

PENINGKATAN PERPINDAHAN PANAS DENGAN PENGGUNAAN *CONCAVE DELTA WINGLET VORTEX GENERATORS* DAN NANOFLUIDA DALAM SALURAN

*Pinasti Dewi Sekarwangi¹, Syaiful², Eflita Yohana²

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: pinastidewi@gmail.com

Abstrak

Penggunaan vortex generator dan nanofluida dalam peningkatan perpindahan panas adalah topik yang menarik dalam studi akhir-akhir ini. Oleh karena itu, studi numerik saat ini dimaksudkan untuk mempertinggi laju perpindahan panas dari dinding saluran ke fluida dengan pemasangan *concave delta winglet vortex generators* dan penggunaan nanofluida. Dalam studi numerik ini, *concave delta winglet vortex generators* dipasang dengan sudut serang 30° terhadap arah aliran di dalam saluran dengan penampang berbentuk lingkaran, elipsoidal, dan flat yang memiliki diameter berbeda. Empat jenis fluida, yaitu udara, air, nanofluida CuO, dan nanofluida Al₂O₃, dialirkan di dalam saluran. Aliran fluida yang masuk divariasikan pada rentang bilangan Reynolds 4.000 – 12.000. Hasil dari studi numerik ini menunjukkan bahwa nanofluida CuO mampu meningkatkan 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.

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

Abstract

The use of vortex generators and nanofluids in enhancing heat transfer is a topic of interest in recent studies. Therefore, the present numerical study is intended to enhance the rate of heat transfer from the channel walls to the fluid by the installation of concave delta winglet vortex generators and the use of nanofluids. In this numerical study, concave delta winglet vortex generators are installed with an angle of attack of 30° with respect to the flow direction in the channel with circular, ellipsoidal, and flat cross sections having different diameters. Four types of fluids, namely air, water, CuO nanofluids, and Al₂O₃ nanofluids, were flowed in the channel. The incoming fluid flow is varied in the Reynolds number range of 4,000 – 12,000. The results of this numerical study show that CuO nanofluid is able to improve the performance evaluation criteria (PEC), 6.06% higher than using water as the working fluid. At the same channel geometry, the Al₂O₃ nanofluid produced 4.23% higher PEC than the working fluid of water.

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

1. Pendahuluan

Efisiensi energi menjadi hal yang menarik untuk dipelajari akhi-akhir ini. Pada bidang industri, efisiensi energi dapat diraih salah satunya dengan meningkatkan perpindahan panas dalam *heat exchanger* melalui penggunaan *vortex generators* (VGs) [1]. VGs memproduksi *vortices* yang mereduksi tebal lapisan batas sehingga laju perpindahan panas meningkat [2]. *Vortices* memperkuat turbulensi aliran yang berakibat pada tingginya pencampuran fluida dan meningkatkan laju perpindahan panas pada akhirnya [3]. Tingginya laju perpindahan panas juga dipengaruhi oleh sifat fisik fluida, yaitu konduktifitas termal. Konduktifitas termal dapat ditingkatkan dengan menambahkan partikel berukuran nano ke dalam fluida dasar yang disebut nanofluida [4]. Nanopartikel tersebut akan bergerak secara acak dan terus menerus sehingga meningkatkan perpindahan panas yang terjadi antara permukaan panas dan fluida [5].

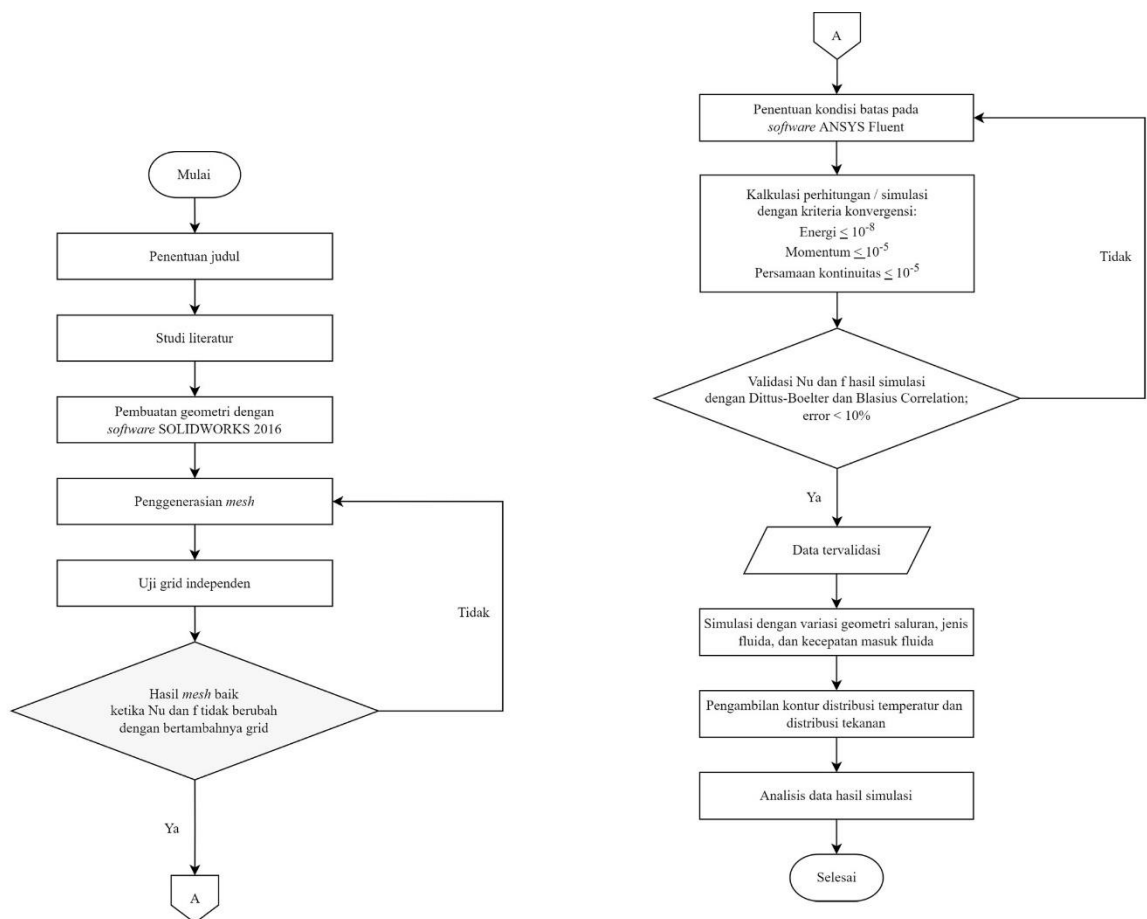
Awais, dkk [6] mengevaluasi peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan berbagai jenis VGs dan susunan arah aliran pada studi sebelumnya. Dari hasil kerja ini didapati bahwa *winglet-type VGs* adalah efektif dalam peningkatan perpindahan panas dengan *pressure loss* yang lebih rendah daripada *wing-type VGs*. *Winglet-type VGs* dapat dibedakan menjadi dua bentuk konvensional, yaitu *delta winglet* dan *rectangular winglet*. Song, dkk [7] melakukan studi numerik tentang karakteristik perpindahan panas yang menggunakan *concave delta winglet vortex generator* (CDW VG) dan *convex delta winglet vortex generator* (CxDW VG) pada sebuah *heat exchanger*. Mereka memasang CDW VG dan CxDW VG dengan sudut serang (β) 20° , 30° , 40° , sudut kelengkungan (θ) 10° – 80° pada $Re = 200$ – 1.400 . Mereka melaporkan bahwa penggunaan CDW VG menghasilkan perpindahan panas lebih tinggi daripada yang dari CxDW VG dan DW VG. Dengan pemasangan CDW VG didapati Nu 19,7% lebih tinggi daripada yang DW VG pada sudut serang

(β) 30° dan sudut kelengkungan (θ) kurang dari 60° . Selain menggunakan VGs, perpindahan panas dapat diperbaiki dengan meningkatkan konduktivitas termal dari material yang digunakan, salah satu contohnya mengganti fluida kerja dasar menjadi nanofluida. Tinjani, dkk membuat nanofluida dengan mendispersikan partikel Al_2O_3 dan CuO ke dalam campuran air-Ethylen Glycol dengan konsentrasi 0,05%, 0,15%, dan 0,3% sebagai pendingin pada radiator mobil. Hasilnya, koefisien perpindahan panas dan Nu meningkat untuk kedua nanofluida dibandingkan fluida dasar. Kemudian, Tian, dkk [8] menginvestigasi penggunaan DWP VGs dan nanofluida dalam meningkatkan perpindahan panas pada beberapa bentuk saluran. Mereka menginformasikan bahwa penggunaan nanofluida CuO menghasilkan Nu yang lebih tinggi daripada yang dari fluida lain.

Berdasarkan studi-studi sebelumnya, penggunaan *concave delta winglet vortex generators* (CDWP VGs) dan nanofluida secara bersamaan dalam meningkatkan perpindahan panas belum dilakukan. Hal ini menarik untuk dipelajari karena kemampuan CDWP VGs dapat membangkitkan longitudinal vortex yang kuat dan nanofluida dapat meningkatkan konduktivitas termal. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mempelajari peningkatan perpindahan panas dari pemasangan CDWP VGs dan penggunaan nanofluida (CuO dan Al_2O_3) pada saluran dengan berbagai penampang.

2. Metode Penelitian

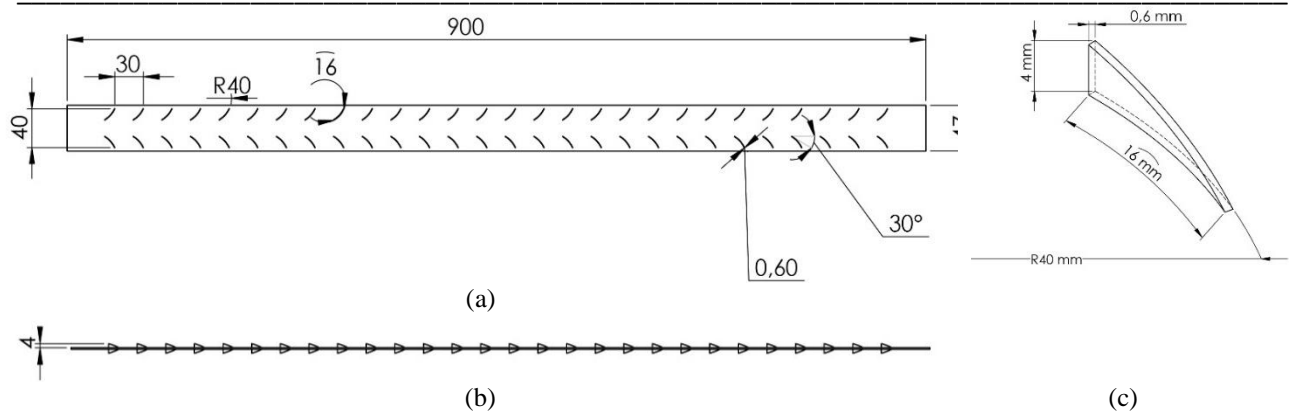
2.1 Diagram Alir



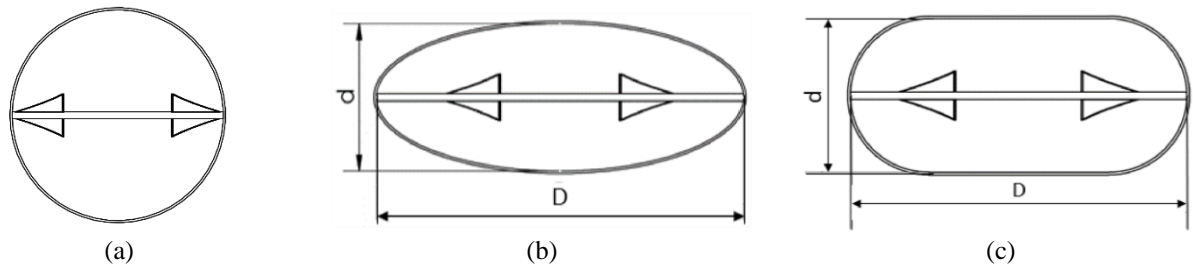
Gambar 1. Diagram alir penelitian

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*

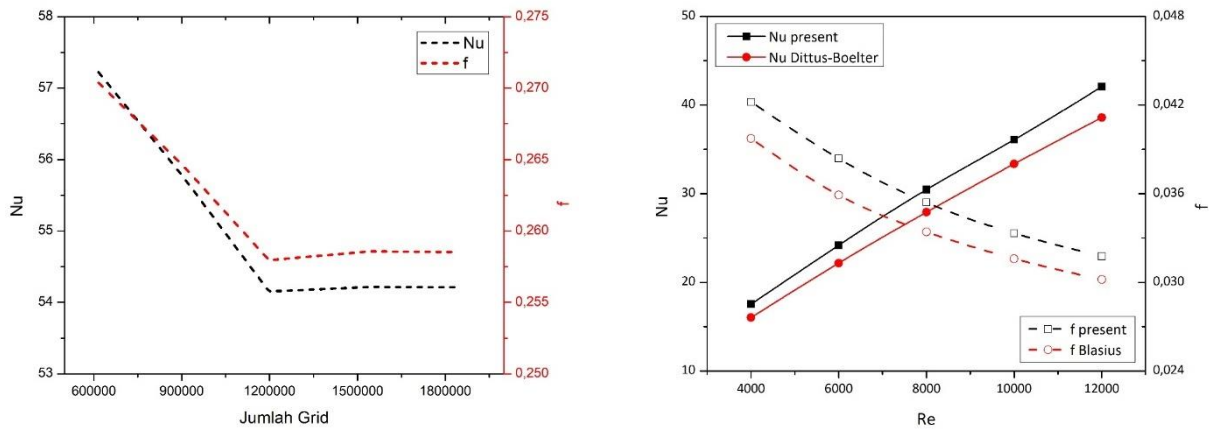
Tabel 1. Detail geometri saluran

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 CDWP 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 1.198.650 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 independen dan validasi dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada kasus ini, computational fluid dynamic (CFD) digunakan dengan skema *second order* ditentukan untuk mendeskripsikan tekanan dan *second-order upwind* untuk mendeskripsikan 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- ω 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 uji grid independen dan 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

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

- Persamaan momentum pada arah θ

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

- Persamaan momentum pada arah X

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

- Persamaan transportasi untuk K- ω SST

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

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

- Persamaan energi

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

2.5 Kondisi Batas

Berikut ini adalah kondisi batas yang digunakan pada domain komputasi:

- Inlet

$$\mathbf{u}_X = \mathbf{u}_{Xin}, \mathbf{u}_\theta = \mathbf{u}_R = \mathbf{0}, p = p_{in}, T_{in} = 300K \quad (8)$$

- Outlet

$$\frac{\partial \mathbf{u}_X}{\partial x} = \mathbf{0}, \frac{\partial p}{\partial x} = \mathbf{0}, \frac{\partial T}{\partial x} = \mathbf{0} \quad (9)$$

- Kondisi batas pada wall (no-slip condition)

$$T_W = 500K \quad (10)$$

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)

$$PEC = \frac{\frac{Nu}{Nu_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (24)$$

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

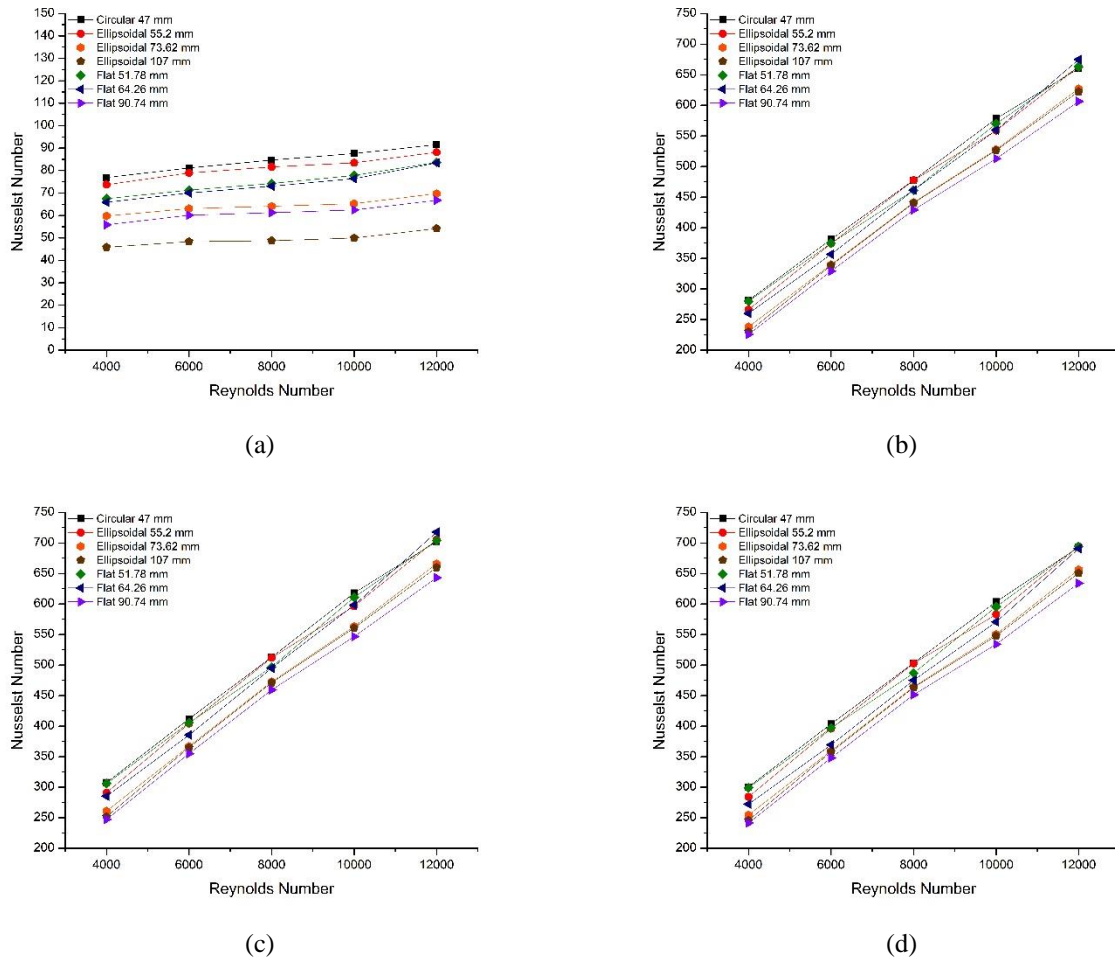
Tabel 2. Sifat termofisik fluida

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

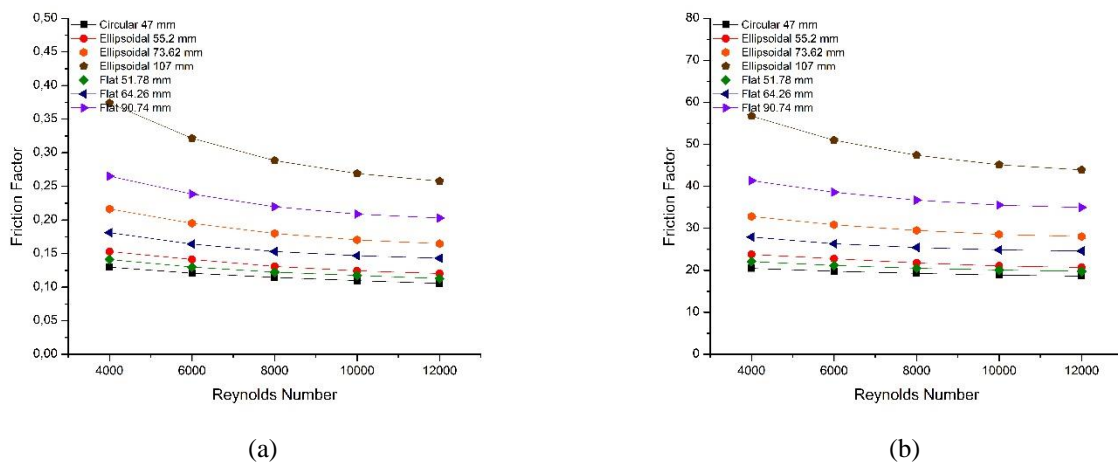
Pada studi sekarang ini, peningkatan perpindahan yang terjadi akibat pemasangan CDWP VGs dalam saluran dipresentasikan dengan bilangan Nusselts. Gambar 5, menunjukkan variasi bilangan Nusselt terhadap Reynolds number untuk semua fluida kerja, yang mana setiap fluida kerja memiliki tujuh variasi saluran. 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 [9]. Dari gambar tersebut didapati bahwa fluida udara memiliki tendensi yang lebih datar dibandingkan jenis fluida lain. Sedangkan pada fluida kerja air, nanofluida CuO dan nanofluida Al₂O₃ memiliki bilangan Nusselt dengan tendensi yang sama dan nilai yang tidak terpaut jauh. Hal ini disebabkan karena konsentrasi nanopartikel yang cukup rendah, yaitu 1%. Selain itu, dari gambar tersebut didapati bahwa secara umum, saluran dengan geometri *circular* 47 mm memiliki bilangan Nusselt tertinggi dan diikuti oleh geometri *ellipsoidal* 55,2 mm, dan *flat* 51,78 mm. Hal ini disebabkan karena besarnya vortex yang dibangkitkan akibat kelengkungan yang besar.

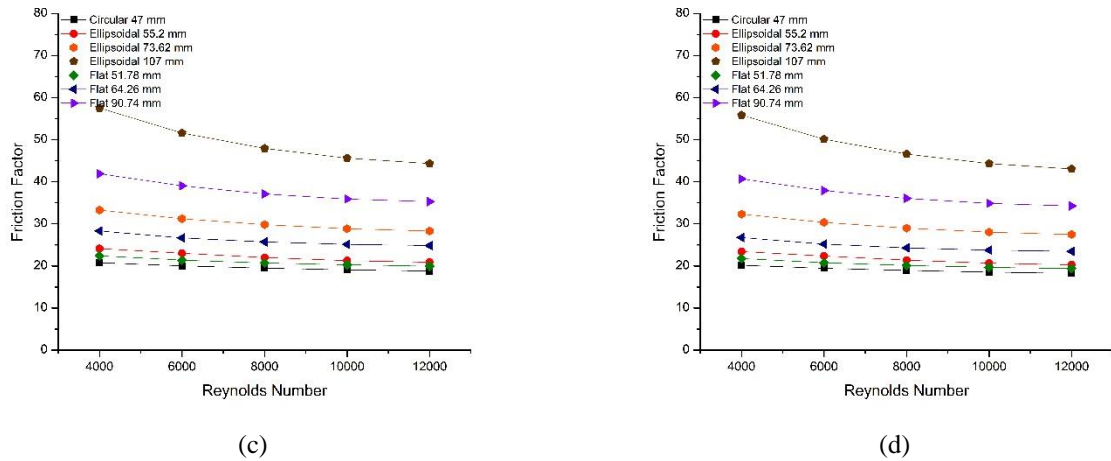


Gambar 5. Grafik bilangan Nusselt terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida CuO, dan nanofluida Al₂O₃

3.2 Friction Factor

Gambar 6. menunjukkan variasi faktor gesekan terhadap variasi bilangan Reynolds pada semua kasus sudut DW VG. 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 CDWP VGs yang dipasang pada plat sisipan dalam saluran *ellipsoidal* 107 memiliki hambatan aliran yang paling tinggi dibandingkan dengan CDWP VGs yang ada di dalam saluran lain untuk semua jenis fluida kerja.

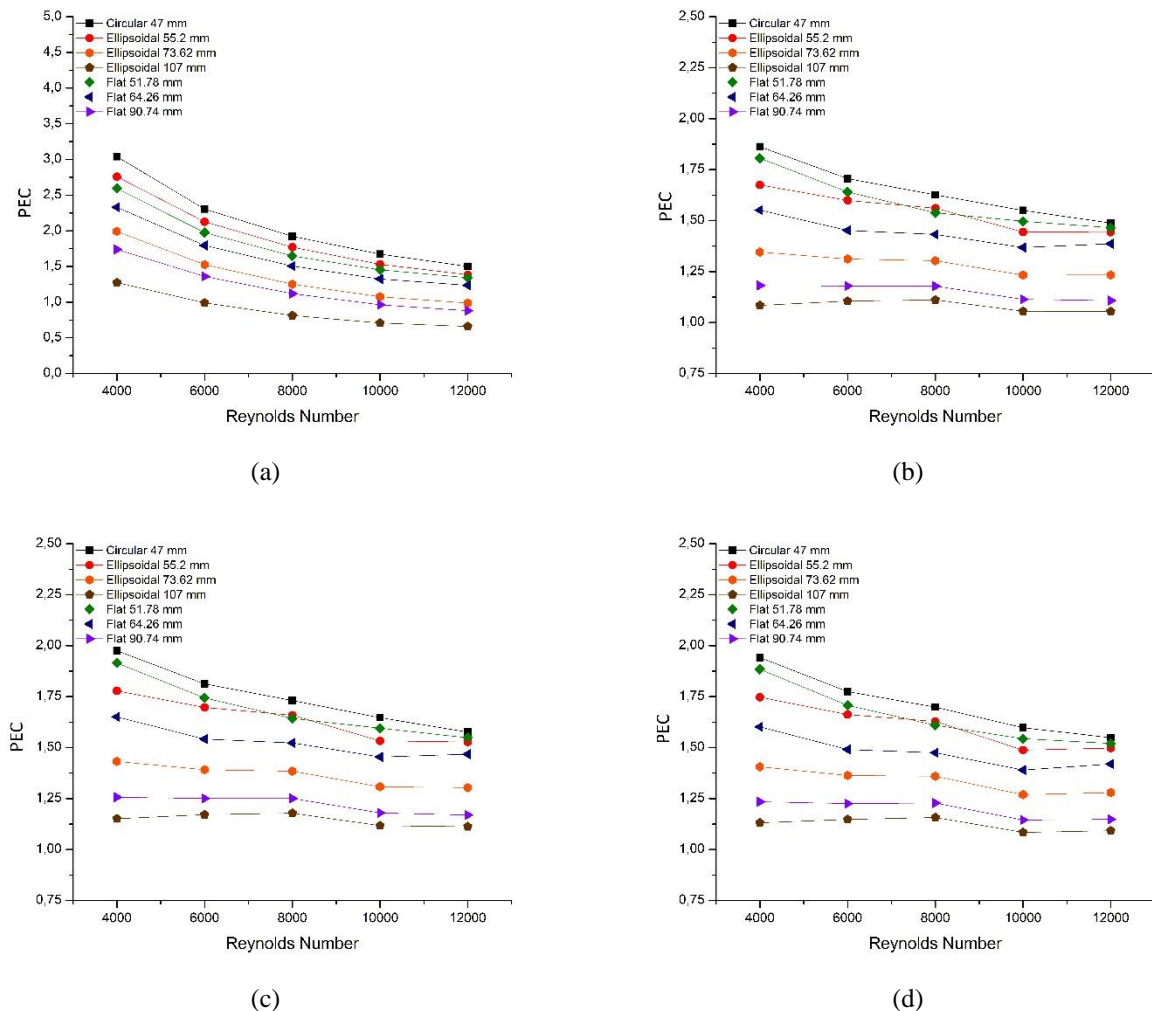




Gambar 6. Grafik *friction factor* terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida CuO, dan nanofluida Al₂O₃

3.3 Performance Evaluation Criteria (PEC)

PEC digunakan sebagai parameter optimasi perpindahan panas menggunakan CDWP VGs dan nanofluida dengan variasi geometri saluran [10]. Gambar 7 menunjukkan saluran dengan geometri circular 47 mm memiliki PEC tertinggi untuk semua fluida kerja. Dari kasus tersebut, dapat diketahui bahwa secara umum saluran dengan geometri circular 47 mm memiliki perpindahan panas yang paling baik.



Gambar 7. Grafik PEC terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida CuO, dan nanofluida Al₂O₃

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, *circular* 47 mm, *ellipsoidal* 55,2 mm, dan *flat* 51,78 mm adalah geometri saluran dengan perpindahan panas tertinggi. Kombinasi *circular* 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] Ghanem, A., Habchi, C., Lemenand, T., Della Valle, D., & Peerhossaini, H., 2013, "Energy efficiency in process industry–High-efficiency vortex (HEV) multifunctional heat exchanger," *Renewable Energy*, 56: 96-104.
- [2] Min, C., Qi, C., Wang, E., Tian, L., & Qin, Y., 2012, "Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in a channel with novel longitudinal vortex generators," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(23-24): 7268-7277.
- [3] Xie, J., & Lee, H. M., 2020, "Flow and heat transfer performances of directly printed curved-rectangular vortex generators in a compact fin-tube heat exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 180, 115830.
- [4] Cui, W., Mao, D., Lin, B., & Yang, J., 2019, "Field synergy analysis on the mechanism of heat transfer enhancement by using nanofluids," *Case Studies in Thermal Engineering*, 16, 100554.
- [5] Wang, Y., Deng, K., Wu, J., Su, G., & Qiu, S., 2020, "A mechanism of heat transfer enhancement or deterioration of nanofluid flow boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119985.
- [6] Awais, M., & Bhuiyan, A. A., 2018, "Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities," *Thermal Science and Engineering Progress*, 5: 524-545.
- [7] Song, K., Tagawa, T., Chen, Z., & Zhang, Q., 2019, "Heat transfer characteristics of concave and convex curved vortex generators in the channel of plate heat exchanger under laminar flow," *International Journal of Thermal Sciences*, 137: 215-228.
- [8] Tian, M. W., Khorasani, S., Moria, H., Pourhedayat, S., & Dizaji, H. S., 2020, "Profit and efficiency boost of triangular vortex-generators by novel techniques," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119842.
- [9] Awais, M., Bhuiyan, A.A., 2018 "Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities," *Thermal Science and Engineering Progress*, 5(August 2017): 524–545.
- [10] Arjmandi, H., Amini, R., Ghaffari, A., Rahmani, H., & Chamkha, A., 2022, "Effects of baffles and vortex generators on cooling performance of a gas turbine combustion chamber: Numerical assessment," *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4467-4478.