EISSN: 2528 - 0112

JURNAL VIRTUAL OF MECHANICAL ENGINEERING ARTICLE (V-MAC)

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

Laju Penguapan Air Laut pada Kolam Garam Tertutup Menggunakan Teknologi Solar *Still* Berbasis Perpindahan Panas dan Massa

Ahmad Ahdani[1], Dan Mugisidi[2], Oktarina Heriyani[3], Sofia Pinardi[4], Nunik Pratiwi[5]
[1]Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia, ahdanidani030@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 Elektro, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia, sofiapinardi@uhamka.co.id
[5]Program Studi Teknik Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, Jakarta, Indonesia, npratiwi@uhamka.ac.id

Corresponding Author: dan.mugisidi@uhamka.ac.id[2]

Abstract: *Salt production in Indonesia is still not optimal due to the dependence on open pond systems that are highly affected by weather and environmental conditions. This study aims to determine seawater evaporation in a closed salt pond and to analyze the relationship between thermal conditions, vapor pressure differences, and internal heat transfer on the evaporation process. The research was conducted experimentally using a closed salt pond with dimensions of 7 m × 1.5 m × 1.1 m and an initial seawater volume of 420 liters. The experiment was carried out for three consecutive days with a testing duration of 9 hours per day and a data recording interval of 15 minutes. The measured parameters included seawater temperature, vapor temperature, cover temperature, ambient temperature, relative humidity, chamber air pressure, solar radiation intensity, ambient wind speed, and seawater level reduction. The results showed that an increase in solar radiation intensity increased the seawater temperature up to 48.5 °C on the third day and produced the highest evaporation amount of 13,125 g with a thermal efficiency of 19.63%. The temperature increase enhanced the vapor pressure difference between the seawater surface and the inner cover surface, thereby increasing the evaporative heat transfer coefficient up to 29.29 W/m²·K and the evaporative heat transfer rate up to 188.40 W/m². The findings indicate that the evaporation rate in a closed salt pond is primarily governed by vapor pressure differences resulting from temperature variations, making vapor pressure difference the dominant parameter controlling the evaporation process.*

Keyword: *Closed salt pond, Seawater evaporation, Vapor pressure difference, Heat and mass transfer*

Abstrak: Produksi garam di Indonesia masih belum optimal karena ketergantungan pada sistem kolam terbuka yang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan penguapan air laut pada kolam garam tertutup serta

menganalisis hubungan antara kondisi termal, perbedaan tekanan uap, dan perpindahan panas internal terhadap proses penguapan. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan kolam garam tertutup berukuran 7 m × 1,5 m × 1,1 m dengan volume awal air laut sebesar 420 liter. Pengujian dilakukan selama tiga hari berturut-turut dengan durasi 9 jam per hari dan interval pencatatan data setiap 15 menit. Parameter yang diukur meliputi temperatur air laut, temperatur uap, temperatur penutup, temperatur *ambient*, kelembapan relatif, tekanan udara ruang, intensitas radiasi matahari, kecepatan angin *ambient*, dan penyusutan level air laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari meningkatkan temperatur air laut hingga mencapai 48,5°C pada hari ketiga dan menghasilkan jumlah penguapan tertinggi sebesar 13.125 g dengan efisiensi termal sebesar 19,63 %. Peningkatan temperatur memperbesar perbedaan tekanan uap antara permukaan air laut dan penutup bagian dalam sehingga meningkatkan koefisien perpindahan panas evaporasi hingga 29,29 W/m²·K serta laju perpindahan panas evaporasi hingga 188,40 W/m². Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju penguapan pada kolam garam tertutup dipengaruhi oleh perbedaan tekanan uap akibat perbedaan temperatur, sehingga perbedaan tekanan uap menjadi parameter dominan dalam proses penguapan.

Kata Kunci: Kolam garam tertutup, Penguapan air laut, Perbedaan tekanan uap, Perpindahan panas dan massa

1. PENDAHULUAN

Garam merupakan komoditas strategis yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan rumah tangga dan sektor industri [1]. Kebutuhan garam di Indonesia pada tahun 2024 mencapai 5 juta ton dan diperkirakan meningkat sebesar 2,5% setiap tahunnya seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan sektor industri [2]. Di sisi lain, Indonesia memiliki potensi alam yang besar untuk produksi garam, ditandai dengan wilayah laut yang mencakup sekitar dua pertiga 3.288.683 km² dari total luas wilayah [3], serta intensitas radiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m²/hari [4]. Namun demikian, produksi garam nasional hingga saat ini belum mampu memenuhi kebutuhan secara optimal [5], [6], [7], sehingga ketergantungan terhadap impor garam masih relatif tinggi mencapai 2,5 juta ton per tahun [8].

Produksi garam laut pada umumnya dilakukan melalui proses penguapan air laut, yaitu proses pemisahan garam dari air laut dengan memanfaatkan energi panas untuk menguapkan kandungan air hingga terbentuk kristal garam [9], [10]. Secara fisik, penguapan merupakan proses perubahan fase cair menjadi uap yang dipengaruhi oleh parameter seperti temperatur air, radiasi matahari, dan kelembapan [11]. Laju penguapan merupakan parameter utama yang menentukan kecepatan produksi dan efektivitas sistem kolam garam [12], [13]. Rendahnya produktivitas garam rakyat umumnya berkaitan dengan penggunaan sistem kolam terbuka yang sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan lingkungan [14], [15], [16]. Ketidakstabilan tersebut berdampak langsung pada penurunan laju produksi dan dalam beberapa kasus mendorong petani garam untuk beralih profesi sementara [17]. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem produksi garam dengan kolam terbuka belum mampu memanfaatkan potensi energi surya secara optimal dan berkelanjutan.

Sebagai upaya untuk meningkatkan efektivitas penguapan pada kolam garam, sistem kolam garam tertutup dikembangkan menggunakan penutup transparan yang memungkinkan radiasi matahari masuk ke dalam kolam sekaligus menahan uap hasil penguapan. Radiasi matahari yang masuk ke dalam sistem meningkatkan temperatur air laut sehingga tekanan uap pada permukaan air laut meningkat [18]. Perbedaan tekanan uap antara permukaan air laut dan penutup bagian dalam menjadi mekanisme utama yang mendorong proses penguapan [19], [20], [21]. Dalam sistem tertutup ini, laju penguapan dapat dipandang sebagai respons langsung sistem terhadap kondisi termal internal yang terbentuk akibat pemanasan surya pasif [22]. Laju penguapan ditentukan oleh mekanisme perpindahan panas dan massa yang saling berkaitan, di

mana kondisi termal sistem seperti temperatur air laut, temperatur uap, temperatur penutup, kelembapan relatif, dan tekanan menjadi faktor yang mempengaruhi laju perpindahan massa uap air dari permukaan air laut. Selain itu, kondisi lingkungan eksternal juga mempengaruhi kondisi termal sistem dan proses penguapan yang terjadi di dalam kolam garam tertutup.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji pengembangan sistem kolam garam tertutup atau semi tertutup berbasis pemanasan surya pasif. Penelitian pada prototipe *salt house* berdinding kaca dengan atap transparan dan petakan kolam menunjukkan rata-rata laju penguapan sebesar 1,02 liter/hari [23]. Selain itu, sistem berpenutup kaca berbentuk limas dikembangkan dan mampu menghasilkan temperatur air laut rata-rata hingga 44,92 °C serta memungkinkan produksi simultan air tawar dan garam [24]. Pengembangan rumah garam prisma juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur kolam hingga 45-70 °C dapat mempercepat proses produksi garam [18]. Penelitian lain melalui sistem *greenhouse salt tunnel* menunjukkan bahwa sistem tertutup mampu menjaga stabilitas kondisi termal dengan temperatur udara berkisar antara 26-38 °C [25], [26]. Selain itu, rumah garam kubus tertutup dengan sirkulasi udara aktif juga dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas sistem [27]. Di sisi lain, teknologi berbasis *solar still* telah dikembangkan melalui pendekatan eksperimental skala kecil dengan memanfaatkan proses evaporasi dan kondensasi untuk menghasilkan dua produk secara simultan, yaitu garam dan air bersih hasil kondensasi [28], [29]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa konsep *solar still* memiliki potensi untuk diterapkan pada sistem produksi garam tertutup berbasis energi surya. Namun demikian, penelitian yang menerapkan konsep *solar still* pada kolam garam tertutup skala besar untuk mendukung produksi garam sekaligus memanfaatkan air kondensasi hasil penguapan masih terbatas.

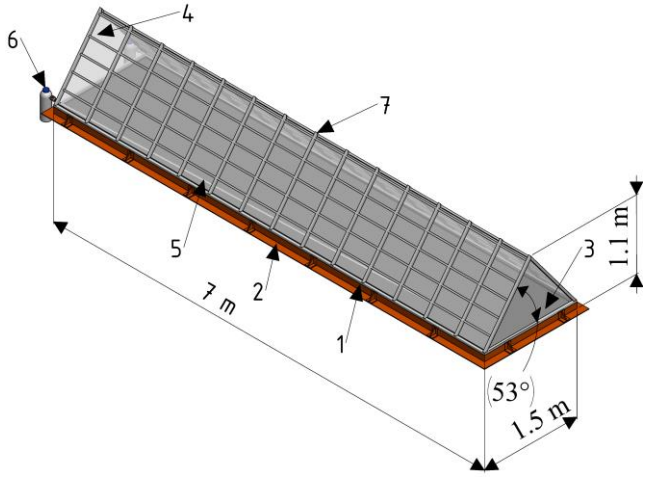
Pada saat yang sama, kebutuhan air tawar terus meningkat [30]. Dalam kolam garam tertutup, uap air hasil penguapan berpotensi untuk dikondensasikan dan dimanfaatkan sebagai air bersih. Oleh karena itu, pada skala yang lebih besar, sistem kolam garam tertutup memiliki potensi untuk mengatasi dua permasalahan secara bersamaan, yaitu peningkatan produksi garam dan pemanfaatan air kondensasi berbasis energi surya. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan secara eksperimental untuk menentukan laju penguapan air laut pada kolam garam tertutup skala besar. Penerapan konsep *solar still* pada sistem produksi garam tertutup skala besar merepresentasikan kondisi aktual produksi garam lapangan, sistem ini dirancang untuk menghasilkan garam sekaligus air kondensasi melalui proses evaporasi dan kondensasi berbasis energi surya. Penelitian ini juga menganalisis hubungan antara kondisi termal sistem, perbedaan tekanan uap, dan perpindahan panas internal terhadap proses penguapan melalui pendekatan perpindahan panas dan massa. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan data kuantitatif mengenai karakteristik evaporasi pada kolam garam tertutup skala besar sebagai dasar pengembangan sistem produksi garam yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menentukan laju penguapan pada kolam garam tertutup. Pengujian dilakukan di area terbuka untuk memperoleh paparan radiasi matahari secara langsung. Pendekatan ini juga memungkinkan identifikasi pengaruh parameter lingkungan terhadap penguapan [31].

Dapat dilihat pada Gambar 1, kolam garam tertutup dirancang dengan konfigurasi berbentuk segitiga (*triangular model*) dengan panjang 7 m, lebar 1,5 m, dan tinggi 1,1 m, serta memiliki dua bidang penutup dengan sudut kemiringan masing-masing sebesar 53°. Sudut kemiringan ini berfungsi untuk meningkatkan penerimaan radiasi matahari sekaligus mempermudah aliran kondensat menuju saluran pengumpul. Penutup menggunakan plastik UV transparan yang dipasang pada bagian dalam rangka kolam. Bagian bawah *basin* terbuat dari multipleks dengan ketebalan 8 mm, sedangkan dindingnya menggunakan kayu dengan

ketebalan 12 mm. Dasar *basin* dilapisi geomembran yang berfungsi sebagai lapisan kedap air sekaligus penyerap radiasi dan tempat pengendapan garam [32]. Komponen dan alat ukur ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 1. Desain Penelitian Kolam Garam Tertutup: (1) Kayu, (2) Multipleks, (3) Geomembran HDPE, (4) Plastik UV, (5) Saluran Kondensat, (6) Penampung Kondensat (7) Rangka
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 1. Komponen Kolam Garam Tertutup

No	Komponen	Fungsi	Spesifikasi
1.	Kayu	Dinding *basin*	Blockboard tebal 12 mm, panjang 1200 mm dan tinggi tinggi 90 mm
2.	Multipleks	Dasar *basin*	Tebal 8 mm
3	Geomembran HDPE	Lapisan dasar *basin* dan kedap air	Tebal 500 micron
4.	Plastik UV	Penutup untuk mentransmisikan radiasi matahari dan menahan uap	Transparan, transmitansi (τ) 0,90 dan tebal 50 micron
5.	Saluran Kondensat	Mengumpulkan dan menyalurkan air hasil kondensasi	½ Pipa PVC 1 inch
6.	Penampung Kondensat	Menampung air kondensasi	Botol 1,5 liter
7.	Rangka	Struktur penopang kolam garam tertutup	Baja ringan 30 x 30 mm

Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 2. Alat Ukur Pengujian

Alat	Fungsi	Spesifikasi
Termometer digital (Tw, Tv, Tgiw, Tgie, dan Ta)	Mengukur temperatur	-50℃ - 110℃, resolusi 0.1℃, akurasi ±0.1℃
Higrometer digital (RH)	Mengukur kelembapan relatif	10% - 99%, resolusi 1%, akurasi ±1%
Solar meter (I(t))	Mengukur radiasi matahari	1-3999 W/m²
Pengukur level air (L)	Mengukur penyusutan level air	Skala 0,05 mm
Pengukur tekanan PCE (P)	Mengukur tekanan	Rentang -20÷ 20 Pa
Anemometer (Va)	Mengukur kecepatan angin *ambient*	0-30 m/s, resolusi 0,1 m/s
Timbangan digital	Mengukur air hasil kondensasi	0-5 kg, 1 g

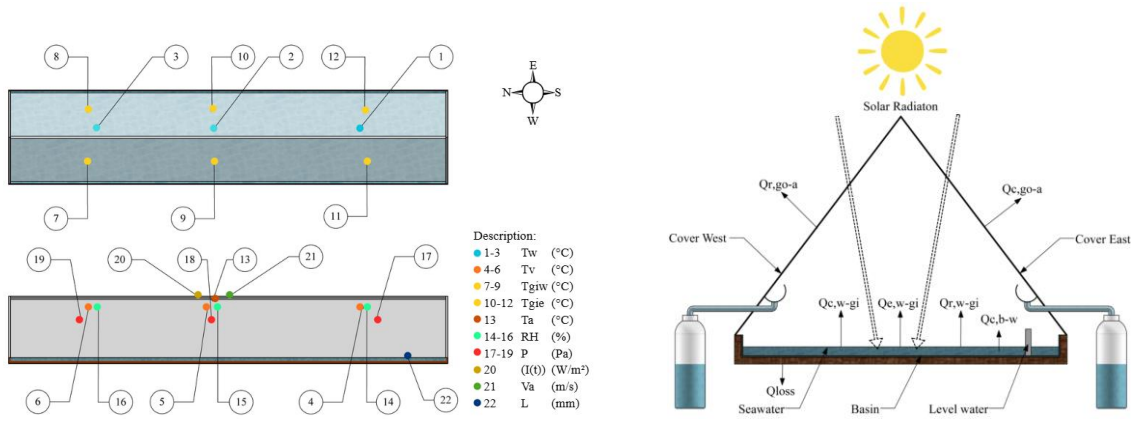
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Skema penempatan alat ukur ditunjukkan pada Gambar 2 (A). Parameter yang dicatat meliputi temperatur air laut (Tw), temperatur uap (Tv), temperatur penutup bagian barat (Tgiw), temperatur penutup bagian timur (Tgie), temperatur *ambient* (Ta), kelembapan relatif (RH), tekanan udara ruang (P), intensitas radiasi matahari (I(t)), level air (L), dan kecepatan angin *ambient* (Va). Pengukuran temperatur, kelembapan, tekanan, dan level air dilakukan di dalam kolam garam, sedangkan pengukuran radiasi matahari, temperatur *ambient* dan

kecepatan angin dilakukan di luar. Ketidakpastian pengukuran dipengaruhi oleh akurasi masing-masing alat ukur sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif menggunakan pendekatan deskriptif. Untuk mengevaluasi tingkat sebaran data hasil pengukuran terhadap nilai rata-rata digunakan analisis standar deviasi. Standar deviasi dihitung untuk menunjukkan tingkat variasi data selama periode pengujian dan mengevaluasi kestabilan parameter yang diukur, dihitung menggunakan persamaan (1) [33]. Dimana S adalah standar deviasi, x_i adalah data pengukuran, $\bar{x}$ adalah nilai rata-rata, dan n adalah jumlah data.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$



(A) **(B)**

Gambar 2. (A) Posisi Instrumen (B) Skema Perpindahan Panas Kolam Garam Tertutup
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA pada bulan januari 2026. Pengujian dilakukan menggunakan volume awal air laut sebesar 420 liter dengan salinitas awal 35 ppt (*parts per thousand*). Selama pengujian, level air diamati sejak kondisi awal hingga terjadi penurunan secara bertahap. Penyusutan level air (L) laut pada *basin* digunakan sebagai dasar untuk menentukan jumlah air laut yang menguap selama proses pengujian. Volume air yang menguap dihitung sebagai hasil perkalian antara perubahan tinggi air dan luas permukaan kolam garam, yang dinyatakan sebagai [33]:

$$V = \Delta h \times A \quad (2)$$

Dimana V adalah volume air yang menguap (g/hari), Δh adalah penyusutan level air (mm) dan A adalah luas penampang kolam garam (m²). Karena kolam berbentuk persegi panjang, luas permukaan dihitung menggunakan persamaan (3). Dimana p adalah panjang kolam (m) dan l adalah lebar kolam (m).

$$\mathrm{A} = \mathrm{p} \times l \quad (3)$$

Gambar 2 (B) menunjukkan skema penelitian yang digunakan. Kolam garam tertutup bekerja berdasarkan mekanisme evaporasi dan kondensasi di dalam ruang tertutup. Radiasi matahari menembus penutup plastik transparan dan mencapai permukaan dasar *basin* yang dilapisi geomembran. Dasar *basin* yang berwarna hitam memiliki daya penyerapan radiasi matahari sebesar 0,98 [34]. Energi panas pada dasar *basin* kemudian dihantarkan secara bertahap ke air laut di atasnya sehingga meningkatkan temperatur air laut. Peningkatan temperatur air laut menyebabkan kenaikan tekanan uap jenuh pada permukaan air sehingga mendorong proses evaporasi [35]. Uap air yang terbentuk mengisi ruang di dalam kolam

garam, sementara garam tertinggal dan mengendap di dasar *basin*. Uap air kemudian bergerak menuju permukaan penutup yang memiliki temperatur lebih rendah dan mengalami kondensasi [36], sehingga terbentuk tetesan air pada permukaan bagian dalam penutup. Tetesan tersebut mengalir mengikuti kemiringan penutup menuju saluran pengumpul dan selanjutnya ditampung sebagai air distilasi.

Dalam model tertutup terjadi beberapa mekanisme perpindahan panas [37]. Secara umum, perpindahan panas terjadi melalui tiga mekanisme, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan panas antara permukaan air dan permukaan penutup bagian dalam dikenal sebagai perpindahan panas internal, ada tiga mekanisme, yaitu konveksi, radiasi, dan evaporasi [38]. Perpindahan panas konveksi dan evaporasi berlangsung secara bersamaan dan independen dari perpindahan panas radiasi. Laju perpindahan panas internal total adalah penjumlahan dari laju perpindahan panas konvektif, radiasi, dan evaporasi antara massa air dan permukaan dalam penutup W/m², yang diberikan sebagai [39]:

$$Q_{t,w-gi} = Q_{c,w-gi} + Q_{r,w-gi} + Q_{e,w-gi} \tag{4}$$

Koefisien perpindahan panas internal total antara massa air dan permukaan dalam penutup W/m²·K, diperoleh dengan persamaan berikut [40]:

$$h_{t,w-gi} = h_{c,w-gi} + h_{r,w-gi} + h_{e,w-gi} \tag{5}$$

Laju perpindahan panas konveksi W/m² terjadi antara air pada *basin* dan permukaan dalam penutup melalui udara lembap akibat perbedaan temperatur di antara keduanya , dihitung sebagai berikut [22].

$$Q_{c,w-gi} = h_{c,w-gi}(T_w - T_{gi}) \tag{6}$$

h_{Cw} adalah koefisien perpindahan panas konveksi antara air dan penutup dalam satuan W/m²·K. Koefisien perpindahan panas konvektif dapat dihitung menggunakan persamaan [41]:

$$h_{C,w-gi} = 0{,}884 \times \left[T_w - T_{gi} + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w + 273{,}15)}{268{,}9 \times 10^3 - P_w]}\right]^{1/3} \tag{7}$$

Dimana T_w (℃) merupakan nilai dari temperatur air laut pada *basin* sedangkan T_{gi} (℃) merupakan nilai temperatur bagian dalam dari penutup. Sedangkan nilai P_w (Pa) merupakan tekanan parsial air dan P_{gi} (Pa) merupakan tekanan parsial diatas permukaan air yaitu pada bagian dalam dari penutup kolam, masing-masing nilai tersebut dihitung menggunakan rumus persamaan [34].

$$P_w = exp\left[25.317 - \left(\frac{5144}{273 + T_w}\right)\right] \tag{8}$$

$$P_{gi} = exp\left[25.317 - \left(\frac{5144}{273 + T_{gi}}\right)\right] \tag{9}$$

Perpindahan panas evaporatif terjadi antara permukaan air dan permukaan penutup bagian dalam. Untuk menghitung Laju perpindahan panas evaporatif W/m² dapat dihitung menggunakan persamaan [42]:

$$Q_{e,w-gi} = h_{e,w-gi}(T_w - T_g) \tag{10}$$

$h_{e,w-gi}$ disebut sebagai koefisien perpindahan panas penguapan antara massa air dan permukaan dalam penutup kolam W/m²·K, dihitung berdasarkan hubungan empiris dengan koefisien konveksi [43]:

$$h_{e,w-gi} = 16.237 \times 10^{-3} \times h_{c,w-gi}\left[\frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})}\right] \tag{11}$$

Laju perpindahan panas radiasi W/m² dari permukaan air laut ke penutup bagian dalam dihitung menggunakan persamaan [44]:

$$Q_{r,w-gi} = h_{r,w-gi}(T_w - T_{gi}) \quad (12)$$

Di mana $Q_{r,w-giw}$ adalah koefisien perpindahan panas radiasi antara massa air dan permukaan dalam penutup W/m²·K dan dinilai oleh [45]:

$$h_{r,w-gi} = \varepsilon_{eff} \times \sigma \times \left[(T_w + 273)^2 + (T_{gi} + 273)^2\right] \times (T_w + T_{gi} + 546) \quad (13)$$

Dimana σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann dengan nilai $5.67 \times 10^{-8}\, W/^2 \cdot K^4$, emisivitas efektif ε_{eff} antara massa air dan penutup bagian dalam dan ditentukan dari emisivitas air laut (ε_w) dan penutup ε_g menggunakan persamaan [46]:

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1\right) \quad (14)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan data kolam garam tertutup dilakukan di bawah paparan radiasi matahari langsung selama 3 hari berturut-turut, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Data dicatat setiap 15 menit selama 9 jam selama 3 hari pengujian, selanjutnya dianalisis menggunakan persamaan matematis yang berasal dari teori perpindahan panas dan massa untuk mengkaji laju penguapan. Pemanasan sistem terjadi akibat radiasi matahari yang ditransmisikan melalui penutup transparan [36].

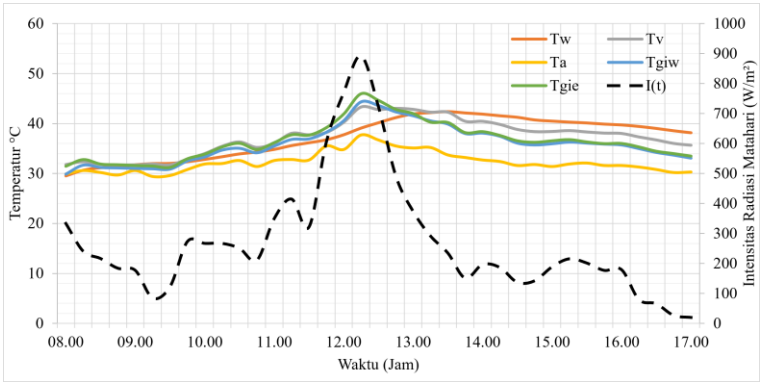


Gambar 3. Unit Kolam Garam Tertutup
Sumber: Dokumentasi Penelitian, 2026

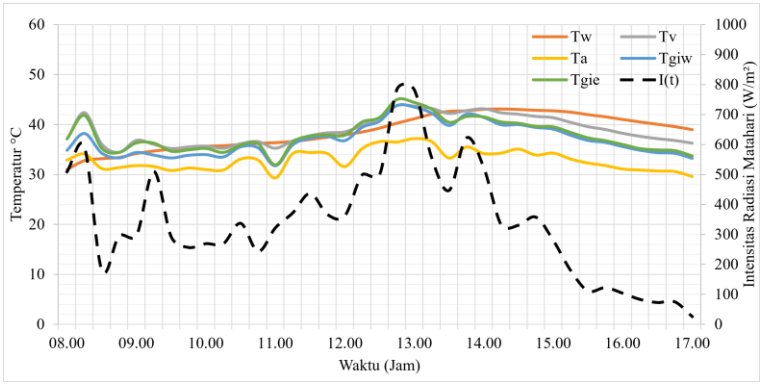
Seperti ditunjukkan pada Gambar 4, intensitas radiasi matahari selama periode pengujian mengalami fluktuasi. Pada hari pertama intensitas radiasi (I(t)) berkisar antara 20,07-891,91 W/m², pada hari kedua 26,39-784,47 W/m², dan pada hari ketiga 45,03-925,09 W/m². Perbedaan intensitas radiasi matahari tersebut menyebabkan respons temperatur yang berbeda pada setiap hari pengujian. Temperatur air laut (T_w) cenderung meningkat sejak pagi hari dan mencapai nilai maksimum pada kisaran waktu 12.30-14.30 WIB, kemudian menurun menjelang sore hari. Temperatur maksimum air laut tercatat sebesar 42,5°C pada hari pertama dengan rata-rata 37,18°C dan standar deviasi ±4,06, pada hari kedua 43,1°C dengan rata-rata 38,54°C dan standar deviasi ±3,52, serta 48,5°C pada hari ketiga dengan rata-rata 42,33°C dan standar deviasi ±4,68. Nilai standar deviasi temperatur air laut menunjukkan adanya fluktuasi temperatur selama pengujian yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas radiasi matahari dan kondisi lingkungan. Namun demikian, perubahan temperatur air laut (T_w) tidak secara langsung mengikuti perubahan intensitas radiasi matahari (I(t)), sehingga waktu tercapainya temperatur maksimum tidak selalu bertepatan dengan puncak intensitas radiasi matahari. Hal ini disebabkan karena air laut hanya menyerap sebagian kecil radiasi matahari sedangkan sebagian besar diteruskan dan diserap oleh dasar *basin*, energi panas pada dasar *basin* kemudian dihantarkan ke air laut di atasnya, sehingga respons temperatur air (T_w) berlangsung lebih lambat. Dasar *basin* yang menggunakan geomembran mampu menyimpan energi panas selama periode pemanasan [32]. Energi panas yang tersimpan tersebut kemudian dilepaskan secara bertahap ke air laut, sehingga temperatur air (T_w) tetap relatif tinggi meskipun intensitas

radiasi matahari telah menurun pada periode siang menuju sore hari. Temperatur uap (T_v) cenderung mengikuti temperatur air laut karena uap terbentuk dari permukaan air sebagai sumber penguapan. Pada kisaran waktu 13.00 WIB hingga sore hari, temperatur uap (T_v) tercatat sedikit lebih rendah dibandingkan temperatur air laut. Kondisi ini disebabkan oleh pelepasan panas laten ketika uap air mengalami proses kondensasi pada permukaan penutup. Ketika penguapan terjadi, uap air yang terbentuk dari permukaan air bergerak menuju permukaan penutup bagian dalam dan mengembun.

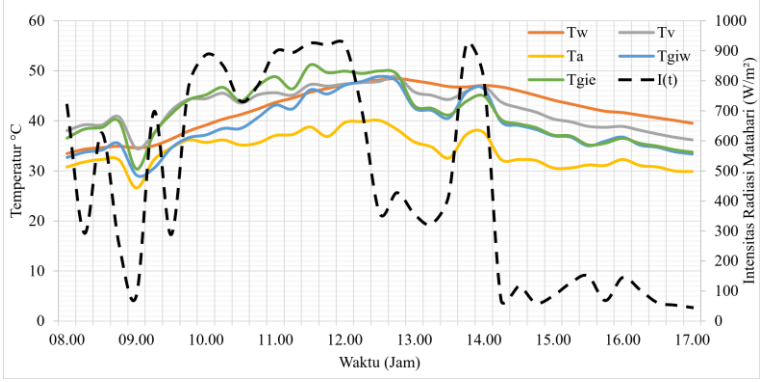
Temperatur penutup (T_{giw}) dan (T_{gie}) cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah uap yang dihasilkan dari proses evaporasi, terlihat dari perubahan temperatur uap. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa temperatur penutup bagian dalam dipengaruhi oleh temperatur air laut [47]. Temperatur penutup sensitif terhadap kondisi atmosfer di sekitarnya, dan hanya sebagian kecil radiasi matahari yang diserap penutup [42]. Akibatnya, pada periode siang menuju sore hari temperatur penutup cenderung lebih rendah dibandingkan temperatur air dan temperatur uap. Kondisi ini juga dipengaruhi oleh menurunnya intensitas radiasi matahari (I(t)). Temperatur *ambient* (T_a) umumnya lebih rendah dibandingkan parameter temperatur lain yang diukur karena dipengaruhi langsung oleh kondisi lingkungan.



(A)



(B)



(C)

Gambar 4. (A) Temperatur Hari Pertama, (B) Temperatur Hari Kedua, (C) Temperatur Hari Ketiga
Sumber: Data Hasil Penelitian, 2026

Penguapan air merupakan proses perubahan fase dari cair menjadi uap [48]. Pada penelitian ini penguapan aktual diperoleh dari pengukuran penyusutan level air (L) di dalam *basin*, yang dihitung menggunakan persamaan (2). Penguapan teoritis dapat dihitung menggunakan persamaan (15) sebagai berikut [49]:

$$m_w = \frac{Q_{e,w-giw} + Q_{e,w-gie}}{h_{fg}} \times 3600 \quad (15)$$

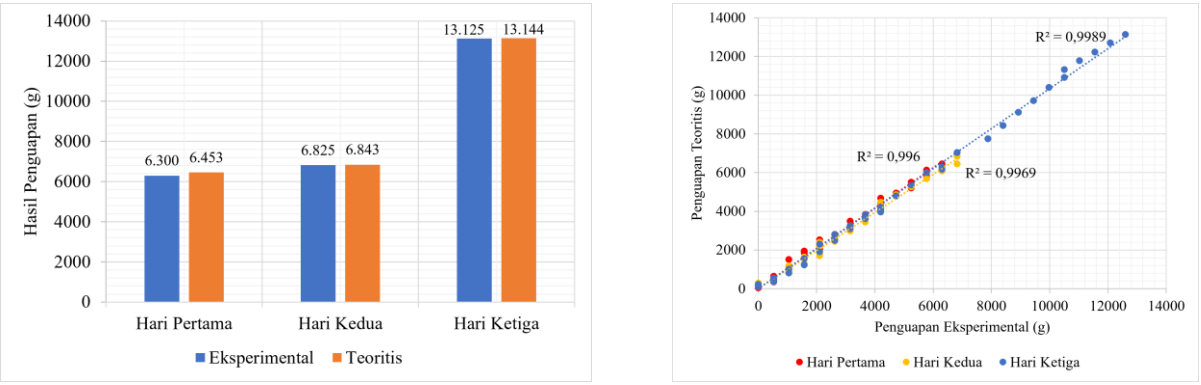
Dimana m_w merupakan laju penguapan air laut yang dikonversi ke (g/hari) ,$Q_{e,w-giw}$ merupakan laju perpindahan panas akibat evaporasi dari air ke sisi barat dan

$Q_{e,w-gie}$ laju perpindahan panas akibat evaporasi dari air ke sisi timur, masing-masing dihitung menggunakan persamaan (10) dengan satuan W/m². Sedangkan h_{fg} menyatakan kalor laten penguapan air dalam satuan J/kg yang dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [38]:

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^{6}[1 - 94779 \times 10^{-4}T_w + 1{,}3132 \times 10^{-7}T_w^2 + 4{,}7974 \times 10^{-9}T_w^3] \quad (16)$$

Perpindahan panas antara massa air laut dan permukaan penutup bagian dalam memainkan peran penting dalam proses penguapan, karena energi panas yang ditransfer dari air menuju penutup menyediakan energi yang diperlukan untuk terjadinya perubahan fase dari cair menjadi uap [50]. Koefisien perpindahan panas menunjukkan kemampuan sistem dalam mentransfer energi, sedangkan laju perpindahan panas merepresentasikan energi panas aktual yang berperan langsung dalam proses penguapan [51], [52]. Perpindahan panas di dalam kolam garam tertutup terjadi melalui udara lembap yang terperangkap di dalam sistem. Karena sistem bersifat kedap udara, perpindahan panas konveksi didominasi oleh konveksi alami akibat gaya apung [45]. Udara di dalam ruang menjadi lembap akibat akumulasi uap air dari permukaan air laut. Perbedaan temperatur antara air laut dan penutup bagian dalam menghasilkan perbedaan densitas fluida yang memicu sirkulasi alami dan mengendalikan perpindahan panas serta massa di dalam sistem. Dalam kondisi ini, koefisien evaporasi $(h_{e,w-gi})$ dipengaruhi oleh temperatur air dan penutup, yang mengendalikan mekanisme konveksi alami. Peningkatan temperatur air laut memperkuat gaya apung, meningkatkan sirkulasi udara, serta mempercepat perpindahan massa, sehingga meningkatkan koefisien evaporasi. Selain itu, kalor laten penguapan (h_{fg}) merupakan fungsi temperatur, di mana peningkatan temperatur menyebabkan penurunan nilai (h_{fg}), sehingga energi yang dibutuhkan untuk perubahan fase menjadi lebih kecil. Dengan demikian, temperatur berperan sebagai parameter dominan yang mempengaruhi perbedaan tekanan uap, koefisien evaporasi, dan kebutuhan energi evaporasi.

Pada sistem tertutup, penguapan air laut dikendalikan oleh perbedaan tekanan antara permukaan air (P_w) dan penutup bagian dalam (P_{gi}) yang sebanding dengan perbedaan temperatur [53]. Secara teoritis, laju evaporasi berbanding lurus dengan koefisien perpindahan massa dan selisih tekanan uap $(P_w - P_{gi})$. Peningkatan temperatur air akibat radiasi matahari meningkatkan tekanan uap jenuh pada permukaan air, sementara temperatur penutup yang lebih rendah mempertahankan tekanan uap pada sisi penutup, sehingga memperbesar perbedaan tekanan uap. Selain itu, kelembapan relatif yang tinggi akan menurunkan kemampuan udara untuk menerima uap tambahan, sehingga dapat menghambat laju evaporasi [54]. Gambar 5 (A) menunjukkan jumlah air laut yang berhasil diuapkan selama periode pengujian, sedangkan Gambar 5 (B) menunjukkan korelasi antara penguapan teoritis dan penguapan aktual.



(A) **(B)**

Gambar 5. (A) Hasil Penguapan, (B) Korelasi Penguapan Eksperimental dan Teoritis
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 5 (A) setiap pengujian menghasilkan penguapan yang berbeda. Hasil pengujian menunjukan pada hari pertama penguapan aktual tercatat sebesar 6.300 g, meningkat menjadi 6.852 g pada hari kedua, dan mencapai 13.125 g pada hari ketiga. Sementara itu penguapan teoritis pada hari pertama sebesar 6.453 g, meningkat menjadi 6.843 g pada hari kedua, dan mencapai 13.144 g pada hari ketiga. Selama pengujian penguapan terjadi pada rentang temperatur air laut antara 29,5-48,5 °C. Laju penguapan terbesar tercatat sebesar 71 g/m² pada hari ketiga, sedangkan laju penguapan terkecil sebesar 0,6 g/m² terjadi pada hari pertama. Peningkatan ini disebabkan oleh intensitas radiasi matahari yang lebih tinggi pada hari ketiga, yang meningkatkan temperatur air laut. Kondisi ini meningkatkan tekanan uap jenuh (P_w) serta memperbesar selisih tekanan uap $(P_w - P_{gi})$, yang mempercepat perpindahan massa uap air menuju penutup [53]. Fenomena ini sejalan dengan penelitian [55] yang menyatakan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari akan meningkatkan temperatur air laut. Kondisi atmosfer eksternal juga berperan dalam mengendalikan temperatur penutup bagian dalam. Pendinginan konvektif akibat temperatur *ambient* dan kecepatan angin menurunkan temperatur penutup, sehingga menurunkan tekanan uap pada sisi penutup dan memperbesar perbedaan tekanan uap. Pada penelitian ini, kecepatan angin rata-rata tercatat sebesar 1,11 m/s pada hari pertama, 1,09 m/s pada hari kedua, dan 1,38 m/s pada hari ketiga. Kecepatan angin yang lebih tinggi meningkatkan kehilangan panas konvektif pada permukaan penutup sehingga mempercepat proses pendinginan [56].

Peningkatan kondisi termal sistem juga tercermin pada kenaikan koefisien dan laju perpindahan panas evaporasi. Hasil perhitungan (11) menunjukan nilai koefisien perpindahan panas evaporasi maksimum meningkat dari 19,74 W/m²·K pada hari pertama menjadi 20,51 W/m²·K pada hari kedua, dan mencapai 29,29 W/m²·K pada hari ketiga. Sejalan dengan itu, laju perpindahan panas evaporasi maksimum dihitung menggunakan persamaan (10) menghasilkan 97,08 W/m² pada hari pertama, kemudian pada hari kedua 148,56 W/m² dan mencapai 188,40 W/m² pada hari ketiga. Sesuai dengan persamaan (15), peningkatan laju perpindahan panas ini secara langsung meningkatkan energi laten yang tersedia untuk perubahan fase, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan massa air yang diuapkan. Hal ini tervalidasi oleh peningkatan jumlah penguapan yang signifikan pada hari ketiga. Sebaliknya, pada kondisi temperatur yang lebih rendah, perbedaan temperatur antara air dan penutup mengecil sehingga perbedaan tekanan uap dan koefisien evaporasi menurun, yang menyebabkan laju evaporasi lebih rendah. Meskipun demikian, evaporasi tetap berlangsung karena perbedaan temperatur masih menghasilkan perpindahan massa uap menuju penutup. Kelembapan udara di dalam sistem juga mempengaruhi laju evaporasi.

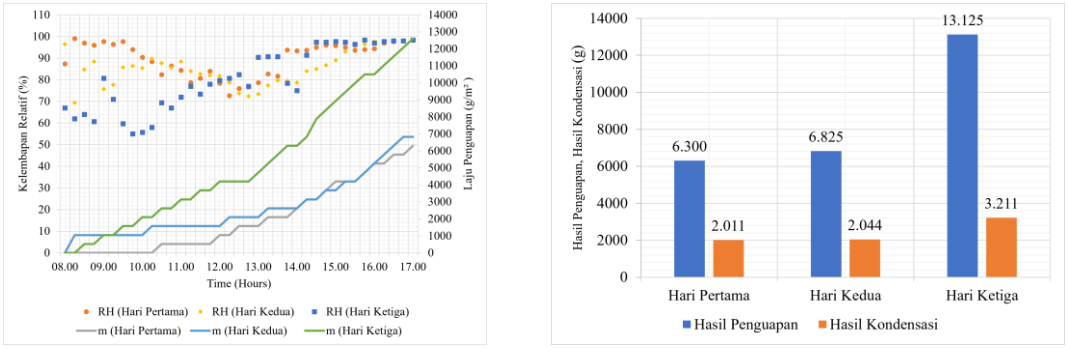
Tekanan total di dalam sistem juga dianalisis. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa tekanan gauge berada pada rentang -3 hingga 1 Pa, yang setara dengan tekanan absolut mendekati tekanan atmosfer (101321-101325 Pa). Kondisi ini sejalan dengan penelitian [57] pada sistem tertutup yang menunjukkan bahwa tekanan internal berada di sekitar tekanan atmosfer. Penurunan tekanan ini terjadi akibat proses kondensasi uap air pada permukaan penutup yang mengurangi jumlah molekul uap dalam ruang tertutup. Namun, karena perubahan tekanan relatif kecil, pengaruhnya terhadap laju penguapan tidak signifikan, sehingga mekanisme penguapan lebih didominasi oleh perbedaan tekanan parsial uap air dibandingkan tekanan total sistem.

Koefisien perpindahan panas internal dari masing-masing mekanisme diperoleh dari persamaan (7), (11), dan (13), kemudian dihitung menggunakan persamaan (5) untuk memperoleh koefisien perpindahan panas internal total. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai koefisien perpindahan panas internal total tercatat 15,5683 W/m²·K pada hari pertama, pada hari kedua sebesar 18,3983 W/m²·K dan pada hari ketiga mencapai 20,8412 W/m²·K. Laju perpindahan panas berbanding lurus dengan koefisien perpindahan panas dan perbedaan temperatur. Laju perpindahan panas dari masing-masing mekanisme dihitung menggunakan

persamaan (6), (10), dan (12), dan dijumlahkan melalui persamaan (4) untuk memperoleh laju perpindahan panas total. Nilai maksimum laju perpindahan panas pada hari pertama tercatat sebesar 63,8283 W/m², meningkat menjadi 68,8231 W/m² pada hari kedua, dan mencapai 128,214 W/m² pada hari ketiga. Peningkatan ini menunjukkan bahwa semakin besar energi panas yang ditransfer, semakin besar pula energi yang tersedia untuk proses penguapan. Penelitian lain juga menyebutkan bahwa peningkatan laju perpindahan panas berkontribusi langsung terhadap peningkatan laju penguapan air laut [50].

Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun perpindahan panas menentukan ketersediaan energi untuk proses perubahan fase, laju penguapan secara dominan dikendalikan oleh perbedaan tekanan uap yang dihasilkan oleh perbedaan temperatur antara air dan penutup. Dapat dilihat pada Gambar 5 (B), kesesuaian antara penguapan aktual dan penguapan teoritis, yang ditunjukkan oleh nilai korelasi sebesar 0,996-0,9989. Nilai yang mendekati satu menunjukkan korelasi yang kuat antara model teoritis dan hasil eksperimen dalam merepresentasikan proses Penguapan [58]. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa model perpindahan panas dan massa yang digunakan mampu menggambarkan mekanisme evaporasi yang terjadi di pada kolam garam tertutup.

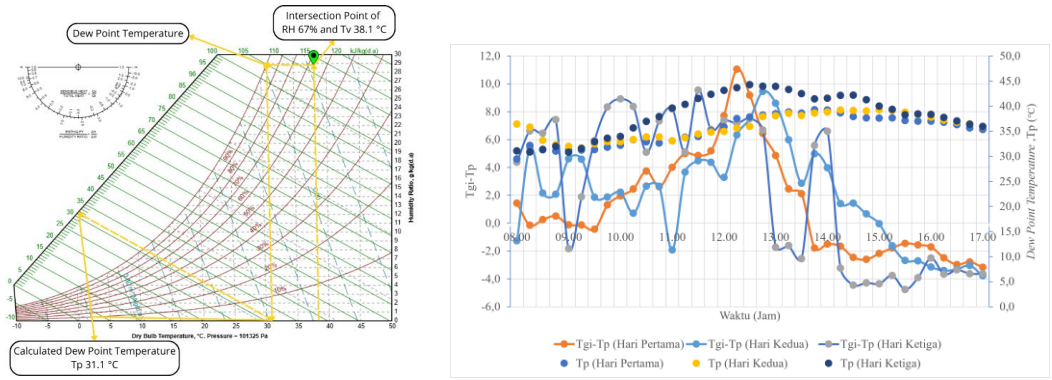
Gambar 6 (A) menunjukkan hubungan antara kelembapan relatif dan penguapan. Proses penguapan menghasilkan uap air yang terakumulasi di dalam ruang tertutup, membentuk udara lembap dan meningkatkan kelembapan relatif akibat bertambahnya konsentrasi uap air di dalam ruang tersebut [53].



(A) **(B)**

Gambar 6. (A) Kelembapan Relatif dan Laju Penguapan (B) Jumlah kondensasi
Sumber: Data Hasil Penelitian, 2026

Uap air yang terbentuk dari proses penguapan kemudian bergerak ke permukaan penutup dan mengalami kondensasi, membentuk butiran air yang selanjutnya mengalir untuk dikumpulkan [59]. Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 6 (B) jumlah air kondensasi terbesar terjadi pada hari ketiga mencapai 3.211 g, yang sejalan dengan besarnya jumlah air laut yang berhasil diuapkan. Analisis psikrometrik digunakan untuk mengidentifikasi kondisi terjadinya kondensasi berdasarkan hubungan antara temperatur uap dan kelembapan relatif. Salah satu parameter penting dalam analisis ini adalah temperatur titik embun (*dew point temperature*), yaitu temperatur ketika udara lembap mencapai kondisi jenuh sehingga uap air mulai mengalami kondensasi [60] . Sebagai contoh pada pagi hari ketiga diperoleh temperatur uap sebesar 38,1 °C dan kelembapan relatif sebesar 67 %, sehingga menghasilkan temperatur titik embun sebesar 31,1 °C. Penentuan nilai ini ditunjukkan pada Gambar 7 (A) menggunakan diagram psikrometrik.



(A) **(B)**

Gambar 7. (A) Grafik Psikometrik Diambil Dari [61], *Dew Point Temperature* Hari Ketiga, Jam 08.00 WIB, (B) *Dew Point Temperature* (Tp), Selisih (Tgi-Tp)
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Kondensasi terjadi ketika uap air bersentuhan dengan permukaan yang lebih dingin daripada titik embunnya [62]. Oleh karena itu, selisih temperatur antara temperatur penutup dan temperatur titik embun digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi terjadinya proses kondensasi. Nilai selisih temperatur yang bernilai negatif menunjukkan bahwa temperatur penutup lebih rendah daripada temperatur titik embun, sehingga kondisi tersebut mendukung terjadinya proses kondensasi pada permukaan penutup, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 (B).

$$\eta = \frac{\sum \mathrm{m} \times \mathrm{h_{fg}}}{\sum \mathrm{I(t)} \,.\, \mathrm{A} \,.\, \mathrm{t}} \times 100\% \qquad (17)$$

Efisiensi dari kolam garam tertutup dapat dicari menggunakan persamaan (17) [46], di mana η adalah efisiensi termal (%), m adalah massa air yang diuapkan (g), h_{fg} adalah kalor laten penguapan air (J/kg), $I(t)$ adalah intensitas radiasi matahari yang diterima (W/m²), A adalah luas permukaan basin (m²), dan t adalah waktu pengujian (s). Berdasarkan hasil pengujian efisiensi tertinggi diperoleh pada hari ketiga sebesar 19,66 % secara teoritis dan 19,63 % secara aktual. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan hari pertama dan hari kedua karena temperatur air laut yang lebih tinggi mempercepat proses evaporasi, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi radiasi matahari pada kolam garam tertutup [63]. Namun, nilai efisiensi termal tersebut masih lebih rendah dibandingkan sistem kolam garam berbasis *solar still* pada skala kecil yang mampu mencapai efisiensi sekitar 22-40 % [28], [29]. Perbedaan ini disebabkan oleh besarnya *heat loss* pada sistem kolam garam skala terbuka, terutama melalui konduksi pada lapisan dasar basin ke lingkungan, sehingga pemanfaatan energi panas untuk proses evaporasi menjadi kurang optimal.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menentukan penguapan pada kolam garam tertutup skala besar, selama 3 hari pengujian di bawah paparan radiasi matahari langsung. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi matahari meningkatkan temperatur air laut hingga mencapai 48,5 °C pada hari ketiga, yang diikuti oleh peningkatan jumlah penguapan hingga 13.125 g dan efisiensi termal sebesar 19,63 %. Peningkatan temperatur air laut memperbesar perbedaan temperatur antara permukaan air laut dan penutup bagian dalam sehingga meningkatkan perbedaan tekanan uap sebagai gaya pendorong utama perpindahan massa uap air. Peningkatan temperatur air juga meningkatkan koefisien perpindahan panas evaporasi hingga 29,29 W/m²·K dan laju perpindahan panas evaporasi hingga 188,40 W/m². Analisis menunjukkan bahwa laju penguapan pada kolam garam tertutup dipengaruhi oleh keterkaitan antara kondisi termal sistem, perbedaan tekanan uap, dan perpindahan panas evaporasi, di mana perbedaan tekanan uap akibat perbedaan temperatur menjadi parameter dominan dalam proses

penguapan. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada durasi pengujian yang relatif singkat dan kondisi atmosfer yang belum bervariasi secara luas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh material penutup, absorber, dan kondisi lingkungan yang lebih beragam terhadap karakteristik perpindahan panas dan massa pada kolam garam tertutup serta melakukan pengujian dalam durasi yang lebih panjang.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM), Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi (Kemendiktisaintek), atas dukungan pendanaan penelitian ini berdasarkan kontrak nomor 124/C3/DT/05.00/PL/2025; 0992/LL3/AL.04/2025; 299/F03.07/2025, serta kepada tim penelitian kolam garam tertutup, Fakultas Teknologi Industri dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA, atas dukungan teknis, bimbingan ilmiah, dan kontribusi aktif selama pelaksanaan penelitian, yang berperan penting dalam kelancaran kegiatan penelitian dan pencapaian hasil yang diperoleh.

REFERENSI

[1] R. Sunoko, A. Saefuddin, R. Syarief, and N. Zulbainarni, "Proteksionisme dan Standardisasi Garam Konsumsi Beryodium," *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, vol. 12, no. 2, pp. 101–111, Dec. 2022, doi: http://dx.doi.org/10.15578/jksekp.v12i2.11077.

[2] M. I. Ramadhan, T. Y. R. Syah, D. A. Negoro, and E. Ruswanti, "Implementasi Teknologi Flaudized Bed Cover (FBD) dan Perencanaan Human Capital untuk Peningkatan Kualitas Garam Indonesia di PT. Ladang Garam Indonesia," *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 4, no. 4, pp. 919–932, Aug. 2025, doi: https://doi.org/10.55123/insologi.v4i4.5688.

[3] R. Wirangga, D. Mugisidi, A. T. Sayuti, and O. Heriyani, "The Impact of Wind Speed on the Rate of Water Evaporation in a Desalination Chamber," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 106, no. 1, pp. 39–50, Jun. 2023, doi: https://doi.org/10.37934/arfmts.106.1.3950.

[4] S. Dewi, A. Agustina, Z. Stabita, and B. Purba, "Analisis Pengaruh Radiasi Matahari Terhadap Cahaya yang Dihasilkan oleh Panel Surya," *Edukasi Elita : Jurnal Inovasi Pendidikan*, vol. 2, no. 1, pp. 276–281, Dec. 2024, doi: 10.62383/edukasi.v2i1.1032.

[5] M. Nompo, Sumarni, and N. K. Toniasih, "Optimalisasi Tambak Garam di Desa Bontomanai Kabupaten Pangkep," *Jurnal Riset Diwa Bahari*, vol. 3, no. 1, pp. 28–37, 2025.

[6] Muclisin and C. Wasonowati, "Analisis Faktor-Faktor Impor Garam Di Indonesia," *Buletin Pemberdayaan Masyarakat dan Desa*, vol. 1, no. 2, pp. 48–54, 2021, doi: 10.21107/bpmd.v1i2.28618.

[7] R. Adila and Budiasih, "Mampukah Usaha Rumah Tangga Penggalian Garam Tambang Industri di Indonesia Mencapai Produksi Optimal?," vol. ., no. 1, pp. 31–40, 2023, doi: https://doi.org/10.34123/semnasoffstat.v2023i1.1695.

[8] A. M. Anshar, I. Raya, A. I. Latunra, A. C. Malina, and E. Mayasari, "Peningkatan Kualitas Garam Krosok di Desa Bontobahari, Kecamatan Bontoa, Kabupaten Maros," *Jurnal Aplikasi dan Inovasi Iptek (JASINTEK)*, vol. 7, no. 1, pp. 37–45, Aug. 2025, doi: https://doi.org/10.52232/jasintek.v7.i1.18.

[9] B. Oktaviansyah, E. N. R. I. Firdausi, Soemargono, and L. Suprianti, "Kajian Proses Penguapan Air Laut Pada Evaporator Sederhana dengan Counter Current Sprayer," *Journal of Chemical and Process Engineering Jurnal ChemPro*, vol. 2, no. 2, pp. 57–62, 2021, doi: https://doi.org/10.33005/chempro.v2i02.101.

[10] R. P. Pasaribu, A. Tanjung, A. K. Pranoto, and R. D. Ryani, "The Comparative Study of The Effectiveness of Seawater Aging with Traditional Techniques and Water Heater Technique for Salt Production," *Pelagicus:Jurnal IPTEK Terapan Perikanan dan Kelautan*, vol. 5, no. 1, pp. 47–59, Jan. 2024, doi: 10.15578/plgc.v5i1.14059.

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

[12] A. A. Ashilah, A. Wirasatriya, and G. Handoyo, "Analisis Variabel Fisika Perairan Terhadap Kuantitas Produksi Garam di Kabupaten Rembang," *Indonesian Journal of Oceanography*, vol. 04, pp. 68–76, 2022.

[13] A. Mustofa, M. Zainuri, Kunarso, and L. Maslukah, "Variabilitas Tahunan Produksi Garam di Wilayah Timur Laut Jawa Tengah, Indonesia," *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 14, no. 2, pp. 255–266, Jun. 2025, doi: 10.14710/buloma.v14i2.70661.

[14] E. Banowati and F. Firmanzah, "Cuaca Dan Kegiatan Pertanian Garam Di Kecamatan Kaliori - Rembang," *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, vol. 1, no. 2, pp. 94–114, Jul. 2023, doi: 10.15294/ka.v1i2.142.

[15] F. U. Safitri and A. P. Marzaman, "Dampak Perpers No. 126 Tahun 2022 Terhadap Upaya Mencapai Swasembada Garam 2024," *ALADALAH: Jurnal Politik, Sosial, Hukum dan Humaniora*, vol. 2, no. 1, pp. 191–202, 2024, doi: https://doi.org/10.59246/aladalah.v2i1.649.

[16] K. Ardyanto, U. Rahmani, and M. Patanda, "Analisis Variabel Produktivitas Garam dan Dampak Kebijakan Impor Garam di Kabupaten Rembang, Jawa Tengah," *Jurnal Ilmiah Satya Minabahari*, vol. 7, no. 2, pp. 32–43, Jun. 2022, doi: 10.53676/jism.v7i2.165.

[17] E. Agustina and S. J. Utomo, "Strategi Bertahan Hidup Petani Garam Saat Musim Penghujan Di Desa Pangarengan Kecamatan Pangarengan Kabupaten Sampang," *Buletin Ekonomika Pembangunan*, vol. 4, no. 1, pp. 185–196, 2023, doi: https://doi.org/10.21107/bep.v4i1.20884.

[18] M. Muhammad, N. Za, S. Fachrurrazi, A. F. Ramadhani, and M. R. A. Sebayang, "Pengembangan Potensi Air Laut Menjadi Garam Industri Dan Garam Konsumsi Untuk Pemberdayaan Masyarakat Dengan Metode Rumah Prisma Di Desa Batuphat Barat Kota Lhokseumawe," *Jurnal Malikussaleh Mengabdi*, vol. 2, no. 1, pp. 35–50, Apr. 2023, doi: doi.org/10. 29103/jmm.v2i1.10474.

[19] N. Ghazouani *et al.*, "Greenhouse Desalination by Humidification–Dehumidification Using a Novel Green Packing Material," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/w14060869.

[20] M. Zamen, M. Kahani, and G. Zarei, "Seawater Greenhouse Equipped with a Novel Solar Humidification-Dehumidification Desalination Unit in MAKRAN Coast: Fabrication and Experimental Study," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/w15030539.

[21] S. H. Soomro, R. Santosh, C. U. Bak, W. S. Kim, and Y. D. Kim, "Humidification–dehumidification desalination system powered by simultaneous air–water solar heater," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 23, Dec. 2021, doi: 10.3390/su132313491.

[22] A. Ghazy, "Theoretical study of a double-slope solar still with solar air heater condenser," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 12, no. 6, pp. 977–986, Nov. 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.53928.

[23] N. I. Nuzula, I. Masruroh, A. G. D. Kartika, M. Efendy, and F. Setiyawan, "Evaporation Rate Analysis Of Raw Water In Salt Production Using a Prototype At Salt House," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1250, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1250/1/012004.

[24] G. Djoyowasito, A. M. Ahmad, M. Lutfi, and A. Anggra, "Rancang Bangun Model Penghasil Air Tawar dan Garam dari Air Laut Berbasis Efek Rumah Kaca Tipe Penutup Limas," *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, vol. 6, no. 2, pp. 107–119, 2018, Accessed: Nov. 07, 2025. [Online]. Available: https://jkptb.ub.ac.id/index.php/jkptb/article/view/456

[25] A. A. Amin *et al.*, "Analysis of Environmental Dynamic Factors During Salt Crystallization Process in Greenhouse Salt Tunnel (A Case Study in South Coastal and North Coastal East Java, Indonesia)," *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol. 11, no. 4, pp. 567–574, Apr. 2025, doi: 10.29303/jppipa.v11i4.7131.

[26] A. A. Amin *et al.*, "Greenhouse Salt Tunnel as Innovation to Create Salt Production in the South Coast Malang Regency, Indonesia," *Jurnal Pembangunan dan Alam Lestari*, vol. 14, no. 1, pp. 14–21, Jul. 2023, doi: 10.21776/ub.jpal.2023.014.01.03.

[27] T. A. Nasution, A. Imran, and S. A. Lestrari, "Otomatisasi Rumah Garam Kubus (Timah Gabus) Sinergi dalam Upaya Meningkatkan Produktivitas Garam Lokal," *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, vol. 2, no. 3, pp. 549–544, Dec. 2019, doi: 10.32734/ee.v2i3.776.

[28] G. Ni, S. H. Zandavi, S. M. Javid, S. V. Boriskina, T. A. Cooper, and G. Chen, "A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination," *Energy Environ. Sci.*, vol. 11, no. 6, pp. 1–15, Jun. 2018, doi: 10.1039/c8ee00220g.

[29] J. Xu *et al.*, "Solar-Driven Interfacial Desalination For Simultaneous Freshwater and Salt Generation," *Desalination*, vol. 484, pp. 1–9, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114423.

[30] G. Gusnawati, "Analisis Kualitas Air Minum Isi Ulang Dengan Menggunakan Teknologi Reverse Osmosis (RO)," *V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 8, no. 2, pp. 66–70, 2023, doi: https://doi.org/10.36526/v-mac.v8i2.3168.

[31] R. Sathyamurthy, "Experimental analysis of solar still equipped with porous rubber sheet as energy storage material," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-93148-5.

[32] Y. Ulfidatul and H. Fakultas, "Peningkatan Kualitas Produksi Garam Menggunakan Teknologi Geomembran," *JSMB*, vol. 6, no. 2, pp. 35–42, 2019, [Online]. Available: http://journal.trunojoyo.ac.id/jsmb

[33] 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," *Jurnal Polimesin*, vol. 23, no. 6, pp. 837–846, 2025, doi: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v23i6.7867.

[34] A. S. Shareef, H. J. Kurji, and A. H. Hamzah, "Modifying performance of solar still, by using slices absorber plate and new design of glass cover, experimental and numerical study," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24021.

[35] M. A. Elazab, M. K. Elshaarawy, and H. A. Dahab, "Optimization of aspect ratio for enhanced thermal and exergy efficiency in conical solar distillers: a thermodynamic and AI-driven study for sustainable freshwater production," *J. Therm. Anal. Calorim.*, Mar. 2026, doi: 10.1007/s10973-026-15372-z.

[36] D. Dsilva Winfred Rufuss, S. Iniyan, L. Suganthi, and P. A. Davies, "Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63, pp. 464–496, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.068.

[37] A. Madhlopa, "Theoretical and empirical study of heat and mass transfer inside a basin type solar still," *Energy*, vol. 136, pp. 1–7, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.126.

[38] D. Mugisidi, A. Fajar, Rifky, and O. Heriyani, "Peningkatan Efisiensi dan Efektivitas Kondensor pada Solar Still," vol. 12, pp. 19–31, 2022.

[39] C. Elango, N. Gunasekaran, and K. Sampathkumar, "Thermal models of solar still - A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 856–911, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.054.

[40] M. Z. Khan *et al.*, "Comparative study and multi-objective optimization of solar stills using priority-based clustering and prediction modelling," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-19119-y.

[41] C. F. Baspineiro, J. Franco, and V. Flexer, "Performance of a double-slope solar still for the concentration of lithium rich brines with concomitant fresh water recovery," *Science of the Total Environment*, vol. 791, pp. 1–12, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148192.

[42] D. Mugisidi *et al.*, "Iron sand as a heat absorber to enhance performance of a single-basin solar still," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 70, no. 1, pp. 125–135, 2020, doi: 10.37934/ARFMTS.70.1.125135.

[43] A. O. Al-Sulttani *et al.*, "Double-Slope Solar Still Productivity Based on the Number of Rubber Scraper Motions," *Energies (Basel).*, vol. 15, no. 21, pp. 1–34, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15217881.

[44] S. W. Sharshir, A. H. Elsheikh, G. Peng, N. Yang, M. O. A. El-Samadony, and A. E. Kabeel, "Thermal performance and exergy analysis of solar stills – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 521–544, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.156.

[45] R. V. Patel, A. Yadav, and J. Winczek, "Experimental investigation and mathematical modelling of heat transfer coefficient in double slope solar still," *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 67, no. 7–8, pp. 369–379, 2021, doi: 10.5545/sv-jme.2021.7156.

[46] William, H. Ambarita, T. B. Sitorus, D. M. Nasution, and P. G. Sembiring, "Analisis Pengaruh Pendinginan Kaca Luar Alat Desalinasi Air Laut Double Slope Solar Still," *Jurnal Dinamis*, vol. 7, no. 2, pp. 9–19, 2019.

[47] N. T. Alwan, B. M. Ali, O. R. Alomar, N. M. Abdulrazzaq, O. M. Ali, and R. M. Abed, "Performance of solar still units and enhancement techniques: A review investigation," Sep. 30, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e37693.

[48] D. Mugisidi, A. Rahman, P. H. Gunawan, and O. Heriyani, "Determination of the convective heat transfer constant (c and n) in a solar still," vol. 22, no. 1, pp. 1–2, 2021, [Online]. Available: https://jurnal.ugm.ac.id/teknosains

[49] V. K. Thakur, M. K. Gaur, M. K. Sagar, and G. N. Tiwari, "A study on heat and mass transfer analysis of solar distillation system," *Journal of Thermal Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 1184–1205, Jul. 2021, doi: 10.18186/thermal.978021.

[50] J. C. Torchia-Núñez, J. Cervantes-de-Gortari, and M. A. Porta-Gándara, "Thermodynamics of a Shallow Solar Still," *Energy Power Eng.*, vol. 06, no. 09, pp. 246–265, 2014, doi: 10.4236/epe.2014.69022.

[51] N. Lobontiu, "Fluid and Thermal Systems," in *System Dynamics for Engineering Students*, Elsevier, 2018, ch. 5, pp. 213–272. doi: 10.1016/b978-0-12-804559-6.00005-1.

[52] C. A. Dorao and M. Fernandino, "The heat transfer coefficient similarity between binary and single component flow condensation inside plain pipes," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 186, pp. 2–0, May 2022, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122450.

[53] H. K. Sachidananda, S. S. Salins, K. A. Mulchandani, A. S. Biradar, and S. Kumar, "Impact of rotating fan and ultrasonic humidifier on the thermal performance of pyramidal solar still," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-21863-0.

[54] M. Mohsenzadeh, L. Aye, and P. Christopher, "Effect of humidity level and aspect ratio on convective heat transfer coefficient and water productivity of a solar still:

Experimental and theoretical analysis," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 228, pp. 2–6, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120547.

[55] M. A. Tony and H. A. Nabwey, "Recent advances in solar still technology for solar water desalination," *Appl. Water Sci.*, vol. 14, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.1007/s13201-024-02188-1.

[56] A. A. El-Sebaii, "On effect of wind speed on passive solar still performance based on inner/outer surface temperatures of the glass cover," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4943–4949, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.05.038.

[57] D. K. Murugan, N. Elumalai, and S. Subramani, "Experimental investigation on the effect of basin pressure in a single basin solar still," *Desalination Water Treat.*, vol. 229, pp. 10–16, Jul. 2021, doi: 10.5004/dwt.2021.27385.

[58] Y. Wang *et al.*, "Prediction of tubular solar still performance by machine learning integrated with Bayesian optimization algorithm," vol. 184, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116233.

[59] H. Fu *et al.*, "Updates on evaporation and condensation methods for the performance improvement of solar stills," *Energies (Basel).*, vol. 14, no. 21, pp. 1–6, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217050.

[60] N. T. Alwan, M. H. Majeed, S. E. Shcheklein, O. M. Ali, and S. Praveenkumar, "Experimental study of a tilt single slope solar still integrated with aluminum condensate plate," *Inventions*, vol. 6, no. 4, pp. 1–3, Dec. 2021, doi: 10.3390/INVENTIONS6040077.

[61] FlyCarpet, "Free Online Interactive Psychrometric Chart." Accessed: Feb. 10, 2026. [Online]. Available: http://www.flycarpet.net/en/PsyOnline

[62] D. Mugisidi, B. Fajar, S. Syaiful, and T. Utomo, "Solar Still with an Integrated Conical Condenser," *CFD Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 122–134, 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.8.122134.

[63] O. Younis *et al.*, "Comprehensive Review on Solar Stills—Latest Developments and Overview," *Sustainability*, vol. 14, no. 16, pp. 1–59, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610136.