

PENINGKATAN HEAT TRANSFER MENGGUNAKAN DELTA WINGLET VORTEX GENERATOR PADA SALURAN

*Arvian Dwi Prasetyo¹, Syaiful², M.S.K. Tony Suryo Utomo²

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: arvianprasetyo06@gmail.com

Abstrak

Peningkatan efisiensi penukar kalor penting untuk memenuhi permintaan industri. Salah satu cara meningkatkan laju perpindahan kalor adalah dengan menggunakan generator vortex, yang menciptakan aliran turbulen untuk memperbaiki perpindahan kalor antara permukaan dan fluida. Eksperimen dilakukan untuk meneliti kinerja dari *perforated delta winglet vortex generators* (PDW VGs). Kecepatan aliran divariasikan dari 0,4 m/s hingga 2 m/s pada interval 0,2 m/s serta memvariasikan sudut serang. *Performance evaluation criteria* (PEC) merupakan output dari eksperimen dengan $(j/j_0)/(f/f_0)$. Hasil eksperimen ini membuktikan PEC pada PDW VGs lebih tinggi dibandingkan DW VGs pada nilai Reynolds 8.800.

Kata kunci: nilai reynolds; *performance evaluation criteria(pec)*; *vortex generators*

Abstract

Increasing the efficiency of heat exchangers is important to meet industrial demands. One way to increase the heat transfer rate is by using vortex generators, which create turbulent flow to improve heat transfer between the surface and the fluid. Experiments were conducted to investigate the performance of perforated delta winglet vortex generators PDW VGs. The flow velocity was varied from 0.4 m/s to 2 m/s at intervals of 0.2 m/s and varying the angle of attack. Performance evaluation criteria (PEC) is the output of the experiment with $(j/j_0)/(f/f_0)$. The results of this experiment prove that the PEC in PDW VGs is higher than that of DW VGs at a Reynolds number of 8,800.

Keywords: : reynolds number; *performance evaluation criteria(pec)*; *vortex generators*

1. Pendahuluan

Dalam industri modern, kebutuhan akan efisiensi energi dan peningkatan kinerja sistem termal semakin meningkat. Salah satu cara untuk mencapai tujuan ini adalah dengan mengoptimalkan proses perpindahan kalor dalam penukar kalor dan sistem aliran fluida. Efisiensi penukar kalor yang lebih tinggi memungkinkan penghematan energi yang signifikan dan pengurangan emisi karbon, yang sangat penting dalam konteks keberlanjutan lingkungan dan ekonomi. Untuk mencapai efisiensi ini, para peneliti telah mengembangkan berbagai teknik peningkatan perpindahan kalor, salah satunya adalah dengan penggunaan vortex generator (VG) jenis delta winglet. Delta winglet vortex generator merupakan elemen pasif yang dipasang di permukaan saluran atau penukar kalor untuk mengganggu aliran fluida secara terkontrol. Generator ini menciptakan vortex atau pusaran di dalam aliran fluida, yang pada gilirannya meningkatkan perpindahan kalor dari permukaan ke fluida. Penelitian oleh Jiangbo Wang menunjukkan bahwa penggunaan delta winglet VG pada saluran mampu meningkatkan laju perpindahan kalor secara signifikan dengan menginduksi aliran sekunder yang efektif, yang memperbesar turbulensi dan mengurangi ketebalan lapisan batas termal [1].

Penelitian yang dilakukan oleh Zhiqing Bai tentang evaluasi pengaruh tiga parameter geometris dari vortex generator membuktikan bahwa penambahan vortex generator pada heat exchanger meningkatkan perpindahan panas sebesar 13.12% dibandingkan heat exchanger tanpa vortex generator [2]. Eksperimen tentang bentuk geometri yang berbeda juga dilakukan oleh Nares Chimres, penelitian ini menggunakan berbagai diameter dan pitch pada wavy fin. Sirip spiral memberikan koefisien perpindahan panas dan penurunan tekanan yang lebih rendah dibandingkan sirip bergelombang, tetapi indeks kinerja sirip spiral lebih tinggi sekitar 0,2–11,9%. Sirip spiral L-footed dapat meningkatkan efisiensi kondensor AC dengan penurunan tekanan yang lebih rendah dan kinerja termal yang lebih baik dibandingkan sirip bergelombang.[3]

Studi tentang peningkatan perpindahan panas dan penurunan tekanan dalam saluran persegi panjang dengan dinding bergelombang dan generator pusaran winglet juga telah dilakukan oleh Khamis. Simulasi numerik dilakukan pada berbagai angka Reynolds (Re) (5000–20000) menggunakan perangkat lunak Ansys Fluent untuk memodelkan kinerja termohidraulik. Hasil studi menunjukkan saluran bergelombang dengan winglet menunjukkan peningkatan angka Nusselt hingga 167.7% dibandingkan saluran halus, namun dengan peningkatan penurunan tekanan.[4] Delta winglet

merupakan bentuk yang sangat diminati oleh karena itu dilakukan penelitian tentang desain baru untuk dinding dalam penukar panas saluran dua-lintasan menggunakan pasangan generator pusaran delta-winglet. Hasil menunjukkan bahwa transfer panas pada dinding dalam meningkat secara signifikan dengan penggunaan generator pusaran ini, terutama pada sudut serang 45 derajat. Desain ini meningkatkan kinerja termal-hidraulik lebih dari 24% dibandingkan dengan desain tradisional.[5]

Penelitian oleh Kartik yang bertujuan untuk menganalisis kinerja termal dari generator pusaran (VG) dengan bentuk baru (envelope) dan bentuk segitiga dengan berbagai rasio pitch dan sudut serang dilakukan untuk menguji perbandingan dengan delta winglet. Penelitian ini menggunakan analisis eksperimental dan numerik untuk memahami distribusi suhu, tekanan, dan kecepatan dalam saluran yang dilengkapi dengan VG. Hasil studi menunjukkan VG segitiga menghasilkan koefisien perpindahan panas tertinggi dan peningkatan persentase angka Nusselt, sementara VG dengan sudut 90° menyebabkan kehilangan tekanan terbesar.[6] Melalui metode eksperimental dan analisis numerik yang mendalam, penelitian yang dilakukan oleh Muhareem berhasil menunjukkan peningkatan kinerja termal-hidraulik yang substansial. Hasil eksperimen membuktikan bahwa VG segitiga pada sudut posisi 30° dan yaw 60° mengurangi fluktuasi kecepatan dan energi kinetik turbulen hingga 19.5%, serta mengurangi hambatan sebesar 33.3%. [7]

Penggunaan VG juga dapat dilakukan pada penukar panas penerima surya (SRH) yang dilengkapi dengan generator vortex longitudinal baru, yaitu winglet trapezoidal berjulur dan alur bergelombang. Studi ini membuktikan dengan VG berjenis winglet trapezoidal dengan alur bergelombang pada kondisi optimal memberikan peningkatan transfer panas hingga 9,35 kali dibandingkan dengan saluran SRH yang halus.[8]

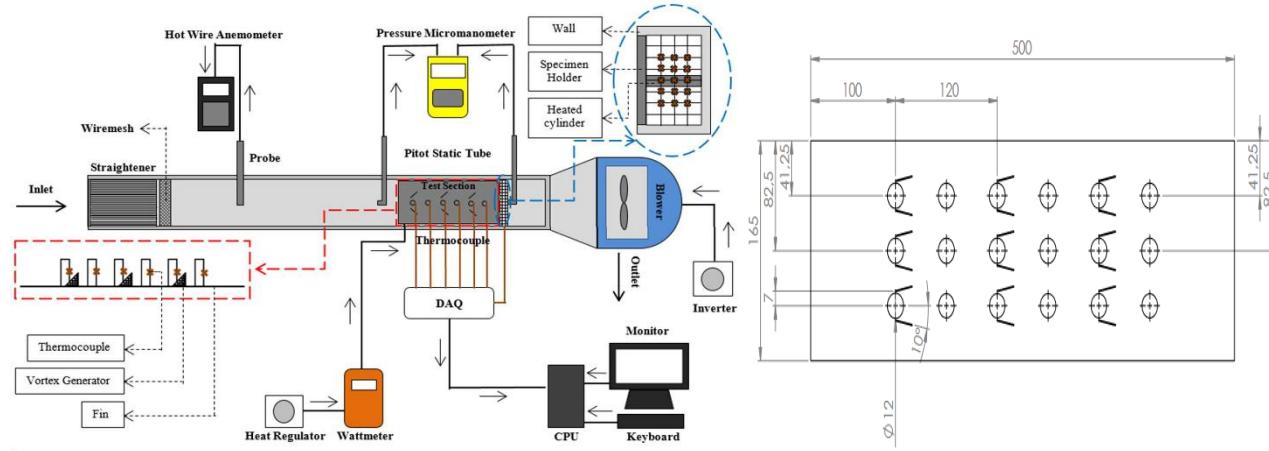
Studi yang dilakukan oleh Okatrina yang bertujuan meningkatkan transfer panas dalam sistem penukar panas dengan menggunakan generator vortex (VG) berbentuk winglet persegi panjang concave berlubang. Dari data hasil didapatkan bahwa konfigurasi in-line VG menunjukkan rasio biaya-manfaat (CBR) yang lebih rendah (3,56) dibandingkan dengan konfigurasi staggered, dengan peningkatan kinerja termal (TEF) sebesar 1,29.[9] Priyadi M. juga melakukan studi tentang meningkatkan efisiensi penukar panas dengan menggunakan vortex generators (VGs) berbentuk Convex Delta Winglet Pairs (CxDWPs). CxDWPs dengan lubang meningkatkan efisiensi transfer panas sebesar 27% dibandingkan dengan yang tanpa lubang pada Reynolds number 8.700. Performance Evaluation Criteria (PEC) menunjukkan bahwa CxDWPs dengan lubang memiliki kinerja yang lebih baik dalam hal transfer panas dan penurunan tekanan.[10]

Secara keseluruhan, penggunaan delta winglet vortex generator telah terbukti sebagai metode yang efektif untuk meningkatkan perpindahan kalor dalam berbagai konfigurasi saluran dan penukar kalor. Keberhasilan teknologi ini tergantung pada optimasi desain, penempatan, dan parameter operasional, yang semuanya memerlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut untuk mengatasi tantangan dan mencapai efisiensi maksimum dalam aplikasi praktis.

2. Metodologi Penelitian

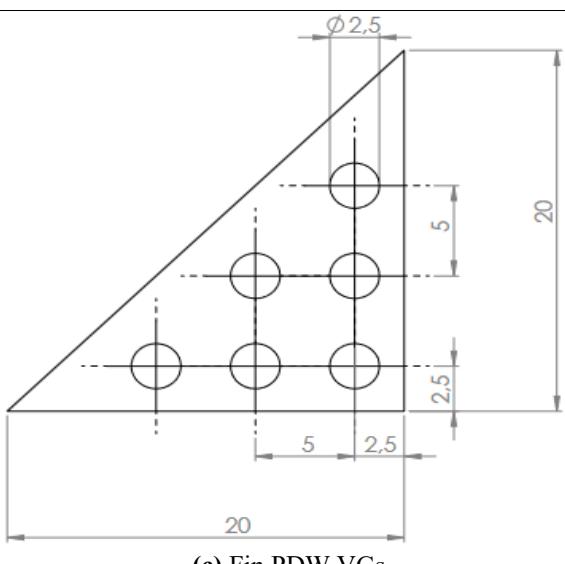
2.1 Set-up Eksperimen

Percobaan ini menggunakan saluran udara berbentuk persegi panjang dengan panjang 370 cm, lebar 8 cm, tinggi 18 cm, dan diameter hidrolik 0,0922 m yang terbuat dari kaca dengan ketebalan 1 cm. Pada percobaan ini, termokopel tipe K (dengan ketelitian $\pm 0,5$ pada rentang suhu 200°C-1250°C) dipasang pada sisi masuk dan keluar untuk mengukur suhu. Suhu udara diukur menggunakan teknologi yang terhubung dengan akuisisi data dan kemudian disimpan di komputer. Untuk mengalirkan udara ke dalam saluran, blower (Wipro tipe YS7112) ditempatkan di ujung saluran. Udara melewati pipa dan kawat kasa yang berfungsi untuk menyeragamkan aliran. Inverter (Mitsubishi Electric tipe FR-D700 dengan akurasi 0,01) digunakan untuk mengatur kecepatan aliran udara dengan variasi kecepatan 0,4 m/s hingga 2,0 m/s dengan interval 0,2 m/s yang diukur dengan anemometer hotwire (Lutron tipe AM-4204 dengan akurasi 0,1). Kemudian, aliran udara melewati spesimen uji yang terdiri dari 6 tabung yang disusun secara in-line yang dipanaskan pada daya konstan 40 W dan VG dipasang pada sirip di sebelah kanan dan kiri tabung. Dalam penelitian ini, mikromanometer tekanan (Fluke 922 dengan akurasi 0,05) yang dihubungkan ke tabung pitot di bagian masuk dan keluar bagian uji digunakan untuk memantau penurunan tekanan. Skema peralatan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 1.



(a) Diagram flow laju perpindahan panas dan *pressure drop*

(b) DW VGs dengan konfigurasi inline



(c) Fin PDW VGs

Gambar 1. (a) Diagram flow laju perpindahan panas dan *pressure drop*; (b) DW VGs dengan konfigurasi inline; (c) Fin PDW VGs

2.3 Definisi Parameter

Berikut merupakan parameter – parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa thermalhidrolik, seperti koefisien perpindahan panas (h) dengan menggunakan persamaan (1).

$$h = \frac{Q}{A_t \Delta T_{LMTD}} \quad (1)$$

Dimana A_t , ΔT_{LMTD} , Q berturut-turut . Sedangkan, koefisien perpindahan panas konveksi (h) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (2).

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T_{LMTD} \quad (2)$$

Dimana \dot{m} , C_p , ΔT_{LMTD} adalah mass flow rate, spesific heat, dan perbedaan suhu antara inlet dan outlet. Nilai nya didapat dari persamaan 3.

$$LMTD = \frac{(\bar{T}_w - \bar{T}_{in}) - (\bar{T}_w - \bar{T}_{out})}{\ln((\bar{T}_w - \bar{T}_{out}) / (\bar{T}_w - \bar{T}_{in}))} \quad (3)$$

Pada pengukuran pressure drop dua titik antara P inlet dan P out akan diukur dan mendapatkan nilai dari pressure drop, seperti pada persamaan (4).

$$\Delta P = (\bar{P}_{in} - \bar{P}_{out}) \quad (4)$$

Performance evaluation criteria merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performance. Parameter ini ditunjukkan pada persamaan (5).

$$PEC = \frac{\left(\frac{j}{f_o}\right)}{\left(\frac{f}{f_o}\right)} \quad (5)$$

Dimana j dan f_o adalah Cloburn factor dan friction factor. Nilai Colburn factor dapat dicari dengan persamaan (6). Sedangkan persamaan (7) untuk menghitung friction factor.

$$j = \frac{h}{\rho U_i C_p} (Pr)^{2/3} \quad (6)$$

$$f = \frac{2 \Delta P D_h}{\rho V^2 (L + 6D)} \quad (7)$$

Dimana ρ , V , dan L adalah densitas, kecepatan pada inlet dan panjang spesimen.

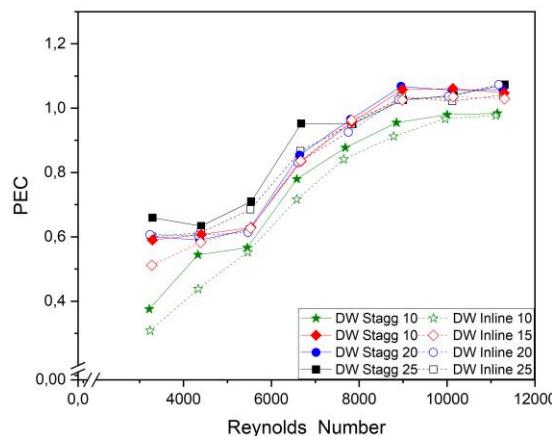
2.4 Validasi

Data diuji untuk validasi dengan membandingkannya terhadap publikasi Whitaker. Nilai Nusselt diubah dari 2000 hingga 10000 dalam studi ini, mengikuti metode Whitaker [11]. Peningkatan perpindahan panas yang diperoleh menunjukkan nilai lebih tinggi dibandingkan dengan temuan Whitaker.

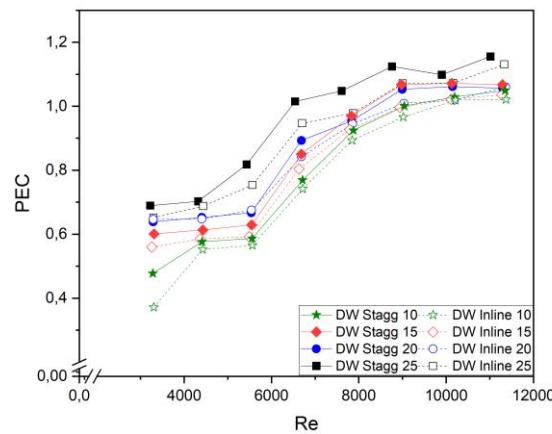
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Performance Evaluation Criteria

Gambar 2 menunjukkan perbandingan nilai PEC pada penggunaan DW VGs dengan berbagai variasi sudut. Nilai PEC tertinggi terjadi pada variasi DW VGs konfigurasi staggered dengan sudut serang 25° sebesar 1,07. Sedangkan Gambar 3 menunjukkan nilai perbandingan nilai PEC pada penggunaan PDW VGs dengan berbagai variasi sudut. Nilai PEC tertinggi terjadi pada variasi PDW VGs konfigurasi staggered dengan sudut serang 25° sebesar 1,15 pada Re 11.000. Pitch sempit pada VGs meningkatkan pencampuran fluida dan koefisien konveksi, mempercepat perpindahan panas.



Gambar 2. Nilai PEC pada penggunaan DW VGs



Gambar 3. Nilai PEC pada penggunaan PDW VGs

4. Kesimpulan

Dalam studi ini, kami mengevaluasi kinerja termal-hidrolik yang dibutuhkan untuk kinerja optimal dengan menggunakan VG dengan variasi dalam pengaturan (in-line dan staggered), angka Reynolds, dan sudut serang VG. Kesimpulan berikut dapat diambil dari hasil studi ini.

1. Lubang-lubang pada VGs dapat mengurangi hambatan aliran. Dalam kasus PDW dengan konfigurasi inline serta sudut serang 10° terbukti memiliki hambatan yang sangat kecil jika dibandingkan dengan kasus lainnya.
2. Dari hasil eksperimen ini nilai performance evaluation criteria (PEC) menunjukkan PDW VGs 7,47% lebih tinggi dibandingkan DW VGs.

5. Daftar Pustaka

- [1] J. Wang, L. Zeng, T. Fu, S. Yu, and Y. He, "Effects of the position and perforation parameters of the delta winglet vortex generators on flow and heat transfer in minichannels," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 198, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108878.

-
- [2] Z. Bai *et al.*, "Bow-shaped vortex generators in finned-tube heat exchangers; ANN/GA-based hydrothermal/structural optimization," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 55, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.csite.2024.104135.
 - [3] N. Chimres, J. Kaew-on, T. Surapapwong, T. Chittiphalungsri, and S. Wongwises, "Using a spiral fin to replace a wavy fin in the condenser of an air conditioner," *International Journal of Thermofluids*, vol. 21, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100545.
 - [4] K. M. Their, T. hamad abed, K. Azeez, and M. A. Mohsin, "Thermohydraulic performance study of the effect of winglet inserts and a corrugated wall in a rectangular channel," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 52, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103707.
 - [5] L. Luo, Z. Zhao, D. Qiu, S. Wang, Z. Wang, and B. Sundén, "An experimental investigation on the thermal augmentation of internal endwall in a two-pass duct using an array of delta-winglet vortex generator pair," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 182, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122043.
 - [6] K. Srivastava and R. R. Sahoo, "Experimental and numerical study on thermal performance of new envelope and triangular vortex generators with different pitch and angle of attack," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 49, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.tsep.2024.102459.
 - [7] M. H. Aksoy, "Flow characteristics and passive flow control of circular cylinders with triangular vortex generators: An experimental investigation," *Applied Ocean Research*, vol. 142, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.apor.2023.103836.
 - [8] P. Promvonge, P. Promthaisong, and S. Skullong, "Experimental and numerical thermal performance in solar receiver heat exchanger with trapezoidal louvered winglet and wavy groove," *Solar Energy*, vol. 236, pp. 153–174, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.02.052.
 - [9] O. Heriyani, M. Djaeni, Syaiful, and A. K. Putri, "Perforated concave rectangular winglet pair vortex generators enhance the heat transfer of air flowing through heated tubes inside a channel," *Results in Engineering*, vol. 16, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100705.
 - [10] M. U. Z. Priyadi, Syaiful, and Muchammad, "Heat Transfer Enhancement in Heat Exchanger using Convex Delta Winglet Vortex Generators," *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 7, no. 6, pp. 96–100, Dec. 2022, doi: 10.24018/ejeng.2022.7.6.2920.
 - [11] Whitaker, S. (1972) '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 Journal*, 18(2), pp. 361–371. <https://doi.org/10.1002/aic.690180219>.