

PENINGKATAN PERFORMA PERPINDAHAN PANAS ALIRAN UDARA MENGGUNAKAN *RECTANGULAR WINGLET VORTEX GENERATOR*

*Naufal Danadyaksa Kurniawan¹, Syaiful², Shofwan Bahar²

¹Mahasiswa Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275, Telp +62247460059

E-mail: naufal.undip777@gmail.com

Abstrak

Perpindahan panas pada pemindah kalor sirip dan tabung merupakan penelitian yang sudah banyak dilakukan. Penelitian ini banyak dilakukan karena menyangkut dengan keberjalanan dunia industri di mana komponen *heat exchanger* memiliki peran yang sangat penting. Berbagai usaha dilakukan untuk mengoptimalkan perpindahan panas pada FTHE. Mulai dari menambahkan sirip pada tabung dan menggunakan sirip bergelombang untuk mengganggu lapisan udara. Namun *vortex generator* atau VG menjadi komponen yang sekarang banyak dikenal untuk meningkatkan perpindahan panas pada FTHE. Jurnal ini membahas penggunaan *rectangular winglet vortex generator* (RWVG) serta pengaruhnya dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas. VG yang digunakan memiliki variasi sudut serang 20°, 15°, dan 10° dengan variasi kecepatan pengujian 0,4 m/s hingga 2 m/s dengan interval 0,2 m/s. Hasil eksperimen membuktikan bahwa spesimen jenis zig-zag atau *staggered* memiliki hasil terbaik diikuti oleh spesimen *inline*. Nilai PEC atau *Performance Evaluation Criteria* menjadi persamaan yang digunakan. Persamaan ini membandingkan nilai perpindahan panas dengan nilai faktor gesekan pada spesimen pengujian.

Kata Kunci: eksperimen; perpindahan panas; *vortex generator*

Abstract

Heat transfer in finned and tube heat exchangers has been extensively researched. This research has been conducted extensively because it relates to the industrial world, where heat exchanger components play a very important role. Various efforts have been made to optimise heat transfer in FTHE. These range from adding fins to the tubes to using corrugated fins to disrupt the air layer. However, vortex generators or VGs are now widely recognised as components that improve heat transfer in FTHEs. This journal discusses the use of rectangular winglet vortex generators (RWVG) and their effect on improving heat transfer efficiency. The VG used had attack angle variations of 20°, 15°, and 10° with test speed variations of 0.4 m/s to 2 m/s with intervals of 0.2 m/s. The results of the experiment proved that zig-zag or staggered specimens had the best results, followed by inline specimens. The PEC or Performance Evaluation Criteria value is used as the equation. This equation compares the heat transfer value with the friction factor value on the test specimen.

Keywords: experiments; heat transfer; *vortex generator*

1. Pendahuluan

Pemindah panas sirip polos dan tabung atau FTHE (*Fin and Tube Heat Exchanger*) adalah alat termal yang digunakan pada banyak bidang seperti pemanasan, pengeringan, sistem pengkondisian udara, dan sistem refrigrasi [1]. Pengubah panas sirip dan tabung atau FTHE dapat bekerja memindahkan panas antara dua jenis fluida tanpa harus mencampur kedua fluida tersebut.[2]. Rendahnya efisiensi dan konsumsi daya tinggi pada FTHE menjadi masalah umum namun merupakan masalah rumit melibatkan banyak parameter untuk memperbaikinya [3]. Adanya penemuan fin atau sirip menjadi awal mula signifikan untuk menaikkan efektifitas perpindahan panasnya [4]. Fin lurus dan fin zig-zag memberikan peningkatan berarti untuk nilai perpindahan panas [5].

VG (*Vortex Generator*) merupakan metode pasif untuk meningkatkan nilai perpindahan panas. Umumnya VG merupakan benda solid dengan berbagai macam bentuk [6]. VG banyak digunakan dengan tujuan untuk memberikan separasi pada lapisan batas atau *boundary layer* [7], [8]. Umumnya, VG digunakan untuk menciptakan aliran yang bertujuan mencampurkan suatu aliran dengan aliran lainnya [9]. Selain itu, VG bekerja dengan meningkatkan perpindahan panas namun juga memberikan peningkatan *pressure drop* (*P drop*) atau kerugian tekanan [10]. Penggunaan VG itu sendiri dapat menyebabkan terjadinya kenaikan nilai Nu (*Nusselt number*) [11].

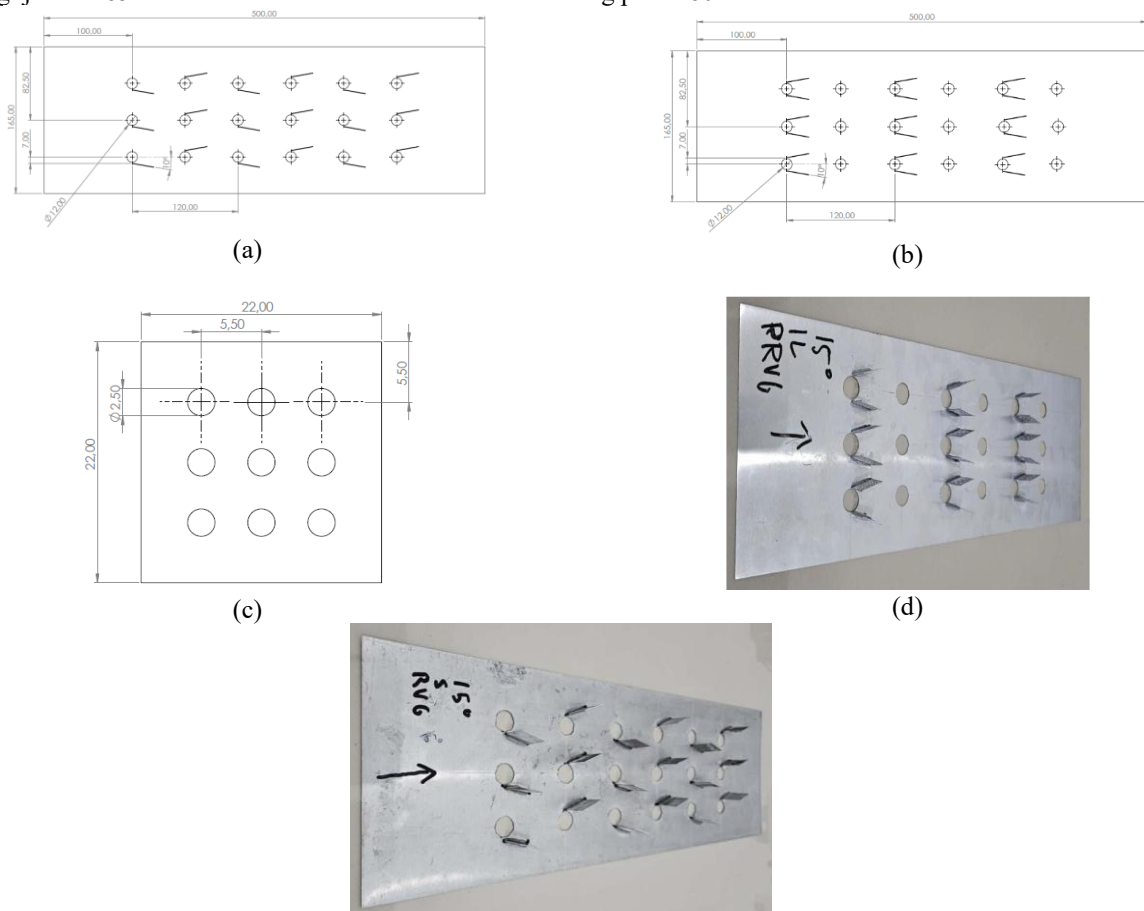
Peningkatan perpindahan panas pada FTHE dikarenakan adanya *longitudinal vortex* (LV). LV juga dinyatakan kuat dan efektif untuk meningkatkan performa termal pada *mini channel* [12], [13]. Selain V, terdapat juga *transversal vortex* (TV) yang bekerja pada pola aliran dua dimensi dengan arah tegak lurus terhadap arah dari aliran utama fluida [14]. VG pada suatu *channel* dapat menipiskan lapisan batas pada dinding dan melakukan pencampuran udara terhadap daerah aliran utama [15]. Indikator performa kunci pada VG adalah *Nusselt number* (Nu) dan *friction factor* (f) di mana kedua persamaan tersebut merepresentasikan nilai PEC [16]. Koefisien perpindahan panas dan nilai faktor gesekan akan meningkat seiring dengan meningkatnya sudut serang VG [17].

Pengujian dari VG sejajar atau *inline* membuktikan bahwa performa termalnya di bawah jenis spesimen zig-zag atau *staggered* [18]. Kerugian tekanan yang terjadi pada pengujian VG dapat dikurangi secara drastis dengan menambahkan lubang pada VG atau *perforated* [19]. Efek dari lubang pada VG memiliki peran pada termal hidrolisnya dengan pengurangan gesekan aliran. Diameter lubang dan lokasi lubang juga punya efek krusial pada aliran fluida dan sistem perpindahan panasnya [20]. Lubang pada permukaan VG mengurangi gaya hambat dan gaya gesek namun lemah juga dalam memindahkan panas [21]. Penerapan VG juga dapat dikombinasikan dengan komponen lain seperti sirip bergelombang pada pemanas air tenaga matahari [22]. Pada pengujian RWVG atau *rectangular winglet* VG memberikan hasil bahwa RWVG cembung memiliki performa tertinggi diikuti RWVG datar dan paling rendah adalah RWVG *concave* [23].

2. Metode Eksperimen

2.1 Spesimen Uji Eksperimen VG

Spesimen uji pada eksperimen ini menggunakan pat aluminium dengan ukuran panjang 500 mm dan lebar 165 mm. Pada plat tersebut ditempelkan aluminium kotak dengan ketebalan 1 mm. Aluminium kotak yang ditempelkan berperan sebagai RWVG. Pada spesimen VG terdapat 18 lubang yang digunakan untuk tempat terpasang dan masuknya *tube* pemanas. Jajaran tabungnya disusun pada susunan *inline* atau sejajar dengan susunan 3 tube secara vertical dan 6 tube secara horizontal. Sudut serang yang diuji pada eksperimen ini ada 3 variasi yaitu 10°, 15°, dan 20°. Panjang tabung panas pada pengujian ini 65 mm dan diameter 12 mm. Jarak antar tabung panas 60 mm.



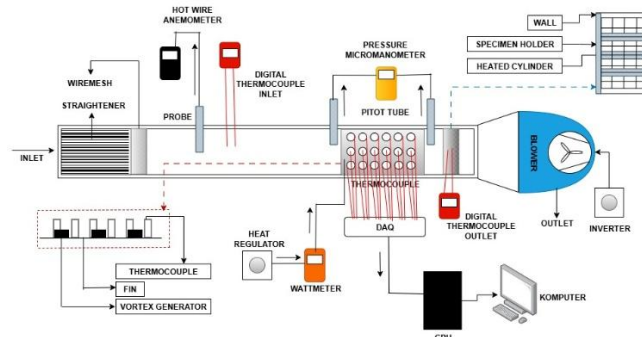
Gambar 1. (a) RWVG susunan *staggered* atau zig-zag, (b) RWVG susunan *inline* atau sejajar, (c) Ukuran spesimen VG, (d) Spesimen VG susunan *inline* (sejajar), (e) Spesimen VG susunan *staggered* (zig-zag)

Eksperimen VG ini dilakukan pada saluran udara kaca memanjang dengan ukuran ketebalan kaca 0,5 cm, panjang 371 cm, lebar 8 cm, dan tinggi saluran udara 17 cm. Saluran udara ini memiliki *inlet* atau tempat masuk udara pada ujung depan dan pada ujung belakang terdapat *outlet* di dekat *blower* sebagai tempat keluar udara. Pada saluran udara terdapat *tube* untuk pengujian VG sebagai tempat memasang spesimen VG.



Gambar 2. Saluran Udara Pengujian VG

2.2 Skema Pengujian Eksperimen VG



Gambar 3. Skema Alat Pengujian VG

Pada pengujian VG ini media *fluida* dibantu dengan udara yang bergerak. Udara bergerak masuk melalui *inlet* melewati saluran uji dan akan keluar di bagian *outlet*. Udara yang bergerak dihasilkan oleh putaran *blower* yang menghisap udara. Kecepatan dari udara ini ditentukan oleh putaran *blower* yang diatur oleh *inverter*. Udara akan melalui *wiremesh* dan *straightener* pada awal saluran udara untuk menyeragamkan aliran udara.

Penggunaan *anemometer* bertujuan untuk mengukur kecepatan aliran udara. Pengukuran perbedaan tekanan dilakukan menggunakan *micromanometer* dan tabung pitot, dilakukan sebelum dan sesudah udara melewati spesimen uji. Dalam saluran udara terdapat *tube* berupa *heated cylinder* dengan daya pemanas sebesar 40 Watt. Suhu pada *tube* diukur oleh *thermocouple* yang akan ditampilkan pada layar komputer. Pada *inlet* dan *outlet* terdapat *digital thermocouple* untuk mengukur suhu udara yang lewat.

2.3 Parameter Pengujian dan Persamaan

Persamaan pada parameter uji untuk mengetahui performa total VG adalah persamaan PEC. Persamaan PEC merupakan persamaan perbandingan yang dapat dilihat sebagai berikut.

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (1)$$

Persamaan Nu atau *Nusselt number* dapat dilihat pada persamaan 2 dan nilai *friction factor* atau faktor gesekan dapat dilihat pada persamaan 3 berikut.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (2)$$

Persamaan h merupakan nilai koefisien konveksi dengan menggunakan persamaan LMTD atau *logarithmic mean temperature difference*. Sedangkan D merupakan nilai diameter hidrolis.

$$f = \frac{\Delta P}{\left(\frac{\rho U^2}{2}\right) \left(\frac{l}{D}\right)} \quad (3)$$

Persamaan h dapat dilihat pada persamaan 4 sebagai berikut di mana nilai q adalah persamaan yang diperoleh dari persamaan laju perpindahan panas. Nilai A adalah luas penampang saluran udara.

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T_{lm}} \quad (4)$$

Persamaan untuk LMTD dapat dilihat pada persamaan 5 sebagai berikut. ΔT_0 merupakan selisih antara suhu permukaan dan suhu udara keluar. Nilai ΔT_i merupakan selisih antara nilai suhu permukaan dan suhu udara masuk.

$$LMTD = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_i}{\ln \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_i} \right)} \quad (5)$$

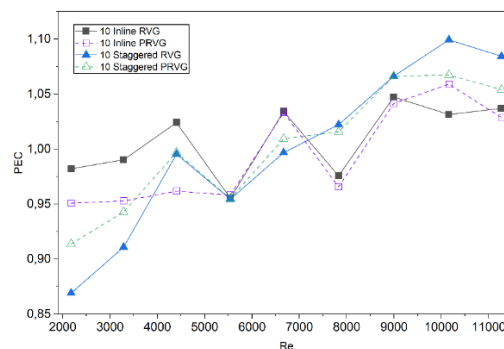
3. Pembahasan Hasil Pengujian

Nilai persamaan PEC atau *performance evaluation criteria* merupakan persamaan yang secara total dapat melihat nilai performa spesimen uji VG. PEC membandingkan nilai Nu spesimen dengan Nu *baseline* dan membandingkan nilai faktor gesekan spesimen dengan faktor gesekan *baseline*. Nilai faktor gesekan ini dipengaruhi oleh besarnya kecepatan udara dan perbedaan tekanan udara sebelum dan sesudah melewati spesimen uji. Pada gambar di bawah ini terdapat 3 gambar yang menunjukkan nilai PEC terhadap nilai Re pada spesimen dengan sudut serang 10°, 15°, dan 20°.

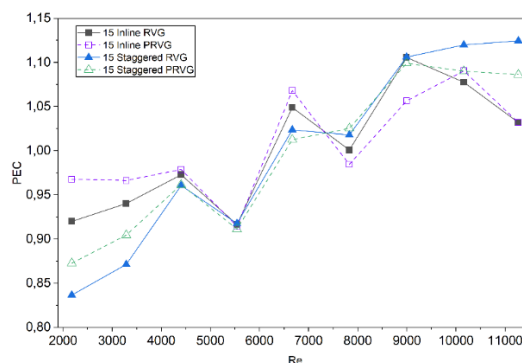
Secara garis besar, spesimen dengan konfigurasi zig-zag atau *staggered* memiliki performa paling baik meskipun kerugian tekanannya juga paling tinggi. Hal ini dikarenakan nilai perpindahan panas yang dihasilkan juga paling tinggi di antara spesimen lainnya. Sedangkan spesimen sejajar atau *inline* nilai kerugian tekanannya tidak sebesar *stagger* namun nilai kemampuan perpindahan panasnya tidak sebaik konfigurasi zig-zag.

Spesimen dengan lubang pada VG atau *perforate* memiliki performa di bawah spesimen *plain* atau VG polos tanpa lubang. Nilai faktor gesekan dan kerugian tekanan pada VG berlubang lebih rendah dikarenakan adanya aliran pada lubang atau biasa disebut dengan *jet flow*. Namun, karena adanya lubang pada VG, kemampuan perpindahan panasnya tidak sebaik spesimen VG polos.

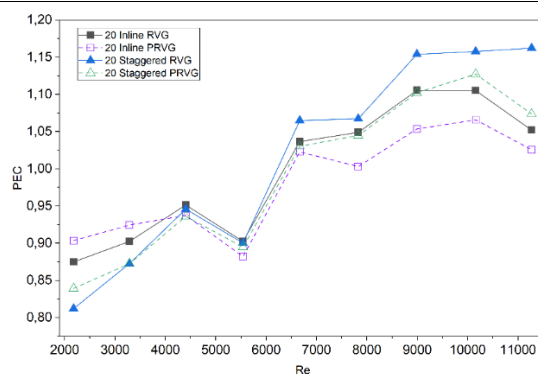
Sudut serang juga memengaruhi performa total atau PEC suatu spesimen. Nilai PEC spesimen dengan sudut serang dari yang terbaik adalah 20°, 15°, dan yang terakhir 10°. Semakin besar sudut serang, semakin baik kemampuan perpindahan panasnya namun juga semakin besar kerugian tekanan dan faktor gesekannya.



Gambar 4. Nilai PEC pada Spesimen Sudut Serang 10°



Gambar 5. Nilai PEC pada Spesimen Sudut Serang 15°



Gambar 6. Nilai PEC pada Spesimen Sudut Serang 20°

Pada ketiga gambar perbandingan nilai PEC dapat dilihat pada seluruh sudut serang, spesimen *staggered* RVG memiliki nilai PEC tertinggi diikuti oleh spesimen *staggered* PRVG. Nilai PEC pada spesimen *inline* berada di bawah spesimen *staggered* PRVG. Begitu pula dengan spesimen *inline* PRVG performanya di bawah *inline* RVG. Nilai PEC mengalami kecenderungan semakin naik dengan naiknya nilai Re. Apabila terdapat kenaikan dan penurunan drastis pada grafik PEC hal tersebut dikarenakan perbedaan perbandingan yang besar atau kecil antara nilai Nu pada spesimen dengan nilai Nu *baseline* dan nilai faktor gesekan *baseline* dengan faktor gesekan pada spesimen.

4. Kesimpulan

Pengujian perpindahan panas dengan bantuan RWVG dilakukan dengan beberapa variasi pengujian di antaranya adalah susunan VG (sejajar dan zig-zag), VG *plain* dan VG *perforate* (berlubang), dan variasi sudut serang. Kesimpulan dari pengujian ini adalah sebagai berikut.

1. Seluruh variasi spesimen memiliki tendensi naik pada PEC yang berarti semakin naik nilai Re, maka semakin baik kemampuan perpindahan panasnya dibandingkan kerugian tekanan.
2. Konfigurasi *staggered* atau zig-zag memberikan performa paling baik jika dibandingkan dengan performa konfigurasi sejajar atau *inline*.
3. Sudut serang 20° memberikan performa terbaik, disusul oleh spesimen dengan sudut serang 15° dan yang terakhir adalah sudut serang 10°.
4. VG yang diberikan lubang atau *perforate* memiliki performa lebih rendah dari VG polos, namun memiliki keunggulan yaitu *pressure drop* yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan VG polos.

5. Daftar Pustaka

- [1] L. Nguyen and A. Quoc, "The effect of geometrical parameters on thermohydraulic characteristics of plain fin-and-flat tube heat exchangers : A CFD and Taguchi approach," vol. 29, no. July, 2025.
- [2] A. Alshayji, M. Al-bataineh, and N. F. Aljuwayhel, "Numerical simulation and topology optimization of fin-and-tube heat exchangers for enhanced performance," vol. 67, no. May, 2025.
- [3] H. Liu, P. Wang, X. Zhang, Z. Tang, L. Wan, and W. Zhao, "Optimization study of heat exchange capacity of elliptical finned tube heat exchanger (EFTHE) based on Taguchi method," vol. 446, no. December 2024, 2026.
- [4] F. Wang *et al.*, "Performance assessment of aluminum slitted finned tube heat exchangers with small tube diameters," vol. 180, no. September, pp. 437–452, 2025.
- [5] S. Ali, H. Liu, H. Eddine, Z. Wang, A. Belaadi, and A. Alhushaybari, "Investigation on enhancing thermal energy storage performance of a phase change material in triplex tube heat exchangers with novel fins configuration," vol. 167, no. June, 2025.
- [6] A. Tanougast and R. Bessaih, "Results in Physics Comparative study of different vortex generator designs in corrugated channel for turbulent heat transfer enhancement," vol. 77, no. September, 2025.
- [7] Y. Gong *et al.*, "International Journal of Multiphase Flow Discrete phase coupling method based on vortex core excitation in cavitation induced by vortex generators," vol. 194, no. September 2025, 2026.
- [8] R. Huang, Z. Wang, J. Chang, D. Wang, and Z. Hong, "The control mechanism of micro-vortex generators on streamwise vortex-shock train coupling interference," vol. 163, no. December 2024, 2025.
- [9] S. Zheng *et al.*, "The application of bionic vortex generator on the duct of a pump-jet propulsor and mechanism for its flow control," vol. 341, no. September, 2025.
- [10] L. Yu, X. Wu, M. Song, and K. Chen, "International Journal of Heat and Mass Transfer Hot spot temperature optimization of micro-channel heat sinks enabled by designing vortex generators and realizing optimal flow pattern," vol. 247, no. May, 2025.

- [11] N. Ahmadi, S. Rostami, and A. Damya, "Results in Engineering Smart design of conical vortex generators for heat transfer enhancement : A synergy of CFD and Bio-inspired optimization," vol. 27, no. May, 2025.
- [12] A. Arora, P. M. V Subbarao, and R. S. Agarwal, "Development of parametric space for the vortex generator location for improving thermal compactness of an existing inline fin and tube heat exchanger," vol. 98, pp. 727–742, 2016.
- [13] Z. Feng, P. Jiang, S. Zheng, Q. Zhang, Z. Chen, and F. Guo, "Experimental and numerical investigations on the effects of insertion-type longitudinal vortex generators on flow and heat transfer characteristics in square minichannels," vol. 278, no. May, 2023.
- [14] L. Xu, J. Li, K. Sun, L. Xi, J. Gao, and Y. Li, "Heat analysis and optimal design of fin-and-tube heat exchanger with X-truss vortex generators," vol. 152, 2024.
- [15] J. Li, Z. Han, W. Liu, and Z. Xu, "The local particulate fouling characteristics of curved rectangular vortex generators in a pulsating flow channel," vol. 158, no. July, 2024.
- [16] Z. Bai *et al.*, "Case Studies in Thermal Engineering Bow-shaped vortex generators in finned-tube heat exchangers ; ANN / GA-based hydrothermal / structural optimization," vol. 55, no. February, 2024.
- [17] 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," vol. 95, pp. 311–329, 2016.
- [18] E. Salamatbakhsh, "Hydrothermal performance of a wavy minichannel heatsink with longitudinal vortex generators," vol. 50, no. January, 2024.
- [19] C. Huang and L. Liu, "Case Studies in Thermal Engineering Optimal position and perforated radius of punched vortex generators for heat sink," vol. 32, no. February, 2022.
- [20] "Enhancing heat transfer with a hybrid vortex generator combining delta wing and winglet designs : A numerical study using the GEKO turbulence model," vol. 258, no. September 2024, 2025.
- [21] R. Borrajo, A. Menéndez, and D. Sacasas, "International Journal of Heat and Mass Transfer Influence of the punched holes on thermohydraulic performance and flow pattern of rectangular channels with a pair of perforated vortex generators," vol. 184, 2022.
- [22] G. Wu, J. Xu, H. Wang, and W. Yin, "Optimized design of multiple vortex generator rows to enhance thermo-hydraulic performance in fully developed forced convection channel," vol. 157, no. June, 2024.
- [23] Z. Yang, J. Gu, X. Luo, Z. Qin, and S. Zhou, "Progress in Nuclear Energy An RSM approach to optimize the thermal performance of novel type vortex generators," vol. 167, no. August 2023, 2024.