

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA THÔNG SỐ VẬN HÀNH VÀ ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG ĐẾN HIỆU SUẤT VÀ TỐC ĐỘ NGƯNG TỤ CỦA THIẾT BỊ THU HỒI NƯỚC SỬ DỤNG MÔ-ĐUN NHIỆT ĐIỆN

STUDY ON THE EFFECTS OF OPERATING PARAMETERS AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE PERFORMANCE AND CONDENSATION RATE OF AN ATMOSPHERIC WATER HARVESTER USING THERMOELECTRIC MODULES

Nguyễn Quang Hưng, Nguyễn Văn Chéc, Đặng Anh Tuấn, Nguyễn Thị Hoa*

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

*Email: hoanguyen@tnut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của cường độ dòng điện, vận tốc không khí và độ ẩm môi trường đến tốc độ ngưng tụ cùng hệ số hiệu suất năng lượng của thiết bị khai thác nước từ khí quyển sử dụng mô-đun nhiệt điện. Nhóm tác giả đã xây dựng một mô hình toán học dựa trên các phương trình cân bằng năng lượng và truyền khối. Quy trình tính toán được thiết lập trên phần mềm MATLAB và tiến hành kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm, khẳng định độ tin cậy trong việc mô phỏng các hiện tượng vật lý phức tạp. Kết quả thu được chỉ ra rằng tác động của dòng điện và vận tốc gió lên tốc độ ngưng tụ cũng như hiệu suất hệ thống đều tuân theo quy luật parabol với các điểm tối ưu rõ rệt. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất dải vận hành cho cường độ dòng điện là 1,5 A – 2,5 A và vận tốc gió là 1,0 m/s – 1,5 m/s. Việc xác định các vùng thông số này có ý nghĩa thực tiễn lớn, làm cơ sở để tối ưu hóa khả năng làm việc của hệ thống, đảm bảo sự cân bằng giữa sản lượng nước thu hồi và năng lượng tiêu thụ.

Từ khóa: Mô-đun nhiệt điện; Tốc độ ngưng tụ; Điểm sương; Hệ số hiệu suất; Thiết bị thu hồi nước từ khí quyển.

ABSTRACT

This study evaluates the effects of electrical current, air velocity, and ambient humidity on the condensation rate and coefficient of performance of an atmospheric water harvester using thermoelectric modules. A mathematical model founded on energy balance and mass transfer equations was developed. The computational procedure was implemented in MATLAB and validated against experimental data, confirming its reliability in simulating complex physical phenomena. The results indicate that the impacts of current and air velocity on both the condensation rate and system efficiency follow a parabolic trend with distinct optimal points. Consequently, the study recommends an operating range of 1.5 A – 2.5 A for the electrical current and 1.0 m/s – 1.5 m/s

for the air velocity. Identifying these regions holds significant practical value, serving as a basis for optimizing operating modes to ensure a balance between recovered water yield and energy consumption.

Keywords: Thermoelectric module; Condensation rate; Dew point; The coefficient of performance; Atmospheric water harvester.

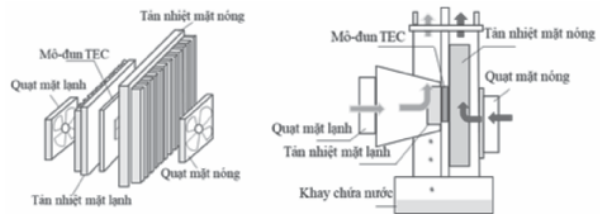
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự khan hiếm nước ngọt trên toàn cầu đã thúc đẩy việc tìm kiếm các công nghệ thay thế bền vững để khai thác nguồn nước dồi dào trong khí quyển. Trong số các phương pháp hiện đại, hệ thống thu hồi nước từ không khí sử dụng mô-đun làm mát nhiệt điện (TEC) dựa trên hiệu ứng Peltier đang nổi lên như một giải pháp đầy triển vọng cho các ứng dụng quy mô nhỏ, di động và sử dụng tại các khu vực thiếu hạ tầng lưới điện [1]. Hệ thống này vận hành bằng cách làm lạnh bề mặt trao đổi nhiệt xuống dưới nhiệt độ điểm sương của không khí để tạo ra sự chuyển pha của hơi nước từ thể khí sang thể lỏng [2]. Tuy nhiên, hệ số hiệu suất (COP) thực tế của hệ thống chịu ảnh hưởng mạnh bởi sự tương tác phi tuyến giữa nhiều thông số vật lý như nhiệt độ môi trường, độ ẩm tương đối (RH), vận tốc dòng khí, cường độ dòng điện đầu vào, diện tích và vật liệu tản nhiệt [3]. Để làm cơ sở cải tiến hiệu suất tản nhiệt, giúp tăng hiệu suất tổng thể cho hệ thống cần phải đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành và điều kiện môi trường.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ KIỂM CHỨNG KẾT QUẢ

2.1. Xây dựng mô hình

Cấu trúc điển hình của hệ thống khai thác nước từ không khí (AWH) sử dụng TEC được chỉ ra trên Hình 1, bao gồm bốn thành phần chính: mô-đun TEC, bộ tản nhiệt cho mặt lạnh, bộ tản nhiệt cho mặt nóng và quạt gió [2, 4].



Hình 1. Cấu trúc và mô hình của AWH sử dụng TEC [4]

Nguyên lý vận hành của hệ thống dựa trên hai hiện tượng vật lý cơ bản là hiệu ứng Peltier kết hợp với quá trình ngưng tụ hơi nước khi không khí ẩm tiếp xúc với bề mặt tản nhiệt được làm lạnh bởi TEC. Nhiệt lượng hấp thụ trên mặt lạnh (Q_c) và nhiệt lượng tỏa ra từ mặt nóng (Q_h) xác định theo công thức [5]:

$$Q_c = \alpha_m IT_c - \frac{I^2 R_m}{2} - K_m \Delta T \quad (1)$$

$$Q_h = \alpha_m IT_h + \frac{I^2 R_m}{2} - K_m \Delta T \quad (2)$$

Trong đó: I là cường độ dòng điện (A); T_c , T_h là nhiệt độ phía mặt lạnh và mặt nóng của TEC (K), $\Delta T = T_h - T_c$; R_m , α_m , K_m lần lượt là điện trở (Ω), hệ số Seebeck (V/K) và độ dẫn nhiệt của TEC ($1/\Omega m$) được xác định từ thông số của mô-đun TEC [5].

Tốc độ trao đổi nhiệt của bộ tản nhiệt lạnh phụ thuộc vào tốc độ truyền nhiệt do đối lưu và ngưng tụ gây ra, do đó ta có quan hệ [6]:

$$Q_c = Q_a + Q_l \quad (3)$$

☞

Trong đó: Q_a là nhiệt lượng đối lưu và Q_l là nhiệt lượng ngưng tụ.

$$Q_a = h_c A_c (T_\infty - T_c) \quad (4)$$

Với A_c là tổng diện tích bề mặt tản nhiệt lạnh; h_c là hệ số truyền nhiệt đối lưu của không khí trên mặt lạnh (W/m^2K); T_∞ là nhiệt độ không khí đầu vào và T_c là nhiệt độ bề mặt tản nhiệt mặt lạnh.

$$Q_l = \dot{m}_w h_{fg} \quad (5)$$

Với:

$$\dot{m}_w = h_m A_c (\rho_{v,in} - \rho_{v,c}) \quad (6)$$

là tốc độ ngưng tụ nước [6], trong đó: h_m - Hệ số truyền khối (m/s); $\rho_{v,in}$ - Mật độ hơi nước trong không khí đầu vào (kg/m^3); $\rho_{v,c}$ - Mật độ hơi nước bão hòa tại bề mặt ngưng tụ (kg/m^3); $\rho_{v,in}$ và $\rho_{v,c}$ có thể tính toán từ các phương trình trạng thái của không khí ẩm [6].

Đối với hỗn hợp không khí khô và hơi nước, giá trị của số Lewis xấp xỉ 1 nên:

$$h_m = \frac{h_c}{\rho_a c_p}$$

Trong đó: ρ_a là khối lượng riêng của không khí (kg/m^3); c_p là nhiệt dung riêng của không khí ở áp suất không đổi (J/kgK);

$$h_{fg}(T) = (2500.8 - 2.36T_c + 0.0016T_c^2 - 0.00006T_c^3) \times 10^3 \quad (7)$$

là nhiệt ẩn hóa hơi của nước [4].

Đối với tản nhiệt khí, nhiệt lượng tỏa ra từ mặt nóng truyền ra môi trường bên ngoài nên ta có công thức [6]:

$$Q_h = h_h A_h (T_h - T_\infty) \quad (8)$$

Trong đó: A_h là tổng diện tích bề mặt tản nhiệt nóng; h_h là hệ số truyền nhiệt đối lưu

của không khí trên mặt nóng (W/m^2K); T_h là nhiệt độ bề mặt tản nhiệt mặt nóng.

Gọi P_{TEC} là công suất điện tiêu thụ của TEC, từ định luật nhiệt động lực học thứ nhất suy ra:

$$P_{TEC} = Q_h - Q_c \quad (9)$$

Khi đó, hệ số hiệu suất (COP) của bộ làm mát nhiệt điện được xác định:

$$COP = \frac{Q_c}{P_{TEC} + P_{fan}} \quad (10)$$

Trong đó, P_{fan} là công suất của quạt.

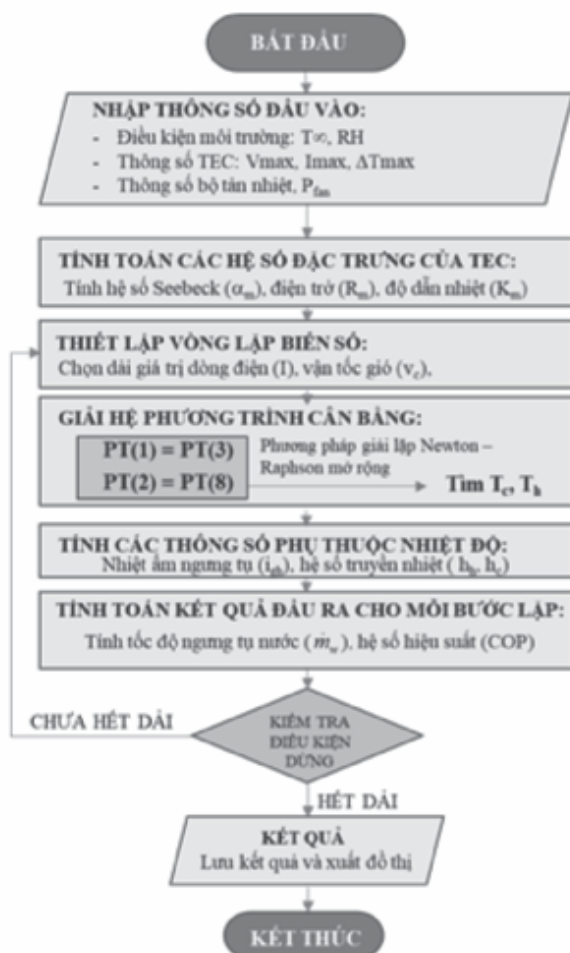
Một chương trình tính bằng MATLAB đã được xây dựng dựa trên các thông số mô hình nguyên mẫu của J. Kim và cộng sự chỉ ra trên Hình 2. Mô-đun TEC HMN 6055 MCS được sử dụng có các thông số cực đại chỉ ra trong Bảng 1 và đặc tính tản nhiệt mặt nóng và mặt lạnh được chỉ ra trong Bảng 2 [4].

Bảng 1. Thông số của mô-đun TEC

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Dòng điện cực đại (I_{max})	6.3 A
Điện áp cực đại (V_{max})	27.7 V
Chênh lệch nhiệt độ cực đại (ΔT_{max})	78°C
Điện trở điện tại 25°C	4.0 Ω
Nhiệt độ môi trường giả định trong các tính toán thực nghiệm (T_∞)	29°C (tương đương 302 K)

Bảng 2. Thông số bộ tản nhiệt

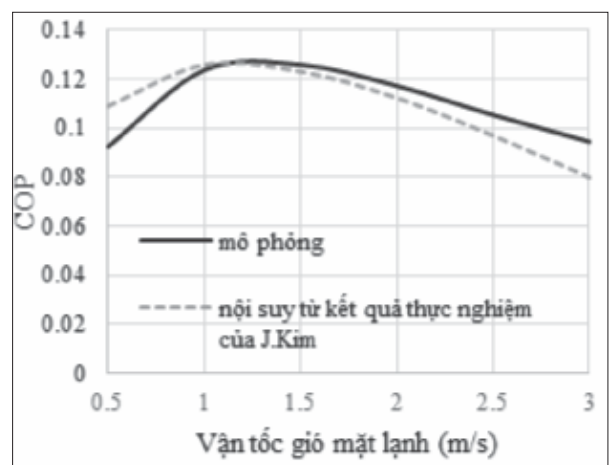
Thông số	Bộ tản nhiệt mặt lạnh	Bộ tản nhiệt mặt nóng
Vật liệu	Nhôm	Nhôm
Kích thước đế	50 mm × 40 mm	127 mm × 180 mm
Chiều cao cánh tản nhiệt	10 mm	21 mm
Độ dày cánh tản nhiệt	1.5 mm	1 mm
Khoảng cách giữa các cánh	4 mm	3.5 mm



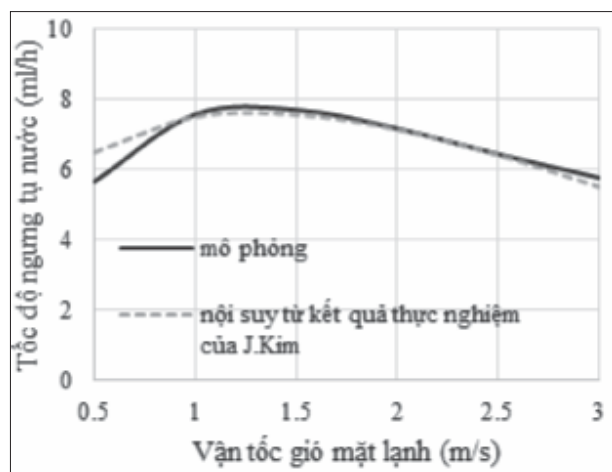
Hình 2. Sơ đồ khối chương trình tính

2.2. Kiểm chứng kết quả

Dựa trên các bảng số liệu và biểu đồ trong tài liệu nguồn [4], số liệu thực nghiệm về tốc độ ngưng tụ nước và hệ số hiệu suất theo vận tốc gió tương ứng được nội suy và so sánh với kết quả mô phỏng từ mô hình lý thuyết trên Hình 3 và Hình 4. Các thí nghiệm và mô phỏng được thực hiện trong điều kiện môi trường: nhiệt độ 29°C, độ ẩm tương đối 57%.



Hình 3. Đồ thị COP



Hình 4. Đồ thị lượng nước thu hồi

Đồ thị thể hiện trên Hình 3 cho thấy COP của hệ thống tăng theo vận tốc gió mặt lạnh và đạt giá trị cực đại khoảng 0,126 tại vận

tốc xấp xỉ 1,2 m/s, sau đó giảm dần khi vận tốc tiếp tục tăng. Kết quả mô phỏng phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm của J. Kim về cả xu hướng biến thiên và giá trị cực đại, chứng tỏ mô hình có độ tin cậy cao. Tuy nhiên, sai lệch tăng lên ở vùng vận tốc lớn có thể xuất phát từ các tổn hao nhiệt và điều kiện đối lưu thực tế chưa được xét đầy đủ trong mô hình lý thuyết.

Đồ thị trên Hình 4 phản ánh tốc độ thu hồi nước tăng khi vận tốc gió mặt lạnh tăng từ 0,5 m/s đến khoảng 1,2 m/s và đạt giá trị lớn nhất xấp xỉ 7,7 ml/h, sau đó giảm dần ở vùng vận tốc cao hơn. Xu hướng này cho thấy sự tồn tại chế độ trao đổi nhiệt tối ưu, tại đó quá trình ngưng tụ hơi ẩm diễn ra hiệu quả nhất. Kết quả tính toán bám sát dữ liệu thực nghiệm của J. Kim trên toàn bộ miền khảo sát với sai khác nhỏ, khẳng định khả năng dự đoán tốt của mô hình đã thiết lập.

Kết quả kiểm chứng này xác nhận các giả thiết và phương pháp xây dựng mô hình là hợp lý, có khả năng phản ánh đúng đặc tính làm việc của hệ thống và có thể ứng dụng cho mục đích dự đoán, phân tích vận hành hệ thống.

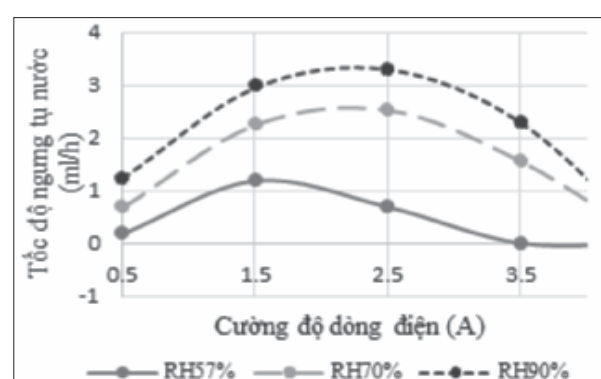
3. THẢO LUẬN

Mặc dù sử dụng bộ thông số mô hình từ nghiên cứu J. Kim và cộng sự, nghiên cứu hiện tại không đi vào phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ mặt lạnh như nguyên mẫu mà mở rộng phân tích ảnh hưởng phi tuyến của cường độ dòng điện và vận tốc gió mặt lạnh trong các điều kiện độ ẩm tương đối khác nhau đến tốc độ ngưng tụ và hiệu suất thu hồi nước.

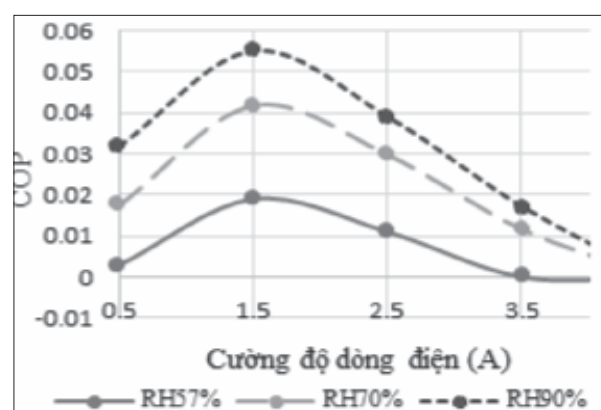
3.1. Sự thay đổi của tốc độ ngưng tụ nước và COP theo dòng điện

Đồ thị chỉ ra trên Hình 5 và Hình 6 là minh chứng cho cường độ dòng điện có ảnh

hưởng rõ rệt đến lượng nước thu hồi và hệ số hiệu suất COP của hệ thống ở các mức độ ẩm tương đối khác nhau. Khi dòng điện tăng từ 0,5 A đến khoảng 1,5 – 2,5 A, cả lượng nước ngưng tụ và COP đều tăng đáng kể do công suất làm lạnh được cải thiện, làm tăng khả năng trao đổi nhiệt và quá trình ngưng tụ ẩm. Tuy nhiên, khi dòng điện tiếp tục tăng đến vùng 3,5 – 4 A, cả hai đại lượng đều giảm. Nguyên nhân là do nhiệt Joule phát sinh ở mặt nóng của phần tử nhiệt điện tăng mạnh, làm suy giảm chênh lệch nhiệt độ hữu ích và giảm hiệu quả làm việc của hệ thống.



Hình 5. Đồ thị tốc độ lượng nước thu hồi theo cường độ dòng điện



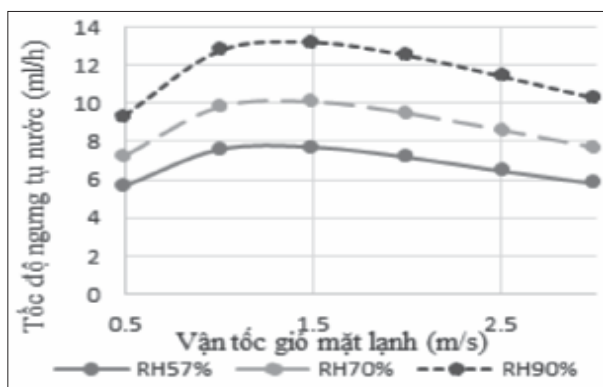
Hình 6. Đồ thị hệ số hiệu suất theo cường độ dòng điện

Cả hai đồ thị cho thấy tồn tại một vùng dòng điện tối ưu khoảng 1,5 – 2,5 A, tại đó hệ thống đạt đồng thời hiệu suất năng lượng và khả năng thu hồi nước cao nhất. Đây là cơ sở

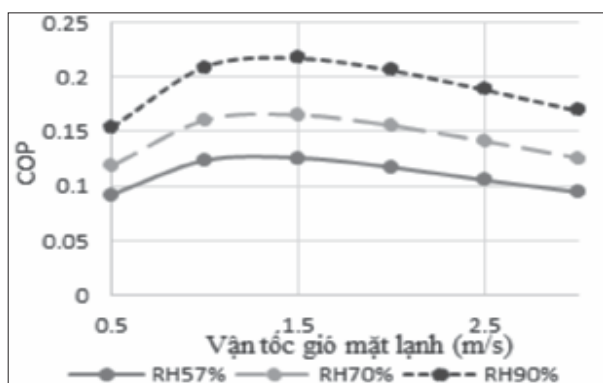
quan trọng cho việc lựa chọn chế độ vận hành tối ưu nhằm nâng cao hiệu quả của hệ thống thu hồi nước từ không khí.

3.2. Sự thay đổi của tốc độ ngưng tụ nước và COP theo vận tốc gió

Đồ thị trên Hình 7 và Hình 8 biểu thị vận tốc gió mặt lạnh ảnh hưởng đáng kể đến lượng nước thu hồi và hệ số hiệu suất COP của hệ thống. Khi vận tốc gió tăng từ 0,5 m/s đến khoảng 1,0–1,5 m/s, cả lượng nước ngưng tụ và COP đều tăng rõ rệt. Điều này phản ánh quá trình trao đổi nhiệt – ẩm giữa không khí và bề mặt lạnh được tăng cường, làm nâng cao khả năng tách ẩm cũng như hiệu quả sử dụng năng lượng của hệ thống.



Hình 7. Đồ thị tốc độ lượng nước thu hồi theo vận tốc gió mặt lạnh



Hình 8. Đồ thị hệ số hiệu suất theo vận tốc gió mặt lạnh

Tuy nhiên, khi vận tốc gió tiếp tục tăng trên 1,5 m/s, lượng nước thu hồi và COP có xu hướng giảm dần. Nguyên nhân là do thời gian tiếp xúc giữa dòng không khí và bề mặt lạnh bị rút ngắn, khiến không khí chưa kịp đạt trạng thái bão hòa để xảy ra ngưng tụ hiệu quả. Đồng thời, tải nhiệt đối lưu tăng lên cũng làm suy giảm khả năng duy trì nhiệt độ thấp tại bề mặt lạnh, từ đó làm giảm hiệu suất tổng thể của hệ thống.

Các kết quả mô phỏng thể hiện rõ việc tồn tại một vùng vận tốc gió tối ưu khoảng 1,0–1,5 m/s, tại đó hệ thống đạt đồng thời hiệu suất năng lượng và khả năng thu hồi nước tốt nhất.

Kết quả cũng chỉ ra độ ẩm tương đối càng cao thì lượng nước thu hồi và COP càng lớn. Ở điều kiện RH 90%, hệ thống đạt giá trị cực đại cao nhất cho cả lượng nước ngưng tụ và COP, trong khi RH 57% cho giá trị thấp nhất. Điều này phù hợp với đặc tính vật lý của quá trình ngưng tụ, khi hàm lượng hơi ẩm trong không khí lớn hơn sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình tách ẩm.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình lý thuyết phân tích dòng nhiệt trong mô-đun TEC nhằm tính toán tốc độ ngưng tụ và chỉ số COP của hệ thống thu hồi nước, với độ chính xác được xác thực qua thực nghiệm. Kết quả phân tích chỉ ra ảnh hưởng lớn và phi tuyến tính của dòng điện vận hành và vận tốc gió đến hiệu suất hệ thống. Đặc biệt, để tối ưu hóa đồng thời khả năng thu hồi nước và hiệu quả năng lượng, chế độ vận hành khuyến nghị cho hệ thống là duy trì dòng điện trong khoảng 1,5 – 2,5 A và vận tốc gió mặt lạnh từ 1,0 – 1,5 m/s. Đây là cơ sở lý thuyết và thực tiễn quan trọng giúp cải thiện hiệu suất năng lượng tản nhiệt cho các hệ

thống thu hồi nước sử dụng mô-đun nhiệt điện hiện nay.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo thông qua đề tài khoa học mã số B2025-TNA-07. ❖

Ngày nhận bài: **08/5/2026**

Ngày phản biện: **21/5/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Li, H.-J.; Cheng, L.; Sun, P.; Li, F.-F.; Qiu, J., “*Potential Analysis of Atmospheric Water Harvesting Technologies from the Perspective of "Trading-in Energy for Water"*”. *Water* 2023, 15, 878. <https://doi.org/10.3390/w15050878>.
- [2]. Ben Wang, Xuechang Zhou, Zhiguang Guo, Weimin Liu, “*Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications*”. *Nano Today* 40 (2021) 101283, <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2021.101283>.
- [3]. Nguyen Thi Hoa, Nguyen Thi Thu Phuong, Ngo Nhu Khoa, Luong Viet Dung, “*An overview of atmospheric water harvesting systems using thermoelectric coolers – potential and challenges*”. *TNU Journal of Science and Technology* 2025, 230(14): 80-91. DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13329>.
- [4]. Joonoh Kim, Keunhwan Park, Duck-Gyu Lee, Young Soo Chang and Ho-Young Kim, “*Optimal cold sink temperature for thermoelectric dehumidifiers*”. *Journal of Mechanical Science and Technology* 32 (2) (2018) 885~895, DOI 10.1007/s12206-018-0139-8.
- [5]. M. Eslamia, F. Tajeddinib, N. Etaatia, “*Thermal analysis and optimization of a system for water harvesting from humid air using thermoelectric coolers*”. *Energy Conversion and Management* 174 (2018) 417-429, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.045>.
- [6]. Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, “*Fundamentals of heat and mass transfer*”, 8th edition. John Wiley & Sons, Inc., 2017.