

EFEK PERFORATED CONCAVE DELTA WINGLET VORTEX GENERATORS DAN NANOFLUIDA TERHADAP KARAKTERISTIK TERMAL-HIDRAULIK DALAM SALURAN

*Marta Khoirunnisa¹, Syaiful², Bambang Yunianto²

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: martakhoirun1@gmail.com

Abstrak

Laju perpindahan panas dapat ditingkatkan dengan pemasangan *vortex generators* dan penggunaan nanofluida. Tujuan dari studi numerik ini adalah peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan *vortex generators* jenis *perforated concave delta winglet* dan penambahan nanofluida pada fluida utama. Simulasi numerik dilakukan di dalam penampang sirkular, elip dan flat dengan empat jenis aliran berbeda, yaitu udara, air, nanofluida CuO dan Al₂O₃. Saluran dengan dan tanpa *vortex generators* diinvestigasi dalam kerja ini. *Vortex generators* disusun secara *inline* pada sisi atas dan bawah plat datar yang disisipkan sepanjang saluran dengan sudut serang 30° terhadap arah aliran. Bilangan *Reynolds* divariasikan antara 4.000 sampai 12.000 dengan interval 2.000. Hasil dari studi numerik ini menunjukkan bahwa nanofluida Al₂O₃, dan CuO mampu meningkatkan performance evaluation criteria (PEC) adalah berturut – turut 8%, dan 10% lebih tinggi daripada yang dari fluida dasar air.

Kata kunci: nanofluida; PEC; perpindahan panas; *vortex generator*

Abstract

The rate of heat transfer can be increased by installing *vortex generators* and using nanofluids. The purpose of this numerical study is to increase heat transfer by using *perforated concave delta winglet vortex generators* and adding nanofluid to the main fluid. Numerical simulations were carried out in circular, elliptical and flat sections with four different flow types, namely air, water, CuO and Al₂O₃ nanofluids. Channels with and without *vortex generators* are investigated in this work. *Vortex generators* are arranged *inline* on the top and bottom sides of a flat plate which is inserted along the channel with an angle of attack of 30° to the direction of flow. The Reynolds number is varied between 4,000 and 12,000 with an interval of 2,000. The results of this numerical study showed that the Al₂O₃ and CuO nanofluids were able to increase the performance evaluation criteria (PEC) by 8% and 10%, respectively, higher than those of water-based fluids.

Keywords: heat transfer; nanofluids; PEC; *vortex generator*

1. Pendahuluan

Peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan susunan *vortex generators* (VGs) adalah metode pasif yang banyak digunakan dalam aplikasi industri. VGs didefinisikan sebagai tonjolan dari permukaan perpindahan panas yang memproduksi *vortex* yang diklasifikasikan berdasarkan jenis, bentuk dan geometri [1]. VGs banyak digunakan untuk peningkatan laju perpindahan panas pada penukar panas dan bilah turbin pendingin serta komponen elektronik. VGs membangkitkan *longitudinal vortex* yang mengintervensi aliran utama, sehingga ketebalan lapisan batas termal dapat direduksi yang pada akhirnya dapat meningkatkan perpindahan panas. Selain penggunaan VGs, peningkatan laju perpindahan panas juga dapat dicapai dengan penggunaan nanofluida [2]. Nanofluida memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi daripada fluida utama. Nanofluida adalah nanopartikel yang dicampurkan pada fluida dasar dengan konduktivitas termal 15-40% lebih tinggi daripada fluida dasar [3].

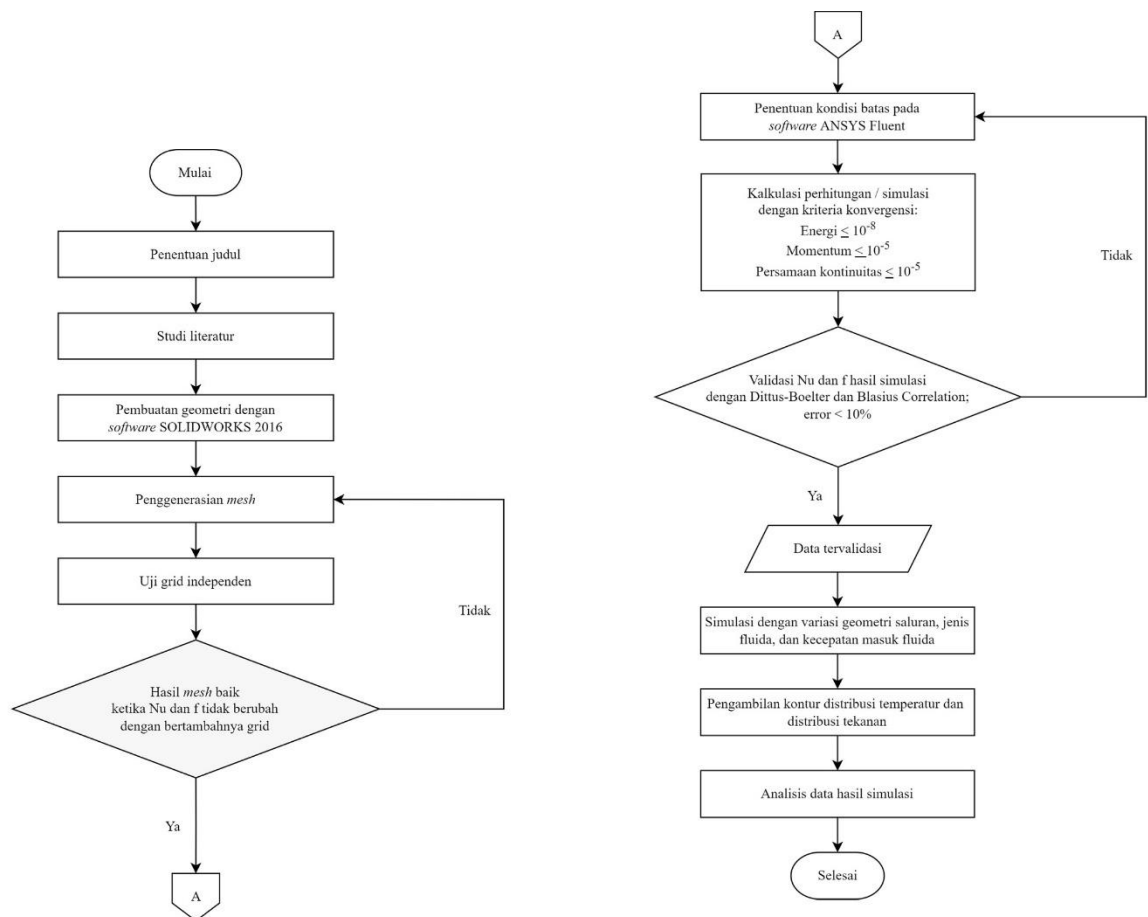
Studi penggunaan VGs untuk mempertinggi perpindahan panas adalah telah banyak mendapatkan perhatian dari para peneliti. Song dan Tagawa [4] menginvestigasi efek jarak transversal antar *delta winglet* VGs terhadap intensitas *longitudinal vortex*, peningkatan perpindahan panas, dan penurunan tekanan pada penukar panas. Hasilnya menunjukkan bahwa jarak transversal paling tinggi antar VGs meningkatkan intensitas *longitudinal vortex*, perpindahan panas, dan penurunan tekanan pada bilangan *Reynolds* (Re) 1.600 berturut-turut 34%, 33.9%, dan 18.5%. Zhai, dkk. [5] melakukan eksperimen berhubungan dengan karakteristik aliran dan termal dari *delta winglet* VGs dalam sebuah tabung sirkular. Dari studi tersebut dapat diamati bahwa pemasangan *delta winglet* VGs pada tabung dapat meningkatkan performa perpindahan panas daripada yang tidak menggunakan VGs. Selain itu Song dkk. [6] juga mempelajari geometri VGs terbaru pada aliran laminar dalam saluran penukar panas. Geometri VGs yang diteliti adalah *convex* dan *concave delta*

winglet dengan sudut serang 20° , 30° , dan 40° . Studi tersebut menunjukkan bahwa bilangan *Nusselt* (*Nu*) pada geometri *concave delta winglet* adalah 19.7% lebih tinggi daripada yang *convex delta winglet*. Effendi dkk. [7] menginvestigasi efek *concave delta winglet pair* (CDWP) dan *delta winglet pair* (DWP) VGs terhadap peningkatan koefisien perpindahan panas dan *flow loss*. Penelitian mereka mendapati bahwa CDWP VGs memproduksi *longitudinal vortex* lebih besar daripada yang dari DWP VGs. Muallim dkk. [8] memvariasikan VGs dengan fluida kerja air, nanofluida Al_2O_3 dan CuO pada *rectangular microchannel heat sink* (RMCHS). Kerja mereka melaporkan bahwa nanofluida CuO dapat meningkatkan perpindahan panas lebih tinggi daripada yang dari Al_2O_3 pada volume dan *Re* yang sama. Hal itu dapat terjadi karena konduktivitas termal pada nanofluida CuO adalah lebih tinggi daripada Al_2O_3 . Kemudian, efek dari nanofluida Al_2O_3 , CuO dan air dianalisis pada DW VGs dengan bentuk penampang lingkaran, elips, dan flat oleh Tian dkk. [9]. Dari hasil investigasi mereka teramati bahwa nanofluida CuO memiliki *Nu* lebih tinggi daripada fluida kerja yang lain dengan penampang lingkaran.

Berdasarkan studi literatur diatas, peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan *perforated concave delta winglet* (PCDW) VGs masih jarang dilakukan. Oleh karena itu, novelty dari penelitian ini adalah peningkatan perpindahan panas menggunakan nanofluida dan *perforated concave delta winglet* (PCDW) VGs di dalam saluran dengan berbagai penampang. Hambatan fluida pada PCDW yang lebih luas daripada DW VGs ditambah dengan peningkatan konduktivitas termal merupakan masalah yang serius untuk diteliti. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan dalam menginvestigasi *perforated concave delta winglet* (PCDW) VGs dan nanofluida. Sudut serang VGs ditentukan sebesar 30° (β) dengan susunan *in-line*. Fluida kerja yang digunakan yaitu udara, air, nanofluida Al_2O_3 dan CuO.

2. Metode Penelitian

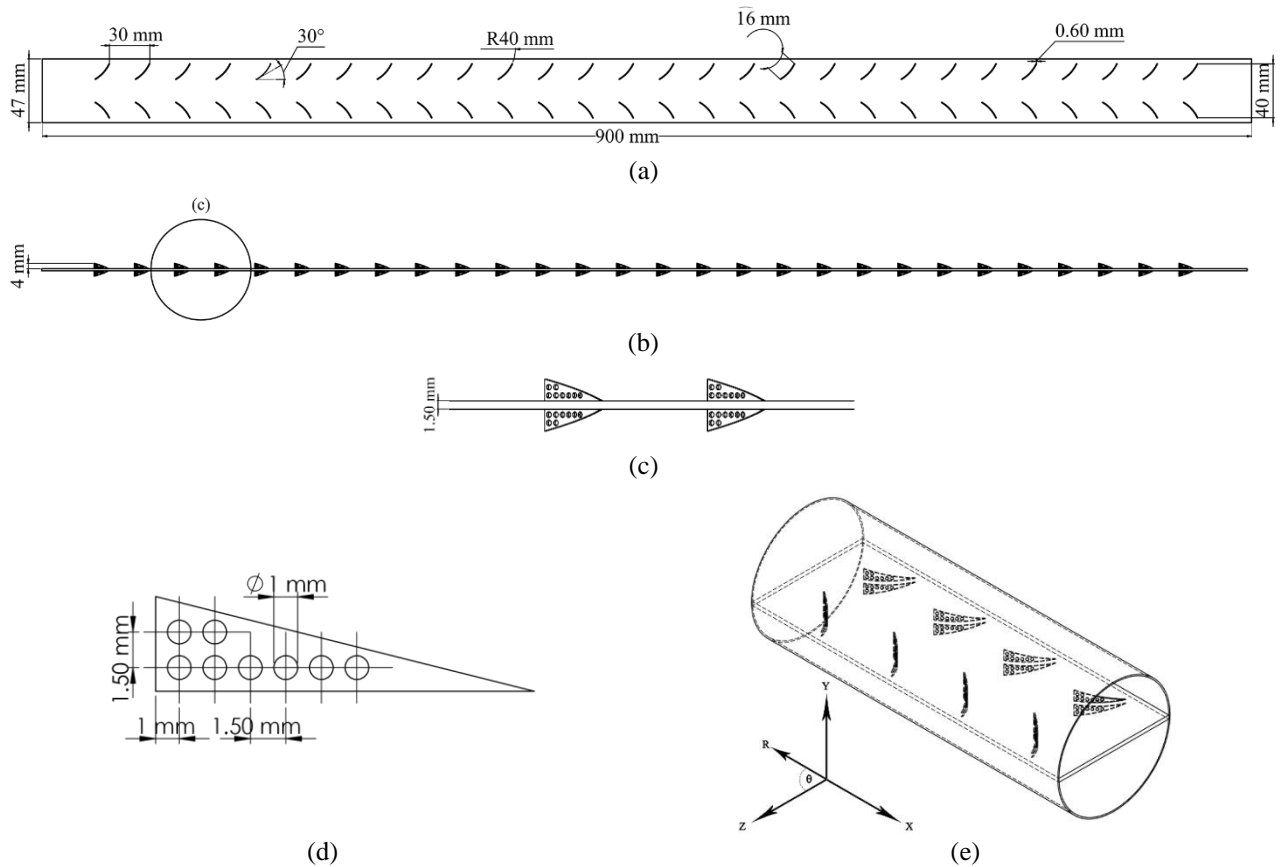
2.1 Diagram Alir



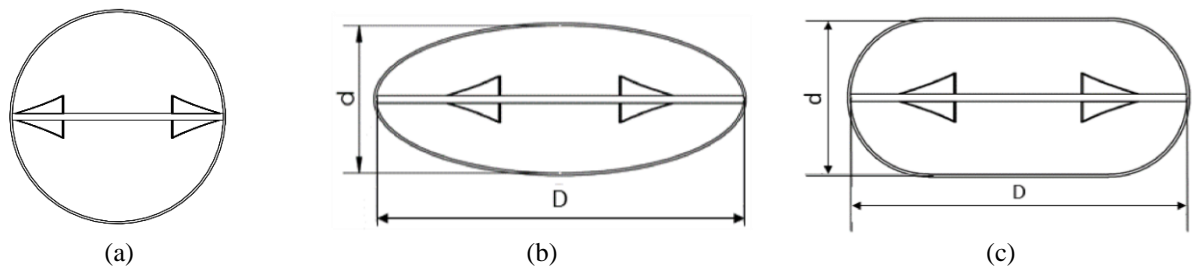
Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Model Fisik

Pada studi sekarang ini, geometri yang digunakan untuk melakukan simulasi seperti terlihat pada Gambar 2, yang mana mengacu pada penelitian yang telah dilakukan oleh Tian, dkk. VGs dengan susunan *in-line* dipasang pada sisi atas dan bawah plat sisipan yang dimasukkan ke dalam tujuh geometri berbeda. Detail geometri saluran seperti yang terlihat pada Gambar 3 dan Tabel 1.



Gambar 2. Geometri VGs (a) tampak atas, (b) tampak samping, (c) detail VG



Gambar 3. Saluran dengan penampang (a) *circular*, (b) *ellipsoidal*, (c) *flat*

Tabel 1. Detail geometri saluran

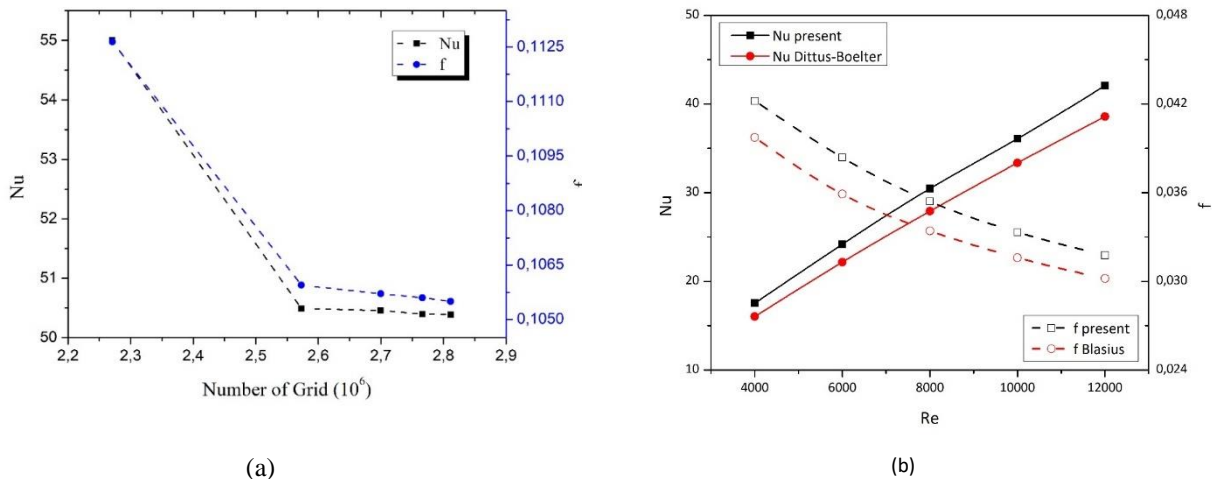
Bentuk penampang	L (mm)	D (mm)	d (mm)
Circular 47 mm	900	47	47
Ellipsoidal 55,2 mm	900	55,2	40
Ellipsoidal 73,62 mm	900	73,62	30
Ellipsoidal 107 mm	900	107	20
Flat 51,78 mm	900	51,78	40
Flat 64,26 mm	900	64,26	30
Flat 90,74 mm	900	90,74	20

2.3 Simulasi Numerik

Pada studi sekarang ini, domain komputasi PCDW VGs susunan *in-line* di dalam saluran dengan penampang *ellipsoidal* 107 mm pada bilangan Reynolds 12.000 dipilih untuk mendapatkan *grid independen*. Geometri *ellipsoidal* 107 mm dipilih oleh karena sumbu minor yang lebih pendek dari penampang saluran lain sehingga mesh yang lebih kompleks ditentukan untuk mendapatkan hasil yang akurat. Hasil uji *grid independen* yang mana Nu dan f adalah tidak berubah terhadap peningkatan jumlah *grid* didapatkan pada jumlah *grid* 2.5 juta dengan *grid* berjenis *polyhedra*. Kemudian, validasi akan dilakukan dengan membandingkan Nu dan f hasil simulasi berturut-turut dengan persamaan

Dittus-Boelter dan Blasius pada saluran tanpa VGs. Gambar hasil uji grid independent dan validasi dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada kasus ini, computational fluid dynamic (CFD) digunakan dengan skema *second order* ditentukan untuk mendeskretisasikan tekanan dan *second-order upwind* untuk mendeskretisasikan persamaan momentum, energi kinetik turbulen, *specific dissipation rate*, dan energi. Algoritma SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*) ditentukan untuk menyelesaikan tekanan dan kecepatan. Model turbulen $k-\omega$ SST ditentukan pada simulasi ini karena kemampuannya melakukan perhitungan di dekat dinding dan memprediksi separasi aliran dengan akurat [21]. Kriteria konvergensi untuk persamaan kontinuitas dan momentum adalah lebih kecil dari 10^{-5} , serta lebih kecil dari 10^{-8} untuk energi.



Gambar 5. Grafik (a) uji grid independen dan (b) validasi

2.4 Persamaan Pembangun

Persamaan pembangun yang digunakan pada studi numerik sekarang ini adalah:

- Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial(Ru_R)}{R} + \frac{\partial u_\theta}{R\partial\theta} + \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

- Persamaan momentum pada arah R

$$\rho \left(\bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial R} + \frac{\bar{u}_\theta}{\theta} \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial \theta} - \frac{\bar{u}_\theta^2}{R} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial x} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial R} + \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial R} \right) - \frac{\bar{u}_R}{R^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_R}{R^2 \partial \theta^2} - \frac{2}{R^2} \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{u}_R}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (-\rho \overline{u'_R u'_\theta}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'_R u'_x}) \quad (2)$$

- Persamaan momentum pada arah θ

$$\rho \left(\bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial R} + \frac{\bar{u}_\theta}{\theta} \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial \theta} - \frac{\bar{u}_\theta \bar{u}_R}{R} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial x} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{R\partial\theta} + \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \bar{u}_\theta}{\partial R} \right) - \frac{\bar{u}_\theta}{R^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_\theta}{R^2 \partial \theta^2} - \frac{2}{R^2} \frac{\partial \bar{u}_R}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \bar{u}_\theta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} (-\rho \overline{u'_\theta u'_R}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'_\theta u'_x}) \quad (3)$$

- Persamaan momentum pada arah X

$$\rho \left(\bar{u}_R \frac{\partial \bar{u}_X}{\partial R} + \frac{\bar{u}_\theta}{R} \frac{\partial \bar{u}_X}{\partial \theta} + \bar{u}_x \frac{\partial \bar{u}_X}{\partial x} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \bar{u}_X}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}_X}{R^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_X}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial}{\partial R} (-\rho \overline{u'_X u'_R}) + \frac{\partial}{\partial \theta} (-\rho \overline{u'_X u'_\theta}) \quad (4)$$

- Persamaan transportasi untuk $K-\omega$ SST

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

- Persamaan energi

$$\rho C_p \left(u_R \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{u_\theta}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) = -\lambda \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

2.5 Kondisi Batas

Berikut ini adalah kondisi batas yang digunakan pada domain komputasi:

Kondisi batas *inlet*, *wall*, dan *outlet* pada domain komputasi adalah:

- *Inlet*

$$u_x = u_{xin}, \quad u_\theta = u_R = 0, \quad p = p_{in}, \quad T_{in} = 300K \quad (8)$$

- *Wall (no slip condition)*

$$T_w = 500K \quad (9)$$

• Outlet

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

2.6 Pendefinisian Parameter

Beberapa parameter yang digunakan pada studi ini adalah:

• Bilangan Reynolds

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad (11)$$

• Bilangan Nusselts

$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (12)$$

• Friction factor

$$f = \frac{\Delta p D_h}{\frac{1}{2} \rho u^2 L} \quad (13)$$

• Diameter hidrolis

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (14)$$

• Perpindahan panas konveksi

$$h = \frac{\dot{q}}{A_w(T_w - T_m)} \quad (15)$$

• Laju perpindahan panas konveksi

$$\dot{q} = \dot{m} C_p (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in}) \quad (16)$$

• Laju aliran massa

$$\dot{m} = \rho u A_c \quad (17)$$

• Performance evaluation criteria (PEC)

$$PEC = \frac{\frac{Nu}{Nu_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (18)$$

Selain itu, sifat-sifat termofisik dari nanofluida dapat dideskripsikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat termofisik fluida

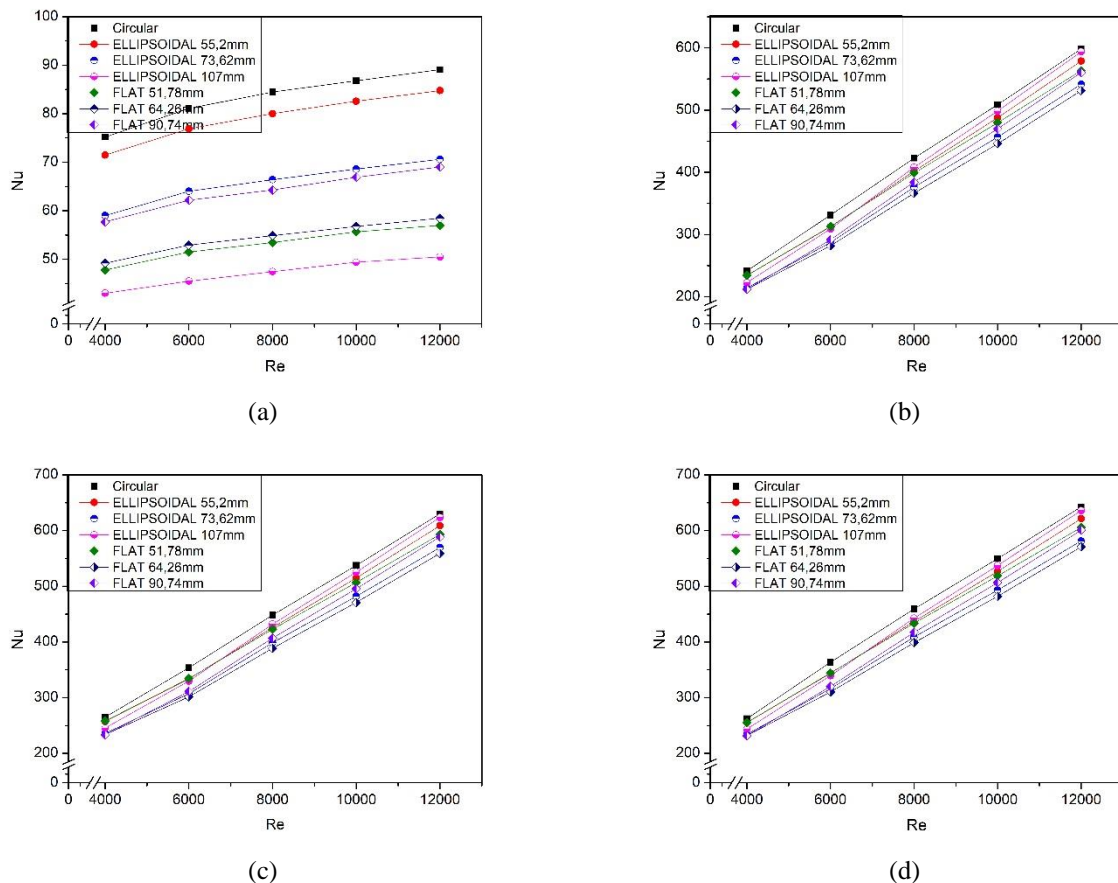
Jenis Fluida	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (kg/m.s)	Heat capacity (j/kg.K)	Konduktivitas termal (W.m ² /K)
Udara	1,225	0,00001789	1006,44	0,0242
Air	998,2	0,001003	4182	0,6
Nanofluida CuO	1052,268	0,001028075	3960,21174	0,6164
Nanofluida Al ₂ O ₃	1027,718	0,001028	4950,6687	0,6172936

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Bilangan Nusselts

Pada studi sekarang ini, peningkatan perpindahan yang terjadi akibat pemasangan PCDW VGs dalam saluran dipresentasikan dengan bilangan Nusselts. Gambar 5, menunjukkan nilai bilangan *nusselt* (Nu) untuk semua kasus geometri saluran pada fluida kerja udara, air, nanofluida Al₂O₃, dan CuO. Secara umum hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi bilangan *Reynolds* akan meningkatkan perpindahan panas yang ditunjukkan dengan meningkatnya bilangan *Nusselt*. Hal ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa semakin tinggi bilangan *Reynolds* akan mempengaruhi jumlah perpindahan panas [1]. Dari Gambar 5 didapati bahwa nilai Nu paling tinggi pada adalah yang dari saluran sirkular 47 mm. Nilai Nu pada saluran sirkular 47 mm untuk fluida kerja udara pada Re 12.000 adalah berturut – turut 5%, 26%, 29%, 52%, 56%, dan 76% lebih tinggi daripada yang dari saluran elips 55,2 mm, elips 73,62 mm, flat 90,74 mm, flat 64,26 mm, flat 51,78 mm, dan elips 107 mm. Nilai Nu pada saluran sirkular 47 mm untuk fluida kerja air pada Re 12.000 adalah berturut – turut 0,8%, 4%, 6,2%, 6,7%, 10%, dan 13% lebih tinggi daripada yang dari saluran elips 107 mm, elips 55,2 mm, flat 51,78 mm, flat 90,74 mm elips 73,62 mm, dan flat 64,26 mm. Kemudian, nilai Nu pada pada saluran sirkular 47 mm untuk fluida kerja nanofluida Al₂O₃ adalah berturut – turut 1%, 3%, 6%, 7%, 10%, dan 12% lebih tinggi daripada yang dari saluran elips 107 mm, elips 55,2 mm, flat 51,78 mm, flat 90,74 mm elips 73,62 mm, dan flat 64,26 mm. Sedangkan, nilai Nu pada pada saluran sirkular 47 mm untuk fluida kerja nanofluida CuO adalah berturut – turut 1%, 3%, 6%, 6,9%, 10%, dan 13% lebih tinggi daripada yang dari saluran elips 107 mm, elips 55,2

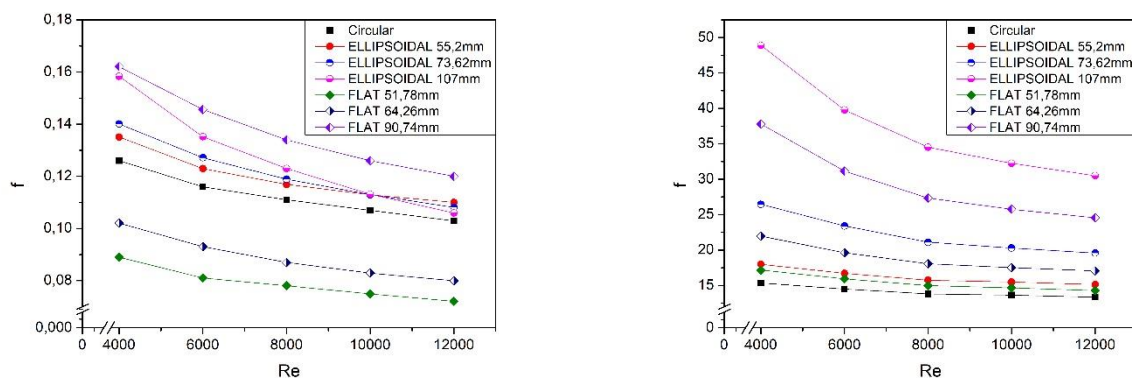
mm, flat 51,78 mm, flat 90,74 mm elips 73,62 mm, dan flat 64,26 mm. Hal ini mengindikasikan bahwa geometri yang paling bagus dalam perpindahan panas adalah geometri sirkular 47 mm.

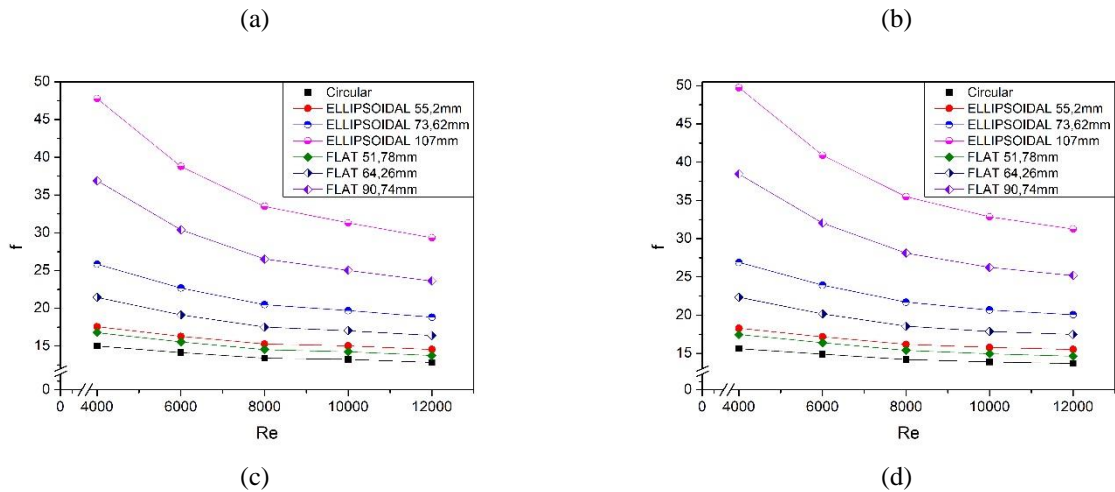


Gambar 5. Grafik bilangan *Nusselt* terhadap variasi *Reynolds* number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida Al_2O_3 dan (d) CuO

3.2 Friction Factor

Penambahan jumlah baris VGs berdampak pada peningkatan rasio *friction factor* yang menyebabkan pada peningkatan gaya gesek antara fluida dengan permukaan VGs, sehingga hambatan dan *friction factor* meningkat [10]. Gambar 6. menunjukkan variasi faktor gesekan terhadap variasi bilangan *Reynolds* pada semua kasus geometri saluran. Hasil keseluruhan dari penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi bilangan *Reynolds* akan menurunkan hambatan aliran saluran yang ditunjukkan dengan penurunan faktor gesekan. Penelitian ini menunjukkan bahwa PCDW VGs yang dipasang pada plat sisipan dalam saluran elips 107 mm memiliki hambatan aliran yang paling tinggi dibandingkan dengan PCDW VGs yang ada di dalam saluran lain untuk semua jenis fluida kerja. Dari hasil studi ini juga ditunjukkan bahwa nanofluida dengan fluida dasar air dan campuran nanopartikel 1% dapat mempengaruhi *friction factor*. *Friction factor* pada geometri sirkular 47 mm dengan penggunaan nanofluida Al_2O_3 adalah 4% lebih rendah dari fluida dasar. Sedangkan pada nanofluida CuO adalah 3% lebih tinggi daripada yang dari fluida dasar.

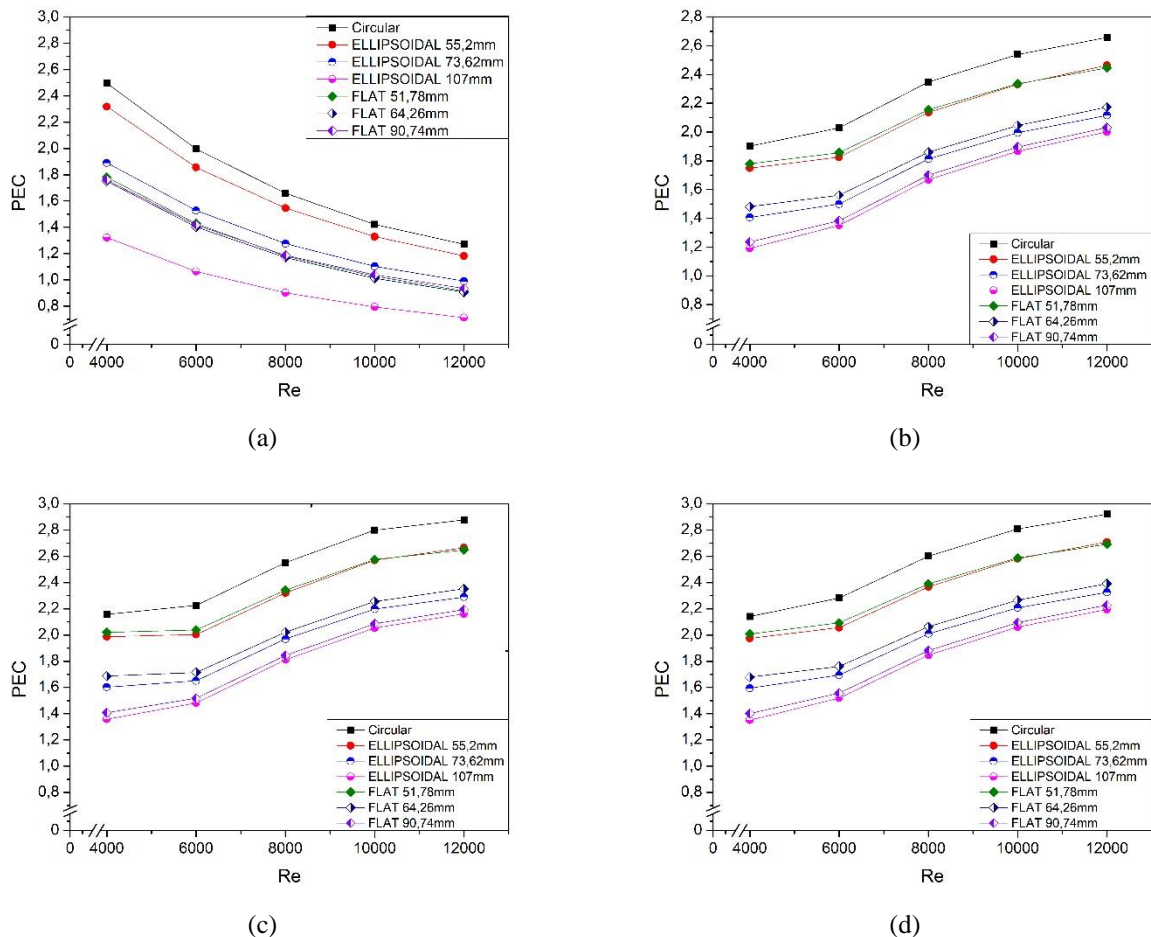




Gambar 6. Grafik *friction factor* terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida Al_2O_3 dan (d) CuO

3.3 Performance Evaluation Criteria (PEC)

PEC digunakan sebagai parameter optimasi perpindahan panas menggunakan PCDW VGs dan nanofluida dengan variasi geometri saluran. Gambar 7 menunjukkan nilai PEC terhadap variasi bilangan *Reynolds* pada semua kasus geometri saluran untuk fluida kerja udara, air, nanofluida Al_2O_3 , dan CuO. Dari gambar tersebut, dapat diketahui bahwa secara umum saluran dengan geometri circular 47 mm memiliki perpindahan panas yang paling baik karena memiliki nilai PEC lebih tinggi daripada geometri saluran yang lain. Nilai PEC untuk nanofluida Al_2O_3 , dan CuO adalah berturut – turut 8%, dan 10% lebih tinggi daripada yang dari fluida dasar air.



Gambar 7. Grafik PEC terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida Al_2O_3 dan (d) CuO

4. Kesimpulan

CDWP VGs yang dipasang pada plat sisipan dalam saluran panas membangkitkan vortex dengan radius berbeda pada tiap saluran. *Vortex* yang dibangkitkan akan mereduksi lapisan batas dan meningkatkan pencampuran fluida sehingga perpindahan panas meningkat. Pada studi sekarang ini, sirkular 47 mm, elips 55,2 mm, dan flat 51,78 mm adalah geometri saluran dengan perpindahan panas tertinggi. Kombinasi sirkular 47 mm dan nanofluida CuO mampu meningkatkan perpindahan panas, yang dipresentasikan dengan *performance evaluation criteria* (PEC), 6,06% lebih tinggi daripada menggunakan fluida kerja air. Pada geometri saluran yang sama, nanofluida Al₂O₃ menghasilkan PEC 4,23% lebih tinggi daripada fluida kerja air.

5. Daftar Pustaka

- [1]. Awais, M., Bhuiyan, A.A., 2018, "Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities," 5: 524-545. Samadifar, M., Toghraie, D., 2018, "Numerical simulation of heat transfer enhancement in a plate-fin heat exchanger using a new type of vortex generators," 133: 671-681.
- [2]. Ali shah, M., dkk, 2022, "Numerical study and optimization of important parameters of non-Newtonian nanofluid turbulent flow in a channel with triangular vortex generators using artificial neural network," 139: 94-108.
- [3]. Yilmaz, M.S., dkk, 2022, "Enhancement of heat transfer in shell and tube heat exchanger using mini-channels and nanofluids: An experimental study," 179: 1-23.
- [4]. Song, K., Tagawa, T., 2018, "The optimal arrangement of vortex generators for best heat transfer enhancement in flat-tube-fin heat exchanger," 132: 355-367.
- [5]. Zhai, C., dkk, 2019, "Heat transfer augmentation in a circular tube with delta winglet vortex generator pairs," 140:480-490.
- [6]. Song, K., dkk, 2019, "Heat transfer characteristics of concave and convex curved vortex generators in the channel of plate heat exchanger under laminar flow," 137: 215-228.
- [7]. Effendi, Y., dkk, 2019, "The analysis of heat transfer and pressure loss for the air flow through heated cylinders with concave delta winglet vortex generators in rectangular channel: an experimental study," 673.
- [8]. Muallim, B.A., 2020, "Thermal-Hydraulic Performance in a Microchannel Heat Sink Equipped with Longitudinal Vortex Generators (LVGs) and Nanofluid"
- [9]. Tian, M.W., dkk, 2020, "Profit and efficiency boost of triangular vortex-generators by novel techniques," 156.
- [10]. Modi, A. J., Rathod, M. K., 2019, "Comparative study of heat transfer enhancement and pressure drop for fin-and-circular tube compact heat exchangers with sinusoidal wavy and elliptical curved rectangular winglet vortex generator," 141: 310-326.