan *Nusselt* dan *friction factor* dari PHE dengan pelat datar.

II. METODOLOGI

A. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan kajian terkait dasar teori yang akan digunakan pada penelitian kali ini. Studi literatur yang dilakukan diantaranya meliputi konveksi, PHE, dan proses CFD. Hal ini dilakukan pada literatur seperti beberapa jurnal internasional, buku CFD dan buku *heat transfer* yang mana digunakan dalam hal dasaran dalam melakukan perhitungan dan juga simulasi.

B. Pengumpulan Data

Pada tahapan kali ini dilakukan pengumpulan data berupa geometri, material, penelitian terdahulu tentang PHE. Data-data tersebut nantinya akan dilakukan permodelan geometri dan sebagai acuan penetapan *boundary condition*.

C. Analisa Perpindahan Panas pada Plate Heat Exchanger

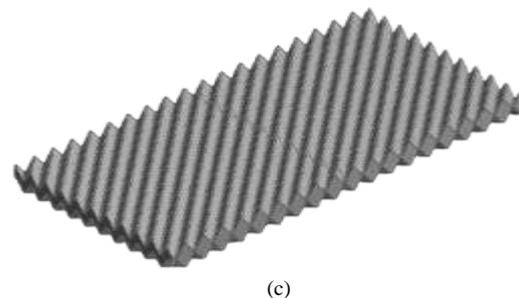
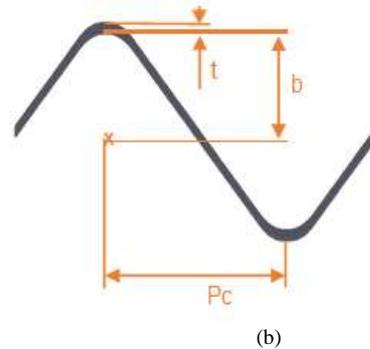
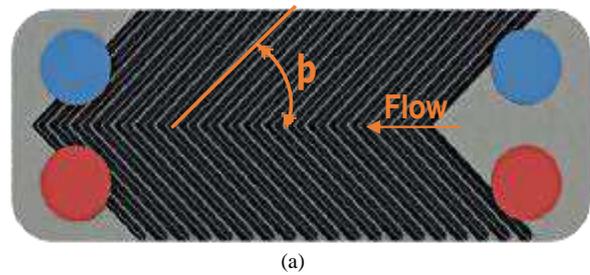
1) Modelling Geometri dan Meshing

Pemodelan geometri dilakukan berdasarkan geometri yang digunakan pada penelitian Saha et al. [4] dengan rincian pada Tabel 1. Adapun model yang dibuat yaitu pada salah satu *channel fluida* dingin PHE dan hanya seperempat bagian dari ukuran asli pelat yang digunakan. Untuk bentuk dari model yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Pemodelan dibuat sebanyak empat macam sesuai dengan variasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu *flat plate* dan PHE sudut korugasi 25°, 45°, dan 65°.

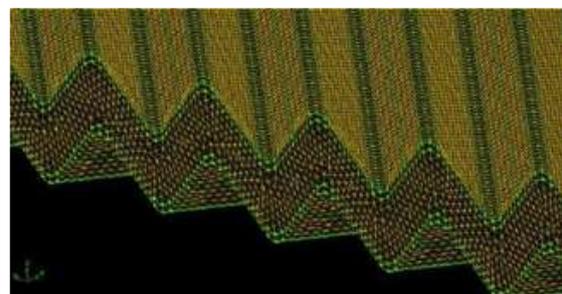
Setelah dilakukan pemodelan, dilanjutkan dengan tahapan *meshing*. Untuk *meshing* yang digunakan yaitu tipe tetrahedral. Struktur dari *mesh* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.

2) Bounndary Condition dan Model Turbulensi

Pada penelitian kali ini, *boundary condition* yang digunakan yaitu *mass-flow inlet* sebesar 0,078kg/s dengan temperatur fluida konstan yaitu 293K. *Outlet* fluida menggunakan *outflow*. Adapun fluida kerja yang digunakan yaitu air. Untuk pelat atas dan bawah diasumsikan sebagai *wall* dengan temperatur konstan 333K.



Gambar 2. Model geometri *corrugated plate heat exchanger* (a) Tampak atas (b) Detail sisi *plate heat exchanger* (c) Gambar 3D keseluruhan.

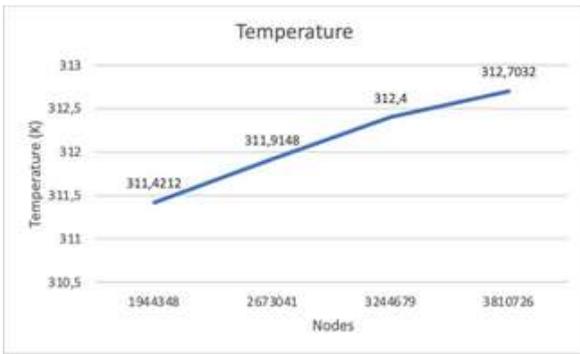


Gambar 3. *Structured mesh* dengan tipe tetrahedral.

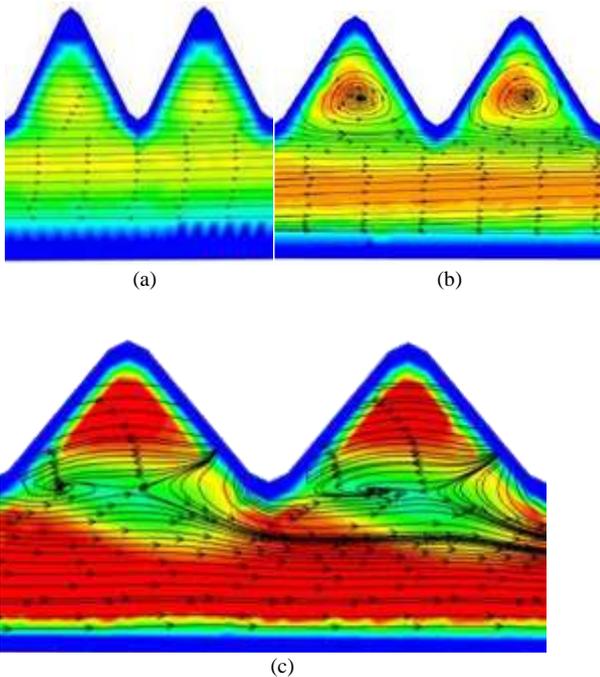
Berdasarkan penelitian Sarraf et al. [5] telah dilakukan simulasi menggunakan model turbulensi *k-c*, *k-ε*, dan RANS. Model *k-c* dan RANS memiliki hasil yang tidak begitu memperhitungkan penurunan tekanan dan residual dari simulasi dengan kedua model ini sangat tidak stabil. Untuk itu model turbulensi yang paling baik digunakan yaitu model *Realizable k-ε*.

3) Grid Independency

Grid independency dilakukan untuk menentukan kerapatan *mesh* yang paling tepat untuk digunakan sehingga mendapatkan hasil yang paling mendekati dengan keadaan yang sebenarnya. Berdasarkan Gambar 4, yaitu grafik *grid independency* terhadap temperatur keluaran fluida, dapat dipilih *mesh* dengan jumlah *nodes* sebesar 3,2 juta. *Mesh* ini dipilih karena memilih selisih temperatur keluaran fluida yang paling kecil terhadap *mesh* yang lebih rapat.



Gambar 4. Grafik *grid independency* terhadap temperatur keluaran.



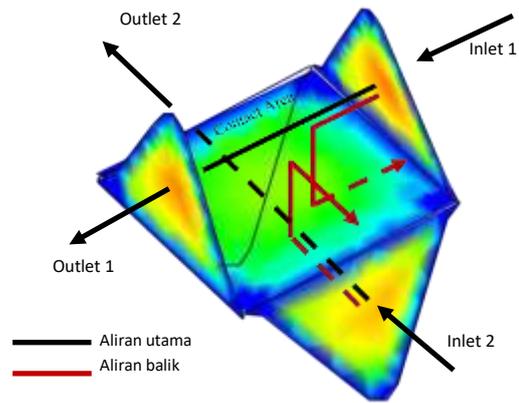
Gambar 5. *Streamline* kecepatan pada *corrugated plate heat exchange* (a) 25° (b) 45° (c) 65°.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

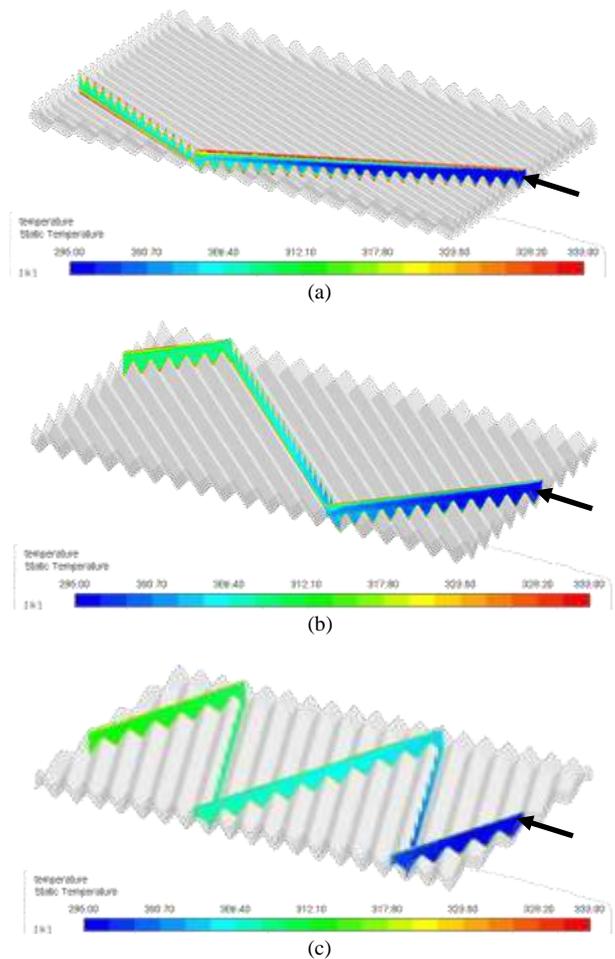
A. Velocity Streamline

Gambar 5 menunjukkan *streamline* kecepatan fluida kerja air di antara dua pelat. *Streamline* ini menunjukkan terbentuknya *secondary flow* pada aliran. Pada *secondary flow* dalam PHE ini terbentuk karena adanya aliran balik, seperti pada Gambar 6, dari aliran fluida korugasi bawah yang mengalir ke arah korugasi atas atau sebaliknya yaitu dari aliran fluida korugasi atas ke arah korugasi bawah secara berulang-ulang sehingga membentuk pusaran atau *base vortex*. *Secondary flow* ini menyebabkan aliran mengalami penyumbatan pada aliran utama (*blockage effect*). Penyumbatan ini menyebabkan luasan penampang pada aliran utama mengecil, yang selanjutnya menghasilkan kecepatan yang semakin tinggi pada aliran.

Dari Gambar 5(a) dapat dilihat bahwa pada PHE dengan sudut korugasi 25° belum terlihat adanya *vortex* yang terbentuk, sedangkan pada Gambar 5(b) terlihat bahwa pada PHE dengan sudut korugasi 65° terbentuk *vortex* yang cukup besar. Hal ini yang menyebabkan kecepatan pada PHE dengan sudut korugasi 65° lebih tinggi dilihat dari warna konturnya, Gambar 5(c).



Gambar 6. Distribusi kontur kecepatan dan gambaran bentuk aliran pada salah satu daerah kontak di antara dua pelat pada plate heat exchanger.

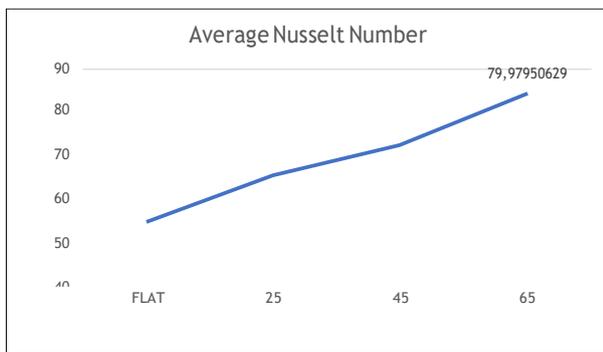
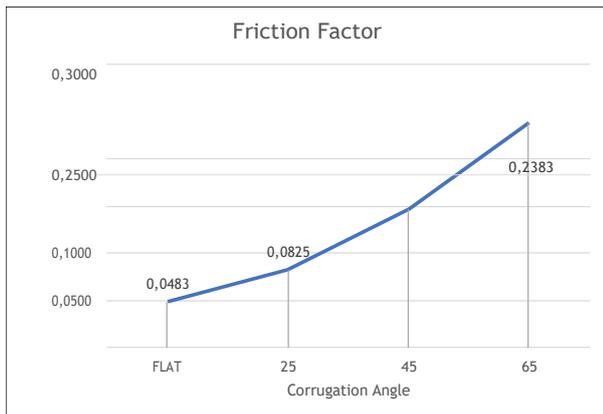
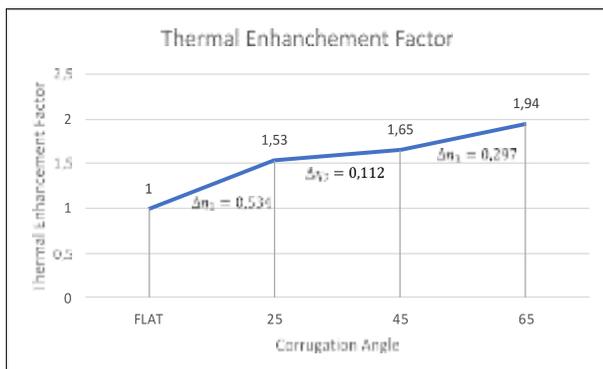


Gambar 7. Kontur temperatur pada fluida di antara dua pelat (a) 25° (b) 45° (c) 65°.

B. Temperature Contour

Dari simulasi CFD yang telah dilakukan, didapatkan hasil berupa kontur temperatur dari fluida di antara dua pelat. Gambar 7 diambil dari *inlet* paling tengah fluida mengikuti aliran fluida sampai ke *outlet*. Besarnya korugasi ini yang mempengaruhi panjangnya lintasan dari fluida, dikarenakan fluida bergerak mengikuti korugasi tersebut.

Dapat dilihat pada Gambar 7(a), PHE dengan sudut korugasi 25° memiliki lintasan yang pendek sedangkan pada Gambar 7(b), PHE dengan sudut korugasi 65° memiliki lintasan yang jauh lebih panjang. Hal ini menyebabkan perubahan temperatur terjadi lebih besar pada PHE dengan

Gambar 8. Bilangan *Nusselt* rata-rata *plate heat exchanger*.Gambar 9. Nilai *friction factor* pada *plate heat exchanger*.Gambar 10. Nilai *friction factor* pada *plate heat exchanger*.

sudut korugasi 65° (Gambar 7(c)) karena fluida memiliki waktu yang lebih panjang untuk mengalami kontak dengan pelat panas.

C. *Nusselt Number*

Efek dari besarnya sudut korugasi terhadap bilangan *Nusselt* dapat dilihat pada Gambar 8. Terlihat bahwa bilangan *Nusselt* pada *corrugated PHE* jauh lebih tinggi daripada *flat PHE*. Dapat dilihat juga bahwa bilangan *Nusselt* yang diperoleh akan semakin tinggi seiring dengan semakin besarnya sudut korugasi *PHE* yang digunakan. Hal ini dikarenakan pada sudut korugasi *PHE* yang besar memiliki turbulensi yang semakin tinggi yang disebabkan oleh *secondary flow* yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

D. *Friction Factor*

Friction factor diperoleh dari penurunan tekanan yang terjadi pada fluida di antara dua pelat. Pengaruh dari besarnya sudut korugasi terhadap *friction factor* yang terjadi diilustrasikan pada Gambar 9. Dapat dilihat bahwa

corrugated PHE memiliki nilai *friction factor* yang lebih tinggi dari *flat PHE* serta semakin besar sudut korugasi *PHE* yang digunakan, maka semakin besar nilai *friction factor* yang diperoleh. Hal ini disebabkan oleh panjang lintasan dan besarnya *secondary flow* yang mempengaruhi besarnya penurunan tekanan yang terjadi.

E. *Thermal Enhancement Factor*

Untuk mengetahui efisiensi dari *corrugated PHE* yang digunakan terhadap *flat PHE*, perlu digunakan *thermal enhancement factor*. Pengaruh dari besarnya sudut korugasi terhadap nilai *thermal enhancement factor* dapat dilihat pada Gambar 10.

Sesuai dengan hasil pembahasan pada bagian sebelumnya, bahwa semakin besar sudut korugasi *PHE* digunakan maka semakin besar bilangan *Nusselt* dan *friction factor* yang dihasilkan, hasil dari *thermal enhancement factor* juga demikian. Maka dari itu, *corrugated PHE* dengan efisiensi tertinggi ada pada *corrugated PHE* dengan sudut korugasi 65°, sehingga *corrugated PHE* ini yang paling baik untuk digunakan.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang saya dapatkan dari penelitian yang saya lakukan pada tugas akhir ini yaitu: (1) Pada sudut korugasi yang lebih besar terjadi *base vortex* yang lebih besar atau dominan. *Base vortex* yang semakin besar memberikan *blockage effect* pada aliran utama yang menyebabkan luasan penampang aliran mengecil. Mengecilnya penampang ini diiringi dengan kecepatan aliran yang semakin tinggi; (2) Kecepatan yang semakin tinggi diiringi dengan bilangan *Reynolds* yang semakin tinggi. Bilangan *Reynolds* yang semakin tinggi menghasilkan nilai *Nusselt* yang semakin tinggi pula. Oleh karena itu semakin tinggi kecepatan maka perpindahan panas yang terjadi semakin baik; (3) Kecepatan ini berdampak juga pada penurunan tekanan *plate heat exchanger*. Semakin besar nilai *pressure drop* yang terjadi maka nilai *friction factor* yang didapatkan semakin besar. *Pressure drop* juga menyebabkan kerugian, sehingga dapat mempengaruhi efisiensi dari *plate heat exchanger*; (4) *Thermal enhancement factor* didapatkan untuk mengetahui efisiensi dari *corrugated plate heat exchanger* terhadap *flat plate heat exchanger*. Nilai dari *thermal enhancement factor* dipengaruhi oleh bilangan *Nusselt* dan *friction factor*. Sangat penting untuk mendapatkan nilai *thermal enhancement factor* yang optimum yaitu dengan mempertimbangan bilangan *Nusselt* yang terbaik dengan kerugian yang diakibatkan *pressure drop* sekecil mungkin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. P. Bergman, T. L., Incropera, F. P., Lavine, A. S., & Dewitt, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [2] Y. A. Cengel, *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2nd Edition. Boston: McGraw-Hill, Inc, 2002.
- [3] B. Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [4] A. H. Saha, S. K., & Khan, "Numerical study on the effect of corrugation angle on thermal performance of cross corrugated plate heat exchangers." *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 20, 2020.
- [5] L. Sarraf, K., Launay, S., & Tadrist, "Complex 3D-flow analysis and

corrugation angle effect in plate heat exchangers,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 94, pp. 126–138, 2015.