

SIMULASI NUMERIK PENINGKATAN HEAT TRANSFER MENGGUNAKAN DELTA WINGLET VORTEX GENERATOR PADA SALURAN

Marcellias Nathan Prima¹, Syaiful², Shofwan Bahar²

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: nathanfoxwell@gmail.com

Abstrak

Efisiensi energi dalam sistem industri sangat bergantung pada kinerja *fin-and-tube heat exchangers* (FTHE), sehingga peningkatan kapasitas perpindahan panas menjadi fokus utama dalam upaya konservasi energi. Salah satu metode yang terbukti efektif untuk meningkatkan laju perpindahan kalor adalah penggunaan *vortex generators* (VGs), yang menciptakan pusaran aliran guna memperkuat pencampuran fluida di dalam penukar panas. Studi ini melakukan simulasi numerik untuk menganalisis kinerja *delta winglet vortex generators* (DW VGs) dan *perforated delta winglet vortex generators* (PDW VGs) dalam meningkatkan efisiensi termohidrolik. Kecepatan aliran divariasikan antara 0,4 m/s hingga 2 m/s dengan interval 0,2 m/s, serta digunakan variasi sudut serang sebesar 10° dan 15°. Evaluasi performa dilakukan menggunakan parameter *Performance Evaluation Criteria* (PEC), yang dihitung berdasarkan rasio peningkatan koefisien perpindahan panas terhadap peningkatan faktor gesekan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi DW VGs memiliki nilai PEC yang lebih tinggi dibandingkan PDW VGs, menandakan efisiensi perpindahan panas yang lebih rendah walaupun tanpa peningkatan *pressure drop* yang signifikan.

Kata kunci: *performance evaluation criteria* (pec); simulasi numerik; *vortex generators*

Abstract

The energy efficiency of industrial systems is strongly influenced by the performance of fin-and-tube heat exchangers (FTHE), making the enhancement of heat transfer capacity a key focus in energy conservation efforts. One effective method for improving heat transfer rates is the application of vortex generators (VGs), which induce vortical flows to enhance fluid mixing within the heat exchanger. This study presents a numerical simulation to evaluate the thermal-hydraulic performance of delta winglet vortex generators (DW VGs) and perforated delta winglet vortex generators (PDW VGs). The inlet flow velocity was varied from 0.4 m/s to 2.0 m/s in 0.2 m/s increments, with angle of attack (AoA) variations of 10° and 15°. Performance was assessed using the Performance Evaluation Criteria (PEC), defined as the ratio of heat transfer enhancement to friction factor penalty. Simulation results indicate that DW VGs exhibit higher PEC values compared to PDW VGs, suggesting lower heat transfer efficiency despite having minimal additional pressure loss.

Keywords: *numerical simulation; performance evaluation criteria* (pec); *vortex generators*

1. Pendahuluan

Efisiensi energi dalam sistem industri sangat bergantung pada kinerja *fin-and-tube heat exchangers* (FTHE), sehingga peningkatan kapasitas perpindahan panas menjadi fokus utama dalam upaya konservasi energi [1]. Kinerja FTHE sangat memengaruhi efisiensi energi dalam sistem industri, sehingga peningkatan kapasitas perpindahan panas menjadi fokus utama dalam konservasi energi [2]. Penukar panas memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi, mulai dari sistem HVAC, proses kimia, hingga pendinginan laser dan teknologi luar angkasa [3]. Efisiensi termal penukar panas secara langsung memengaruhi performa sistem dan konsumsi energi total [4]. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi termal tidak hanya bertujuan untuk menghemat energi, tetapi juga untuk mendukung desain sistem yang lebih ekonomis, kompak, dan mendukung miniaturisasi [5].

Teknik peningkatan perpindahan panas umumnya dibagi menjadi tiga kategori: aktif, pasif, dan hibrida [6]. Di antara ketiganya, teknik pasif banyak diterapkan karena tidak memerlukan energi tambahan, lebih ekonomis, dan mudah dalam pemeliharaan. Salah satu metode pasif yang terbukti efektif adalah penggunaan *vortex generators* (VGs), yaitu struktur kecil yang dipasang untuk memodifikasi pola aliran fluida secara strategis [7]. VGs dapat meningkatkan perpindahan panas, meskipun umumnya diikuti oleh peningkatan *pressure drop* [8]. Berbagai jenis VGs telah diteliti, termasuk longitudinal *vortex generators* (LVG), *curve rectangular* (CRVG), dan *delta winglet vortex generators* (DWVG), dengan DWVG menunjukkan kinerja optimal pada aliran laminar dan transisional dalam FTHE [9]. Mekanisme utama kerja VGs

adalah pembangkitan longitudinal vortices, yang meningkatkan pencampuran fluida antara lapisan dekat dinding dan inti aliran, memperkuat perpindahan panas konvektif [10].

DWVG menjadi subjek utama banyak penelitian karena desainnya yang kompak dan kemampuannya menghasilkan vorteks yang kuat dan stabil [11]. Meski peningkatan perpindahan panas secara konsisten tercapai, peningkatan tersebut umumnya disertai kenaikan pressure drop atau faktor gesek [12]. Oleh karena itu, banyak studi menekankan pentingnya mengevaluasi efisiensi termohidrolik, yakni keseimbangan antara peningkatan perpindahan panas dan penalti tekanan, untuk memastikan peningkatan performa tidak mengorbankan efisiensi energi [13].

Dalam konteks analisis mendalam, simulasi numerik berbasis Computational Fluid Dynamics (CFD) telah menjadi alat yang sangat penting dalam studi intensifikasi perpindahan panas. CFD memungkinkan analisis rinci terhadap perilaku aliran dan perpindahan panas kompleks yang sulit diobservasi secara eksperimen [14]. Visualisasi topologi aliran, pembentukan vorteks, dan karakteristik termal sangat penting dalam memahami efektivitas VGs dan optimalisasi desainnya [15]. Dalam praktiknya, metode Finite Volume dan algoritma SIMPLE banyak digunakan untuk menyelesaikan model CFD [16], dengan model turbulensi seperti Realizable $k-\epsilon$ dan SST $k-\omega$ yang umum dipakai. Penyesuaian model dengan production limit dan curvature correction sering dilakukan untuk meningkatkan akurasi prediksi [17, 18].

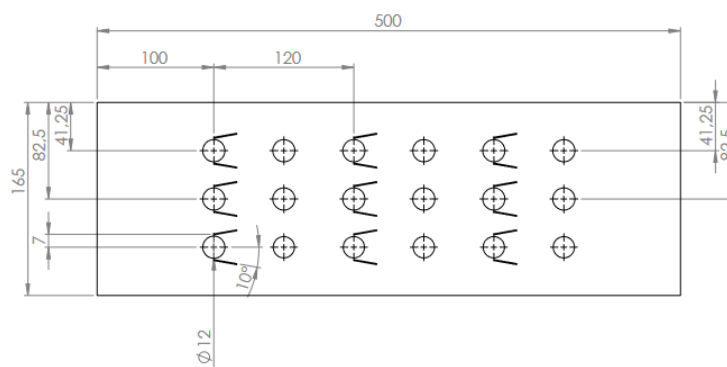
Simulasi numerik juga memberikan wawasan penting mengenai performa termohidrolik. Studi menunjukkan bahwa pembentukan vorteks dan penundaan pemisahan aliran dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas [19], serta adanya aliran sekunder di depan tabung antar baris yang memengaruhi ketebalan lapisan batas [20]. Desain VGs juga terus dimodifikasi untuk mengurangi pressure drop, misalnya dengan menggunakan VGs berlubang atau mengatur sudut serang optimal [21]. Beberapa geometri, seperti winglet delta melengkung atau berlubang yang diposisikan strategis, terbukti meningkatkan efisiensi termohidrolik [22-26].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa perpindahan panas aliran udara melalui tube bank panas yang dilengkapi dengan DWVG dan PDWVG, menggunakan variasi sudut serang 10° dan 15° . Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis pengaruh konfigurasi ini terhadap efisiensi termal dan tekanan, dengan Performance Evaluation Criteria (PEC) sebagai parameter utama evaluasi.

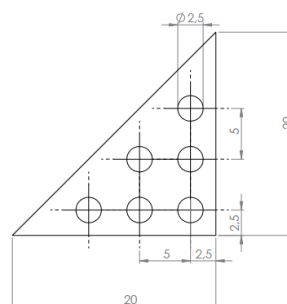
2. Metodologi Penelitian

2.1 Geometri dan Domain Komputasi

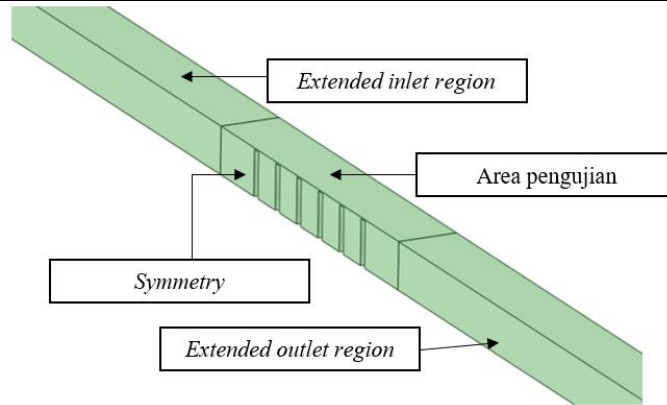
Dalam penelitian ini, digunakan delapan belas pipa panas yang disusun dalam tiga baris secara in-line dan dipasang pada pelat logam dengan ketebalan 1 mm, panjang 500 mm, serta lebar 165 mm. Masing-masing pipa memiliki diameter luar 12 mm dan tinggi 63 mm, dengan jarak antar pusat pipa sebesar 60 mm, serta jarak antar pasangan vortex generators (VGs) sebesar 120 mm. Proses pembuatan geometri dilakukan menggunakan perangkat lunak SOLIDWORKS 2022. Pengujian dilakukan untuk konfigurasi VGs in-line dan staggered dengan variasi sudut serang (angle of attack/AoA) sebesar 10° dan 15° . Geometri spesimen uji untuk susunan VGs in-line pada variasi sudut serang dapat dilihat pada Gambar 1(a) dan Gambar 1(b).



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. (a) DW VGs dengan konfigurasi inline, (b) Fin PDW VGs (c) Domain Komputasi

Domain komputasi dalam simulasi ini dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu extended inlet region, test section, dan extended outlet region, dengan geometri yang dirancang menggunakan ANSYS SpaceClaim sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1(c). Udara dialirkan melalui extended inlet sepanjang 10 meter untuk memastikan aliran mencapai kondisi fully developed sebelum masuk ke area pengujian. Test section berupa saluran persegi panjang berukuran 500 mm × 165 mm × 65 mm, yang berisi 18 tabung panas sebagai objek utama studi. Setelah melewati test section, udara mengalir ke extended outlet sepanjang 10 meter untuk mencegah terjadinya aliran balik (backflow). Untuk meningkatkan efisiensi komputasi, pada model dengan susunan tabung inline digunakan symmetry boundary condition, yang berfungsi mengurangi jumlah mesh dan mempercepat waktu simulasi tanpa mengorbankan akurasi hasil

2.2 Definisi Parameter

Parameter-parameter yang digunakan untuk mengevaluasi performa termohidrolik dalam penelitian ini meliputi antara lain koefisien perpindahan panas (h), yang dihitung menggunakan persamaan (1).

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

Dimana A_t , ΔT_{LMTD} , Q berturut-turut adalah luas tabung, *logarithmic mean temperature difference*, dan laju perpindahan panas. Sedangkan, laju perpindahan panas (Q) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut (2).

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

Dimana \dot{m} dan C_p adalah mass flow rate dan *specific heat*. Nilai ΔT_{LMTD} diperoleh dari persamaan (3).

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

Pressure drop diperoleh dengan mengukur tekanan pada dua titik, yaitu inlet dan outlet, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (4).

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

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

$$PEC = \frac{\left(\frac{j}{j_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)} \quad (5)$$

Dimana j dan f_0 adalah Colburn factor dan friction factor. Nilai Colburn factor dapat dicari dengan persamaan (6). Sedangkan persamaan (7) untuk menghitung friction factor.

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

$$f = \frac{\Delta P(D/L)}{\rho U^2/2} \quad (7)$$

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

2.3 Simulasi Numerik

Simulasi numerik dalam penelitian ini dijalankan menggunakan ANSYS Fluent 2022, dengan pendekatan aliran incompressible yang dimodelkan menggunakan metode RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) berbasis Generalized $k-\omega$ turbulence model. Untuk penyelesaian numerik, digunakan algoritma SIMPLE dan skema second-order pada spatial discretization guna memastikan akurasi hasil. Konvergensi simulasi ditentukan berdasarkan residual, di mana nilai residual untuk kontinuitas dan momentum harus kurang dari 10^{-5} , sedangkan untuk energi, kurang dari 10^{-8} .

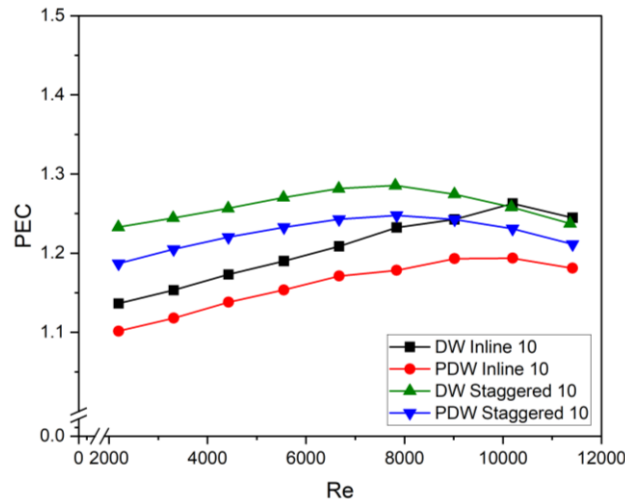
2.4 Validasi

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik yang diperoleh bersifat akurat, andal, dan dapat dipercaya. Langkah ini penting guna menjamin bahwa kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi memiliki relevansi ilmiah dan dapat dipertanggungjawabkan. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimental, yang telah diperoleh sebelumnya.

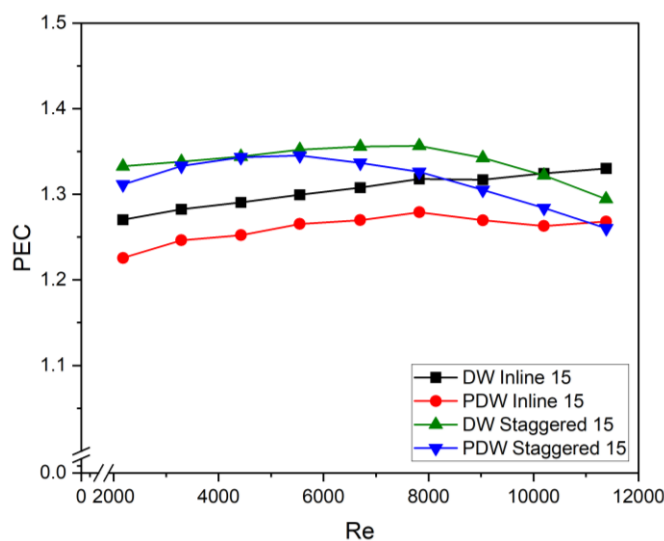
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Performance Evaluation Criteria

Gambar 3 dan Gambar 4 memperlihatkan grafik hubungan antara bilangan Reynolds (Re) dan nilai Performance Evaluation Criterion (PEC) untuk berbagai konfigurasi delta winglet vortex generators (DWVG) dan perforated delta winglet vortex generators (PDWVG), masing-masing pada konfigurasi inline dan staggered, serta variasi sudut serang (AoA) 10° dan 15° . PEC merupakan parameter integral yang mengevaluasi efisiensi termal-hidrolik sistem berdasarkan perbandingan antara peningkatan perpindahan panas dan kenaikan pressure drop akibat penambahan vortex generators.



Gambar 2. Variasi Performance Evaluation Criterion (PEC) terhadap Reynolds number untuk berbagai konfigurasi vortex generator pada sudut serang 10° .



Gambar 3. Variasi Performance Evaluation Criterion (PEC) terhadap Reynolds number untuk berbagai konfigurasi vortex generator pada sudut serang 15° .

Nilai Performance Evaluation Criterion (PEC) ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 untuk berbagai konfigurasi vortex generator. Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa seluruh konfigurasi menghasilkan nilai PEC lebih besar dari satu, yang menandakan bahwa peningkatan perpindahan panas akibat penggunaan vortex generator lebih dominan dibandingkan dengan tambahan kerugian tekanan yang ditimbulkan. Konfigurasi staggered secara konsisten menunjukkan nilai PEC yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi inline, baik pada sudut serang 10° maupun 15° , yang mengindikasikan kinerja termo-hidrolik yang lebih baik. Selain itu, DW VGs memperlihatkan performa yang lebih unggul dibandingkan PDW VGs. Peningkatan sudut serang dari 10° menjadi 15° juga cenderung memberikan kenaikan nilai PEC, terutama pada konfigurasi staggered, seiring dengan terbentuknya longitudinal vortices yang lebih kuat dan seragam di sepanjang saluran aliran.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi performa termohidrolik sistem dengan menggunakan vortex generators (VGs), melalui variasi dalam konfigurasi susunan (in-line dan staggered), bilangan Reynolds, serta sudut serang. Berdasarkan hasil yang diperoleh, beberapa kesimpulan utama dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Semua konfigurasi vortex generator menghasilkan $PEC > 1$, menunjukkan peningkatan perpindahan panas lebih dominan dibanding kerugian tekanan.
2. Konfigurasi staggered memberikan kinerja termo-hidrolik lebih baik dibanding konfigurasi inline.
3. DW VGs menunjukkan performa lebih tinggi dibanding PDW VGs, dan peningkatan sudut serang dari 10° ke 15° umumnya meningkatkan nilai PEC.

5. Daftar Pustaka

- [1] K. Torii, K. M. Kwak, and K. Nishino, "Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 45, 2002.
- [2] A. Lemouedda, M. Breuer, E. Franz, T. Botsch, and A. Delgado, "Optimization of the angle of attack of delta-winglet vortex generators in a plate-fin-and-tube heat exchanger," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 53, no. 23–24, pp. 5386–5399, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.017.
- [3] S. Skullong, P. Promvong, C. Thianpong, and N. Jayranaiwachira, "Thermal behaviors in a round tube equipped with quadruple perforated-delta-winglet pairs," *Appl Therm Eng*, vol. 115, pp. 229–243, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.12.082.
- [4] L. Yang, M. Xu, J. Wang, L. Song, and J. Wang, "Experimental and numerical analysis of a demister with vortex generators," *Chin J Chem Eng*, vol. 33, pp. 83–95, 2021, doi: 10.1016/j.cjche.2020.07.045.
- [5] S. Y. Yoo, D. S. Park, M. H. Chung, and S. Y. Lee, "Heat transfer enhancement for fin-tube heat exchanger using vortex generators," *KSME International Journal*, vol. 16, no. 1, pp. 109–115, 2002, doi: 10.1007/BF03185161.
- [6] S. B. Bhajankar and U. S. Wankhede, "A comprehensive review of heat transfer enhancement by passive inserts," *International Journal of Applied Engineering Research*, vol. 10, no. 6, pp. 13863–13876, 2015.
- [7] M. Dogan and A. Abir İgci, "An experimental comparison of delta winglet and novel type vortex generators for heat transfer enhancement in a rectangular channel and flow visualization with stereoscopic PIV," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 164, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120592.
- [8] L. Chai and S. A. Tassou, "A review of airside heat transfer augmentation with vortex generators on heat transfer surface," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 10, 2018, doi: 10.3390/en11102737.
- [9] M. Awais and A. A. Bhuiyan, "Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities," Mar. 01, 2018, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.tsep.2018.02.007.
- [10] M. F. B. Raihan, M. T. Al-Asadi, and H. M. Thompson, "Management of conjugate heat transfer using various arrangements of cylindrical vortex generators in micro-channels," *Appl Therm Eng*, vol. 182, no. September 2020, p. 116097, 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116097.
- [11] J. Xie and H. M. Lee, "Flow and heat transfer performances of directly printed curved-rectangular vortex generators in a compact fin-tube heat exchanger," *Appl Therm Eng*, vol. 180, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115830.
- [12] K. W. Song, Z. P. Xi, M. Su, L. C. Wang, X. Wu, and L. B. Wang, "Effect of geometric size of curved delta winglet vortex generators and tube pitch on heat transfer characteristics of fin-tube heat exchanger," *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 82, pp. 8–18, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.11.002.
- [13] Y. Luo, G. Li, N. S. Bennett, Z. Luo, A. Munir, and M. S. Islam, "Heat Transfer Enhancement in Heat Exchangers by Longitudinal Vortex Generators: A Review of Numerical and Experimental Approaches," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 11, pp. 1–49, 2025, doi: 10.3390/en18112896.

- [14] Syaiful, H. Nabilah, M. S. K. T. Suryo Utomo, A. Suprihanto, and M. F. Soetanto, “Numerical simulation of heat transfer enhancement from tubes surface to airflow using concave delta winglet vortex generators,” *Results in Engineering*, vol. 16, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100710.
- [15] A. Gupta, A. Roy, S. Gupta, and M. Gupta, “Numerical investigation towards implementation of punched winglet as vortex generator for performance improvement of a fin-and-tube heat exchanger,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 149, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119171.
- [16] W. Jedsadaratanachai and A. Boonloi, “Effects of blockage ratio and pitch ratio on thermal performance in a square channel with 30° double V-baffles,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 4, pp. 118–128, Nov. 2014, doi: 10.1016/j.csite.2014.08.002.
- [17] M. Ozsen and S. Yildiz, “NUMERICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF DELTA VORTEX GENERATOR LOCATED UPSTREAM OF IN-LINE TUBE BUNDLE,” vol. 28, no. 4, pp. 2891–2903, 2024, doi: <https://doi.org/10.2298/TSCI231010287O>.
- [18] L. O. Salviano, D. J. Dezan, and J. I. Yanagihara, “Thermal-hydraulic performance optimization of inline and staggered fin-tube compact heat exchangers applying longitudinal vortex generators Thermal-hydraulic performance optimization of inline and staggered fin-tube compact heat exchangers applying longitudinal vortex generators,” *Appl Therm Eng*, vol. 95, no. March 2018, pp. 311–329, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.069.
- [19] D. C. Pal and A. Majumder, “NUMERICAL STUDY OF FIN-TUBE TYPE HEAT EXCHANGER WITH DELTA WINGLETS,” no. March, 2016, doi: 10.5098/hmt.7.1.
- [20] P. S. B. Zdanski, D. Pauli, and F. A. L. Dauner, “Effects of delta winglet vortex generators on flow of air over in-line tube bank : A new empirical correlation for heat transfer prediction ☆,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 67, pp. 89–96, 2015, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.07.010.
- [21] F. Naoumis, H. Linardos, G. Mihalakakou, and J. A. Paravantis, “Heat Transfer in U-Tubes : Simulating the Performance of Delta Winglet Pairs in Laminar and Turbulent Flows,” 2025.
- [22] Y. Chen, M. Fiebig, and N. K. Mitra, “Heat transfer enhancement of a finned oval tube with punched longitudinal vortex generators in-line,” *Int J Heat Mass Transf*, vol. 41, no. 24, pp. 4151–4166, 1998, doi: 10.1016/S0017-9310(98)00130-6.
- [23] K. W. Song, K. Sun, X. J. Lu, Q. F. Gao, Q. Z. Hou, and B. D. Gu, “Effect of wavy delta winglet vortex generators on heat transfer performance of a fin-and-tube heat exchanger,” *Int J Heat Fluid Flow*, vol. 108, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109485.
- [24] X. Wu, Z. M. Lin, S. Liu, M. Su, L. C. Wang, and L. B. Wang, “Experimental study on the effects of fin pitches and tube diameters on the heat transfer and fluid flow characteristics of a fin punched with curved delta-winglet vortex generators,” *Appl Therm Eng*, vol. 119, pp. 560–572, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.072.
- [25] Y. Effendi, A. Prayogo, Syaiful, M. Djaeni, and E. Yohana, “Effect of perforated concave delta winglet vortex generators on heat transfer and flow resistance through the heated tubes in the channel,” *Experimental Heat Transfer*, vol. 35, no. 5, pp. 553–576, 2022, doi: 10.1080/08916152.2021.1919245.
- [26] A. T. Wijayanta, T. Istanto, K. Kariya, and A. Miyara, “Heat transfer enhancement of internal flow by inserting punched delta winglet vortex generators with various attack angles,” *Exp Therm Fluid Sci*, vol. 87, pp. 141–148, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.002.