

Peningkatan Performa Termal Dengan Menggunakan Vortex Generators Didalam Saluran Persegi Panjang

¹Yafid Effendi, ²Ali Rosyidin, ³Bambang Setiawan

¹Universitas Muhammadiyah Tangerang, Tangerang 15118

²Universitas Muhammadiyah Tangerang, Tangerang 15118

³Universitas Muhammadiyah Jakarta, Tangerang 15419

e-mail: yafid_effendi@yahoo.com

Receive: 1-6-2024

Accepted: 12-7-2024

Abstract

Vortex generators (VGs) are an effective method for improving the thermal performance of heat exchangers. This study aims to optimize the heat transfer rate by employing VGs, where airflow passes over a heated cylinder within a rectangular duct equipped with vortex generators. An experimental approach was conducted to investigate the enhancement of heat transfer using concave delta winglet (CDW) and delta winglet (DW) VGs, compared to the baseline condition without VGs. The experiments involved variations in the angle of attack (β) at 10° , one VG pairs, and the arrangement types (in-line and staggered). The cylinder was heated with a constant power of 35 W, reaching a surface temperature of 38°C , and airflow velocities ranged from 0.4 to 2 m/s. Temperature measurements were taken at the inlet, outlet, and cylinder surface using thermocouples. The research results indicate a significant enhancement in the convective heat transfer coefficient when using vortex generators (VGs). Among the various configurations tested, the staggered concave delta winglet pair (CDW) arrangement demonstrated the highest values in terms of convective heat transfer coefficient, friction factor ratio, and performance evaluation criterion (PEC), followed by the in-line CDW, staggered delta winglet pair (DW), and in-line DW configurations. The highest convective heat transfer coefficient was observed in the staggered CDW configuration, reaching 16.02%. The friction factor ratio (f/f_0) for this configuration was 108.67%. The highest PEC value, 26.34%, was achieved with a single staggered CDW pair at a Reynolds number of $Re = 11,000$.

Keywords: Heat transfer, Nusselt number, Angle of Attack, Heat Exchanger, Vortex Generators

Abstrak

Vortex Generators (VGs) merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan kinerja termal penukar panas. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan laju perpindahan panas dengan memanfaatkan VGs, di mana aliran udara melewati silinder panas yang ditempatkan di dalam saluran persegi panjang yang dilengkapi dengan vortex generators. Pendekatan eksperimental dilakukan untuk menyelidiki peningkatan perpindahan panas dengan menggunakan jenis vortex generator concave delta winglet (CDW) dan delta winglet (DW), yang dibandingkan dengan kondisi dasar (baseline) tanpa penggunaan VGs. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan sudut serang (β) sebesar 10° , satu pasangan VGs, serta jenis susunan (in-line dan staggered). Silinder dipanaskan secara konstan dengan daya 35 W hingga mencapai suhu permukaan 38°C , sementara kecepatan aliran udara

divariasikan antara 0,4 hingga 2 m/s. Pengukuran suhu dilakukan pada bagian inlet, outlet, dan permukaan silinder menggunakan termokopel. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan pada koefisien perpindahan panas konveksi saat menggunakan VGs. Dari berbagai konfigurasi yang diuji, susunan staggered CDW menghasilkan koefisien perpindahan panas, rasio friction factor dan PEC tertinggi, diikuti oleh CDW in-line, DW staggered, dan DWP in-line. Koefisien perpindahan panas konveksi tertinggi pada CDW staggered sebesar 16,02%. Rasio friction factor (f/f_o) = 108,67% pada CDW staggered. Nilai PEC tertinggi, yaitu 26,34%, dicapai pada konfigurasi satu pasangan CDW staggered dengan bilangan Reynolds $Re = 11.000$.

Kata Kunci: Perpindahan panas, Nusselt number, Sudut serang, Heat Exchanger, Vortex Generators

PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi perpindahan panas pada penukar panas merupakan aspek krusial dalam upaya konservasi energi dan telah diimplementasikan secara luas di berbagai sektor industri, termasuk industri kimia, otomotif, dan sistem tata udara (Aslam Bhutta dkk., 2012) (Gherasim, Galanis, & Nguyen, 2011) (Hosseini-rad, Khoshvaght-Aliabadi, & Hormozi, 2019) (Khoshvaght-Aliabadi, Hormozi, & Zamzamian, 2014) Dalam sistem pendingin udara (AC), kondensor memainkan peran vital sebagai komponen utama dalam siklus termal. Salah satu pendekatan pasif yang efektif untuk meningkatkan kinerja termal kondensor adalah penggunaan vortex generator (VG). VG telah terbukti mampu mempercepat laju perpindahan panas di sisi udara kondensor (Jacobi & Shah, 1995), melalui pembangkitan aliran turbulen dan gangguan terhadap lapisan batas termal (Gautam Biswas, Chattopadhyay, & Sinha, 2012) (Gautam Biswas dkk., 2012) (Awais & Bhuiyan, 2018). Setelah VG diterapkan, mekanisme peningkatan perpindahan panas terjadi melalui pembentukan vortisitas longitudinal (LV), penciptaan pusaran aliran, penekanan lapisan batas termal, serta peningkatan transfer panas dari permukaan dinding ke aliran utama (G. Biswas, Torii, Fujii, & Nishino, 1996) (Malatesta, Souza, Liu, & Kloker, 2015). Dalam praktiknya, VG jenis delta winglet (DW) diposisikan secara strategis mengelilingi tabung kondensor, dengan konfigurasi sepuluh unit, untuk memaksimalkan efektivitas perpindahan panas. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penerapan VG dapat mengurangi wilayah wake di sekitar tabung, memfasilitasi interaksi antara fluida panas dan dingin, serta meningkatkan intensitas vortisitas aliran (Liu dkk., 2019).

Berbagai studi mengenai peningkatan performa perpindahan panas telah banyak diarahkan pada pemanfaatan beragam bentuk sirip, seperti sirip bergelombang, berlubang, strip offset, serta variasi desain lainnya. Di antara jenis-jenis tersebut, sirip bergelombang menjadi fokus utama dalam banyak penelitian karena kemampuannya yang terbukti secara signifikan dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas (Ermagan & Rafee, 2018) (Wen, Li, Wang, Zhang, & Wang, 2019). Berdasarkan hasil eksperimen dan simulasi numerik, diketahui bahwa penggunaan saluran dengan struktur bergelombang dapat menghasilkan perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan saluran konvensional, meskipun disertai peningkatan tekanan hilang (Dong, Su, Chen, & Xu, 2013) (Lin, Zhao, Lu, Wang, & Yan, 2017). Yafid et al. mengembangkan pendekatan inovatif dengan memanfaatkan delta winglet cekung berlubang serta vortex generator tipe delta winglet pada saluran berbentuk

persegi panjang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keberadaan lubang pada vortex generator cenderung menurunkan nilai bilangan Nusselt (Nu), karena efek jet yang ditimbulkan mengurangi intensitas vortisitas longitudinal, sehingga laju perpindahan panas mengalami penurunan. Meskipun demikian, konfigurasi vortex generator yang disusun secara staggered terbukti lebih efektif dibandingkan penyusunan in-line, karena mampu menghasilkan turbulensi yang lebih intens. Penerapan tiga pasang Perforated Concave Delta Winglet Pair (PCDWP) dalam susunan bertingkat secara signifikan meningkatkan kinerja termal, dengan nilai bilangan Nusselt mencapai 462 pada bilangan Reynolds sebesar 11.000 (Effendi, Prayogo, Syaiful, Djaeni, & Yohana, 2021).

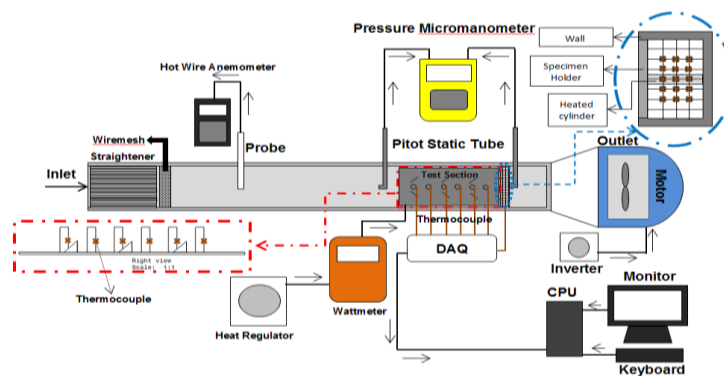
Selain itu, radius lengkung pada Perforated Concave Delta Winglet Pair (PCDWP) yang lebih besar dibandingkan dengan Perforated Delta Winglet Pair (PDWP) turut berkontribusi terhadap peningkatan vortisitas longitudinal (LV), yang pada akhirnya berdampak positif terhadap efisiensi perpindahan panas. Penelitian yang dilakukan oleh (Effendi, Taufiq, & Pratama, 2024) (Song, Tagawa, Chen, & Zhang, 2019) menelusuri karakteristik perpindahan panas dari berbagai bentuk geometri optimal vortex generator tipe cekung dan cembung pada saluran pelat dalam kondisi aliran laminar. Hasil studi menunjukkan bahwa konfigurasi vortex generator tipe cekung menghasilkan peningkatan kinerja perpindahan panas yang paling signifikan. Selanjutnya, Huang dan Chiang (Huang & Chiang, 2016) melakukan kajian terhadap desain bentuk serta penempatan optimal vortex generator tipe delta winglet pada heat sink berbasis sirip pin, guna mencapai performa pendinginan yang maksimal. Di sisi lain, analisis numerik terhadap performa termal-hidrolik pada sistem perpindahan panas tabung elips dengan sirip bergelombang halus juga telah dilakukan, dengan membandingkan berbagai tipe winglet seperti Rectangular Trapezoidal Winglet (RTW), Angle Rectangular Winglet (ARW), dan Curved Angle Rectangular Winglet (CARW) (Lotfi, Sundén, & Wang, 2016). Penelitian yang dilakukan oleh Syaiful et al. (2016) (Syaiful, Sugiri, Soetanto, & Bae, 2017) bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi geometri dan jumlah vortex generator tipe winglet baik berbentuk persegi panjang maupun persegi panjang cekung terhadap kinerja perpindahan panas konvektif. Hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa konfigurasi dengan tiga baris winglet cekung berbentuk persegi panjang memberikan performa perpindahan panas tertinggi. Pada kondisi dengan bilangan Reynolds maksimum, terjadi peningkatan signifikan pada bilangan Nusselt dan faktor transfer panas (j-factor) hingga mencapai 205%, disertai penurunan hambatan termal sebesar 67% jika dibandingkan dengan sistem referensi tanpa penggunaan vortex generator.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengungkapkan bahwa konfigurasi geometris dari vortex generator (VG) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja termal pada sistem penukar panas. Namun, hingga saat ini masih belum ditemukan studi yang secara khusus mengevaluasi peningkatan efisiensi perpindahan panas aliran udara di dalam silinder pemanas yang ditempatkan dalam saluran berbentuk persegi panjang dengan penerapan vortex generator tipe Concave Delta Winglet (CDW).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan pendekatan eksperimental guna memperoleh data empiris dari saluran udara transparan berbentuk persegi panjang. Saluran

tersebut memiliki dimensi panjang 370 cm, lebar 8 cm, tinggi 18 cm, serta ketebalan dinding sebesar 10 mm. Berbagai perangkat pendukung telah dipasang untuk menunjang proses pengujian, di antaranya adalah kipas, anemometer kawat panas, tabung pitot, mikromanometer, elemen pemanas, kompresor, laser, tabung kapiler, serta motor controller. Kecepatan aliran udara dalam saluran divariasikan dalam rentang 0,4 m/s hingga 2 m/s dan dialirkan melalui enam tabung isothermal yang masing-masing diberi daya pemanas sebesar 35 W. Untuk memastikan pengujian berlangsung secara sistematis, saluran dibagi menjadi empat bagian utama: yaitu bagian inlet, segmen lurus, zona pengujian, dan outlet. Desain skematis dari sistem pengujian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 skematik rancangan alat uji yang digunakan

Beberapa rumus yang digunakan dalam studi ini adalah:

Reynolds number (Re) :

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

ρ = massa jenis fluida dalam satuan kg/m^3 , U = kecepatan aliran udara (m/s), D = diameter hidrolis saluran (m), serta μ = viskositas dinamik ($\text{Pa}\cdot\text{s}$). Berikutnya, nilai diameter hidrolis saluran udara dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$D_h = \frac{4(ab)}{2(a+b)} \quad (2)$$

Q = laju perpindahan panas silinder ke fluida, A = luas permukaan total enam tubs dalam spesimen, serta $LMTD$ = perbedaan suhu rata-rata logaritmik. Nilai Q serta $LMTD$ diperoleh dari persamaan (3) serta (4).

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3)$$

$\dot{m}$ = laju perpindahan massa fluida, C_p = Critical Point, T_{out} = temperatur keluar fluida, serta T_{in} = temperatur fluida masuk

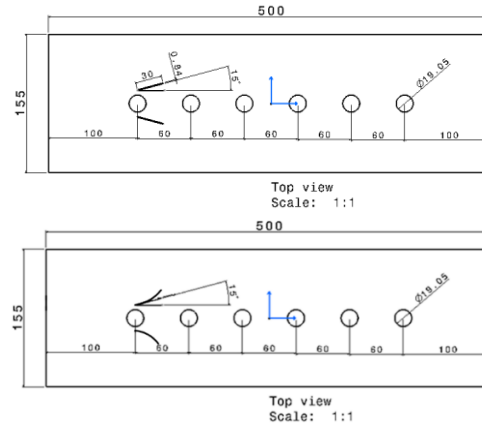
$$LMTD = \frac{(T_w - T_{out}) - (T_w - T_{in})}{\ln\left(\frac{T_w - T_{out}}{T_w - T_{in}}\right)} \quad (4)$$

Untuk (h) Persamaan (5).

$$h = \frac{Q}{A\Delta T_{LM}} \quad (5)$$

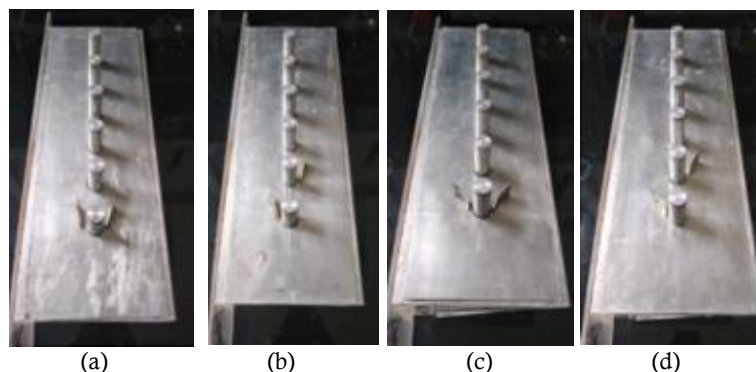
Validasi eksperimen ini telah dilakukan oleh Yafid Effendi *et al.* (Effendi dkk., 2021)

Objek percobaan pada percobaan ini adalah VG CDW dan VG DW yang dilengkapi pipa kalor. Seperti yang ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2 Menampilkan bentuk geometris dari *vortex generator* tipe *delta winglet* serta *concave delta winglet*, dengan dimensi ditunjukkan dalam satuan milimeter

VG dipakai di eksperimen ialah 1 pasang winglet delta (susunan segaris dan bertingkat) dan 1 pasang winglet delta cekung (susunan segaris dan bertingkat), Gambar 3 di bawah.

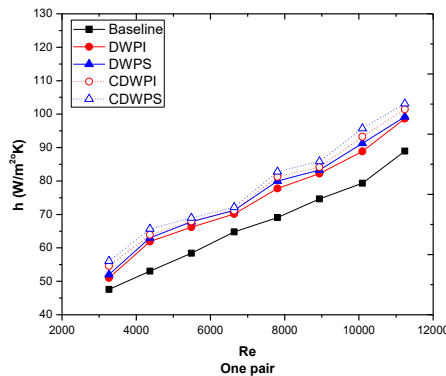


Gambar 3 memperlihatkan variasi konfigurasi spesimen uji, meliputi: (a) *delta winglet* (DW) *in-line*, (b) *DW staggered*, (c) *concave delta winglet* (CDW) *in-line*, serta (d) *CDW staggered*

HASIL DAN PEMBAHASAN

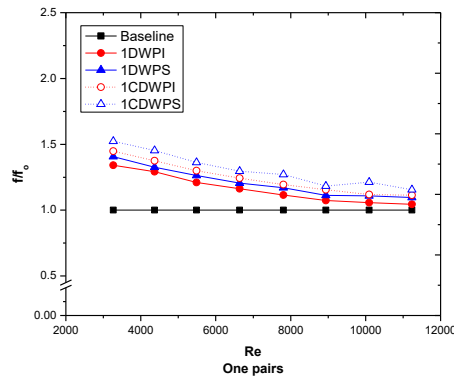
Eksperimen ini menggunakan parameter koefisien perpindahan panas konvektif (h) sebagai dasar analisis terhadap laju perpindahan panas, rasio friction factor (f/f_0) dan performance evaluation criteria (PEC) dengan mempertimbangkan variasi pada konfigurasi penempatan vortex generator (VG), yaitu susunan *in-line* dan *staggered*, tipe geometri (*concave delta winglet* dan *delta winglet*), satu pasangan VG, serta rentang bilangan

Reynolds. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bukti empiris bahwa keberadaan vortex generator memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas.



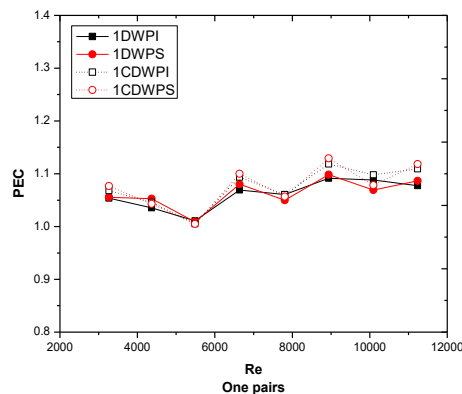
Gambar 4 Koefisien perpindahan panas konveksi beserta baseline, DWP and CDWP VGs (in-line and staggered) variasi satu pasang terhadap Reynolds numbers

Gambar 4 memperlihatkan karakteristik perpindahan panas yang dihasilkan dari penerapan satu pasang vortex generator (VG) jenis concave delta winglet pair (CDW) dan delta winglet pair (DW), yang semuanya diatur dalam konfigurasi *in-line* dan *staggered* dibandingkan dengan kondisi tanpa VG (baseline). Berdasarkan Gambar 4, dapat diamati bahwa penggunaan satu pasang VG menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan panas konvektif di seluruh rentang bilangan Reynolds, dengan nilai h secara konsisten lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa VG. Secara keseluruhan, penerapan VG tipe CDW baik dalam susunan *in-line* maupun *staggered* menunjukkan performa perpindahan panas yang lebih unggul dibandingkan tipe DW (Syaiful, Sugiri, dkk., 2017). Keunggulan ini berkaitan dengan bentuk permukaan cekung pada CDW yang menimbulkan gaya sentrifugal pada aliran fluida, menciptakan ketidakstabilan aliran dan meningkatkan vortisitas (Syaiful, Ayutasari, Soetanto, Siswantara, & Bae, 2017). Peningkatan vortisitas tersebut memperkuat proses pencampuran antara lapisan fluida panas di dekat dinding dan fluida dingin dari bagian inti aliran, yang pada akhirnya meningkatkan efektivitas perpindahan panas [21][22]. Pada bilangan Reynolds 11.000, koefisien perpindahan panas konvektif mengalami peningkatan masing-masing sebesar 10,95%, 11,56%, 14,05%, dan 16,02% ketika menggunakan konfigurasi in-line DW VG, staggered DW VG, in-line CDW VG, dan staggered CDWP VG, jika dibandingkan dengan kondisi tanpa vortex generator (model dasar). Penggunaan CDW VG menghasilkan pusaran longitudinal dengan diameter yang lebih besar dan intensitas yang lebih kuat dibandingkan dengan pusaran yang dihasilkan oleh DWP VG (Malatesta dkk., 2015).



Gambar 5 Perbandingan friction factor beserta baseline, DWP and CDWP VGs (in-line and staggered) variasi satu pasang terhadap Reynolds numbers

Gambar 5 menampilkan rasio friction factor untuk seluruh konfigurasi yang diteliti. Terlihat bahwa rasio friction factor cenderung menurun seiring dengan peningkatan bilangan Reynolds pada konfigurasi yang memanfaatkan vortex generator (Tang, Chu, Ahmed, & Zeng, 2016). Pada bilangan Reynolds yang sama, rerata rasio friction factor untuk konfigurasi DW VG in-line, DW VG staggered, CDW VG in-line, dan CDW VG staggered masing-masing meningkat sebesar 25,96%, 51,82%, 89,85%, dan 108,67% dibandingkan dengan kondisi tanpa VG, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Perbandingan ini mengindikasikan bahwa pada bilangan Reynolds yang sama, konfigurasi dengan concave delta winglet menghasilkan peningkatan rasio faktor gesek yang lebih signifikan dibandingkan konfigurasi dengan delta winglet.



Gambar 6 Performa termal DWP and CDWP VGs (in-line and staggered) variasi satu pasang terhadap Reynolds numbers

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, peningkatan perpindahan panas umumnya diiringi dengan kenaikan faktor gesek. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi kinerja peningkatan perpindahan panas secara menyeluruh. Dalam penelitian ini, *Performance Evaluation Criterion* (PEC), yang menggabungkan nilai *Nusselt number* (Nu) dan faktor gesek (f), digunakan sebagai indikator untuk menilai efisiensi perpindahan panas pada berbagai konfigurasi. Hasil perbandingan PEC ditampilkan pada Gambar 6. Kinerja termal

menunjukkan tren peningkatan seiring dengan naiknya bilangan Reynolds pada seluruh konfigurasi yang menggunakan vortex generator. Pada bilangan Reynolds 9.000, konfigurasi CDW VG staggered mencatat nilai performa termal tertinggi sebesar 26,34%, diikuti oleh CDW VG in-line sebesar 24,46%, DW VG staggered sebesar 10,87%, dan DW VG in-line sebesar 9,54% dibandingkan dengan baseline, sebagaimana terlihat pada Gambar 12. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi CDW VG, baik in-line maupun staggered, menghasilkan nilai PEC yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi DW VG. Secara keseluruhan, konfigurasi CDW VG staggered memberikan performa termal terbaik, diikuti secara berurutan oleh CDW VG in-line, DW VG staggered, dan DW VG in-line.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada LPPM Universitas Muhammadiyah Tangerang atas dukungan pendanaan yang diberikan melalui skema hibah internal, serta kepada Laboratorium Universitas Diponegoro atas izin dan fasilitas yang telah disediakan selama pelaksanaan pengumpulan data dalam penelitian ini.

SIMPULAN DAN SARAN

Efisiensi perpindahan panas pada konfigurasi vortex generator (VG) dengan susunan staggered menunjukkan performa termal yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi in-line, hal ini disebabkan oleh adanya interaksi antar aliran yang menimbulkan efek tumbukan dan meningkatkan intensitas turbulensi. Implementasi VG secara umum terbukti efektif dalam meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif dibandingkan dengan baseline. Peningkatan performa termal paling signifikan tercatat pada konfigurasi satu pasang Concave Delta Winglet Pair (CDW) dengan susunan staggered, yaitu sebesar 26,34% pada kondisi bilangan Reynolds (Re) 11.000. saran dari penelitian selanjutnya bisa dikembangkan pada penelitian vortex generators jenis CDW dan DW berlubang (*perforated*) pada sudut serang 10° .

DAFTAR PUSTAKA

- Aslam Bhutta, M. M., Hayat, N., Bashir, M. H., Khan, A. R., Ahmad, K. N., & Khan, S. (2012). CFD applications in various heat exchangers design: A review. *Applied Thermal Engineering*, 32(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.001>
- 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(March 2018), 524–545. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.007>
- Biswas, G., Torii, K., Fujii, D., & Nishino, K. (1996). Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 39(16), 3441–3451. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00398-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00398-3)
- Biswas, Gautam, Chattopadhyay, H., & Sinha, A. (2012). Augmentation of heat transfer by creation of streamwise longitudinal vortices using vortex generators. *Heat Transfer Engineering*, 33(4–5), 406–424. <https://doi.org/10.1080/01457632.2012.614150>
- Dong, J., Su, L., Chen, Q., & Xu, W. (2013). Experimental study on thermal-hydraulic performance of a wavy fin-and-flat tube aluminum heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 51(1–2), 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.09.018>

- Effendi, Y., Prayogo, A., Syaiful, Djaeni, M., & Yohana, E. (2021). Effect of perforated concave delta winglet vortex generators on heat transfer and flow resistance through the heated tubes in the channel. *Experimental Heat Transfer*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/08916152.2021.1919245>
- Effendi, Y., Taufiq, R., & Pratama, D. (2024). *Studi Eksperimental Peningkatan Perpindahan Panas dengan Menggunakan Perforated Concave Delta Winglet Vortex Generators*. 13(02), 300–307.
- Ermagan, H., & Rafee, R. (2018). Numerical investigation into the thermo-fluid performance of wavy microchannels with superhydrophobic walls. *International Journal of Thermal Sciences*, 132(June), 578–588. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.035>
- Gherasim, I., Galanis, N., & Nguyen, C. T. (2011). Heat transfer and fluid flow in a plate heat exchanger. Part II: Assessment of laminar and two-equation turbulent models. *International Journal of Thermal Sciences*, 50(8), 1499–1511. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.03.017>
- Hosseini-rad, E., Khoshvaght-Aliabadi, M., & Hormozi, F. (2019). Evaluation of heat transfer and pressure drop in a mini-channel using transverse rectangular vortex-generators with various non-uniform heights. *Applied Thermal Engineering*, 161(June), 114196. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114196>
- Huang, C. H., & Chiang, P. C. (2016). An inverse study to design the optimal shape and position for delta winglet vortex generators of pin-fin heat sinks. *International Journal of Thermal Sciences*, 109, 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.018>
- Jacobi, A. M., & Shah, R. K. (1995). Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 11(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(95\)00066-U](https://doi.org/10.1016/0894-1777(95)00066-U)
- Khoshvaght-Aliabadi, M., Hormozi, F., & Zamzaman, A. (2014). Role of channel shape on performance of plate-fin heat exchangers: Experimental assessment. *International Journal of Thermal Sciences*, 79, 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.01.004>
- Lin, L., Zhao, J., Lu, G., Wang, X. D., & Yan, W. M. (2017). Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude. *International Journal of Thermal Sciences*, 118, 423–434. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.05.013>
- Liu, Y., Ma, X., Ye, X., Chen, Y., Cheng, Y., & Lan, Z. (2019). Heat transfer enhancement of annular finned tube exchanger using vortex generators: The effect of oriented functional circumferential arrangement. *Thermal Science and Engineering Progress*, 10(April 2018), 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.12.010>
- Lotfi, B., Sundén, B., & Wang, Q. (2016). An investigation of the thermo-hydraulic performance of the smooth wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers utilizing new type vortex generators. *Applied Energy*, 162, 1282–1302. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.065>
- Malatesta, V., Souza, L. F., Liu, J. T. C., & Kloker, M. J. (2015). Heat Transfer Analysis in a Flow over Concave Wall with Primary and Secondary Instabilities. *Procedia IUTAM*, 14, 487–495. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2015.03.077>
- Song, K. W., Tagawa, T., Chen, Z. H., & 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(October 2018), 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.002>
- Syaiful, Ayutarsi, A., Soetanto, M. F., Siswantara, A. I., & Bae, M. (2017). Thermo-hydrodynamics performance analysis of fluid flow Through concave delta winglet vortex generators by Numerical simulation. *International Journal of Technology*, 7, 1276–

1285. <https://doi.org/https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i7.706>
- Syaiful, Sugiri, G., Soetanto, M. F., & Bae, M. W. (2017). Effect of concave rectangular winglet vortex generator on convection coefficient of heat transfer. *AIP Conference Proceedings*, 1788, 1–8. <https://doi.org/10.1063/1.4968278>
- Tang, L. ., Chu, W. ., Ahmed, N., & Zeng, M. (2016). A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance_read.pdf. *Applied Thermal Engineering*, 104, 74–84. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.056>
- Wen, J., Li, K., Wang, C., Zhang, X., & Wang, S. (2019). Optimization investigation on configuration parameters of sine wavy fin in plate-fin heat exchanger based on fluid structure interaction analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 131, 385–402. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.023>