EISSN: 2528 - 0112

JURNAL VIRTUAL OF MECHANICAL ENGINEERING ARTICLE (V-MAC)

https://ejournal.unibabwi.ac.id/index.php/vmac email: vmac.mesin@gmail.com

Pengaruh *Vortex* Generator terhadap Laju Penguapan pada Unit Desalinasi Berbasis Panas Buang *Air Conditioner*

Genta Prastanadira[1], Dan Mugisidi[2], Oktarina Heriyana[3], Rifky[4], Ahmad Rizal Dzikrillah[5], Ahmad Faiz Rahmatullah[6], Salman Alfariz[7].

[1]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia gentaprastanadira@gmail.com

[2]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia dan.mugisidi@uhamka.ac.id

[3]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia oktarina@uhamka.ac.id

[4]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia rifky@uhamka.ac.id

[5]Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia ahmadrizaldzikrillah@uhamka.ac.id

[6]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia ahmadfais0809@gmail.com

[7]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia salmanalfrz86@gmail.com

Corresponding Author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Abstract: The increasing demand for freshwater has driven the development of desalination technologies that utilize waste heat from air conditioners (ACs) as an alternative energy source. This study aimed to experimentally investigate the effect of a delta winglet vortex generator (VG) on the evaporation rate of an AC waste heat-based desalination unit. Experiments were conducted over three consecutive days using 13 Liter of seawater with a salinity of 35 ppt under two conditions: without a vortex generator (NVG) and with a delta winglet vortex generator (VG), with data collected at 30-minute intervals. The measured parameters included air temperature, relative humidity, air velocity, changes in the mass of evaporated water, Reynolds number, convective heat transfer coefficient, and mass transfer coefficient. The results showed that the evaporation volume under the NVG condition was 3,860 gram, 3,810 gram, and 3,910 gram, while under the VG condition it increased to 4,340 gram, 4,350 gram, and 4,320 gram, representing improvements of 12.44%, 14.17%, and 10.49%, respectively. Although the Reynolds number, convective heat transfer coefficient, and mass transfer coefficient were lower under the VG condition, the outlet air humidity was also lower, consistent with the higher evaporation volume achieved. These findings indicate that the application of a delta winglet vortex generator effectively enhances the evaporation performance of an AC waste heat-based desalination system.

Keyword: *vortex generator, desalination, evaporation rate, air conditioner waste heat, heat transfer enhancement.*

Abstrak: Meningkatnya kebutuhan air tawar mendorong pengembangan teknologi desalinasi yang memanfaatkan panas buang *air conditioner* (AC) sebagai sumber energi alternatif. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh *delta winglet vortex generator* (VG) terhadap laju penguapan pada unit desalinasi berbasis panas buang AC secara eksperimental. Pengujian dilakukan selama tiga hari menggunakan air laut bersalinitas 35 ppt sebanyak 13 Liter pada dua kondisi, yaitu tanpa *vortex generator* (NVG) dan menggunakan *delta winglet vortex generator* (VG), dengan pengambilan data setiap 30 menit. Parameter yang diukur meliputi temperatur udara, kelembapan udara, kecepatan aliran udara, perubahan massa air yang menguap, bilangan Reynolds, koefisien perpindahan panas, dan koefisien perpindahan massa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa volume penguapan pada kondisi NVG berturut-turut sebesar 3.860 gram, 3.810 gram, dan 3.910 gram, sedangkan pada kondisi VG sebesar 4.340 gram, 4.350 gram, dan 4.320 gram, yang menunjukkan peningkatan masing-masing sebesar 12,44%, 14,17%, dan 10,49% dibandingkan kondisi NVG. Meskipun bilangan Reynolds serta koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa lebih rendah pada kondisi VG, kelembapan udara keluaran juga lebih rendah, yang sejalan dengan peningkatan volume penguapan pada kondisi VG. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *delta winglet vortex generator* mampu meningkatkan kinerja penguapan pada sistem desalinasi berbasis panas buang AC.

Kata Kunci: vortex generator, desalinasi, laju penguapan, panas buang pendingin udara, peningkatan perpindahan panas

1. PENDAHULUAN

Ketersediaan air bersih menjadi salah satu tantangan yang terus meningkat akibat pertumbuhan penduduk, peningkatan kebutuhan air, perkembangan sektor industri, serta perubahan iklim yang berdampak terhadap ketersediaan sumber daya air tawar [1], [2], [3]. Permasalahan tersebut semakin dirasakan di wilayah pesisir karena ketersediaan sumber air tawar yang terbatas sehingga pemenuhan kebutuhan air bersih masih menjadi tantangan [4], [5]. Salah satu teknologi yang digunakan untuk mengolah air laut menjadi air tawar adalah desalinasi termal, yaitu proses pemisahan garam dari air laut melalui proses penguapan dan pengembunan [6]. Pada proses ini, energi panas digunakan untuk mengubah air laut menjadi uap, kemudian uap tersebut dikondensasikan sehingga diperoleh air tawar [6]. Oleh karena itu, ketersediaan sumber energi panas menjadi salah satu aspek yang menentukan keberlangsungan proses desalinasi termal [4], [7].

Salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan adalah panas buang dari sistem pendingin udara (*air conditioner*, AC). Pada siklus refrigerasi, kondensor melepaskan kalor dari refrigeran ke udara lingkungan sehingga udara yang keluar dari unit *outdoor* memiliki temperatur lebih tinggi dibandingkan udara di sekitarnya [4]. Energi panas tersebut umumnya dilepaskan ke lingkungan meskipun masih dapat dimanfaatkan kembali melalui konsep *waste heat recovery* [4]. Pada penelitian ini, panas buang AC dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk proses desalinasi. Sebelum digunakan pada proses evaporasi, energi panas dari udara keluaran kondensor dipindahkan melalui *heat exchanger* ke aliran udara yang akan memasuki unit desalinasi. Dengan mekanisme tersebut, panas buang AC berperan sebagai penyedia energi, sedangkan *heat exchanger* berfungsi sebagai media perpindahan panas yang menghubungkan sumber energi dengan proses evaporasi [8], [9].

Pada sistem desalinasi termal, udara yang telah menerima energi panas dialirkan di atas permukaan air laut untuk mendukung proses evaporasi. Selama proses evaporasi, perpindahan panas menyediakan energi yang dibutuhkan untuk mengubah air dari fase cair menjadi uap, sedangkan perpindahan massa mengangkut uap air dari permukaan menuju aliran udara [10], [11]. Pada proses evaporasi, laju penguapan digunakan sebagai salah satu parameter untuk

menggambarkan jumlah massa air yang berubah menjadi uap per satuan waktu [12]. Besarnya laju penguapan dipengaruhi oleh ketersediaan energi panas, temperatur udara, kelembapan udara, serta kecepatan aliran udara di atas permukaan air [13], [14], [15]. Oleh karena itu, berbagai penelitian mengembangkan berbagai pendekatan untuk memodifikasi karakteristik aliran udara, seperti modifikasi geometri ruang evaporasi, pengaturan kondisi aliran, maupun penggunaan perangkat pengendali aliran (*flow control device*) [9], [16], [17]. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penggunaan *vortex generator* sebagai perangkat pasif untuk memodifikasi karakteristik aliran udara [8], [16]. Penerapan *vortex generator* pada berbagai sistem termal mendorong berkembangnya penelitian mengenai variasi geometri, konfigurasi pemasangan, serta karakteristik aliran yang dihasilkan pada proses evaporasi [8], [18].

Penelitian mengenai *vortex generator* terus berkembang sebagai salah satu metode pasif untuk memodifikasi karakteristik aliran pada berbagai sistem termal. Pada tahap awal pengembangannya, penelitian berfokus pada mekanisme pembentukan pusaran (*vortex*), kemudian berkembang pada pengkajian berbagai bentuk geometri, seperti *delta winglet*, *rectangular winglet*, *curved winglet*, dan *trapezoidal winglet*, yang menghasilkan karakteristik aliran berbeda [8], [19]. Kajian selanjutnya mengarah pada evaluasi konfigurasi pemasangan, meliputi jumlah baris, sudut pemasangan (*attack angle*), jarak antar-*winglet*, dan posisi pemasangan karena parameter-parameter tersebut memengaruhi karakteristik aliran yang terbentuk [18], [20]. Sejalan dengan perkembangan tersebut, penerapan *vortex generator* juga semakin luas, tidak hanya pada sistem perpindahan panas, tetapi juga pada berbagai sistem yang melibatkan proses evaporasi, termasuk sistem desalinasi [7], [9]. Di antara berbagai geometri yang telah dikembangkan, *delta winglet vortex generator* merupakan salah satu konfigurasi yang banyak diterapkan pada berbagai penelitian dan aplikasi sistem termal [8], [19].

Penerapan *vortex generator* pada sistem desalinasi terus berkembang, tetapi penelitian yang telah dilakukan umumnya berfokus pada analisis numerik menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) atau mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan jumlah air yang dihasilkan [21], [22], [23]. Meskipun demikian, kajian eksperimental yang menjelaskan keterkaitan antara perubahan karakteristik aliran akibat pemasangan *vortex generator* dengan temperatur udara, kelembapan udara, kecepatan aliran udara, perpindahan panas, perpindahan massa, dan laju penguapan pada sistem desalinasi berbasis panas buang *air conditioner* masih terbatas [4], [24]. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menggunakan *delta winglet vortex generator* pada sistem desalinasi berbasis panas buang *air conditioner* untuk menjelaskan bagaimana perubahan karakteristik aliran memengaruhi temperatur udara, kelembapan udara, kecepatan aliran udara, perpindahan panas, perpindahan massa, hingga laju penguapan melalui pengujian eksperimental. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai mekanisme pengaruh *delta winglet vortex generator* terhadap laju penguapan melalui keterkaitan antarparameter yang diamati selama proses evaporasi.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk menganalisis pengaruh penambahan *vortex generator* (VG) tipe *delta winglet* terhadap kinerja sistem desalinasi berbasis panas buang yang memanfaatkan panas dari sisi kondensor *air conditioner* sebagai sumber energi evaporasi air laut. Pengujian dilakukan pada dua konfigurasi, yaitu tanpa *vortex generator* (NVG) sebagai kondisi pembanding dan dengan pemasangan *vortex generator* (VG) tipe *delta winglet*, untuk mengevaluasi pengaruh pusaran aliran yang dihasilkan terhadap perpindahan panas dan laju penguapan air laut.

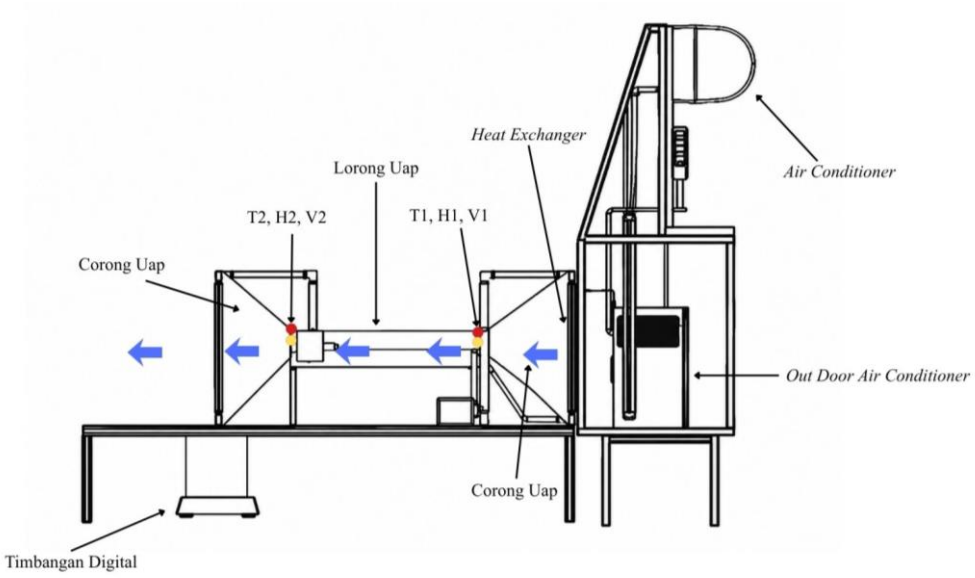
Data yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi temperatur udara, kelembapan udara, kecepatan aliran udara, serta perubahan massa air laut selama proses penguapan. Rincian alat dan bahan yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan Penelitian

No.	Alat	Fungsi	Spesifikasi
1	Thermometer Digital	Mengukur Temperatur	-50℃-110℃, ± 0,1℃
2	Hygrometer Digital	Mengukur kelembapan	10%-99%, ±1%
3	Anemometer	Mengukur kecepatan angin	0-30 m/s, resolusi 0,1 m/s
4	Timbangan Digital 30 kg	Mengukur massa kondensat	0-30 kg,
5	Zinc Aluminium	Sebagai bahan pembuat *Vortex generator*s	Ketebalan 0,2 mm

Sumber: Data Penelitian, 2026

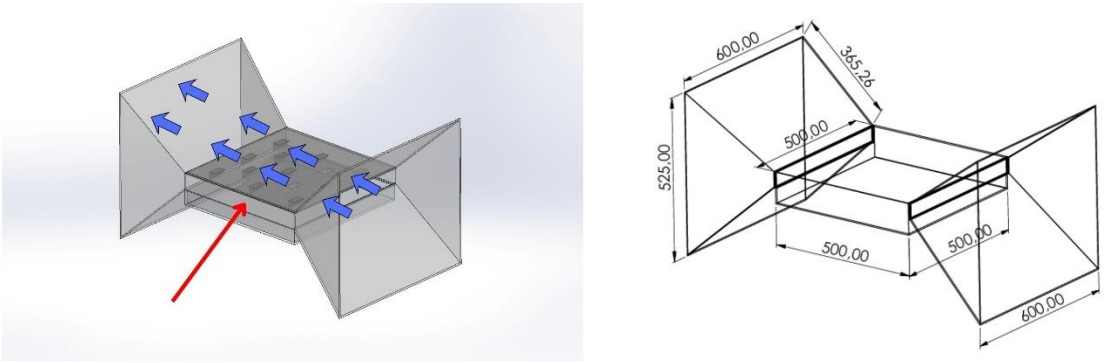
Alat dan bahan penelitian disusun menjadi sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. *Vortex generator* dibuat dari lembaran zinc aluminium setebal 0,2 mm yang dipilih karena mudah dibentuk menjadi geometri delta winglet serta cukup kaku untuk mempertahankan bentuk selama proses pengujian [25]. Sistem ini memanfaatkan udara panas dari sisi *outdoor AC* yang diarahkan menuju *heat exchanger* dan wadah evaporasi berisi air laut. Udara panas berinteraksi dengan permukaan air laut di lorong uap sehingga membantu proses penguapan. Uap yang terbentuk kemudian dialirkan menuju kondensor.



Gambar 1. Rancangan Sistem Desalinasi Berbasis Panas Buang *Air Conditioner*.
Sumber: Data Penelitian, 2026

Rancangan sistem penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem desalinasi memanfaatkan panas buang dari unit *outdoor air conditioner* sebagai sumber energi untuk proses evaporasi. Udara yang telah menerima panas dari kondensor terlebih dahulu melewati *heat exchanger* sebelum dialirkan menuju ruang evaporasi. *Heat exchanger* berfungsi memindahkan energi panas dari udara keluaran *air conditioner* ke aliran udara yang memasukilorong uap sehingga temperatur aliran udara meningkat sebelum melintasi permukaan air laut. Selanjutnya, udara panas dialirkan secara horizontal melintasi permukaan air laut di dalam lorng uap sebelum keluar melalui corong uap menuju lingkungan.

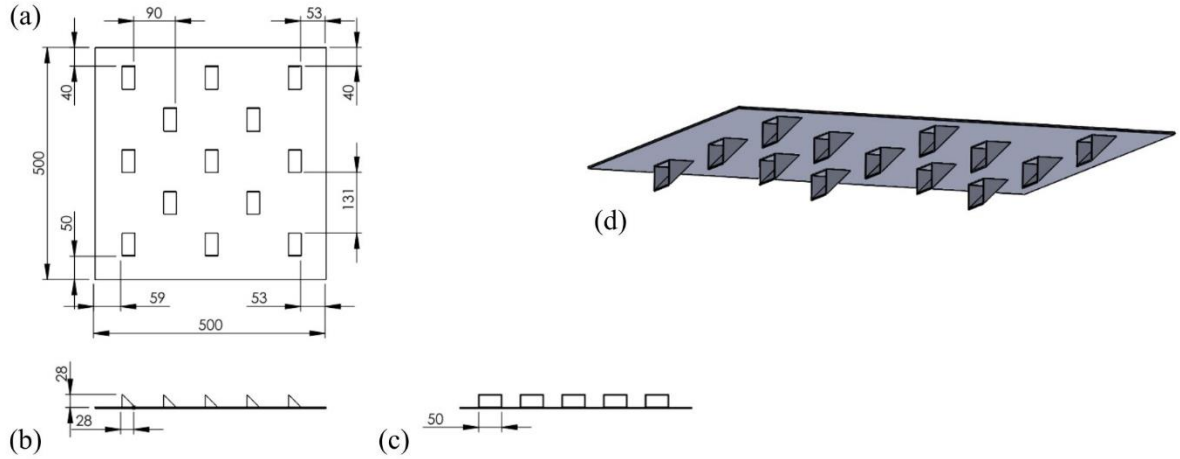
Untuk mengevaluasi perubahan karakteristik aliran selama proses berlangsung, pengukuran dilakukan pada dua titik pengamatan. Titik pertama (T1, H1, dan V1) ditempatkan pada sisi masuk ruang evaporasi untuk mengukur temperatur udara (T), kelembapan udara (H), dan kecepatan udara (V) sebelum melewati lorong uap. Titik kedua (T2, H2, dan V2) ditempatkan pada sisi keluar lorong uap untuk mengukur parameter yang sama setelah udara melewati permukaan air. Perubahan parameter pada kedua titik tersebut digunakan untuk menganalisis pengaruh pemasangan *delta winglet vortex generator* terhadap karakteristik aliran udara selama proses evaporasi.



(a) Arah aliran Fluida (b) Dimensi Lorong Uap

Gambar 2. Skema Aliran Udara dan Dimensi Lorong Uap.
Sumber: Data Penelitian, 2026

Berdasarkan Gambar 2, udara panas hasil perpindahan panas pada *heat exchanger* dialirkan menuju lorong uap, kemudian mengalir secara horizontal di atas permukaan air sebelum keluar melalui corong uap menuju lingkungan. Gambar 2(a) menunjukkan arah aliran udara serta posisi pemasangan *delta winglet vortex generator* di dalam lorong uap, sedangkan Gambar 2(b) memperlihatkan dimensi utama lorong uap yang digunakan pada penelitian. Pengukuran temperatur udara (T), kelembapan udara (H), dan kecepatan aliran udara (V) dilakukan pada dua titik pengamatan, yaitu titik masuk (*inlet*) ruang evaporasi (T1, H1, dan V1) serta titik keluar (*outlet*) ruang evaporasi (T2, H2, dan V2). Pengukuran pada kedua titik tersebut bertujuan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik aliran udara sebelum dan sesudah melewati lorong udara pada kondisi menggunakan *vortex generator* (VG) maupun tanpa *vortex generator* (NVG). Konfigurasi *delta winglet vortex generator* yang digunakan sebagai objek penelitian dijelaskan pada Gambar 3.



Gambar 3. Geometri delta winglet vortex generator yang digunakan pada penelitian: (a) tampak atas, (b) tampak samping, (c) tampak depan, dan (d) perspektif isometrik.
Sumber: Data Penelitian, 2026

Air laut yang digunakan sebagai sampel memiliki salinitas sebesar 35 ppt dengan volume 13 L pada setiap pengujian. Pada setiap pengujian digunakan sampel air laut yang baru sehingga seluruh pengujian diawali pada kondisi awal yang sama. Sampel air laut digunakan secara langsung tanpa perlakuan (*treatment*) fisik maupun kimia sebelum pengujian.

Penelitian ini menggunakan *delta winglet vortex generator* yang dipasang di dalam ruang evaporasi untuk menganalisis pengaruhnya terhadap temperatur udara, kelembapan udara, perpindahan panas, perpindahan massa, dan laju penguapan pada sistem desalinasi berbasis

panas buang *air conditioner*. Pemilihan geometri *delta winglet* mengacu pada penelitian-penelitian terdahulu yang menggunakan konfigurasi tersebut pada berbagai aplikasi perpindahan panas [8], [19]. Sedangkan sudut serang 45° dipilih karena memberikan kinerja perpindahan panas yang lebih baik dibandingkan variasi sudut lainnya [20]. V*ortex generator* dibuat dari lembaran *zinc aluminium* setebal 0,2 mm, sedangkan detail geometri dan konfigurasi pemasangannya disajikan pada Gambar 3.

Pengujian dilakukan selama tiga hari untuk masing-masing kondisi pengujian. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit mulai pukul 08.00 hingga 16.00 WIB pada setiap hari pengujian. Selama pengujian, *air conditioner* dioperasikan hingga mencapai kondisi operasi yang stabil sebelum proses pengambilan data dimulai sehingga temperatur udara panas dari sisi *outdoor* relatif konstan selama pengujian. Parameter yang diukur meliputi temperatur udara, kelembapan udara, kecepatan aliran udara, dan massa air yang menguap.

Penambahan *vortex generator* dapat memengaruhi kecepatan udara dan distribusi temperatur di dalam lorong uap, sehingga karakteristik aliran dianalisis menggunakan bilangan Reynolds sebagai berikut:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \tag{1}$$

Di mana ρ adalah densitas udara (kg/m³), v adalah kecepatan aliran udara di permukaan air (m/s), L adalah panjang karakteristik permukaan air (m), dan μ adalah viskositas dinamik udara ($Pa \cdot s$). Setelah nilai Re diketahui, Nusselt (Nu) menggunakan persamaan :

$$Nu = C \cdot (Re^m) \cdot Pr^n \tag{2}$$

Nilai konstanta $C = 0{,}037$, $m = 0{,}8$ mengacu pada korelasi konveksi paksa turbulen pelat datar eksternal, dengan eksponen $n = 0{,}3$ Korelasi ini dipilih karena aliran udara panas bergerak di atas permukaan air laut yang bersifat datar di dalam lorong uap, sehingga pendekatan konveksi paksa eksternal lebih sesuai dengan geometri sistem yang digunaka. Aliran mulai bersifat turbulen pada Re > 4000, dengan akurasi korelasi yang lebih baik pada Re > 10.000 [26]. Nilai Prandtl udara sekitar 0,7 sehingga masih sesuai untuk perhitungan konveksi paksa turbulen. koefisien konveksi dihitung menggunakan:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L} \tag{3}$$

Di mana (h_c) adalah koefisien konveksi panas (W/m^2K), (Nu) adalah bilangan Nusselt, (k) adalah konduktivitas termal udara ($W/m \cdot K$), dan (L) adalah panjang karakteristik permukaan air (m). Nilai (h_c) digunakan untuk mengetahui kemampuan udara panas dalam memindahkan panas ke permukaan air laut. Untuk menghubungkan perpindahan panas dengan laju pengangkutan uap air di atas permukaan evaporasi, digunakan Analogi Chilton-Colburn. Analogi ini menyatakan bahwa koefisien perpindahan massa dapat diturunkan dari koefisien konveksi panas melalui persamaan berikut [11]:

$$h_m = \frac{h_c}{\rho \cdot c_p \cdot L_e{}^{2/3}} \tag{4}$$

Di mana h_m adalah koefisien perpindahan massa (m/s), ρ adalah densitas udara (kg/m³), c_p adalah kalor spesifik udara (J/kg·K), dan Le adalah bilangan Lewis. Untuk sistem uap air di udara, nilai $L_e \approx 0{,}845$. Nilai h_m menunjukkan kemampuan perpindahan massa uap air dari permukaan evaporasi menuju aliran udara utama, sehingga dapat digunakan untuk menunjukkan laju penguapan yang terjadi selama pengujian.

Laju penguapan dihitung berdasarkan selisih massa air sebelum dan sesudah pengujian terhadap waktu pengujian:

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \tag{5}$$

Di mana ($\dot{m}$) adalah laju penguapan (g/s), (Δm) adalah perubahan massa air laut (g), dan (Δt) adalah waktu pengujian (detik). Persamaan yang digunakan dalam penelitian ini diterapkan pada data hasil pengujian untuk menganalisis laju penguapan air laut pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara. Persentase peningkatan evaporasi VG terhadap NVG dihitung sebagai:

$$\text{Peningkatan (\%)} = \frac{V_{VG} - V_{NVG}}{V_{NVG}} \; x \; 100\% \tag{6}$$

Sedangkan efektivitas VG dihitung sebagai:

$$\text{Efektivitas (\%)} = \frac{V_{VG} - V_{NVG}}{V_{VG}} \; x \; 100\% \tag{7}$$

Di mana V_{VG} dan V_{NVG} adalah volume evaporasi pada kondisi V_{VG} dan V_{NVG} (gram). Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk nilai rata-rata (mean). Untuk mengevaluasi tingkat konsistensi dan variasi data selama pengujian, dilakukan analisis statistik menggunakan standar deviasi. Analisis ini digunakan untuk menunjukkan tingkat penyebaran data terhadap nilai rata-ratanya sehingga dapat menggambarkan reliabilitas hasil pengukuran yang diperoleh. Standar deviasi dihitung menggunakan persamaan berikut [27]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{8}$$

di mana s adalah standar deviasi, x_i adalah data pengukuran ke-i, $\bar{x}$ adalah nilai rata-rata (mean) dari pengambilan data, dan n adalah jumlah data hasil pengujian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian pengaruh penggunaan *delta winglet vortex generator* pada unit desalinasi berbasis panas buang *air conditioner* disajikan secara berurutan. Pembahasan diawali dengan penyajian temperatur udara, kelembapan udara, dan kecepatan aliran udara yang diperoleh selama pengujian, kemudian dilanjutkan dengan analisis bilangan Reynolds, koefisien perpindahan panas konveksi, dan koefisien perpindahan massa. Selanjutnya dibahas laju penguapan dan volume evaporasi pada kondisi menggunakan *delta winglet vortex generator* (VG) maupun tanpa *vortex generator* (NVG).

Tabel 2. Rata-rata Data Temperatur, Kelembapan Udara, dan Kecepatan Aliran Udara

Hari	T_{udara} VG (°C)	T_{udara} NVG (°C)	RH_{udara} VG (%)	RH_{udara} NVG (%)	V VG (m/s)	V NVG (m/s)
1	45,7	44,8	40,9	42,1	1	1,1
2	44,6	43,6	40,9	41,1	1	1,1
3	44,8	44,2	40,1	42,8	1	1,1

Sumber: Data Penelitian, 2026

Tabel 2 menunjukkan rata-rata temperatur udara, kelembapan udara, dan kecepatan aliran udara selama tiga hari pengujian pada kondisi menggunakan *vortex generator* (VG) tipe *delta winglet* dan tanpa *vortex generator* (NVG). Temperatur udara pada kondisi VG berada pada kisaran 44,6–45,7°C, lebih tinggi dibandingkan kondisi NVG yang berkisar antara 43,6–44,8°C. Sebaliknya, kelembapan udara pada kondisi VG berada pada kisaran 40,1–40,9%, lebih rendah dibandingkan kondisi NVG yang berkisar antara 41,1–42,8%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pemasangan *delta winglet vortex generator* menghasilkan kondisi udara yang berbeda di dalam ruang evaporasi. Selain itu, kecepatan aliran udara pada kondisi VG sebesar 1,0 m/s, sedikit lebih rendah dibandingkan kondisi NVG sebesar 1,1 m/s. Perbedaan temperatur, kelembapan udara, dan kecepatan aliran udara tersebut selanjutnya dianalisis melalui bilangan Reynolds untuk menggambarkan karakteristik aliran pada kedua kondisi pengujian. Hasil tersebut konsisten dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa

temperatur udara, kelembapan udara, dan kecepatan aliran udara merupakan faktor yang memengaruhi proses evaporasi [12], [13].

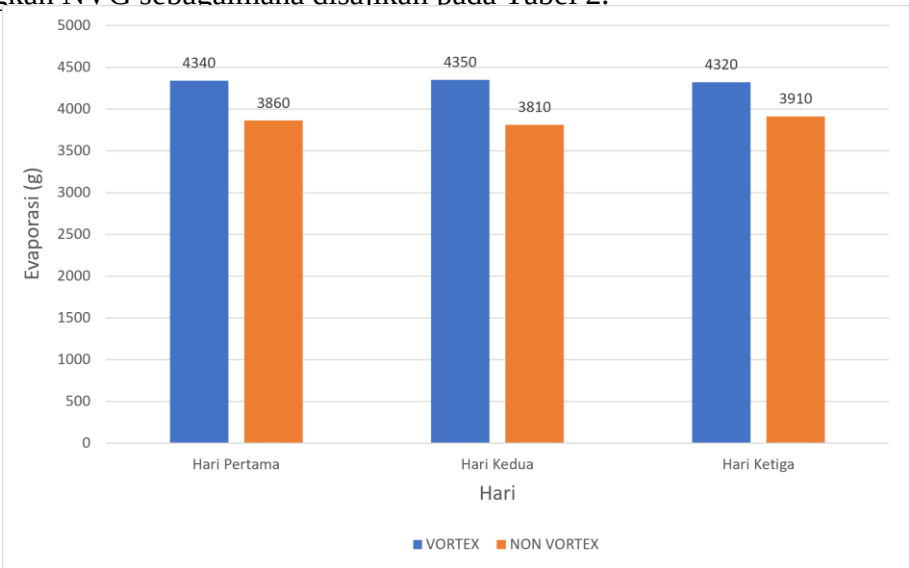
Tabel 3. Rata-rata Parameter Aliran, Perpindahan Panas, dan Perpindahan Massa

Hari	Re VG	Re NVG	h_c VG (W/m^2K)	h_c NVG (W/m^2K)	h_m VG (m/s)	h_m NVG (m/s)
1	29.750	33.260	6,43	7,41	0,00646	0,00740
2	29.933	32.986	6,46	7,38	0,00646	0,00747
3	29.655	33.040	6,43	7,39	0,00643	0,00740

Sumber: Data Penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 3, nilai bilangan Reynolds pada kondisi NVG lebih tinggi dibandingkan kondisi VG pada seluruh hari pengujian, yaitu sebesar 33.260 dan 29.750 pada hari pertama, 32.986 dan 29.933 pada hari kedua, serta 33.040 dan 29.655 pada hari ketiga. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa keberadaan *delta winglet vortex generator* menyebabkan penurunan kecepatan udara rata-rata di dalam lorong uap, yang secara umum berkaitan dengan bertambahnya hambatan aliran. Meskipun demikian, seluruh nilai Reynolds pada kedua kondisi berada di atas 10.000, sehingga aliran tetap berada pada kondisi turbulen dan masih memenuhi rentang penggunaan korelasi konveksi paksa turbulen pada pelat datar eksternal [28]. Kecenderungan yang sama juga ditunjukkan oleh koefisien perpindahan panas konveksi h_c dan koefisien perpindahan massa h_m, di mana nilai pada kondisi NVG lebih tinggi dibandingkan VG. Nilai h_c pada kondisi NVG berada pada rentang 7,38–7,41 W/m²K, sedangkan pada kondisi VG berkisar 6,43–6,46 W/m²K. Sementara itu, nilai h_m pada kondisi NVG berada pada rentang 0,00740–0,00747 m/s dan pada kondisi VG berkisar 0,00643–0,00646 m/s.

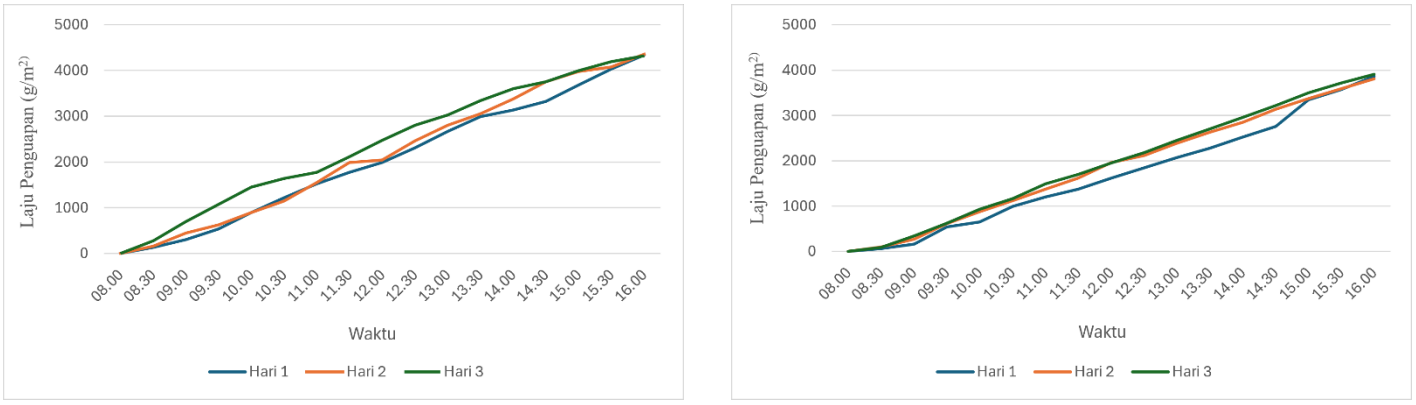
Meskipun nilai Reynolds, koefisien perpindahan panas konveksi h_c, dan koefisien perpindahan massa h_m, pada kondisi VG lebih rendah dibandingkan NVG, hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa temperatur udara pada kondisi VG tetap lebih tinggi, sedangkan kelembapan udara lebih rendah selama tiga hari pengujian. Perbedaan kondisi udara tersebut menunjukkan adanya perubahan kondisi aliran di dalam ruang evaporasi pada penggunaan *delta winglet vortex generator*. Penggunaan *delta winglet vortex generator* telah banyak dikaji pada penelitian terdahulu, khususnya terkait pengaruhnya terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panas [8], [19]. Pada penelitian ini, perubahan kondisi udara ditunjukkan oleh temperatur udara yang lebih tinggi dan kelembapan udara yang lebih rendah pada kondisi VG dibandingkan NVG sebagaimana disajikan pada Tabel 2.



Gambar 4. Perbandingan Massa Air yang Menguap pada Kondisi VG dan NVG
Sumber: Data Penelitian, 2026

Berdasarkan Gambar 4, massa air yang menguap selama pengujian pada kondisi menggunakan *delta winglet vortex generator* (VG) lebih besar dibandingkan kondisi tanpa *vortex generator* (NVG) pada seluruh hari pengujian. Massa air yang menguap pada kondisi VG berturut-turut sebesar 4.340 gram, 4.350 gram, dan 4.320 gram pada hari pertama hingga hari ketiga, sedangkan pada kondisi NVG sebesar 3.860 gram, 3.810 gram, dan 3.910 gram. Perbedaan massa air yang menguap antarhari relatif kecil dan berkaitan dengan variasi kondisi pengujian, seperti temperatur udara, kelembapan udara, serta perubahan kondisi panas buang *air conditioner* selama proses pengujian. Meskipun demikian, kondisi VG secara konsisten menghasilkan massa air yang menguap lebih besar dibandingkan kondisi NVG pada seluruh hari pengujian.

Perbedaan massa air yang menguap tersebut konsisten dengan kondisi udara yang telah dibahas pada Tabel 2. Temperatur udara yang lebih tinggi dan kelembapan udara yang lebih rendah pada kondisi VG menghasilkan kondisi yang lebih mendukung proses evaporasi dibandingkan kondisi NVG, sehingga akumulasi massa air yang menguap selama periode pengujian menjadi lebih besar. Pembahasan selanjutnya difokuskan pada laju penguapan yang disajikan pada Gambar 5 untuk menjelaskan perubahan proses evaporasi pada setiap interval waktu pengujian.



(a) (b)

Gambar 5. Laju Penguapan dengan *Vortex Generator* Tipe *Delta Winglet* dan Tanpa *Vortex Generator*
Sumber: Data Penelitian, 2026

Berdasarkan Gambar 5, perubahan massa air yang menguap terhadap waktu pada kondisi menggunakan *delta winglet vortex generator* ditunjukkan pada Gambar 5(a), sedangkan kondisi tanpa *vortex generator* ditunjukkan pada Gambar 5(b). Pada kedua kondisi, massa air yang menguap meningkat seiring bertambahnya waktu pengujian. Pola perubahan pada ketiga hari pengujian relatif serupa, meskipun terdapat sedikit perbedaan nilai pada setiap hari yang berkaitan dengan variasi temperatur udara dan kelembapan udara selama pengujian sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Pada kondisi menggunakan *delta winglet vortex generator*, nilai massa air yang menguap cenderung lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa *vortex generator* pada sebagian besar waktu pengamatan. Perbedaan tersebut sejalan dengan hasil pengukuran pada Tabel 2 yang menunjukkan temperatur udara lebih tinggi dan kelembapan udara lebih rendah pada kondisi VG dibandingkan kondisi NVG. Sementara itu, Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai bilangan Reynolds, koefisien perpindahan panas konveksi (h_c)dan koefisien perpindahan massa (h_m) pada kondisi VG lebih rendah dibandingkan kondisi NVG. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut, penggunaan *delta winglet vortex generator* memberikan perbedaan terhadap massa air yang menguap selama periode pengujian dibandingkan kondisi tanpa *vortex generator*.

Tabel 4. Perbandingan Peningkatan dan Efektivitas Evaporasi pada Kondisi VG dan NVG

Hari	Evaporasi VG (gram)	Evaporasi NVG (gram)	Selisih (gram)	Peningkatan (%)	Efektivitas (%)
1	4340	3860	480	12,44	11,06
2	4350	3810	540	14,17	12,41
3	4320	3910	410	10,49	9,49

Sumber: Data Penelitian, 2026

Berdasarkan Tabel 4, penggunaan vortex generator meningkatkan volume evaporasi sebesar 12,44% pada hari pertama, 14,17% pada hari kedua, dan 10,49% pada hari ketiga dibandingkan kondisi NVG. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan *vortex generator* memberikan pengaruh positif terhadap kinerja evaporasi pada sistem desalinasi berbasis panas buang pendingin udara.

Secara keseluruhan, kondisi VG menghasilkan evaporasi yang lebih tinggi pada seluruh hari pengujian meskipun nilai Reynolds, koefisien perpindahan panas konveksi h_c dan koefisien perpindahan massa h_m lebih rendah dibandingkan NVG. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan evaporasi tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya kecepatan aliran rata-rata, tetapi juga oleh karakteristik aliran yang terbentuk di dalam lorong uap [29], [30]. Temperatur udara yang lebih tinggi dan kelembapan udara yang lebih rendah pada kondisi VG mengindikasikan bahwa distribusi panas dan pengangkutan uap air berlangsung lebih efektif [31], [32]. Kondisi tersebut mendukung terjadinya perpindahan panas dan massa yang lebih baik sehingga menghasilkan volume evaporasi yang lebih besar dibandingkan kondisi tanpa *vortex generator* [27].

4. KESIMPULAN

Pemasangan *vortex generator* pada unit desalinasi berbasis pendingin udara meningkatkan volume evaporasi sebesar 12,44%, 14,17%, dan 10,49% dibandingkan kondisi tanpa *vortex generator*. Meskipun nilai Reynolds, h_c, dan h_m lebih rendah, kondisi VG menghasilkan temperatur udara yang lebih tinggi, kelembapan udara yang lebih rendah, serta volume evaporasi yang lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan *vortex generator* meningkatkan kinerja evaporasi pada sistem desalinasi yang memanfaatkan panas buang *air conditioner*. Temuan ini menunjukkan bahwa *vortex generator* dapat menjadi salah satu alternatif sederhana untuk meningkatkan produktivitas sistem desalinasi berbasis panas buang. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada variasi geometri, sudut serang, dan susunan *vortex generator* untuk memperoleh konfigurasi yang menghasilkan kinerja evaporasi yang lebih optimal.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada tim penelitian Panas Buang *AC*, di Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA atas dukungan teknis, bimbingan dan bantuan pendanaan penelitian DPPM Kemendiktisaintek dengan nomor kontrak 124/C3/DT.05.00/PL/2025, 0992/LL3/AL.04/2025, 280/F.03.07/2025. Dukungan tersebut berkontribusi penting terhadap kelancaran penelitian dan pencapaian hasil yang diperoleh.

REFERENSI

[1] M. T. H. van Vliet *et al.*, "Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies," *Environ. Res. Lett.*, vol. 16, no. 2, 2021, doi: 10.1088/1748-9326/abbfc3.

[2] M. Leijnse, M. F P Bierkens, K. H M Gommans, D. Lin, A. Tait, and N. Wanders, "Key drivers and pressures of global water scarcity hotspots," *Environ. Res. Lett.*, vol. 19, no. 5, 2024, doi: 10.1088/1748-9326/ad3c54.

[3] G. Gusnawati, "Pengaruh Kualitas Air Minum Isi Ulang Dengan Menggunakan Teknologi Reverse Osmosis (RO)," *V-MAC (Virtual Mech. Eng. Artic.*, vol. 8, no. 2, pp. 66–70, Oct. 2023, doi: 10.36526/v-mac.v8i2.3168.

[4] N. Nurkholid, D. Mugisidi, W. Widodo, O. Heriyani, and I. Sulistiono, "Enhancing seawater desalination performance using a vortex generator in a modified window air conditioner," *J. Polimesin*, vol. 23, no. 1, p. 38, Feb. 2025, doi: 10.30811/jpl.v23i1.6110.

[5] A. Huwaina and R. H. Kostoer, "Selecting methods for water resources in coastal area: Comparative study cases of Hong Kong and Jakarta," *J. Pengelolaan Sumberd. Alam dan Lingkung.*, vol. 12, no. 2, pp. 228–236, 2022, doi: 10.29244/jpsl.12.2.228-236.

[6] A. N. Shmroukh, A. A. Serageldin, A. Abdal, and E. Ali, "Application of new series connection scheme of vortex tubes in seawater desalination unit using new vortex generators," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–13, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04205-3.

[7] H. Shan, Z. Ye, J. Yu, R. Wang, and Z. Xu, "Article Improving solar water harvesting via airflow restructuring using 3D vapor generator Improving solar water harvesting via airflow restructuring using 3D vapor generator," *Device*, vol. 1, no. 4, p. 100065, 2023, doi: 10.1016/j.device.2023.100065.

[8] 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*, vol. 18, no. 11, p. 2896, May 2025, doi: 10.3390/en18112896.

[9] M. Fiebig, "Vortices, Generators and Heat Transfer," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 76, no. 2, pp. 108–123, Feb. 1998, doi: 10.1205/026387698524686.

[10] M. Raimundo, R. Gaspar, A. V. M. Oliveira, and D. A. Quintela, "International Journal of Thermal Sciences Wind tunnel measurements and numerical simulations of water evaporation in forced convection air fl ow Ant o," vol. 86, pp. 28–40, 2014, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.026.

[11] T. Poós and E. Varju, "International Journal of Heat and Mass Transfer Mass transfer coefficient for water evaporation by theoretical and empirical correlations," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 153, p. 119500, 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119500.

[12] S. Zimmermann, U. Gärtner, Y. Capowiez, H. Köhler, and D. Wharam, "Water evaporation as a function of temperature, humidity, air velocity and body size in inactive terrestrial pulmonate Theba pisana," *BMC Zool.*, vol. 10, no. 1, p. 13, Jul. 2025, doi: 10.1186/s40850-025-00236-0.

[13] R. N. Putra and T. A. Ajiwiguna, "Influence of Air Temperature and Velocity for Drying Process," *Procedia Eng.*, vol. 170, pp. 516–519, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.082.

[14] E. A. Kosasih, A. Zikri, and M. I. Dzaky, "Heliyon Water vapor desorption from silica gel in a combined drying and double-condenser compression refrigeration system," *HLY*, vol. 8, no. 6, p. e09757, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09757.

[15] G. Lorenzini, "Air temperature effect on spray evaporation in sprinkler irrigation," *Irrig. Drain.*, vol. 51, no. 4, pp. 301–309, Dec. 2002, doi: 10.1002/ird.68.

[16] S. Hosseini, S. Aghebatandish, A. Dadvand, and B. C. Khoo, "An immersed boundary-lattice Boltzmann method with multi relaxation time for solving flow-induced vibrations

of an elastic vortex generator and its effect on heat transfer and mixing," *Chem. Eng. J.*, p. 126652, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.126652.

[17] Sumarjianto, G. Rubiono, and I. Qiram, "Pengaruh Jumlah Sekat Aliran Lapisan Pengisi Terhadap Unjuk Kerja Menara Pendingin (Cooling Tower)," *V-MAC (Virtual Mech. Eng. Artic.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–4, Oct. 2020, doi: 10.36526/v-mac.v5i1.1024.

[18] H. Karkaba *et al.*, "Effect of using multiple vortex generator rows on heat transfer enhancement inside an asymmetrically heated rectangular channel," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 227, p. 120359, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120359.

[19] M. Awais and A. A. Bhuiyan, "Heat transfer enhancement using different types of vortex generators," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.02.007.

[20] R. Khargotra, R. Kumar, and S. Kumar, "Impact of perforated shapes in delta type hindrance promoter on thermo-hydraulic performance of solar water heating system (An experimental study)," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 24, no. June 2020, p. 100831, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2020.100831.

[21] D. Mugisidi and A. Rahmani, "Airflow-enhanced evaporation – condensation seawater desalination using residential air conditioner waste heat," no. April, pp. 1–9, 2026, doi: 10.1002/ep.70555.

[22] O. Heriyani, D. Mugisidi, and Rifky, "CFD simulation for optimizing the evaporation process in seawater desalination using exhaust heat from AC and vortex generators," *Desalin. Water Treat.*, vol. 322, no. March, p. 101145, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101145.

[23] R. Aridi, S. Ali, T. Lemenand, J. Faraj, and M. Khaled, "CFD analysis on the spatial effect of vortex generators in concentric tube heat exchangers – A comparative study," *Int. J. Thermofluids*, vol. 16, no. October 2022, p. 100247, 2027, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100247.

[24] O. Heriyani, D. Mugisidi, and Rifky, "CFD simulation for optimizing the evaporation process in seawater desalination using exhaust heat from AC and vortex generators," *Desalin. Water Treat.*, vol. 322, no. September 2024, p. 101145, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.dwt.2025.101145.

[25] W. L. Chen and R. S. Lee, "Novel Aging Warm-Forming Process of Al-Zn-Mg Aluminum Alloy Sheets and Influence of Precipitate Characteristics on Warm Formability," *Metals (Basel).*, vol. 14, no. 8, 2024, doi: 10.3390/met14080844.

[26] 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.

[27] D. A. Dwibowo, D. Mugisidi, O. Heriyani, R. Alamsyach, and S. Amin, "Effect of water pressure and temperature on the perform-ance of a desalination reactor," *J. Polimesin*, vol. 23, no. 6, p. 837, Dec. 2025, doi: 10.30811/jpl.v23i6.7867.

[28] J. H. Lienhard, "Heat Transfer in Flat-Plate Boundary Layers: A Correlation for Laminar, Transitional, and Turbulent Flow," *J. Heat Transfer*, vol. 142, no. 6, 2020, doi: 10.1115/1.4046795.

[29] Ristanto Wirangga, Dan Mugisidi, Adi Tegar Sayuti, and Oktarina Heriyani, "The Impact of Wind Speed on the Rate of Water Evaporation in a Desalination Chamber," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 106, no. 1, pp. 39–50, Jun. 2023, doi: 10.37934/arfmts.106.1.3950.

[30] I. Sulistiono, D. Mugisidi, and O. Heriyani, "Effect of wind speed on evaporation rate in air conditioner based desalination units," vol. 12, no. 1, pp. 54–61, 2025, doi: 10.37373/tekno.v12i1.1238.

[31] R. Alamsyach, D. Mugisidi, A. Oktavian, and O. Heriyani, "Laju Penguapan Pada Forced Flow Solar Still," *J. Mesin Nusant.*, vol. 7, no. 2, pp. 255–268, Dec. 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i2.22887.

[32] Andika Cahya Putra Pratama, Dan Mugisidi, and Oktarina Heriyani, "Seawater evaporation using natural flow solar still," *TEKNOSAINS J. Sains, Teknol. dan Inform.*, vol. 13, no. 1, pp. 137–143, Nov. 2025, doi: 10.37373/tekno.v13i1.1664.