

SIMULASI NUMERIK PENGARUH SUSUNAN *CONVEX DELTA WINGLET VORTEX GENERATOR* TERHADAP KRITERIA EVALUASI KINERJA ALIRAN UDARA DALAM SALURAN

Yogi Ananda Wibawa Munte¹, Bambang Yunianto², Syaiful²

¹ Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

² Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

E-mail: yogi.wibawa2000@gmail.com

Abstrak

Penggunaan *vortex generator* dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas telah menjadi perhatian utama dalam penelitian terkini. Maka dari itu, penelitian ini dilaksanakan untuk menginvestigasi dampak penggunaan *convex delta winglet vortex generators* (CxDWPs VGs) terhadap karakteristik evaluasi kinerja pada aliran udara dalam saluran persegi empat. Melalui pendekatan simulasi numerik, berbagai variasi jumlah dan konfigurasi VGs, termasuk pengaturan CxDWPs dan PCxDWPs dengan satu, dua, dan tiga pasang VGs, dieksplorasi dalam susunan *in-line* maupun *staggered*. Uji coba dilakukan dengan memvariasikan kecepatan aliran udara dari 0,4 m/s hingga 2 m/s, dengan interval 0,2 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan tiga pasang CxDWPs memberikan kriteria evaluasi kinerja tertinggi, mencapai nilai 1,38. Selain itu, pemasangan CxDWPs dalam susunan *staggered* menunjukkan peningkatan perpindahan panas yang signifikan, dengan lonjakan mencapai 64,9% dibandingkan dengan *baseline*.

Kata kunci: *convex delta winglet pairs; perpindahan panas; pressure drop; vortex generator*

Abstract

The use of vortex generators to enhance heat transfer efficiency has been a major focus in recent research. Therefore, this study was conducted to investigate the impact of using convex delta winglet vortex generators (CxDWPs VGs) on the performance evaluation characteristics of airflow in a square channel. Through numerical simulation approaches, various variations in the number and configuration of VGs, including arrangements of CxDWPs and PCxDWPs with one, two, and three pairs of VGs, were explored in both *in-line* and *staggered* arrangements. Experiments were conducted by varying the airflow velocity from 0.4 m/s to 2 m/s, with intervals of 0.2 m/s. The research results indicate that the use of three pairs of CxDWPs provides the highest performance evaluation criteria, reaching a value of 1.38. Additionally, the installation of CxDWPs in a *staggered* arrangement showed a significant increase in heat transfer, with a spike of up to 64.9% compared to the *baseline*.

Keywords: *convex delta winglet pairs; heat transfer; pressure drop; vortex generator*

1. Pendahuluan

Peningkatan efisiensi penukar kalor melalui metode pasif, seperti penggunaan *vortex generators* (VGs), menjadi fokus penelitian karena dampaknya terhadap biaya operasional [1]–[4]. VGs meningkatkan perpindahan panas dengan membentuk pusaran, memecah lapisan batas, dan meningkatkan turbulensi [1]. Dalam penukar kalor jenis *fin and tube heat exchangers* (FTHes), peningkatan perpindahan panas terutama dilakukan pada sisi udara dengan menggunakan VGs [2]. Meskipun VGs memudahkan pemasangan dan stabil dalam pencampuran fluida, efektivitasnya cenderung menurun di saluran dengan rib untuk fluida berbilangan Prandtl rendah [3].

Studi eksperimen yang dilakukan oleh Lu dkk [4] pada aliran subpendingin menunjukkan bahwa penggunaan VGs bentuk heliks dalam saluran dapat meningkatkan perpindahan panas dengan mempercepat pelepasan dan kondensasi gelembung refrigeran. Kemudian, penelitian Yuan dkk [5] menunjukkan bahwa tabung berulir spiral dengan VGs segitiga memiliki kinerja perpindahan panas yang lebih baik daripada tanpa VGs, dengan sudut serang 120° dianggap sebagai

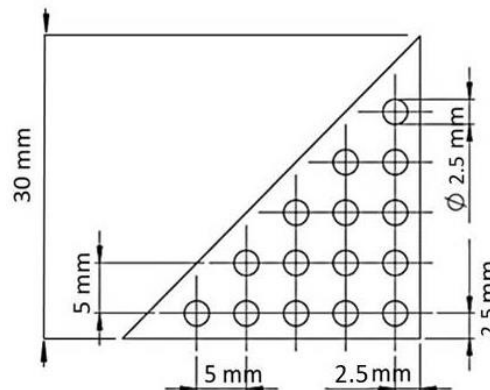
konfigurasi paling optimal. Selain itu, penelitian numerik Aridi dkk [6] pada *concentric tube heat exchanger* menunjukkan peningkatan lebih dari dua kali lipat pada *Thermal Enhancement Factor* (TEF) dengan penggunaan VGs berbentuk trapesium. Terdapat juga investigasi oleh Arora dan Subbarao [7] pada *finned-tube heat exchanger*, di mana penggunaan DWVGs secara numerik mempengaruhi peningkatan efisiensi energi termal. Berber dan Gürdal [8] menemukan bahwa penggunaan VGs *curve winglet* dengan sudut serang 60° menghasilkan peningkatan perpindahan panas yang optimal pada aliran udara di dalam saluran persegi panjang. Studi lain oleh Jayranaiwachira dkk [9] pada *tube heat exchanger* menunjukkan bahwa penggunaan VGs LCB dengan parameter tertentu dapat menghasilkan TEF tertinggi. Borrajo-Pérez dkk [10] dalam penelitiannya pada saluran persegi panjang, menemukan bahwa penggunaan VGs *punched holes* dengan susunan PHF memberikan peningkatan perpindahan panas yang signifikan. Terakhir, Zhao dkk [11] menemukan bahwa penggunaan DVGPs dengan jarak antar VGs $0.03D_h$ mampu menghasilkan perpindahan panas terbaik pada ujung internal bilah turbin gas.

Studi sebelumnya telah menginvestigasi pengaruh *concave vortex generators* dalam meningkatkan perpindahan panas [1]. Permukaan *concave* pada *vortex generator* telah terbukti meningkatkan intensitas dari aliran *vortex longitudinal*, sehingga memperkuat proses pencampuran fluida dan pada akhirnya meningkatkan laju perpindahan panas [12]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efek penggunaan PCxDWPs VGs terhadap kriteria evaluasi kinerja aliran udara yang melewati *tubes* panas dalam susunan *in-line* dan *staggered* di dalam saluran persegi empat.

2. Metode Penelitian

2.1 Model Fisik

Studi ini merujuk pada eksperimen sebelumnya yang dilakukan oleh Syaiful dkk [13] dalam mengaplikasikan model fisik yang serupa. Simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini mengevaluasi efek susunan CxDWPs VGs terhadap kriteria evaluasi kinerja aliran udara dalam saluran persegi empat. Penggunaan VGs, baik dengan lubang maupun tanpa lubang, menghasilkan *longitudinal vortex* yang meningkatkan intensitas aliran *vortex*, yang pada gilirannya meningkatkan laju perpindahan panas. VGs ditempatkan dalam susunan *in-line* dan *staggered*, dengan jumlah pasang VGs bervariasi antara satu hingga tiga, dan sudut serang sebesar 15° . Variasi kecepatan aliran udara di saluran dilakukan dalam rentang bilangan *Reynolds* dari $Re = 2.100$ hingga $Re = 11.200$.



Gambar 2.1 Detail geometri lubang pada VG

2.2 Persamaan Pembangun

Pada studi ini, simulasi 3D dipelajari dengan mengasumsikan fluida *incompressible* dan *steady state*. Aliran pada $Re = 2.100$ diasumsikan laminar dan turbulen untuk $Re > 2.100$. Persamaan-persamaan pembangun yang digunakan dalam simulasi numerik ini, yaitu:

- Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (1)$$

- Persamaan momentum

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

- Persamaan energi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

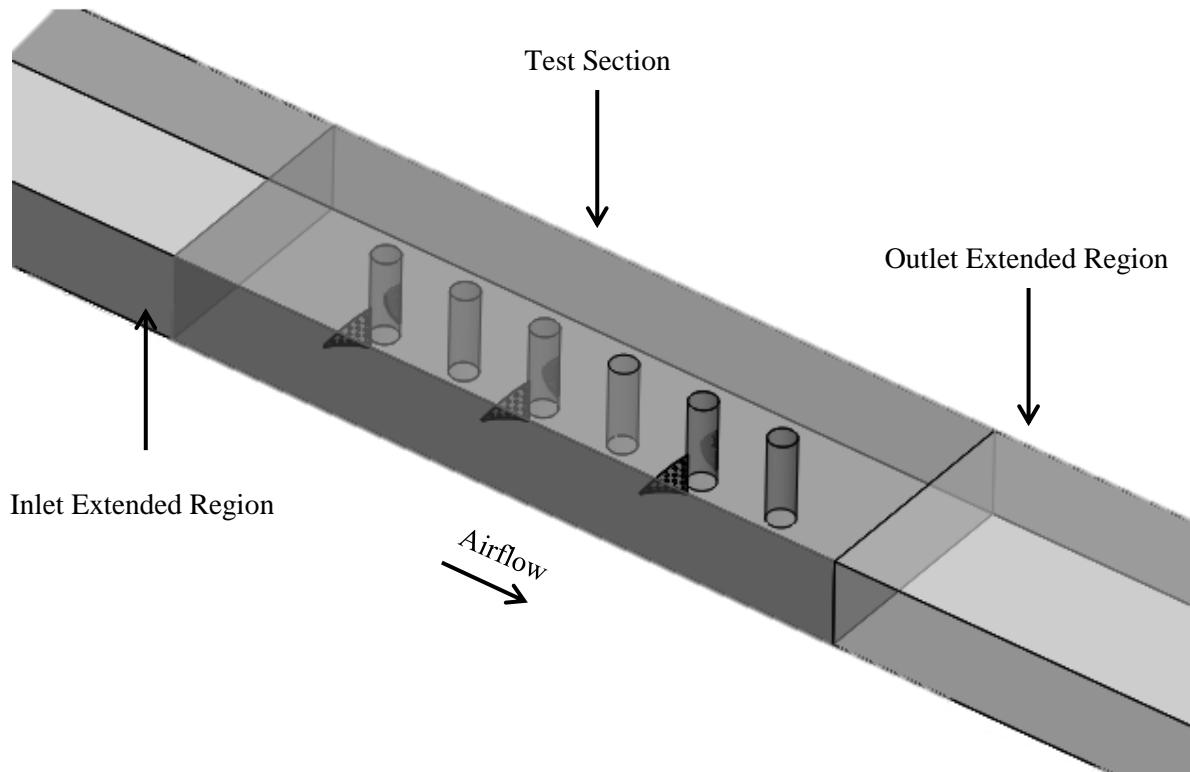
dimana ρ dan μ masing-masing adalah densitas dan viskositas dinamik udara, sedangkan Γ merupakan koefisien difusi yang dikalkulasi dengan Persamaan (4).

$$\Gamma = \frac{\lambda}{C_p} \quad (4)$$

dimana λ dan C_p berturut-turut adalah konduktivitas termal dan panas spesifik udara.

2.3 Model Numerik

Dalam penelitian ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* CFD ANSYS FLUENT. Algoritma *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equation* (SIMPLE) digunakan untuk menjaga kestabilan sistem dan menentukan variabel penting seperti kecepatan dan tekanan dalam domain yang diamati. Persamaan dasar mekanika fluida, seperti kontinuitas, momentum, dan energi, diterjemahkan ke dalam lingkungan diskrit menggunakan skema *second-order upwind*. Model laminar digunakan saat kecepatan aliran masuk di bawah 0,4 m/s ($Re = 2.100$), sedangkan model turbulen $k-\omega$ dipilih untuk kecepatan aliran di atas 0,4 m/s ($Re > 2.300$). Kriteria konvergensi ketat diterapkan, dengan residu di bawah 10^{-5} untuk persamaan kontinuitas, momentum, k, dan omega, serta di bawah 10^{-8} untuk energi. Ini menunjukkan tingkat konvergensi yang dapat diterima secara numerik.



Gambar 2.2 Domain komputasi dan sistem koordinat PCxDWPs VGs *in-line* 3 pasang

2.4 Parameter Penelitian

Kriteria evaluasi kinerja aliran udara yang diuji secara numerik menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Oleh karena itu, beberapa persamaan yang terlibat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bilangan *Nusselt* (Nu)

$$Nu = \frac{D_h h}{\lambda} \quad (5)$$

dimana D_h , h dan λ masing-masing adalah diameter hidrolis ($D_h = \frac{4A_c}{P_w} = \frac{2BH}{(B+H)}$), koefisien perpindahan panas konveksi ($h = \frac{q}{A_T \Delta T_{LMTD}}$), dan konduktivitas termal udara.

- *Friction factor* (f)

$$f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho V^2 (L + 6D)} \quad (6)$$

dimana ρ, V dan L masing-masing adalah massa jenis udara, kecepatan aliran udara masuk dan panjang plat spesimen uji.

- Laju perpindahan panas konveksi (q)

$$q = \dot{m} C_p (\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in}) \quad (7)$$

dimana $A_T, \dot{m}, C_p, \bar{T}_{in}$, dan \bar{T}_{out} berturut-turut adalah luas perpindahan panas silinder, laju aliran massa, panas spesifik fluida, rata-rata temperatur udara masuk, dan rata-rata temperatur udara keluar.

- *Log-mean temperature difference* (ΔT_{LMTD})

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(\bar{T}_{tube} - \bar{T}_{out}) - (\bar{T}_{tube} - \bar{T}_{in})}{\ln[(\bar{T}_{tube} - \bar{T}_{out}) - (\bar{T}_{tube} - \bar{T}_{in})]} \quad (8)$$

Ketika nilai dari Nu dan f sudah ditemukan, maka selanjutnya mencari nilai dari kriteria evaluasi kinerja dengan Persamaan (5) berikut.

- *Performance evaluation criteria* (PEC)

$$PEC = \frac{\frac{\bar{Nu}}{Nu_0}}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (9)$$

dimana subskrip 0 adalah nilai pada saat kondisi *baseline* (tanpa VGs).

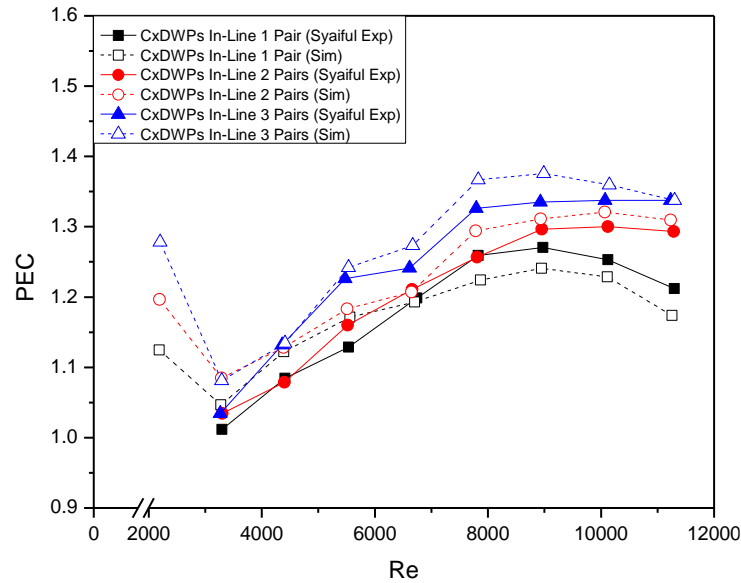
2.4 Validasi

Validasi yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan hasil eksperimen yang sudah dilakukan oleh Whitaker [14] yang membandingkan nilai dari Nu pada aliran udara yang melewati satu silinder pada rentang Re dari $Re = 2.100$ hingga $Re = 11.200$. Hasil dari validasi ini dapat dilihat pada Referensi [15].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh VG terhadap *Performance Evaluation Criteria* (PEC)

Gambar 3.1 menunjukkan nilai PEC untuk berbagai bilangan *Reynolds* pada pemasangan satu, dua, dan tiga pasang VGs untuk semua kasus. Dari gambar ini terlihat bahwa pada rentang $Re = 2.100$ sampai $Re = 3.300$, TEF tereduksi dengan tajam secara keseluruhan, penambahan jumlah pasang VGs meningkatkan PEC, dimana penurunan tertinggi didapati pada penggunaan tiga pasang VGs. Selanjutnya, nilai PEC mengalami peningkatan hingga bilangan $Re = 9.000$. Penggunaan tiga pasang CxDWPs VGs menghasilkan PEC tertinggi sebesar 1,38 pada $Re = 9.000$.



Gambar 3.1 TEF untuk kasus pemasangan CxDWPs *in-line*

4. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan laju perpindahan panas dari VGs dalam konfigurasi *staggered* melebihi VGs dalam konfigurasi *in-line* sebesar 3,5% untuk semua variasi bilangan *Reynolds*.
2. Semakin kuat intensitas *longitudinal vortex* yang dihasilkan, maka laju perpindahan panasnya akan semakin tinggi

5. Daftar Pustaka

- [1] O. Heriyani, M. Djaeni, Syaiful, dan A. K. Putri, "Perforated concave rectangular winglet pair vortex generators enhance the heat transfer of air flowing through heated tubes inside a channel," *Results Eng.*, vol. 16, no. September, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100705.
- [2] P. Saini, A. Dhar, dan S. Powar, "Performance enhancement of fin and tube heat exchanger employing curved trapezoidal winglet vortex generator with circular punched holes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 209, hal. 124142, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124142.
- [3] X. Shi, W. Chen, Z. Li, X. Chai, dan M. K. Chyu, "Investigation of the heat transfer enhancement and deterioration induced by vortex generators in low Prandtl number sodium-potassium alloy liquid," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 193, no. May, 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108456.
- [4] J. Lu, D. Zhuang, Y. Wang, dan G. Ding, "Effects of vortex generator on subcooled flow boiling characteristics in micro-channel," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 216, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124572.
- [5] M. Yuan *dkk.*, "Heat transfer enhancement for spiral finned tubes with triangular winglets," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 205, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123918.
- [6] R. Aridi, S. Ali, T. Lemenand, J. Faraj, dan M. Khaled, "Thermoeconomic and environmental impacts of vortex generator-equipped multi-drain heat recovery systems under various renewable sources," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 20, no. July, 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100431.
- [7] A. Arora dan P. M. V. Subbarao, "Geometric parametrization of toe-out type vortex generators for energy-efficient capacity augmentation in finned-tube heat exchangers," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 42, no. May, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2023.101936.
- [8] A. Berber dan M. Gürdal, "Estimation of forced heat convection in a rectangular channel with curved-winglet vortex generator: A machine learning approach," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 37, no. November 2022, 2023, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101563.
- [9] N. Jayranaiwachira, P. Promvong, C. Thianpong, P. Promthaisong, dan S. Skullong, "Effect of louvered curved-baffles on thermohydraulic performance in heat exchanger tube," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102717.
- [10] R. Borrajo-Pérez, A. Menéndez-Pérez, dan D. Sacasas-Suárez, "A deep assessment of a pair of built-in winglets with similar disposition on a rectangular channel," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 189, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108261.
- [11] Z. Zhao, L. Luo, D. Qiu, S. Wang, Z. Wang, dan B. Sundén, "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," *Int. J. Therm. Sci.*,

- vol. 175, 2022, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.107464.
- [12] Syaiful, H. Nabilah, M. S. K. T. Suryo Utomo, A. Suprihanto, dan M. F. Soetanto, “Numerical simulation of heat transfer enhancement from tubes surface to airflow using concave delta winglet vortex generators,” *Results Eng.*, vol. 16, no. October, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100710.
- [13] M. Untung, Z. Priyadi, B. Yudianto, dan N. Sinaga, “Enhancing Heat Transfer in Rectangular Channels : An Experimental Study on Perforated Concave Delta Winglet Vortex Generators,” vol. 42, no. 1, hal. 132–140, 2024.
- [14] S. Whitaker, “Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles,” *AIChE J.*, vol. 18, no. 2, hal. 361–371, 1972, doi: 10.1002/aic.690180219.
- [15] Y. Effendi, Syaiful, M. Djaeni, dan S. H. Winoto, “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,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 673, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/673/1/012111.