

Pemanfaatan Panas Buang Pendingin Udara untuk Proses Penguapan Air pada Sistem Desalinasi Berbasis *Vortex Generator*

Genta Prastanadira & Dan Mugisidi

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka

Alamat: Jalan Tanah Merdeka No. 6, Kp. Rambutan, Ps. Rebo, Jakarta Timur. Telp.(021)840094 Fax. (021)87782739

E-mail: gentaprastanadira@gmail.com, Corresponding author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstrak

Krisis air bersih akibat perubahan iklim dan pertumbuhan populasi mendorong pengembangan teknologi desalinasi yang efisien dan berkelanjutan. Salah satu alternatifnya adalah pemanfaatan panas buang dari sistem pendingin udara sebagai sumber energi termal untuk proses penguapan air. Udara panas kondensor sistem pendingin udara dapat dimanfaatkan kembali dalam proses desalinasi, terutama jika dikombinasikan dengan vortex generator untuk meningkatkan perpindahan panas melalui aliran turbulen. Kajian ini bertujuan meninjau berbagai penelitian mengenai pengaruh vortex generator terhadap peningkatan proses penguapan pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap publikasi ilmiah yang membahas karakteristik aliran, distribusi suhu, efisiensi termal, dan laju penguapan air. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa penerapan vortex generator mampu meningkatkan laju penguapan dibandingkan sistem konvensional. Kajian ini menjadi dasar pengembangan sistem desalinasi hemat energi dengan potensi luas bagi penyediaan air bersih.

Kata Kunci: desalinasi, panas buang AC, vortex generator, penguapan air, efisiensi energi

Abstract

The clean water crisis caused by climate change and population growth has driven the development of efficient and sustainable desalination technologies. One alternative is to utilize waste heat from air conditioning systems as a thermal energy source for water evaporation processes. Hot air from air conditioning system condensers can be reused in the desalination process, especially when combined with vortex generators to increase heat transfer through turbulent flow. This study aims to review various studies on the effect of vortex generators on increasing the evaporation process in air conditioning waste heat-based desalination systems. The method used is a literature study of scientific publications discussing flow characteristics, temperature distribution, thermal efficiency, and water evaporation rate. The results of the review show that the application of vortex generators can increase the evaporation rate compared to conventional systems. This study provides the basis for the development of energy-efficient desalination systems with broad potential for clean water supply.

Keywords: desalination, air conditioning waste heat, vortex generator, water evaporation, energy efficiency

1 PENDAHULUAN

Krisis air bersih merupakan salah satu permasalahan global yang semakin mendesak akibat perubahan iklim dan pertumbuhan populasi yang pesat. Keterbatasan sumber air tawar membuat teknologi desalinasi menjadi solusi penting untuk menyediakan air bersih bagi masyarakat. Namun, proses desalinasi konvensional seperti distilasi termal dan *reverse osmosis* masih menghadapi kendala utama berupa tingginya konsumsi energi [1]. Oleh karena itu, diperlukan inovasi yang mampu menekan kebutuhan energi sekaligus meningkatkan efisiensi proses desalinasi.

Salah satu solusi yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan panas buang dari sistem pendingin udara (*air conditioner*) sebagai sumber energi termal. Panas dari udara keluar kondensor yang selama ini terbuang dapat dimanfaatkan untuk proses penguapan air laut, sehingga meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan [2]. Metode ini termasuk dalam kategori *waste heat recovery desalination system*, yang dinilai ramah lingkungan dan hemat biaya karena tidak memerlukan tambahan energi signifikan dari sumber eksternal [3].

Agar panas buang dapat dimanfaatkan secara optimal, diperlukan peningkatan efisiensi perpindahan panas antara udara panas kondensor dan

media penguapan. Salah satu pendekatan efektif yang telah banyak diteliti adalah penggunaan *vortex generator* (VG). *Vortex generator* merupakan elemen pengganggu aliran yang ditempatkan di saluran fluida untuk menciptakan pusaran (*vortex*) dan meningkatkan turbulensi. Dengan peningkatan turbulensi tersebut, lapisan batas termal menjadi lebih tipis sehingga koefisien perpindahan panas meningkat secara signifikan [4].

Penelitian oleh Syaiful *et al.* menunjukkan bahwa penggunaan *vortex generator* pada saluran udara berpemanas mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas hingga 42 % dibandingkan sistem tanpa VG [5]. Studi lain oleh Rambhad *et al.* juga menemukan bahwa pemasangan *vortex generator* pada aliran turbulen di pipa dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 30 % [6]. Dalam konteks desalinasi, Vane *et al.* mengembangkan teknologi *vortex-enhanced evaporation* untuk pengolahan air garam pekat (*brine*), yang menunjukkan peningkatan efisiensi termal dan laju penguapan air [2]. Selain itu, penelitian oleh Nurkholid *et al.* pada sistem pendingin udara yang dimodifikasi menjadi unit desalinasi menunjukkan bahwa penerapan *vortex generator* dapat meningkatkan laju penguapan dan efisiensi energi secara signifikan [7].

Dengan demikian, penerapan *vortex generator* pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara menjadi strategi potensial untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mempercepat proses penguapan air. Kajian ini bertujuan untuk meninjau berbagai penelitian mengenai pengaruh *vortex generator* terhadap karakteristik aliran, distribusi suhu, dan laju penguapan air, guna mendukung pengembangan sistem desalinasi yang hemat energi dan berkelanjutan di masa depan.

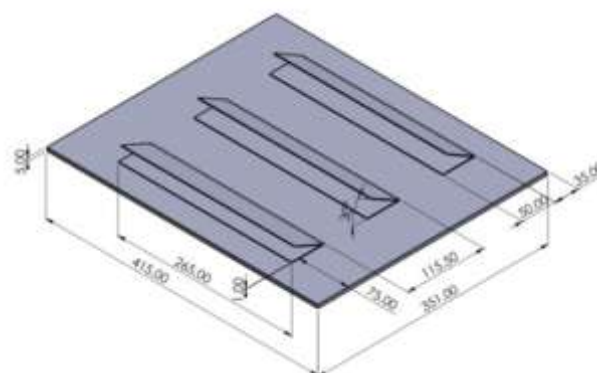
2 CONNECTED VORTEX (CV)

Connected Vortex (CV) merupakan jenis *vortex generator* yang menghasilkan pusaran longitudinal secara berkesinambungan sepanjang aliran fluida. Elemen penghasil pusaran ini biasanya berupa *winglet strip*, *convex-strip*, atau pelat longitudinal yang terhubung satu sama lain. Mekanisme CV memungkinkan aliran udara panas bercampur lebih merata dengan lapisan udara di atas permukaan air, sehingga mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas dan mempercepat laju penguapan [8], [9].

Menurut Nurkholid *et al.* (2024), penerapan *vortex generator* tipe *connected* dalam sistem desalinasi berbasis pendingin udara (AC) dapat

meningkatkan distribusi temperatur secara lebih homogen pada ruang evaporasi. Dalam penelitiannya, konfigurasi CV menghasilkan peningkatan laju penguapan hingga sekitar 17 % dibandingkan sistem tanpa VG. Pusaran kontinu yang terbentuk di sepanjang aliran udara menjaga kontak termal antara udara panas dan permukaan air, sehingga efisiensi penguapan meningkat signifikan [10].

Hasil tersebut diperkuat oleh penelitian Kusuma (2024) yang meneliti pengaruh jumlah *convex-strip vortex generator* pada *heat exchanger*. Ia menemukan bahwa peningkatan jumlah elemen longitudinal meningkatkan nilai *nusselt number*, namun disertai kenaikan *pressure drop* yang perlu diperhatikan untuk menjaga efisiensi sistem [9]. Effendi (2024) menambahkan bahwa variasi bentuk dan sudut serang VG sangat berpengaruh terhadap performa termal; desain dengan sudut 20°–25° dianggap paling stabil untuk menghasilkan *vortex* terhubung yang kuat [10].



Gambar 1 *Connected Vortex (CV)* [7]

Sementara itu, Effendi & Rosyidin (2020) menunjukkan bahwa penerapan VG pada aliran melewati *heated tube* dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas secara signifikan. Mereka menekankan bahwa jarak antar elemen dan konfigurasi geometris yang tidak tepat dapat menimbulkan interaksi pusaran yang saling mengganggu, menurunkan stabilitas CV, dan mengurangi efisiensi perpindahan panas. Oleh karena itu, penentuan jarak optimum antar elemen VG sangat penting agar pusaran longitudinal yang terbentuk dapat bertahan hingga mencapai zona penguapan [11].

Suryo (2021) menambahkan bahwa variasi aspek rasio pada VG juga memengaruhi performa termal. Aspek rasio yang terlalu besar menimbulkan *secondary flow* yang tidak stabil, sedangkan rasio yang terlalu kecil menghasilkan pusaran lemah. Kombinasi desain yang seimbang diperlukan untuk menjaga kestabilan aliran CV [12].

Secara praktis, CV cocok digunakan pada sistem desalinasi dengan saluran udara yang relatif panjang, karena memungkinkan pusaran berkembang sempurna sebelum memasuki ruang penguapan. Dengan demikian, *Connected Vortex* (CV) terbukti efektif dalam meningkatkan proses perpindahan panas dan laju penguapan, khususnya pada sistem desalinasi yang memanfaatkan panas buang dari AC atau sumber energi rendah lainnya. CV juga menawarkan stabilitas pusaran yang lebih baik dibandingkan tipe terpisah (SV), meskipun tetap memerlukan kompromi terhadap kenaikan kehilangan tekanan [8]–[12].

3 SEPARATED VORTEX (SV)

Separated Vortex (SV) merupakan jenis *vortex generator* yang menghasilkan pusaran longitudinal yang terpisah dari permukaan generator. Berbeda dengan *Connected Vortex* (CV) yang pusarannya tetap menempel pada permukaan, SV menghasilkan *vortex* yang terlepas dan bergerak bebas di dalam aliran fluida. Karakteristik ini memberikan keunggulan dalam menciptakan turbulensi yang lebih intens pada zona tertentu di sepanjang saluran aliran [13][14].

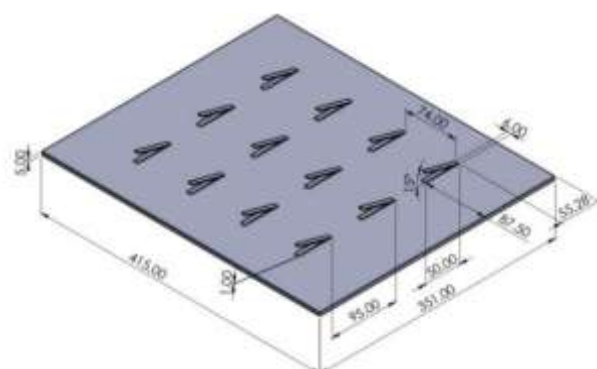
Menurut Maulana *et al.* (2024), penggunaan *delta winglet vortex generator* dengan konfigurasi yang memungkinkan pemisahan *vortex* dapat meningkatkan perpindahan panas secara signifikan. Studi eksperimen menunjukkan bahwa penggunaan *Concave Delta Winglet Vortex Generator* (CDWVG) dengan berbagai aspek rasio mampu menghasilkan *separated longitudinal vortex* yang efektif dalam meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi. Pemisahan *vortex* dari permukaan generator memungkinkan pusaran untuk penetrasi lebih dalam ke dalam aliran utama dan *wake region* di belakang tube [14].

Penelitian terbaru oleh Effendi *et al.* (2024) menunjukkan bahwa konfigurasi *vortex generator* dengan susunan *staggered* menghasilkan *separated vortex* yang lebih efektif dibandingkan susunan *in-line*. Pada bilangan Reynolds 11.000, penggunaan *Concave Delta Winglet* (CDW) dalam susunan *staggered* menghasilkan koefisien perpindahan panas konveksi tertinggi dengan peningkatan sebesar 16,02% dibandingkan baseline. *Separated vortex*

yang dihasilkan dari konfigurasi ini memiliki diameter yang lebih besar dan intensitas yang lebih kuat, sehingga mampu meningkatkan pencampuran fluida panas dan dingin secara lebih efektif di sepanjang saluran [10].

Dalam hal *pressure drop*, *separated vortex* cenderung menghasilkan hambatan aliran yang lebih tinggi dibandingkan dengan *connected vortex*. Penelitian oleh Baihaqi *et al.* (2023) menunjukkan bahwa *Perforated Concave Delta Winglet* (PCDW) dengan tiga pasang VG dan aspek rasio 3 menghasilkan peningkatan laju perpindahan panas hingga 54,8% lebih tinggi dari baseline, namun juga disertai dengan penurunan *pressure drop* sebesar 48% dibandingkan dengan CDW tanpa lubang. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi geometri seperti penambahan lubang (*perforated*) dapat mengurangi *pressure drop* yang dihasilkan oleh *separated vortex*, sehingga meningkatkan nilai *Performance Evaluation Criterion* (PEC) [15].

Secara praktis, *separated vortex* cocok diaplikasikan pada sistem *heat exchanger* yang membutuhkan peningkatan perpindahan panas yang signifikan dan tidak terlalu sensitif terhadap peningkatan *pressure drop*. Berbeda dengan *connected vortex* yang lebih efektif untuk aliran dengan hambatan rendah, *separated vortex* memberikan keunggulan dalam menciptakan zona pencampuran yang lebih luas dan menembus lebih dalam ke dalam *wake region*, sehingga meningkatkan efisiensi perpindahan panas di area yang biasanya mengalami stagnasi aliran. Optimasi parameter seperti sudut serang, aspek rasio, dan jumlah baris VG menjadi kunci dalam aplikasi *separated vortex* pada sistem desalinasi dan penukar kalor lainnya [10][13][14].



Gambar 2 Separated Vortex (SV) [7]

4 SWIRL FLOW / HELICAL VORTEX

Swirl Flow atau *Helical Vortex* (SF) merupakan salah satu metode peningkatan perpindahan panas yang memanfaatkan aliran fluida berputar membentuk pola spiral sepanjang sumbu saluran. Fenomena ini terbentuk melalui pemasangan elemen pengarah aliran seperti *twisted tape*, *conical insert*, atau *helical baffle* yang menyebabkan fluida bergerak melingkar sambil maju. Dalam konteks sistem desalinasi air laut, konfigurasi *swirl* ini berfungsi untuk meningkatkan turbulensi dan mempercepat proses perpindahan panas pada zona penguapan [16], [17].

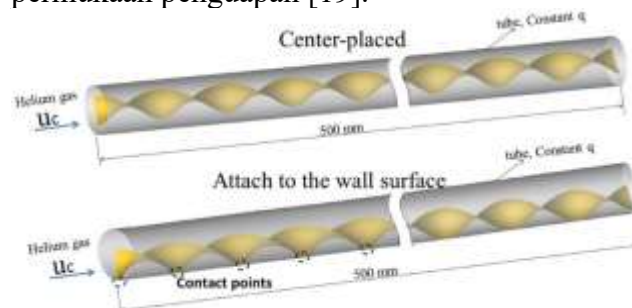
Menurut Kalyankar (2021), pola aliran spiral mampu memperkecil ketebalan lapisan batas termal di permukaan fluida, sehingga memudahkan panas berpindah dari udara panas ke permukaan air laut. Peningkatan intensitas turbulensi akibat gerakan heliks memperluas area kontak antara fluida panas dan air, sehingga laju penguapan meningkat secara signifikan [16].

Penelitian Dehankar (2022) juga memperkuat temuan tersebut, dengan meneliti kinerja *twist tape insert* sebagai penghasil *swirl flow* pada sistem *heat exchanger*. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan elemen *swirl* dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas tanpa memberikan peningkatan signifikan pada *pressure drop*. Kondisi ini menjadikan *swirl flow ideal* untuk diterapkan dalam sistem desalinasi bertekanan rendah, karena mampu mempercepat proses evaporasi tanpa menimbulkan hambatan besar pada aliran udara panas [17].

Selain itu, studi oleh Kapse (2024) menunjukkan bahwa penerapan *conical wire coil insert* menghasilkan *helical vortex* dengan stabilitas tinggi dan mampu memperbaiki distribusi panas secara merata di sepanjang saluran. Penelitian ini melaporkan bahwa pada bilangan Reynolds 11.000, efisiensi perpindahan panas meningkat hingga 27%, dengan *pressure drop* yang relatif stabil. Temuan ini penting dalam aplikasi sistem desalinasi berbasis *waste heat recovery*, karena memungkinkan peningkatan laju penguapan tanpa kehilangan energi yang besar [18].

Sementara itu, Marzouk et al. (2024) dalam studi numerik dan eksperimental pada *double-tube helical coil exchanger* melaporkan

bahwa konfigurasi *swirl* mampu meningkatkan *local heat transfer coefficient* secara signifikan. Aliran spiral menghasilkan distribusi temperatur yang lebih seragam dan mengurangi zona stagnasi di sekitar permukaan dinding saluran. Efek ini membantu proses evaporasi air laut menjadi lebih efisien, karena setiap lapisan udara panas selalu bersirkulasi aktif di sekitar permukaan penguapan [19].



Gambar 3 Swirl Flow / Helical Vortex [51]

5 PERFORATED WINGLET (MICRO-VORTEX GENERATOR)

Perforated Winglet atau *micro-vortex generator* merupakan modifikasi desain *vortex generator* dengan menambahkan lubang (*perforations*) pada permukaan winglet untuk mengoptimalkan perpindahan panas pada sistem evaporasi air. Konsep ini mengurangi *pressure drop* sambil mempertahankan intensitas vortex yang diperlukan untuk meningkatkan laju penguapan [19][20][21].

Nghaimesh dan Jabbar (2024) menunjukkan bahwa *curved delta winglet* dengan lubang (CDWH) meningkatkan koefisien perpindahan panas hingga 6,4% dibandingkan winglet tanpa lubang pada Re 12.000, yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi penguapan dengan *thermal enhancement factor* 35,3% lebih tinggi pada Re 18.000 [19]. Dalam konteks evaporator, peningkatan perpindahan panas ini mempercepat proses penguapan air dengan konsumsi energi yang lebih efisien.

Saini et al. (2023) menemukan bahwa *curved delta winglet vortex generator* dengan 6 lubang meningkatkan bilangan nusselt sebesar 75,25% pada Re 400 dan 40,10% pada Re 2000, dengan *friction factor* berkurang 8,1%, menunjukkan potensi besar untuk aplikasi sistem desalinasi yang membutuhkan perpindahan panas tinggi dengan hambatan aliran minimal

[20]. Penelitian Saini et al. (2023) pada *curved trapezoidal winglet* menunjukkan peningkatan *heat transfer performance factor* sebesar 30,96%, yang berarti lebih banyak energi panas yang ditransfer ke air untuk proses evaporasi [21].

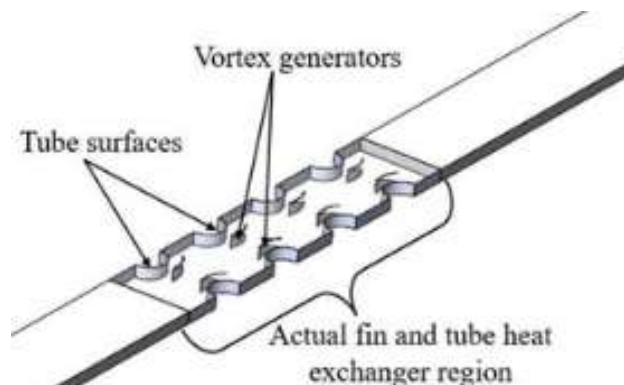
Wang et al. (2024) menganalisis posisi dan parameter perforasi pada *delta winglet* dalam *minichannel*, menemukan peningkatan Nu sebesar 68-257% dengan TEF maksimum 1,43, konfigurasi ini sangat relevan untuk evaporator kompak dalam sistem desalinasi skala kecil [22]. Wang et al. (2024) menunjukkan *curved rectangular winglet* dengan *rectangular perforation* meningkatkan TEF hingga 26%, yang berarti efisiensi perpindahan panas untuk penguapan air meningkat signifikan [23].

Mekanisme kerja *perforated winglet* dalam sistem evaporasi melibatkan aliran jet yang menembus lubang untuk membersihkan zona stagnasi, meningkatkan pencampuran fluida panas dengan air yang akan diuapkan, dan mengurangi *pressure drop* yang dapat menghambat sirkulasi aliran dalam evaporator [19][24]. Wang et al. (2024) menekankan bahwa jumlah lubang optimal meningkatkan distribusi panas yang lebih merata pada permukaan evaporasi, menghasilkan laju penguapan yang lebih tinggi [25].

Ali et al. (2023) menggunakan optimasi untuk *morphing vortex generators*, menunjukkan desain optimal dapat mengurangi *pressure drop* hingga 39%, yang sangat penting untuk sistem desalinasi yang efisien energi [26]. Gonul dan Okbaz (2023) menganalisis *rectangular vortex generators*, menyimpulkan bahwa perforasi efektif dalam meningkatkan perpindahan panas untuk aplikasi *thermal desalination* [27]. Saini dan Shah (2024) mengevaluasi *curved wavy delta winglet* dengan *circular perforations* pada *finned tube heat exchanger*, menunjukkan peningkatan performa yang signifikan untuk aplikasi evaporator dalam sistem desalinasi berbasis thermal [28].

Secara keseluruhan, *perforated winglet* menawarkan solusi efektif untuk meningkatkan laju penguapan air dalam sistem desalinasi dengan minimalisasi konsumsi energi pompa. Parameter kritis seperti jumlah, diameter, dan posisi lubang harus dioptimalkan untuk mencapai perpindahan panas maksimal yang

dibutuhkan dalam proses evaporasi air laut menjadi air tawar [19], [20], [21], [22], [23], [24].



Gambar 4 Perforated Winglet [52]

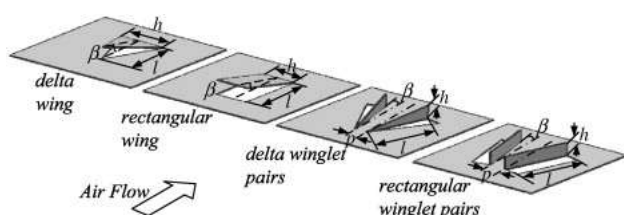
6 LONGITUDINAL VORTEX GENERATORS (LVG)

Longitudinal Vortex Generator (LVG) merupakan salah satu metode peningkatan perpindahan panas pasif yang paling efektif dalam *heat exchanger modern*. LVG berfungsi menghasilkan pusaran *longitudinal (streamwise vortices)* yang berputar mengelilingi sumbu searah dengan arah aliran utama fluida. Pusaran *longitudinal* ini mampu mendisrupsi pertumbuhan lapisan batas termal, meningkatkan pencampuran fluida antara daerah panas dan dingin, serta mengurangi *wake region* di belakang *tube* [29][30][31]. Berbeda dengan *transverse vortex generators*, LVG terbukti lebih efisien karena pusaran longitudinal dapat bertahan lebih lama di sepanjang saluran aliran dan memberikan peningkatan perpindahan panas yang lebih signifikan dengan penalti *pressure drop* yang lebih rendah [32][33].

Mekanisme utama peningkatan perpindahan panas oleh LVG adalah melalui tiga mode *enhancement*: (1) *developing boundary layer* – penipisan lapisan batas laminar di dekat dinding, (2) *swirl effect* – gerakan memutar dari pusaran *longitudinal* yang meningkatkan transfer konvektif, dan (3) *flow destabilization* – destabilisasi aliran yang meningkatkan turbulensi tiga dimensi [34], [35]. Pusaran *longitudinal* membawa fluida dengan momentum tinggi dari daerah inti aliran menuju daerah dekat dinding, sekaligus membawa fluida panas dari dekat dinding menuju inti aliran, sehingga terjadi pencampuran intensif dan peningkatan perpindahan panas yang signifikan [36], [37].

LVG memiliki empat konfigurasi dasar yang umum digunakan: (a) *delta wing*, (b) *rectangular wing*, (c) *delta winglet pair*, dan (d) *rectangular*

winglet pair [34], [38], [39]. Delta wing berbentuk segitiga yang memanjang dari *leading edge* hingga *trailing edge*. Penelitian Lei *et al.* (2017) menunjukkan bahwa *delta wing* memberikan efektivitas perpindahan panas yang sangat baik, namun menghasilkan *drag* yang lebih besar karena luas permukaan yang lebih besar [40]. Chung dan Wu (2024) dalam studinya tentang *Ocean Thermal Energy Conversion* menemukan bahwa kombinasi *rectangular*, *triangular*, dan *trapezoidal* LVG pada *heat exchanger* mampu menghasilkan pusaran *longitudinal* yang efektif untuk meningkatkan performa termal, dengan *trapezoidal* LVG menunjukkan keseimbangan terbaik antara peningkatan perpindahan panas dan *pressure drop* [41].



Gambar 5 Longitudinal Vortex Generators (LVG) [53]

Rectangular wing memberikan area kontak yang lebih besar dengan aliran. Studi oleh Ke *et al.* (2021) menunjukkan bahwa novel *delta winglet pair vortex generator* dengan konfigurasi yang dimodifikasi dapat meningkatkan pencampuran fluida di region inti aliran dan dekat dinding [36]. Chen *et al.* (2020) menyimpulkan bahwa *delta winglet pair* (DWP) dalam konfigurasi *common flow-down* memberikan performa termal yang lebih baik dengan *nusselt number* yang lebih tinggi pada rentang Reynolds number 200-1000 [42].

Delta winglet pair (DWP) merupakan konfigurasi LVG yang paling banyak diteliti karena kemampuannya menghasilkan pusaran *longitudinal* intensif dengan *pressure drop* yang relatif lebih rendah. DWP terdiri dari dua buah *delta winglet* yang dipasang berpasangan dengan konfigurasi *common flow-down* (CFD) atau *common flow-up* (CFU) [33][43]. Batista *et al.* (2022) menemukan bahwa *delta winglet* dengan sudut serang 30° memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan *heat transfer* dan *pressure drop* [43]. Effendi (2024) menunjukkan bahwa *concave delta winglet* (CDW) dalam susunan *staggered* menghasilkan koefisien perpindahan panas konveksi tertinggi dengan peningkatan sebesar 16,02% pada Reynolds number 11.000 [10].

Modifikasi geometri pada DWP telah banyak diteliti untuk meningkatkan performa termal. Baihaqi *et al.* (2023) menemukan bahwa *perforated concave*

delta winglet (PCDW) dengan tiga pasang VG dan aspek rasio 3 menghasilkan peningkatan laju perpindahan panas hingga 54,8% lebih tinggi dari *baseline*, dengan penurunan *pressure drop* sebesar 48% [15]. Syaiful *et al.* (2021) menemukan bahwa *concave delta winglet* tanpa lubang menghasilkan *thermal enhancement factor* tertinggi sekitar 1,42 pada Reynolds number 9000, dengan peningkatan *heat transfer* yang lebih baik dibandingkan dengan *flat delta winglet* [44]. Syaiful *et al.* (2022) dalam studinya tentang *heat transfer enhancement* menggunakan *convex delta winglet vortex generators* menemukan bahwa konfigurasi VG yang dioptimalkan mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi secara signifikan dengan penalti *pressure drop* yang terkontrol [45].

Rectangular winglet pair (RWP) memiliki bentuk persegi panjang dan dipasang berpasangan pada permukaan fin. Chen *et al.* (2020) meneliti performa termo-hidrolik dari berbagai bentuk *winglet* dan menemukan bahwa DWP dalam konfigurasi *common flow-down* memberikan performa terbaik dengan peningkatan *nusselt number* yang signifikan [42]. Jain *et al.* (2023) meneliti penggunaan *delta winglet* dan *circular protrusion* sebagai *vortex generator* pada *battery thermal management system*, dan menemukan bahwa sudut serang 30° memberikan performa optimal dengan keseimbangan terbaik antara *heat transfer* dan *pressure drop* [46].

Dua konfigurasi LVG yang paling umum adalah *common flow-down* (CFD) dan *common flow-up* (CFU). Pada konfigurasi CFD, jarak transversal antara *leading edges* lebih kecil dari jarak antara *trailing edges*, sehingga menghasilkan *down-wash* di antara kedua *winglet* dan *up-wash* di bagian luar [43], [47]. Batista *et al.* (2022) menunjukkan bahwa konfigurasi *common flow-up* dengan *delta winglet* pada posisi *downstream* menghasilkan peningkatan *heat transfer* yang lebih baik, dengan peningkatan *nusselt number* mencapai 25-40% tergantung pada sudut serang [43].

Performa LVG sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter geometri dan operasional, antara lain: sudut serang, aspek rasio, jumlah baris VG, posisi dan susunan VG, serta bilangan Reynolds aliran [34], [36], [44]. Kusuma *et al.* (2024) menemukan bahwa fin dengan 24 *convex-strips* menunjukkan laju perpindahan panas tertinggi sebesar 58,45% dibandingkan dengan *plain fin* [9]. Song *et al.* (2024) melakukan studi parametrik terhadap *machine learning analysis* pada *delta wing vortex generators* dan menemukan bahwa Reynolds number tinggi (antara 8160-9800) dan sudut serang tinggi ($\geq 47,5^\circ$) menghasilkan *nusselt number* tertinggi [48].

Aplikasi LVG telah berkembang luas dalam berbagai jenis *heat exchanger*, termasuk *fin-and-tube heat exchanger*, *plate-fin heat exchanger*, *microchannel heat exchanger*, *battery thermal management system*, dan *ocean thermal energy conversion* [41], [46], [49]. Lu *et al.* (2024) menunjukkan bahwa penggunaan LVG pada *parabolic trough solar collector* mampu menginduksi pusaran *longitudinal* yang efektif, mengurangi ketebalan *thermal boundary layer* dan meningkatkan efisiensi perpindahan panas pada rentang Reynolds number 10.000-35.000 [49]. Jain *et al.* (2023) menunjukkan bahwa penggunaan VG pada *battery thermal management system* mampu mengurangi temperatur maksimum baterai dan meningkatkan uniformitas distribusi temperatur [46]. Perkembangan terkini menunjukkan penggunaan kombinasi LVG dengan teknik enhancement lainnya. Song *et al.* (2017) menemukan bahwa kombinasi *dimple* dengan *delta winglet vortex generator* pada *solar receiver* menghasilkan *flow impingement* yang meningkatkan perpindahan panas secara signifikan [50]. Chung dan Wu (2024) mengusulkan konsep penggunaan LVG pada *thermoelectric generator-integrated heat exchanger* untuk aplikasi *Ocean Thermal Energy Conversion*, dan hasil penelitian menunjukkan bahwa optimasi sudut inklinasi LVG mampu meningkatkan net output power dan efisiensi konversi termoelektrik secara signifikan [41].

Secara keseluruhan, LVG merupakan teknologi *passive heat transfer enhancement* yang sangat efektif dan ekonomis. *Delta winglet pair* dengan modifikasi *concave* dan *perforation* menunjukkan performa termo-hidrolik terbaik dengan peningkatan perpindahan panas yang signifikan (hingga 54,8%) dan *pressure drop* yang dapat dikendalikan. Parameter desain seperti sudut serang, aspek rasio, jumlah baris, dan konfigurasi aliran memiliki pengaruh kritis terhadap performa LVG dan harus dioptimasi sesuai dengan kondisi operasional dan geometri *heat exchanger* yang digunakan.

7 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur terhadap berbagai jenis *vortex generator* (VG) yang diterapkan pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara, dapat disimpulkan bahwa penerapan *vortex generator* secara umum mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan laju penguapan air laut dibandingkan sistem konvensional, dan dapat disimpulkan:

1. Jenis *Connected Vortex* (CV) terbukti meningkatkan distribusi temperatur di ruang

evaporasi menjadi lebih homogen dan menaikkan laju penguapan hingga sekitar 17 % dibandingkan sistem tanpa VG. Pusaran *longitudinal* yang berkesinambungan sepanjang saluran udara menjaga kontak termal antara udara panas dan permukaan air, meskipun peningkatan ini disertai kenaikan *pressure drop* yang perlu dikendalikan agar efisiensi keseluruhan tetap optimal.

2. *Separated Vortex* (SV) menghasilkan pusaran yang terpisah dari permukaan generator dan menciptakan turbulensi lebih intens di zona tertentu. Penggunaan *concave delta winglet* dalam konfigurasi *staggered* meningkatkan koefisien perpindahan panas hingga 16,02 % pada $Re = 11.000$, sedangkan modifikasi *perforated concave delta winglet* mampu menaikkan laju perpindahan panas sebesar 54,8 % dan menurunkan *pressure drop* hingga 48 % dibandingkan geometri tanpa lubang. Dengan demikian, SV efektif digunakan pada sistem yang memerlukan peningkatan *heat transfer* tinggi dan tidak terlalu sensitif terhadap hambatan aliran.
3. *Swirl Flow* atau *Helical Vortex* (SF) memberikan peningkatan perpindahan panas melalui aliran spiral yang menipiskan lapisan batas termal dan menghasilkan distribusi panas yang merata. Penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi *twisted tape* maupun *conical coil insert* dapat meningkatkan efisiensi perpindahan panas hingga 27 % tanpa kenaikan *pressure drop* yang signifikan, menjadikannya cocok diterapkan pada sistem desalinasi bertekanan rendah berbasis panas buang kondensor.
4. *Perforated Winglet (Micro-Vortex Generator)* memberikan performa termo-hidrolik yang lebih efisien karena adanya lubang yang mengurangi hambatan aliran sambil mempertahankan kekuatan pusaran. Kajian literatur menunjukkan peningkatan bilangan *nusselt* hingga 75,25 % dan penurunan *friction factor* sekitar 8,1 %, serta peningkatan *thermal enhancement factor* mencapai 1,43. Desain perforasi terbukti mampu mempercepat laju penguapan dengan konsumsi daya kipas dan pompa yang lebih rendah dibandingkan *winglet* padat.
5. *Longitudinal Vortex Generator* (LVG), menghasilkan pusaran searah aliran utama yang efektif dalam menipiskan *thermal boundary layer* dan meningkatkan pencampuran fluida panas dan dingin. Konfigurasi *delta winglet pair* (DWP)

memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan *heat transfer* dan *pressure drop*, dengan peningkatan perpindahan panas hingga 54,8 % pada variasi *perforated concave delta winglet*. Parameter seperti sudut serang, aspek rasio, jumlah baris, serta konfigurasi aliran (*common flow-down* atau *common flow-up*) berpengaruh besar terhadap performa termal dan perlu dioptimalkan sesuai kondisi operasi sistem desalinasi.

Secara keseluruhan, penerapan berbagai tipe *vortex generator* terbukti mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mempercepat proses penguapan air laut pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara. Setiap tipe memiliki karakteristik dan keunggulan tersendiri, di mana CV dan LVG unggul dalam stabilitas aliran dan efisiensi jangka panjang, SV dan SF lebih efektif dalam menciptakan turbulensi dan mempercepat distribusi panas, sementara *Perforated Winglet* menawarkan keseimbangan terbaik antara peningkatan perpindahan panas dan penurunan *pressure drop*. Dengan optimalisasi desain dan konfigurasi yang tepat, sistem desalinasi berbasis panas buang ini berpotensi menjadi teknologi hemat energi, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam penyediaan air bersih di masa mendatang.

KEPUSTAKAAN

- [1] S. A. Marzouk, F. A. Almeahmadi, A. Aljabr, and M. A. Sharaf, "Numerical and experimental investigation of heat transfer enhancement in double tube heat exchanger using nail rod inserts," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1038/s41598-024-59085-5.
- [2] K. S. Rambhad, V. P. Kalbande, M. A. Kumbhalkar, V. W. Khond, and R. A. Jibhakate, "Heat Transfer and Fluid Flow Analysis for Turbulent Flow in Circular Pipe with Vortex Generator," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 7, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04664-8.
- [3] H. Zhao *et al.*, "Thermo-Hydraulic Performances of Microchannel Heat Sinks with Different Types of Perforated Rectangular Blocks," *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 21, no. 1, pp. 87–105, 2025, doi: 10.32604/fdmp.2024.056577.
- [4] J. Orfi and E. Ali, "A Feasibility Study of Vortex Tube-Powered Membrane Distillation (MD) for Desalination," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/w15213767.
- [5] M. A. Alamir, "An artificial neural network model for predicting the performance of thermoacoustic refrigerators," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 164, p. 120551, 2021, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120551.
- [6] M. Oneissi, C. Habchi, S. Russeil, D. Bougeard, and T. Lemenand, "Novel design of delta winglet pair vortex generator for heat transfer enhancement," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 109, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.025.
- [7] A. A. Kapse and V. C. Shewale, "Experimental Study of Heat Transfer Augmentation Characteristics of a Tube Affected by Geometric Parameters of Coiled Spring Inserts," *J. Heat Mass Transf. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 127–138, 2024, doi: 10.22075/JHMTR.2024.30106.1426.
- [8] J. Wang, T. Fu, L. Zeng, G. Chen, and F. S. Lien, "Numerical and experimental investigations of micro thermal performance in a tube with delta winglet pairs," *Micromachines*, vol. 12, no. 7, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/mi12070786.
- [9] L. M. Vane, K. Rock, and D. Jordan, "Energy efficient vortex-enhanced water evaporation technology for concentrated brine management: Theory and process simulation evaluation," *Desalination*, vol. 522, pp. 1–34, 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115427.
- [10] A. S. Bisht, V. S. Bisht, P. Bhandari, K. S. Rawat, T. Alam, and P. Blechich, "The Use of a Vortex Generator for the Efficient Cooling of Lithium-Ion Batteries in Hybrid Electric Vehicles," *Processes*, vol. 11, no. 2, pp. 1–13, 2023, doi: 10.3390/pr11020500.
- [11] S. Ali, T. Dbouk, G. Wang, D. Wang, and D. Drikakis, "Advancing thermal performance through vortex generators morphing," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.1038/s41598-022-25516-4.
- [12] A. Gönül and A. B. Okbaz, "Enhanced performance of a microchannel with rectangular vortex generators," *J. Therm. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 260–278, 2023, doi: 10.18186/thermal.1272395.
- [13] Y. Wang, J. J. Foo, M. V. Tran, S. R. Nair, and C. S. Oon, "Numerical investigation of thermo-hydraulic performance of perforated rectangular and sinusoidal vortex generators in a double-pipe heat exchanger," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 149, no. 19, pp. 11137–11154, 2024, doi: 10.1007/s10973-023-12838-2.
- [14] J. M. Hadi and Y. H. Abed, "A Review on the

- Use of Vortex Generators in Solar Air Heaters: Experimental Insights and Theoretical Models for Performance Improvement,” *Al Rafidain J. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 210–227, 2025, doi: 10.61268/1edw4d57.
- [15] Syaiful, T. Wahyuni, B. Yunianto, and N. Sinaga, “Evaluation of vortex generators in the heat transfer improvement of airflow through an in-line heated tube arrangement,” *Fluids*, vol. 6, no. 10, 2021, doi: 10.3390/fluids6100344.
- [16] S. J. Nghaimesh and M. A. Jabbar, “Heat Transfer Enhancement Simulation Employing Flat and Curved Winglet Vortex Generator Pairs with Punched Holes,” *Int. J. Heat Technol.*, vol. 42, no. 5, pp. 1643–1650, 2024, doi: 10.18280/ijht.420518.
- [17] Y. Lei, Y. Li, S. Jing, C. Song, Y. Lyu, and F. Wang, “Design and performance analysis of the novel shell-and-tube heat exchangers with louver baffles,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 125, pp. 870–879, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.081.
- [18] 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.
- [19] G. Lu and G. Zhou, “Numerical simulation on performances of plane and curved winglet type vortex generator pairs with punched holes,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 102, pp. 679–690, 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.063.
- [20] Z. Ke, C. L. Chen, K. Li, S. Wang, and C. H. Chen, “Vortex dynamics and heat transfer of longitudinal vortex generators in a rectangular channel,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 132, pp. 871–885, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.064.
- [21] A. P. H. J. Gajanan Kalyankar, “Heat Transfer Enhancement Through Swirl Flow Devices,” *Int. J. Innov. Eng. Res. Technol.*, vol. 2018, pp. 198–200, 2018.
- [22] M. Fahri Fadlu Robbi and B. Yunianto, “Studi Numerik Pengaruh Aspek Rasio Dari Perforated Concave Delta Winglet Terhadap Performa Termal-Hidrolik Aliran Udara Melewati Tube Di Dalam Saluran,” *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 11, no. 3, p. 201, 2023.
- [23] N. Aditya Kusuma and B. Yunianto, “Pengaruh Perbedaan Jumlah Convex-Strips Vortex Generator Dalam Laju Perpindahan Panas,” *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 12, no. 2, pp. 113–116, 2024.
- [24] R. Maulana *et al.*, “Panas Menggunakan Delta Winglet Vortex Generator Dengan,” vol. 12, no. 2, pp. 1–6, 2024.
- [25] M. Fiebig, A. Grosse-Gorgemann, Y. Chen, and N. K. Mitra, “Conjugate heat transfer of a finned tube part a: Heat transfer behavior and occurrence of heat transfer reversal,” *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 133–146, 1995, doi: 10.1080/10407789508913737.
- [26] J. C. Shyu and J. S. Jheng, “Heat transfer enhancement of plate-fin heat sinks with different types of winglet vortex generators,” *Energies*, vol. 13, no. 19, 2020, doi: 10.3390/en13195219.
- [27] P. B. Dehankar, K. Joshi, V. A. Bhosale, and R. N. Mulik, “Assessment of twist tape thermal performance in heat transfer passive augmentation technique,” *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s43088-022-00208-0.
- [28] P. Saini, A. Dhar, and S. Powar, “Performance enhancement of fin and tube heat exchanger employing curved delta winglet vortex generator with circular punched holes,” *Int. J. Thermofluids*, vol. 20, no. August, p. 100452, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100452.
- [29] F. H. Exchanger, A. Trp, and K. Lenic, “Heat Transfer Enhancement of Crossflow Air-to-Water,” 2022.
- [30] Y. Effendi, A. Rosyidin, and B. Setiawan, “Peningkatan Performa Termal Dengan Menggunakan Vortex Generators Didalam Saluran Persegi Panjang Vortex generators (VGs) are an effective method for improving the thermal performance of heat exchangers . This study aims to optimize the heat transfer rat,” vol. 13, no. 1, pp. 117–126, 2024.
- [31] Y. Effendi and A. Rosyidin, “Efek vortex generators terhadap peningkatan perpindahan panas pada aliran melewati heated tubes,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 221–227, 2020, doi: 10.24127/trb.v9i2.1303.
- [32] A. M. Jacobi and R. K. Shah, “Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices: A review of recent progress,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 11, no. 3, pp. 295–309, 1995, doi: 10.1016/0894-1777(95)00066-U.
- [33] M. Dalmış, A. E. Gürel, G. Yıldız, A. Ergün, and Ü. Ağbulut, “Effect of the use of metal–oxide and boron-based nanoparticles on the

- performance in a photovoltaic thermal module (PV/T): Experimental study,” *Int. J. Thermofluids*, vol. 24, no. October, 2024, doi: 10.1016/j.ijft.2024.100910.
- [34] A. R. Ramadhan, G. Marausna, and F. Jayadi, “Analisa Performa Heat Exchanger Dengan Penambahan Vortex Generator Tipe Delta Wing Dan Delta Winglet Tape Insert Guna Mengatasi Icing Pada Karburator Piston Engine,” *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 9, no. 1, pp. 45–54, 2023, doi: 10.56521/teknika.v9i1.885.
- [35] B. A. Ahmad *et al.*, “Efek Vortex Generator Berlubang Dengan Variasi Aspek Rasio,” *J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 9–14, 2021.
- [36] G. Biswas, P. Deb, and S. Biswas, “Generation of longitudinal streamwise vortices—a device for improving heat exchanger design,” *J. Heat Transfer*, vol. 116, no. 3, pp. 588–597, 1994, doi: 10.1115/1.2910910.
- [37] S. T. W. A. Hadi Suryo, “Pengaruh Aspect Ratio Dari Delta Winglet Vortex Generator Terhadap Perpindahan Panas Dari Tubes Ke Aliran Udara Di Dalam Saluran,” *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 9, no. 1, pp. 47–62, 2021.
- [38] S. Tiggelbeck, N. K. Mitra, and M. Fiebig, “Comparison of wing-type vortex generators for heat transfer enhancement in channel flows,” *J. Heat Transfer*, vol. 116, no. 4, pp. 880–885, 1994, doi: 10.1115/1.2911462.
- [39] P. Saini, A. Dhar, and 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, p. 124142, 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124142.
- [40] John W. Creswell, *Research Design, Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. 2020.
- [41] Y. C. Chung and C. I. Wu, “Enhancing Ocean Thermal Energy Conversion Performance: Optimized Thermoelectric Generator-Integrated Heat Exchangers with Longitudinal Vortex Generators,” *Energies*, vol. 17, no. 2, 526, 2024. DOI: 10.3390/en17020526.
- [42] D. Chen, J. Ding, Y. Wu, W. Li, and Y. Wang, “Heat Transfer Enhancement of Plate-Fin Heat Sinks with Different Types of Winglet Vortex Generators,” *Energies*, vol. 13, no. 19, 5219, 2020. DOI: 10.3390/en13195219.
- [43] J. Batista, A. Trp, and K. Lenic, “Heat Transfer Enhancement of Crossflow Air-to-Water Fin-and-Tube Heat Exchanger by Using Delta-Winglet Type Vortex Generators,” *Energies*, vol. 15, no. 6, 2070, 2022. DOI: 10.3390/en15062070.
- [44] Syaiful, T. Winoto, B. Yunianto, and N. Sinaga, “Evaluation of Vortex Generators in the Heat Transfer Improvement of Airflow through an In-Line Heated Tube Arrangement,” *Inventions*, vol. 6, no. 4, 344, 2021. DOI: 10.3390/inventions6040344.
- [45] S. Syaiful, M. P. Hendraswari, S. U. Utomo, M. S. K. Tony, and M. F. Soetanto, “Heat transfer enhancement in heat exchanger using convex delta winglet vortex generators,” *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 7, no. 6, pp. 72–77, 2022. DOI: 10.24018/ejeng.2022.7.6.2920
- [46] R. Jain, R. Pitchumani, and D. Lakshmi, “The Use of a Vortex Generator for the Efficient Cooling of Lithium-Ion Batteries in Hybrid Electric Vehicles,” *Processes*, vol. 11, no. 2, 500, 2023. DOI: 10.3390/pr11020500.
- [47] G. Biswas, P. Deb, and S. Biswas, “Generation of longitudinal streamwise vortices—A device for improving heat exchanger design,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 116, no. 3, pp. 588–597, 1994. DOI: 10.1115/1.2910910
- [48] P. P. Jayaramu, A. Ghali, D. Xu, and S. Anandan, “Machine Learning Analysis of Thermal Performance Indicator of Heat Exchangers with Delta Wing Vortex Generators,” *Energies*, vol. 17, no. 6, 1380, 2024. DOI: 10.3390/en17061380.
- [49] L. Lu, J. Pei, Z. Tian, H. Sun, and J. Li, “Effect of the arrangement of longitudinal vortex generators on the performance of a parabolic trough solar collector,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, pp. 2063–2077, 2024. DOI: 10.1007/s12206-024-0239-1
- [50] K. Song, Z. Xi, M. Su, L. Wang, X. Wu, and L. Wang, “Effect of geometric size of curved delta winglet vortex generators and tube pitch on heat transfer characteristics of fin-tube heat exchanger,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 82, pp. 8–18, 2017. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.11.002
- [51] L. Wang, P. Ni, and G. Xi, “The effect of off-center placement of twisted tape on flow and heat transfer characteristics in a circular tube,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 6844, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-86285-0
- [52] M. Fiebig and N. K. Mitra, “Wing-type vortex generators for fin-and-tube heat exchangers,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 7, no. 4, pp. 287–295, 1993. DOI: 10.1016/0894-1777(93)90035-N
- [53] J. Batista, A. Trp, and K. Lenic, “Heat transfer

enhancement of crossflow air-to-water fin-and-tube heat exchanger by using delta-winglet type vortex generators,” *Energies*, vol. 15, no.

6, p. 2070, 2022. DOI: 10.3390/en15062070