

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

\*Aditya Yoga Pramana<sup>1</sup>, Syaiful<sup>2</sup>, MSK Tony Suryo Utomo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: [adityayogapramana@students.undip.ac.id](mailto:adityayogapramana@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Penggunaan vortex generator dan nanofluida dalam upaya peningkatan perpindahan panas perhatian para peneliti akhir-akhir ini. Oleh karena itu, studi numerik saat ini dimaksudkan untuk mempertinggi laju perpindahan panas dari dinding saluran ke aliran fluida dengan pemasangan *concave delta winglet vortex generators* yang disusun secara *staggered* 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, digunakan sebagai fluida kerja. Aliran fluida yang masuk divariasikan pada rentang bilangan Reynolds 4.000 – 12.000. Hasil dari studi numerik ini menunjukkan bahwa nanofluida CuO mampu menghasilkan *performance evaluation criteria* (PEC) 6,81% lebih tinggi daripada yang dari fluida kerja air. Dan pada geometri saluran yang sama, nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menghasilkan PEC 4,39% lebih tinggi daripada yang dari fluida kerja air.

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

### Abstract

*The use of vortex generators and nanofluids in an effort to increase heat sealing has attracted the attention of researchers recently. Therefore, the present numerical study is intended to enhance the degree of heat locking from the channel wall to the fluid flow by the installation of a staggered concave winglet delta vortex generator and the use of nanofluids. In this numerical study, a concave delta winglet vortex generator is installed with an angle of attack of 30° to the flow direction in the channel with circular, ellipsoidal, and flat cross sections having different diameters. Four types of fluids, namely air, air, CuO nanofluids, and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids, were used as working fluids. The incoming fluid flow is varied in the Reynolds number range of 4,000 – 12,000. The results of this numerical study showed that CuO nanofluids were able to produce 6.81% higher performance evaluation criteria (PEC) than those of the water working fluid. And at the same channel geometry, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid produced 4.39% higher PEC than that of the aqueous working fluid.*

**Keywords:** nanofluids; PEC; heat transfer; *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 termodinamika fluida. Sifat termodinamika dapat ditingkatkan dengan mensuspensikan partikel berukuran nano (1-900 nm) ke dalam fluida dasar sehingga mampu memungkinkan lebih banyak perpindahan panas [4].

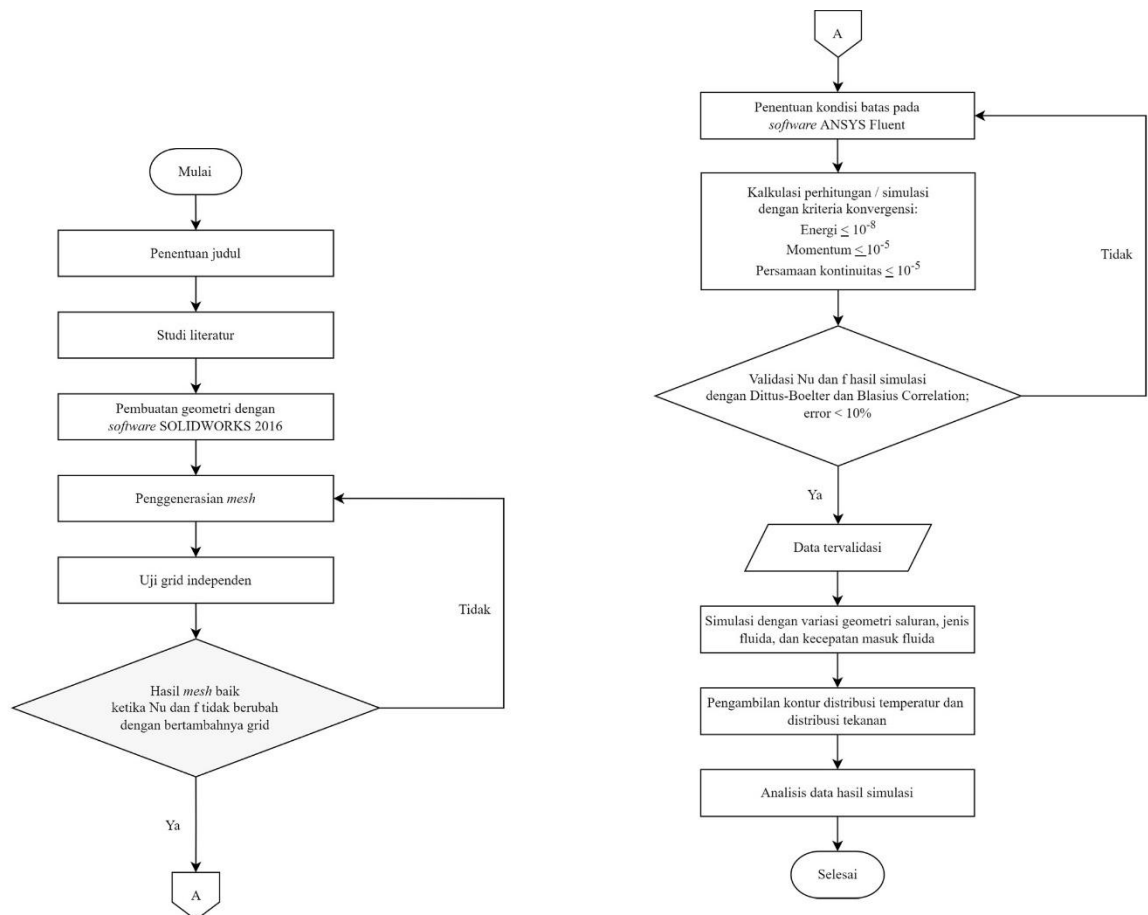
Zhao dkk. (2022) mempelajari pengaruh jarak antar VGs terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas [5]. Mereka menginvestigasi *delta winglet vortex generators* (DWVGs) dengan sudut serang 45° yang divariasikan pada jarak antar VGs untuk mengetahui jarak optimal dalam peningkatan perpindahan panas. Hasil studi mereka menunjukkan bahwa peningkatan jarak antar VGs menghasilkan penurunan perpindahan panas yang disebabkan oleh pergerakan garis attachment dan pelemahan pusaran energi [5]. Song, dkk [6] 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 ( $\beta$ ) 20°, 30°, 40°, sudut kelengkungan ( $\theta$ ) 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 ( $\beta$ )  $30^\circ$  dan sudut kelengkungan ( $\theta$ ) kurang dari  $60^\circ$ . Selain menggunakan VGs, perpindahan panas dapat diperbaiki dengan meningkatkan sifat termal dari material yang digunakan, salah satu contohnya adalah dengan menambahkan nanopartikel kedalam fluida yang biasa disebut sebagai nanofluida. Khoshvaght dkk. (2016) membandingkan pengaruh fluida kerja air dengan *nanofluid*-CuO terhadap performa termal-hidrolik di dalam saluran dengan *VG-insert* sebagai turbulator. Mereka juga melakukan eksperimen dengan berbagai parameter geometri VGs untuk mendapatkan parameter geometri optimal. Dari hasil eksperimen mereka dapat diketahui bahwa *performance evaluation criteria* (PEC) maksimum teramati pada *nanofluid*-CuO sebagai fluida kerja, yaitu 1,83 pada Re 12.000 [7]. 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) dengan susunan *staggered* 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 *staggered* CDWP VGs dan penggunaan nanofluida (CuO dan  $Al_2O_3$ ) pada saluran dengan berbagai penampang.

## 2. Metode Penelitian

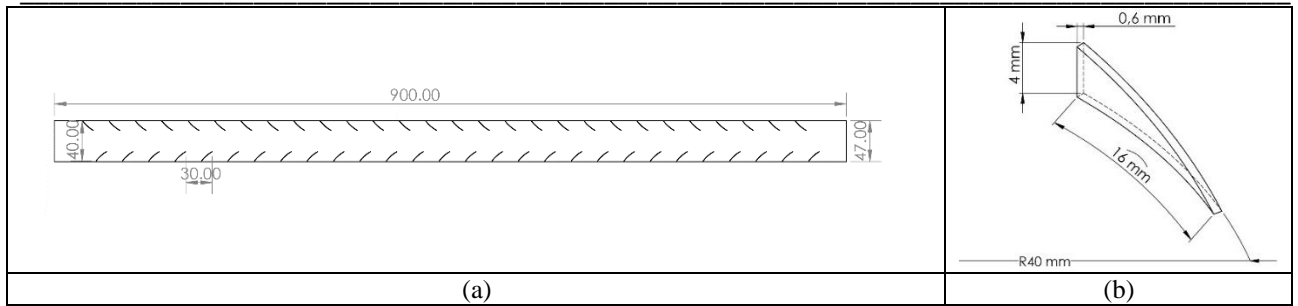
### 2.1 Diagram Alir



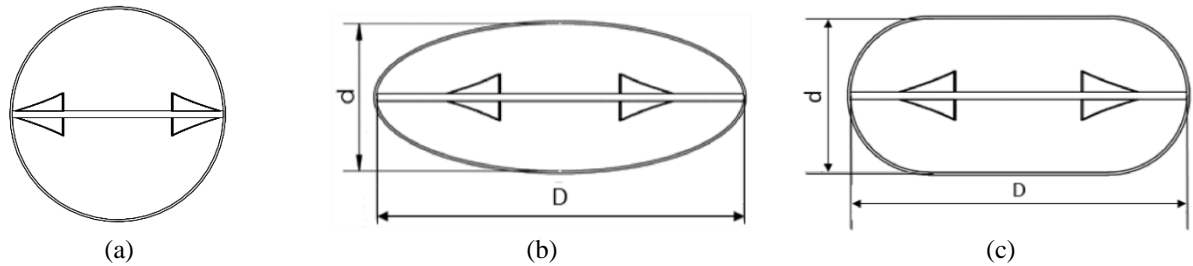
Gambar 1. Diagram alir penelitian

### 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, dan (b) detail VG



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

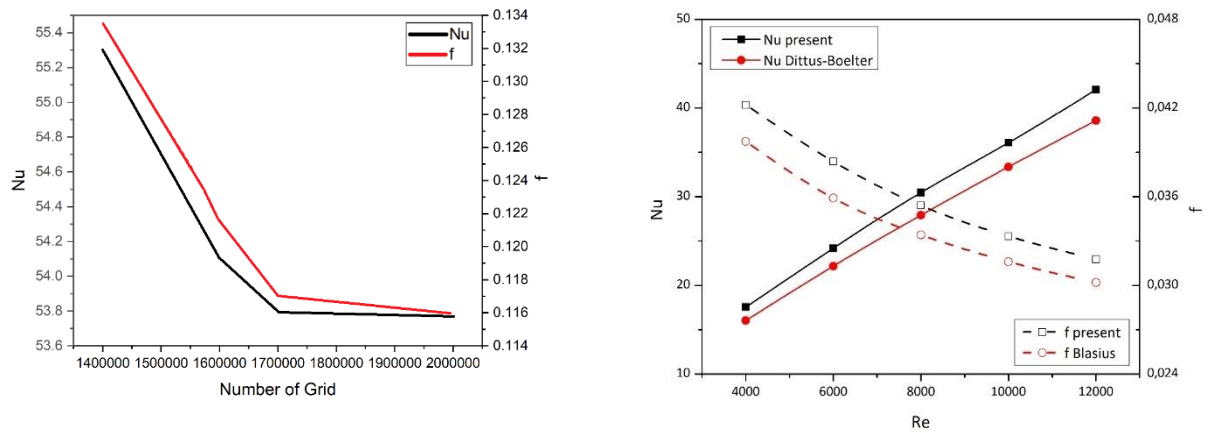
Tabel 1. Detail geometri saluran

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 *staggered* 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. Uji grid independen dilakukan untuk menentukan jumlah grid optimal yang tidak berpengaruh terhadap parameter yang ditentukan pada penelitian sekarang ini. Pada studi ini, uji grid dilakukan dengan menggunakan domain komputasi dari saluran elips (D) 107 mm yang dilengkapi CDWP VGs dengan susunan *staggered* pada  $Re = 10000$ . Lima jumlah grid berbeda pada rentang jumlah grid 1,4 – 2 juta diuji. Gambar 5. menunjukkan bahwa pada jumlah grid 1,7 juta merupakan jumlah grid optimum dimana hasil perhitungan bilangan Nusselts dan *friction factor* tidak mengalami perubahan yang signifikan ketika jumlah grid ditambah. Gambar 5. menunjukkan perbandingan Nu dari hasil simulate dengan perhitungan *Dittus-Boelter* serta f hasil simulasi dengan perhitungan *Blasius correlations*. Dari Gambar 6 didapati bahwa Nu dan f hasil penelitian sekarang ini dengan hasil perhitungan *Dittus-Boelter* dan *Blasius correlation* memperlihatkan tendensi yang sama.

Pada simulasi kali ini 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. 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  $\theta$

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

- 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- $\omega$  SST

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \overline{G}_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

- 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

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

- Outlet

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

- 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

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

- 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.

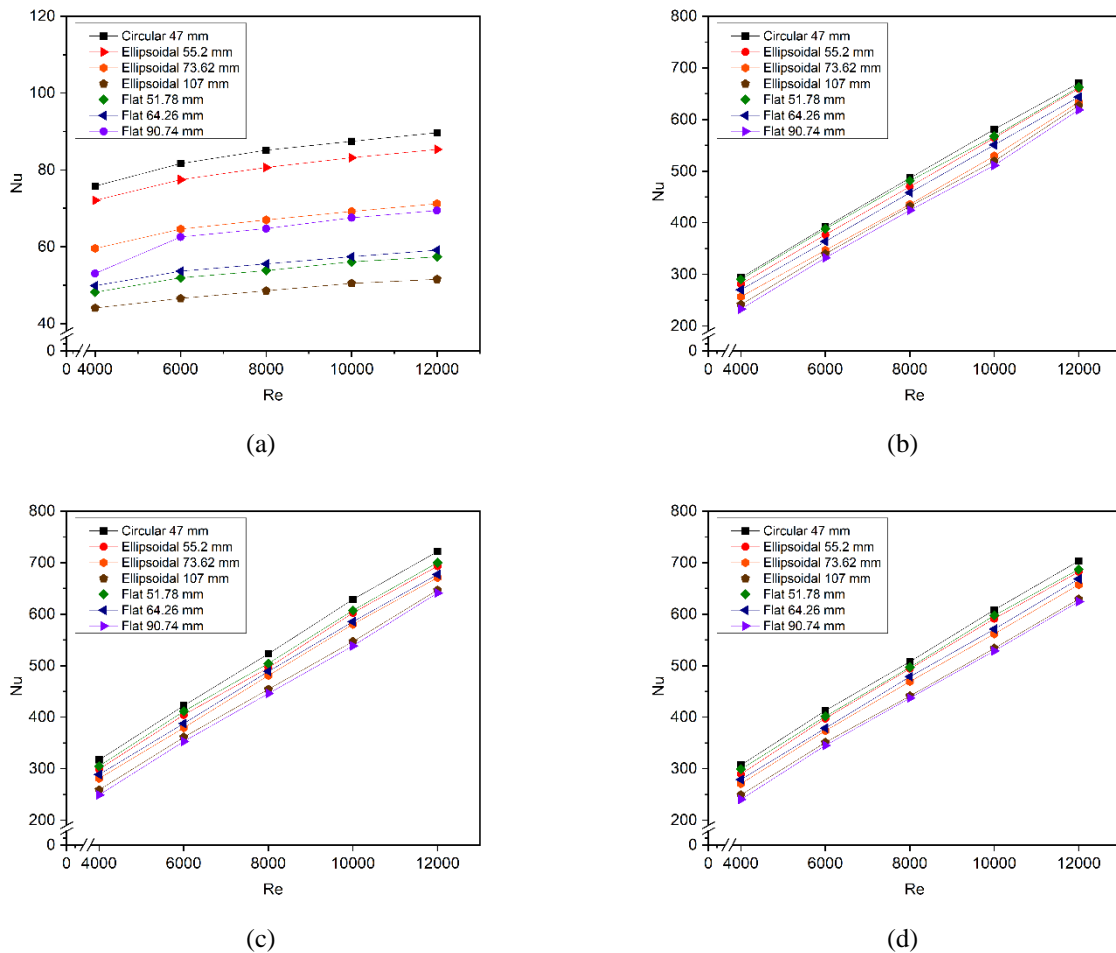
**Tabel 2.** Sifat termofisik fluida pada suhu 300K

Zat	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas (kg/m.s)	Heat capacity (j/kg.K)	Konduktivitas termal (W.m <sup>2</sup> /K)
Udara	1,225	0,00001789	1006,44	0,0242
Air	998,2	0,001003	4182	0,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3950	-	765	36
CuO	6400	-	535,6	18

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Bilangan Nusselts

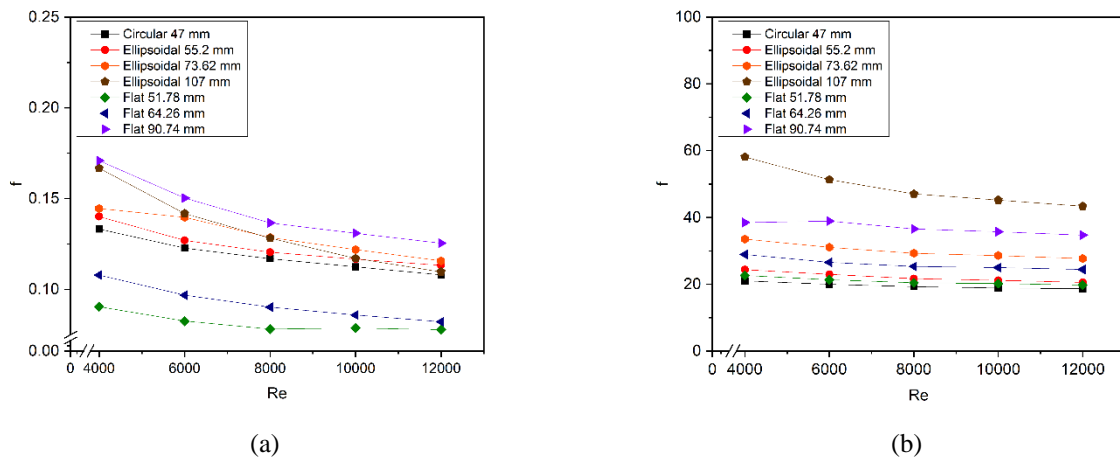
Pada studi sekarang ini, peningkatan perpindahan yang terjadi akibat pemasangan CDWP VGs dalam saluran dipresentasikan dengan bilangan Nusselts. Gambar 5, menunjukkan variasi bilangan Nusselt terhadap Reynolds number untuk semua fluida kerja, yang mana setiap fluida kerja memiliki tujuh variasi saluran. 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> memiliki bilangan Nusselt dengan tendensi yang sama dan nilai yang tidak terpaut jauh. Nilai Nusselts rata-rata untuk nanofluida-CuO dan nanofluida-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berturut-turut 7.63% dan 4.91% lebih tinggi daripada yang dari fluida air pada Re = 12000. Alasan utamanya adalah sifat termodinamika dari nanofluida yang berbeda dari fluida dasarnya dikarenakan penambahan nano partikel yang mampu menaikkan sifat termodinamika dari fluida tersebut. 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 sisi lengkung yang besar.

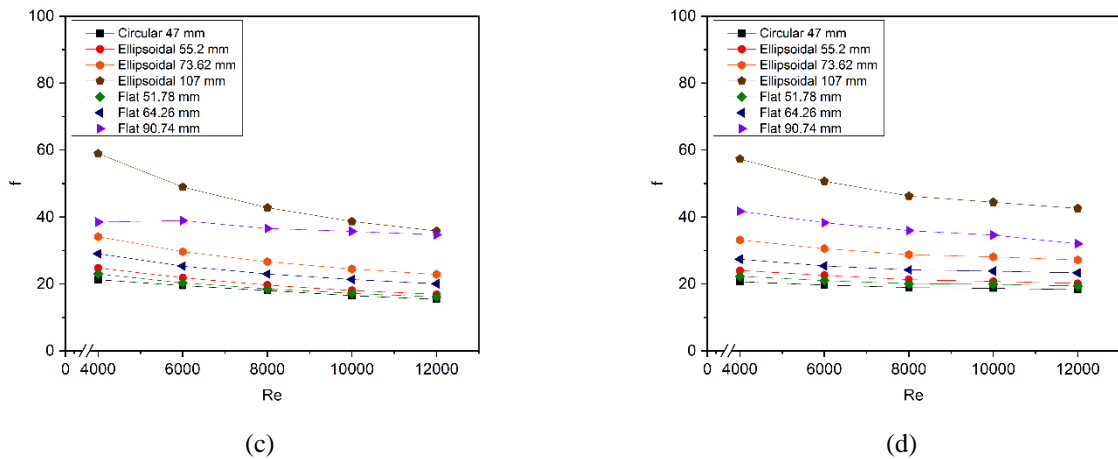


**Gambar 5.** Grafik bilangan Nusselt terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida CuO, dan (d) nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.2 Friction Factor

Gambar 6. menunjukkan variasi faktor gesekan terhadap variasi bilangan Reynolds pada semua kasus CDWP 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.

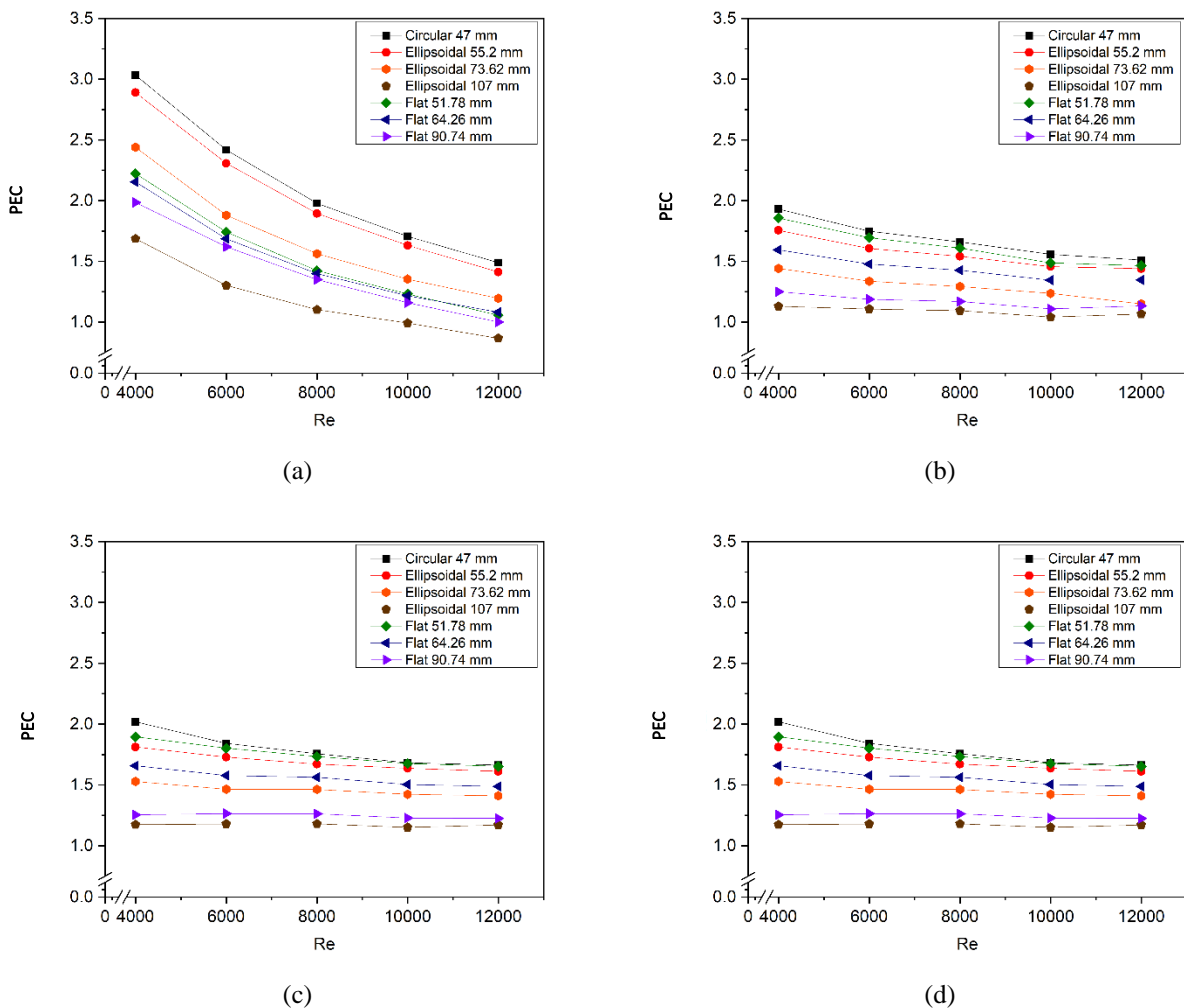




Gambar 6. Grafik *friction factor* terhadap variasi Reynolds number untuk kasus dengan fluida kerja (a) udara, (b) air, (c) nanofluida CuO, dan (d) nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### 3.3 Performance Evaluation Criteria (PEC)

PEC digunakan sebagai parameter yang digunakan untuk menganalisis efektivitas perpindahan panas pada *heat exchanger* [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 (d) nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



#### 4. Kesimpulan

CDWP VGs yang dipasang secara *staggered* 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 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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] Sivashanmugam, P. 2012. "Application of nanofluids in heat transfer". *An overview of heat transfer phenomena*, 16.
- [5] Zhao, Z., Luo, L., Qiu, D., Wang, S., Wang, Z., Sundén B., "Influence of spacing of a delta-winglet vortex generator pair on the flow behavior and heat transfer at the internal tip of gas turbine blades." *International Journal of Thermal Sciences*, 1;175:107464.
- [6] 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.
- [7] Khoshvaght-Aliabadi, M., Akbari, M.H. and Hormozi, F., 2016. An empirical study on vortex-generator insert fitted in tubular heat exchangers with dilute Cu–water nanofluid flow. *Chinese journal of chemical engineering*, 24(6), pp.728-736.
- [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] Xie, J. and 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, p.115830.