AN OVERVIEW OF ATMOSPHERIC WATER HARVESTING SYSTEMS USING THERMOELECTRIC COOLERS – POTENTIAL AND CHALLENGES

Nguyen Thi Hoa[1*], Nguyen Thi Thu Phuong[2], Ngo Nhu Khoa[1], Luong Viet Dung[1]
[1]TNU – University of Technology, [2]Hung Vuong University

ARTICLE INFO

Received: 29/7/2025
Revised: 17/10/2025
Published: 20/10/2025

KEYWORDS

Peltier effect
Thermoelectric cooler
Water production
Thermoelectric dehumidifier
Atmospheric water generator

ABSTRACT

This research provides an overview of the status and development potential of atmospheric water harvesting technologies that use thermoelectric coolers. Compared to traditional methods, these systems offer several key advantages, including compact size, quiet operation, flexible installation, and environmental friendliness. These features make thermoelectric coolers suitable for portable and small atmospheric water harvesting devices. However, thermoelectric modules inherently have a relatively low coefficient of performance. This study examines several experimental models to analyze the design and evaluate how key parameters affect water harvesting performance. Through this analysis, the study highlights the technical challenges that must be addressed to improve the efficiency of atmospheric water harvesting systems. The results show that with improvements in heat dissipation design and energy management, such systems can achieve a higher coefficient of performance. The review provides a basis for improving atmospheric water harvesting technologies using thermoelectric coolers so that these technologies can be applied in the future to provide drinking water in water-scarce areas.

TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG KHAI THÁC NƯỚC TỪ KHÔNG KHÍ ẨM SỬ DỤNG BỘ LÀM MÁT NHIỆT ĐIỆN – TIỀM NĂNG VÀ THÁCH THỨC

Nguyễn Thị Hoa[1*], Nguyễn Thị Thu Phương[2], Ngô Như Khoa[1], Lương Việt Dũng[1]
[1]Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên, [2]Trường Đại học Hùng Vương

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 29/7/2025
Ngày hoàn thiện: 17/10/2025
Ngày đăng: 20/10/2025

TỪ KHÓA

Hiệu ứng Peltier
Bộ làm mát nhiệt điện
Sản xuất nước
Máy hút ẩm nhiệt điện
Máy tạo nước khí quyển

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày tổng quan về thực trạng và tiềm năng phát triển công nghệ khai thác nước từ không khí bằng bộ làm mát nhiệt điện. So với các phương pháp truyền thống, hệ thống có nhiều ưu điểm nổi bật như kích thước nhỏ gọn, vận hành êm ái, lắp đặt linh hoạt và thân thiện với môi trường. Những ưu điểm này giúp cho bộ làm mát nhiệt điện phù hợp với các hệ thống sản xuất nước vừa di động vừa nhỏ gọn. Tuy nhiên, điểm hạn chế cố hữu là hiệu suất của mô-đun nhiệt điện tương đối thấp. Nghiên cứu này tiến hành phân tích một số mô hình thử nghiệm nhằm xem xét thiết kế và đánh giá ảnh hưởng của một số thông số chính đến hiệu suất thu hồi nước của hệ thống, qua đó, chỉ ra những vấn đề kỹ thuật cần giải quyết để hệ thống này hoạt động hiệu quả. Kết quả cho thấy, với các cải tiến phù hợp về thiết kế tản nhiệt và quản lý năng lượng, hệ thống có thể đạt được hiệu suất cao hơn. Bài báo cung cấp cơ sở khoa học cho việc cải tiến các hệ thống thu hồi nước có sử dụng bộ làm mát nhiệt điện, giúp chúng ứng dụng rộng rãi trong tương lai, góp phần cung cấp nước uống ở các khu vực khan hiếm nước.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13329

[*] Corresponding author. *Email: hoanguyen@tnut.edu.vn*

1. Giới thiệu

Nước ngọt giữ vai trò quan trọng trong việc duy trì sự sống của con người. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu diễn biến phức tạp và dân số toàn cầu không ngừng gia tăng, khan hiếm nước ngọt đang và sẽ trở thành một trong những thách thức đối với nhân loại. Trước thực trạng đó, việc nghiên cứu và phát triển các giải pháp bền vững nhằm khai thác các nguồn nước mới, đặc biệt là từ những nguồn tưởng chừng vô tận như không khí ẩm, trở nên rất cấp thiết [1]. Các công nghệ khai thác nước từ không khí đang được quan tâm nghiên cứu mang đến hy vọng tìm ra một giải pháp khả thi để khắc phục trình trạng thiếu nước sinh hoạt ở những khu vực khô hạn [2] - [6]. Một số công nghệ nổi bật phải kể đến đó là: ngưng tụ bằng làm lạnh cơ học [7] - [10], hấp thu/hấp phụ bằng vật liệu hút ẩm [11] - [14], ngưng tụ sử dụng mô-đun làm mát nhiệt điện (TEC) [15], [16], thu nước từ sương mù và màng nano [17] - [20]. Mỗi công nghệ thu hồi nước có những ưu và nhược điểm riêng, phù hợp với các điều kiện môi trường và nhu cầu sử dụng cụ thể. Nguyên lý làm việc cũng như điểm nổi bật của từng phương pháp được tổng hợp và so sánh trong Bảng 1.

Bảng 1. *So sánh một số công nghệ khai thác nước từ không khí*

Công nghệ	Nguyên lý	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng phù hợp
Ngưng tụ bằng làm lạnh cơ học	Làm lạnh không khí bằng chu trình nén hơi, ngưng tụ hơi nước	- Hiệu suất cao - Lượng nước thu được nhiều	- Tiêu thụ điện năng lớn Cồng kềnh, chi phí cao - Không phù hợp nơi thiếu điện	Khu vực đô thị, có nguồn điện ổn định
Hấp thu/hấp phụ bằng vật liệu hút ẩm	Vật liệu hút ẩm cao như silica gel, muối lỏng hoặc vật liệu kim loại hữu cơ (MOFs),… để hấp thụ nước, sau đó gia nhiệt để tách nước	- Hoạt động ở vùng khí hậu khô - Có thể kết hợp năng lượng mặt trời - Hiệu quả trong môi trường có độ ẩm thấp	- Chu kỳ tái sinh phức tạp - Chi phí vật liệu cao - Tốc độ thu nước chậm	Vùng khô hạn, thiếu điện, có nguồn năng lượng tái tạo
Ngưng tụ sử dụng TEC	Dùng hiệu ứng Peltier để làm lạnh bề mặt, ngưng tụ hơi nước	- Cấu trúc đơn giản, gọn nhẹ - Dễ điều khiển và tích hợp - Không cần môi chất lạnh, an toàn đối với môi trường	- Hiệu suất thấp - Tản nhiệt khó khăn - Hạn chế công suất	Ứng dụng quy mô nhỏ, khu vực hẻo lánh, nơi thiếu lưới điện
Thu nước từ sương mù và màng nano	Sử dụng các lưới hoặc màng đặc biệt có khả năng thu giữ các giọt sương mù nhỏ li ti trong không khí	Không yêu cầu về năng lượng, tận dụng các hiện tượng tự nhiên hoặc công nghệ vật liệu tiên tiến		Chỉ phù hợp với các khu vực có sương mù dày đặc

Hệ thống máy hút ẩm sử dụng TEC mang lại khả năng ứng dụng cho hệ thống khai thác nước từ không khí (AWH) với quy mô nhỏ ở những khu vực có độ ẩm cao [21], [22]. TEC và quạt tản nhiệt được sử dụng trong AWH có thể được cấp nguồn trực tiếp bằng dòng điện một chiều, cho nên AWH có thể được hỗ trợ bằng năng lượng mặt trời và hoạt động như các thiết bị tạo nước di động bền vững [5], [23]. Đây được xem như một giải pháp tiềm năng nhờ vào nguyên lý hoạt động đơn giản, khả năng thân thiện với môi trường và tính linh hoạt cao trong ứng dụng của TEC. Tuy nhiên, hạn chế chính của AWH sử dụng TEC hiện nay là hệ số hiệu suất (COP) thấp hơn so với công nghệ nén hơi truyền thống [24], [25]. Vì vậy, TEC thường chỉ được lựa chọn cho các máy hút ẩm và AWH di động, có kích thước nhỏ, chưa phù hợp cho các ứng dụng quy mô lớn. Gần đây, nhiều nghiên cứu đối với TEC đã được thực hiện, mang lại những cải tiến quan trọng. A.H. Shourideh và cộng sự [22] sử dụng các tản nhiệt của bộ xử lý trung tâm của máy tính có diện tích bề mặt lớn với cánh tản nhiệt bằng nhôm, ống dẫn nhiệt bằng đồng giúp tản nhiệt hiệu quả từ phía nóng của TEC. Kết quả nghiên cứu của K.K.I Al-Chlaihawi [26] cho thấy tản

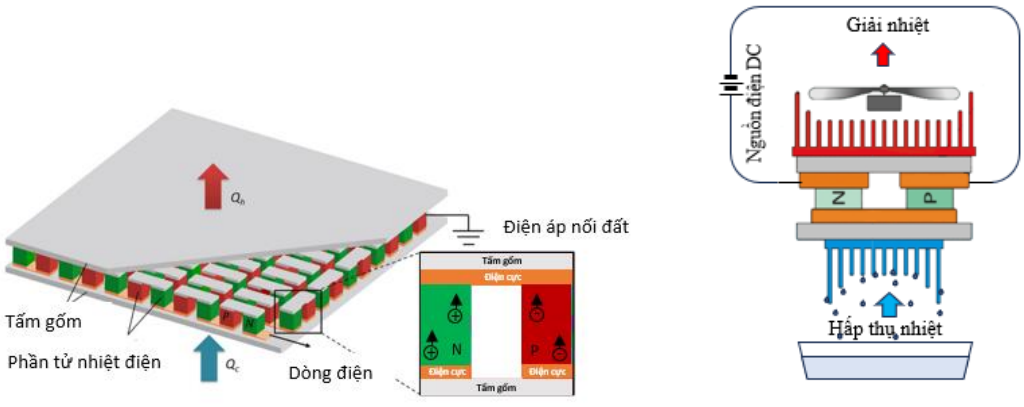
nhiệt dạng hoa hướng dương với đối lưu cưỡng bức đã cải thiện hiệu suất hệ thống khi tăng lưu lượng khí làm mát. Ingrid Casallas [27] đã xây dựng một hệ thống thu hồi năng lượng đã được sử dụng để cải thiện hiệu suất bằng cách dẫn luồng khí mát từ cửa ra phía lạnh đến tản nhiệt cho mặt nóng của TEC. Cải thiện đặc tính bề mặt, hình dạng và vật liệu của cánh tản nhiệt cũng ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất của TEC và lượng nước ngưng tụ [28], [29].

Bài báo này trình bày tổng quan các nghiên cứu thực nghiệm liên quan đến hệ thống AWH sử dụng TEC. Thông qua việc phân tích và so sánh các kết quả thực nghiệm, bài báo đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành chính đến hiệu suất làm việc của hệ thống. Từ đó, một số vấn đề kỹ thuật còn tồn tại được xác định và thảo luận, làm cơ sở cho các định hướng cải tiến trong tương lai. Mục tiêu của bài báo là cung cấp cái nhìn toàn diện về tiềm năng và thách thức của công nghệ này trong việc giải quyết nhu cầu nước sạch cho các khu vực thiếu nước và thiếu điện.

2. Nguyên lý hoạt động và các phương trình cơ bản của hệ thống

2.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Hình 1 minh họa một cấu trúc điển hình của hệ thống AWH sử dụng TEC, bao gồm bốn thành phần chính: mô-đun TEC, bộ tản nhiệt cho mặt lạnh, bộ tản nhiệt cho mặt nóng và quạt gió. Nguyên lý vận hành của hệ thống dựa trên hai hiện tượng vật lý cơ bản là hiệu ứng Peltier, tạo ra sự chênh lệch nhiệt độ giữa hai mặt của mô-đun TEC khi có dòng điện đi qua, và quá trình ngưng tụ hơi nước khi không khí ẩm tiếp xúc với bề mặt lạnh được làm mát bởi TEC [30]. Nếu nhiệt độ bề mặt tản nhiệt thấp hơn nhiệt độ điểm sương của không khí, hơi nước trong không khí sẽ chuyển từ thể khí sang thể lỏng tạo ra các giọt nước li ti trên khắp các cánh của tản nhiệt lạnh. Dưới tác dụng của trọng lực và sự kết dính, các giọt nước li ti sẽ liên kết với nhau thành những giọt lớn hơn. Những giọt nước này sẽ chảy dọc theo các cánh tản nhiệt xuống khay thu nước. Đồng thời, mặt nóng của TEC sẽ liên tục nóng lên. Lượng nhiệt này bao gồm nhiệt từ mặt lạnh chuyển sang và nhiệt lượng do chính TEC sinh ra. Để hệ thống hoạt động hiệu quả, bộ tản nhiệt và quạt ở mặt nóng phải làm việc liên tục để mang nhiệt lượng thải ra môi trường.



(a) *(b)*

Hình 1. *(a) Cấu tạo mô-đun TEC, (b) Cấu tạo của AWH sử dụng TEC*

2.2. Các phương trình cơ bản xác định nhiệt lượng và hiệu suất của TEC

Mỗi TEC được xác định bởi bốn thông số cơ bản từ nhà cung cấp, bao gồm: I_{max} (A) - dòng điện tối đa, U_{max} (V) - điện áp tối đa, ΔT_{max} (^oC) - nhiệt độ chênh lệch tối đa giữa hai mặt nóng và lạnh, Q_{max} (W) - công suất làm mát tối đa. Từ đó, hệ số Seebeck (α), điện trở (R_{TEC}) và độ dẫn nhiệt (K_{TEC}) của TEC được xác định như sau [31]:

$$\alpha = \frac{U_{max}}{T_h} \quad (1) \qquad R_{TEC} = \frac{(T_h - \Delta T_{max})U_{max}}{T_h I_{max}} \quad (2) \qquad K_{TEC} = \frac{(T_h - \Delta T_{max})U_{max} I_{max}}{2T_h \Delta T_{max}} \quad (3)$$

Trong đó: T_h là nhiệt độ mặt nóng. Nhiệt lượng hấp thụ trên mặt lạnh (Q_c) và nhiệt lượng tỏa ra từ mặt nóng (Q_h) của TEC xác định theo công thức:

$$Q_c = \alpha I T_c - \frac{I^2 R_{TEC}}{2} - K_{TEC}\Delta T \quad (4) \qquad Q_h = \alpha I T_h + \frac{I^2 R_{TEC}}{2} - K_{TEC}\Delta T \quad (5)$$

Trong đó: I là dòng điện, T_c là nhiệt độ phía mặt lạnh của TEC, $\Delta T = T_h - T_c$.

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

$$P_{TEC} = Q_h - Q_c \quad (6)$$

Kết hợp các phương trình (4)–(6), ta có:

$$P_{TEC} = \alpha I \Delta T + I^2 R_{TEC} \quad (7)$$

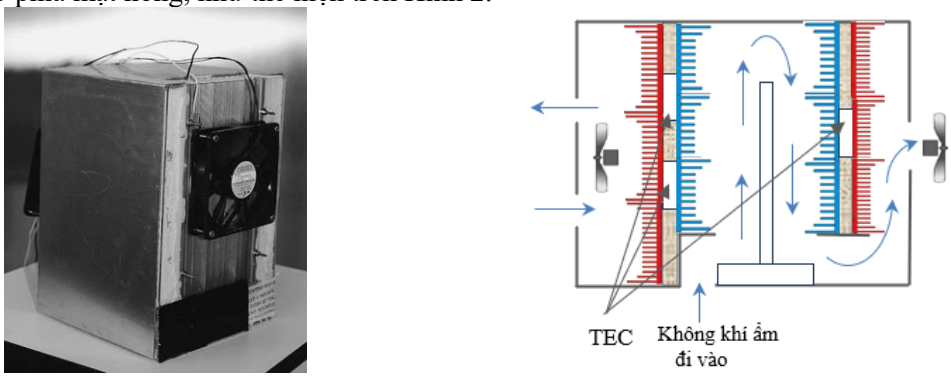
Khi đó, hệ số hiệu suất của bộ làm mát nhiệt điện được xác định:

$$COP = \frac{Q_c}{P_{TEC}} \quad (8)$$

TEC đã được thử nghiệm cho mục đích thu hồi nước từ khí quyển vì có nhiều ưu điểm trong việc chuyển đổi năng lượng trực tiếp và không yêu cầu cao trong việc bảo trì hệ thống. Tuy nhiên, thiết bị làm mát nhiệt điện này có hiệu suất thấp, với các TEC trên thị trường hiện có, công suất làm mát Q_c đạt dưới 200W [32]. Như vậy, để hệ thống tăng hiệu quả trong việc thu hồi nước đòi hỏi sự tìm tòi, nghiên cứu, sáng tạo của các nhà khoa học trong việc thiết kế kết cấu của hệ thống.

3. Các thử nghiệm, kết quả và bàn luận

J. G. Vián và cộng sự [33] đã nghiên cứu ứng dụng TEC cho máy hút ẩm vào năm 2002. Nhóm tác giả đã thiết kế và thử nghiệm một máy hút ẩm công suất thấp (100 W) sử dụng ba TEC, lượng nước được tạo ra khoảng 0,969 L/ngày trong điều kiện kiểm soát trong phòng thí nghiệm. Sau đó, nguyên mẫu tiếp tục được tối ưu hóa trong điều kiện thực nghiệm bằng cách thay đổi điện áp cấp cho TEC và độ ẩm của luồng khí. Hệ thống sử dụng hai quạt hướng trục để tản nhiệt ở phía mặt nóng, như thể hiện trên Hình 2.

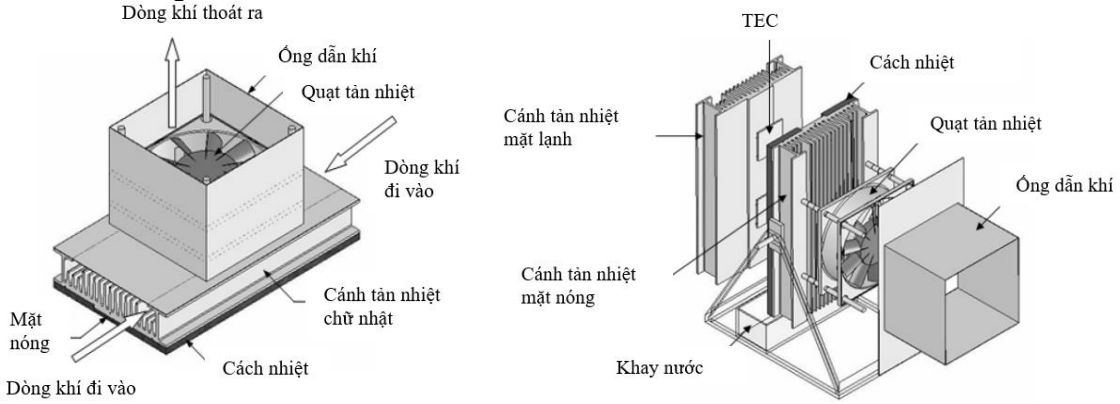


(a) *(b)*

Hình 2. *(a) Nguyên mẫu máy hút ẩm [33], (b) hình vẽ minh họa sơ đồ của hệ thống*

Đối với điều kiện khí quyển 27 ^oC và độ ẩm tương đối (RH) 82%, mô hình dự đoán tốc độ nước ngưng tụ là 1,4 L/ngày, trong khi thực nghiệm cho kết quả 0,969 L/ngày. COP của nguyên mẫu được tối ưu hóa khi điện áp cấp cho TEC ở giai đoạn đầu nằm trong khoảng 12 - 12,5 V và quạt trong khoảng 180 – 190 V. Trong các điều kiện 32 ^oC và RH 90%, COP của nguyên mẫu đạt 0,8. Mặc dù nằm ở mức thấp nhưng kết quả nhận được vẫn trong phạm vi COP của các thiết bị nén hơi thông thường (từ 0,7 đến 1,3). Như vậy, việc áp dụng công nghệ nhiệt điện vào các thiết bị hút ẩm là một đề xuất hấp dẫn và có tính ứng dụng vào thực tiễn, công trình này đã đặt nền móng cho các nghiên cứu về ứng dụng TEC trong công nghệ hút ẩm cũng như hệ thống AWH sau này.

C. Udomsakdigool và cộng sự [34] đã thiết kế một mẫu máy hút ẩm gồm hai TEC (MT2-1 và 6 - 127), sơ đồ thể hiện trên Hình 3. Nghiên cứu tập trung vào việc thử nghiệm một bộ tản nhiệt với các vây hình chữ nhật tích hợp với quạt trong các điều kiện hoạt động khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách giữa quạt và các vây (từ 0 mm đến 40 mm) đến hiệu suất của hệ thống. Kết quả nhận được cho thấy việc lắp đặt quạt ở độ cao 30 mm và 40 mm so với các vây tương ứng với công suất đầu vào lần lượt là 200 W và 300 W sẽ cho nhiệt độ phía nóng của bộ tản nhiệt thấp nhất. Với sự tối ưu hóa này, hiệu suất cánh tản nhiệt là 95% và COP của máy hút ẩm là 0,88 đối với dòng điện 1,9 A và điện áp 12 V. Như vậy, việc giảm nhiệt độ phía nóng của bộ tản nhiệt xuống mức thấp nhất khi quạt được đặt ở vị trí tối ưu sẽ mang lại hiệu suất tối đa cho hệ thống, đây là một yếu tố then chốt để cải thiện hiệu quả làm mát và nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống hút ẩm nhiệt điện.

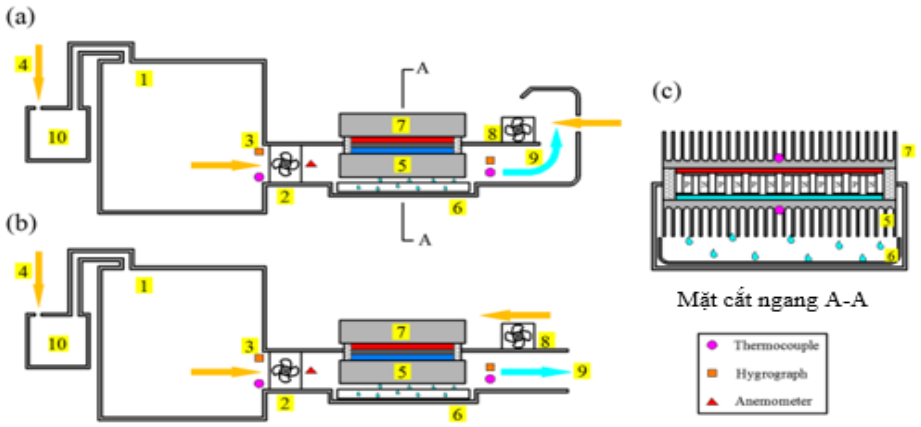


(a) *(b)*

Hình 3. *(a) Bộ tản nhiệt dạng vây và quạt tản nhiệt, (b) sơ đồ của hệ thống thu nước [34]*

W. Huajun và Q. Chengying [35] ứng dụng TEC vào một thiết bị hút ẩm công suất thấp với mục đích thử nghiệm hiệu suất hoạt động của máy để tìm ra mối quan hệ giữa COP và công suất điện đầu vào. Hệ thống bao gồm một tủ kín, mô-đun TEC - 12705, đồng hồ đo công suất DC, máy tạo ẩm, máy đo độ ẩm loại HT - 3005A, cảm biến nhiệt độ và hệ thống thu thập dữ liệu. Hệ thống khi làm việc trải qua hai quá trình nhiệt động học điển hình: hút ẩm làm mát và hút ẩm đẳng nhiệt, trong đó quá trình đẳng nhiệt chiếm ưu thế. RH có hai giai đoạn tăng (98 - 90% và 70 - 50%) và hai giai đoạn giảm (90 - 70% và 50 - 40%). Hiện tượng này liên quan đến sự ngưng tụ nước trên các cánh tản nhiệt phía lạnh. Sự tồn tại của các giọt chất lỏng li ti bám trên bề mặt cánh tản nhiệt có vai trò quan trọng trong quá trình hút ẩm. Việc loại bỏ nhanh chóng các giọt chất lỏng này là một cách tiếp cận để cải thiện hiệu suất hoạt động của hệ thống. Trong điều kiện thí nghiệm chỉ ra, COP đạt tối đa 0,32 và tốc độ hút ẩm tương ứng là 0,0097 g/phút, khi công suất điện đầu vào được giữ ở 6,0 W.

Wei He và cộng sự [36] thiết kế một máy tạo nước di động sử dụng hai mô-đun TEC, một bộ tạo ẩm, một buồng trộn và kênh dẫn khí, sơ đồ thể hiện trên Hình 4. Máy tạo nước nặng 7 kg có kích thước 0,46 m × 0,14 m × 0,15 m được sử dụng vào mục đích đánh giá ảnh hưởng của RH và tốc độ luồng khí đầu vào đến lượng nước tạo ra và tốc độ ngưng tụ. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng lượng nước tạo ra và tốc độ ngưng tụ tăng lên khi RH tăng, lượng nước tạo ra tăng lên khi tốc độ dòng khí tăng, nhưng tốc độ ngưng tụ lại có xu hướng ngược lại. Lượng nước tạo ra tối đa là 25,1 g/giờ với bề mặt ngưng tụ 0,216 m^2 và công suất đầu vào 58,2 W. Nghiên cứu cũng đưa ra các đề xuất cải tiến, bao gồm: tối ưu hóa cấu trúc hệ thống để tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và tăng thời gian tiếp xúc giữa không khí và mặt lạnh của các mô-đun TEC, sửa đổi tính chất thấm ướt của bề mặt lạnh để thúc đẩy sự ngưng tụ theo giọt.



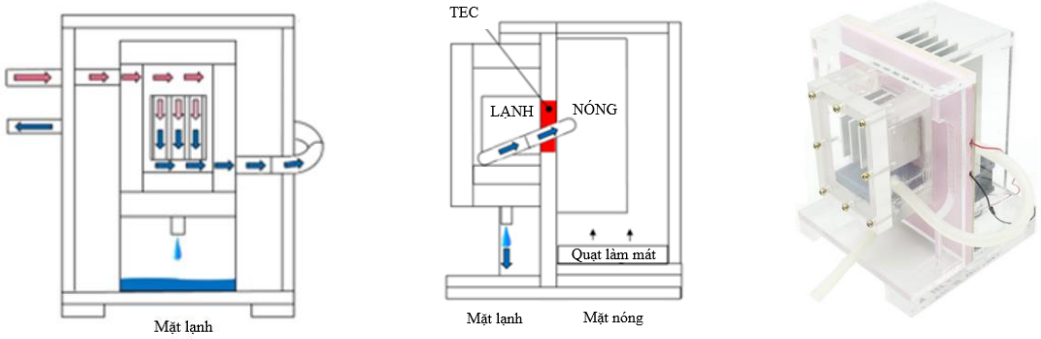
Hình 4. *Sơ đồ cấu trúc: (a) Mô hình A, (b) Mô hình B, (c) mặt cắt ngang A–A* [36], [37]

1-Buồng trộn; 2-Kênh dẫn khí; 3-Nhiệt ẩm kế; 4-Cửa vào; 5-Thanh tản nhiệt phía lạnh; 6-Khay nước; 7-Thanh tản nhiệt phía nóng; 8-Quạt; 9-Cửa ra; 10-Máy tạo độ ẩm

Các đề xuất này đã được nhóm nghiên cứu triển khai thực hiện trong thiết kế cải tiến (mô hình A) [37]. Mô hình A sử dụng không khí thoát ra từ mặt lạnh của TEC để làm mát mặt nóng, giúp tăng hiệu quả tản nhiệt, đồng thời, sử dụng vật liệu kỵ nước (gel Nano SiO_2) trên vây tản nhiệt gắn với mặt lạnh của TEC để thúc đẩy quá trình ngưng tụ giọt, thay vì ngưng tụ dạng màng. Điều này giúp tăng cường truyền nhiệt và tăng tốc độ tạo nước.

So sánh kết quả thực nghiệm về hiệu suất giữa mô hình A và mô hình B (mô hình tham chiếu không sử dụng không khí thải hồi và vật liệu kỵ nước) cho thấy sự khác biệt rõ rệt. Cụ thể, nhiệt độ mặt nóng của mô hình A thấp hơn đáng kể so với mô hình B, đặc biệt ở độ ẩm không khí thấp (ví dụ, ở RH 60%, chênh lệch nhiệt độ là 1,2 ^oC). Đồng thời, nhiệt độ mặt lạnh của mô hình A cũng thấp hơn mô hình B ở tất cả các trường hợp thử nghiệm, rõ rệt nhất ở tốc độ dòng khí cao. Ngoài ra, nhiệt độ không khí thoát ra từ mặt lạnh của mô hình A cũng thấp hơn so với mô hình B, đặc biệt ở trường hợp độ ẩm thấp kết hợp với tốc độ dòng khí cao. Lượng nước thu được từ mô hình A vượt trội so với mô hình B ở cùng độ ẩm tương đối. Ở RH 90%, lượng nước ổn định của mô hình A là khoảng 31 g/giờ, trong khi mô hình B là khoảng 25 g/giờ. Sự vượt trội của mô hình A được giải thích là do việc sử dụng vật liệu kỵ nước giúp truyền nhiệt tốt hơn và hiệu quả làm mát mặt nóng tăng lên nhờ sử dụng không khí thải hồi từ mặt lạnh. Như vậy, việc kết hợp vật liệu kỵ nước trên bề mặt lạnh và sử dụng không khí thải để tản nhiệt là một giải pháp hiệu quả để cải thiện lượng nước ngưng tụ từ không khí trên các bề mặt mở rộng.

Dam-Hyeok Im và cộng sự [38] đã đề xuất một cấu trúc tản nhiệt mới để cải thiện hiệu suất của mô-đun TEC dùng cho máy hút ẩm. Cấu trúc mới minh họa trên Hình 5 cho phép không khí sau khi làm mát và ngưng tụ đi qua một hoặc nhiều lỗ bên trong đế tản nhiệt. Mô-đun nhiệt điện trong thiết bị này là TEC1-12706. Các bộ tản nhiệt bằng hợp kim nhôm có chung kích thước về độ dày và khoảng cách giữa các cánh. Kích thước tổng thể của bộ tản nhiệt phía nóng là 50 mm × 95 mm × 60 mm. Đường kính của lỗ đi qua đế bộ tản nhiệt là 8,7 mm và khoảng cách giữa các lỗ là 26 mm khi có hai lỗ. Kích thước bộ tản nhiệt phía lạnh là 50 mm × 48 mm × 50 mm. Tốc độ dòng chảy của quạt làm mát được cố định ở 60 CFM. Các thí nghiệm được thực hiện trong 01 giờ với không khí xung quanh ở 28 ^oC và RH 90%, lưu lượng luồng khí được xác định ở mức 23 L/phút. Khối lượng nước ngưng tụ tương ứng với điện áp và số lỗ trên đế tản nhiệt được tổng hợp trong Bảng 2. Kết quả nhận được cho thấy luồng không khí qua các lỗ có ảnh hưởng lớn đến hiệu quả hút ẩm. Thiết kế mới với hai lỗ đã tăng COP và công suất hút ẩm lên tới 20% và 19,5% tương ứng so với thiết kế không có lỗ.



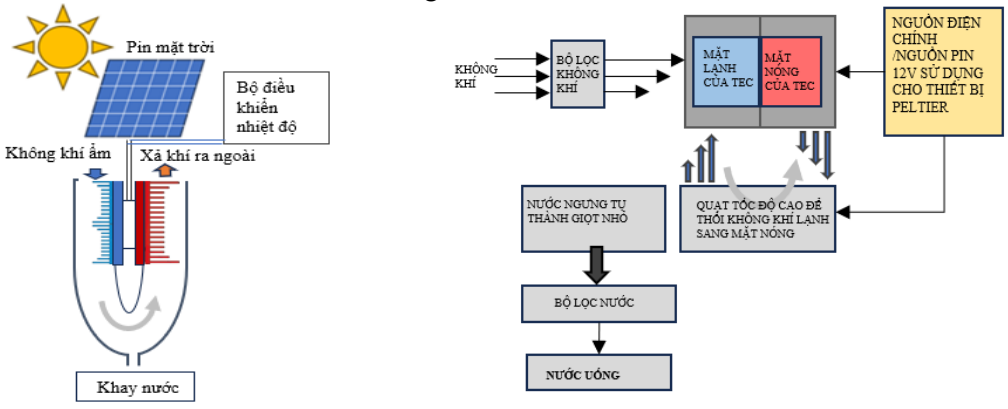
(a) *(b)* *(c)*

Hình 5. *Sơ đồ dòng không khí: (a) đi qua mặt lạnh, (b) đi qua mặt nóng và (c) ảnh chụp thiết bị thí nghiệm* [38]

Bảng 2. *Lượng nước ngưng tụ theo giờ* [38]

Số lỗ	Điện áp qua TEC			
	6 V	8 V	10 V	12 V
0	8 g	10,3 g	11,55 g	11,45 g
1	8,15 g	11,46 g	13,2 g	13,15 g
2	8,25 g	12,4 g	14,3 g	13,8 g

M. Eslamia và cộng sự [39] đã xây dựng một mô hình nhiệt động học chi tiết để phân tích các quá trình truyền nhiệt và truyền khối trong hệ thống thu nước từ không khí ẩm sử dụng TEC. Hệ thống bao gồm một số TEC mắc nối tiếp, một quạt để cung cấp lưu thông luồng không khí cần thiết, hai kênh không khí lạnh và nóng riêng biệt (luồng không khí đi vào qua kênh ở phía lạnh của TEC, sau khi được làm mát và hút ẩm, sẽ đi qua kênh phía nóng của TEC), bộ tản nhiệt và pin mặt trời để cấp điện cho máy làm mát nhiệt điện và quạt. Trong nghiên cứu này, tác động của các tham số khác nhau đến hiệu suất của hệ thống thu hồi nước được xem xét. Để tối ưu hóa thiết kế, một hàm mục tiêu $Eff = \dot{m}_w / (P_{TEC} + P_{fan})$ biểu thị lượng nước được sản xuất so với mức tiêu thụ năng lượng của hệ thống được định nghĩa, đây là yếu tố quan trọng đối với các hệ thống vận hành bằng năng lượng mặt trời. Nghiên cứu tìm ra rằng với điều kiện môi trường nhất định (308 ^{o}K, RH 75%), với lưu lượng khí đầu vào 0,0117 kg/giây hệ thống gồm 18 TEC nhận được *Eff* tối đa (*Eff* = 1,638 E – 07 L/J). Chiều dài kênh tối ưu tương ứng là 1,386 m. Lượng nước sản xuất tỷ lệ thuận với RH, có thể đạt được 106 mL/giờ ở RH cao.



(a) *(b)*

Hình 6. *(a) Sơ đồ hệ thống ngưng tụ nước, (b) quy trình hoạt động* [40]

S.Chinnarao và cộng sự [40] xây dựng một hệ thống ngưng tụ nước bằng năng lượng mặt trời sử dụng TEC1-12706, sơ đồ được minh họa trên Hình 6. Pin mặt trời được sử dụng trong hệ thống này có điện áp đầu ra 12 V với công suất đầu ra tối đa 10 W, đủ để cấp nguồn cho một

TEC 40 W được mắc song song. Mỗi TEC có kích thước 4 cm × 4 cm × 0,8 cm, dòng điện tối đa 3,6 A và chênh lệch nhiệt độ tối đa ΔT là 75 ^{o}C. Tản nhiệt cho mỗi TEC được làm bằng hợp kim nhôm và có kích thước 15 cm × 15 cm, làm cho tổng diện tích trao đổi nhiệt là 45 cm × 15 cm ở mỗi mặt TEC. Không khí được bơm vào hệ thống bằng một máy nén 300 psi, 12 V. Một bộ điều khiển vòng kín đã được xây dựng bằng vi điều khiển PIC16f872 để kiểm soát hệ thống, giữ nhiệt độ của không khí lưu thông dưới điểm sương. Sử dụng hệ thống này ở khu vực có độ ẩm cao như Yanbu đã tạo ra lượng nước gần 1 L/giờ trong thời gian ban ngày, đây là một kết quả đầy hứa hẹn cho một hệ thống phức tạp hơn sử dụng pin mặt trời.

Thualfaqir J. Kadhim và cộng sự [41] đã thiết kế và thử nghiệm một thiết bị thu hồi nước khí quyển di động quy mô nhỏ sử dụng TEC. Hệ thống được bao gồm một tấm pin mặt trời, mô-đun TEC, bộ tản nhiệt, bề mặt lạnh mở rộng có dạng hình nón, quạt và ống dẫn hình chữ nhật thẳng đứng, minh họa trên Hình 7. Hệ thống được thử nghiệm trong các điều kiện làm việc khác nhau, bao gồm: nhiệt độ không khí khô từ 24 ^{o}C đến 31 ^{o}C, RH từ 60% đến 80%, tốc độ luồng khí của quạt từ 0,59 m/s đến 1 m/s. Kết quả thu được cho thấy hệ thống thu hồi nước khí quyển di động sử dụng TEC được cấp điện bằng năng lượng mặt trời là khả thi và hiệu quả. Việc tăng nhiệt độ không khí và RH trong điều kiện khí hậu nóng ẩm dẫn đến tỷ lệ sản xuất nước cao hơn. Tốc độ luồng khí tăng lên ở mặt nóng cũng có tác động tích cực đến tỷ lệ ngưng tụ nước. Lượng nước ngưng tụ đạt 9,5 mL/giờ ở tốc độ khí 1 m/s và nhiệt độ môi trường 30 ^{o}C, và đạt khoảng 20 mL/giờ từ không khí với 75% RH. Mặc dù hệ thống chỉ sử dụng một TEC, nhưng vẫn hoạt động hiệu quả với tỷ lệ RH thấp và mức tiêu thụ năng lượng vừa phải cho tất cả các mức RH (65% đến 75%). Nhiệt độ bề mặt đế hình nón giảm dần theo thời gian, đạt giá trị tối thiểu là 1 ^{o}C với nhiệt độ môi trường 17,5 ^{o}C và 2,6 ^{o}C với nhiệt độ môi trường 24 ^{o}C.

(a) *(b)*

Hình 7. *(a) Hình ảnh thí nghiệm, (b) nước tạo ra từ không khí* [41]

Hình 8. *Hệ thống thử nghiệm* [42]

Ali Riahi và cộng sự [42] đã thiết kế, chế tạo và thử nghiệm một hệ thống tạo nước từ không khí quy mô trung bình được thể hiện trong Hình 8. Nghiên cứu nhằm xác định lượng nước ngọt có thể sản xuất mỗi ngày trong điều kiện khí hậu nhiệt đới thực tế ngoài trời của Malaysia để đánh giá khả năng cung cấp đủ nước uống cho mỗi người. Hệ thống thử nghiệm gồm 18 bộ TEC, trong đó mỗi bộ TEC bao gồm một TEC, một tản nhiệt phía lạnh và một tản nhiệt phía nóng kèm theo một quạt làm mát DC. Các bộ TEC được lắp trên ba mặt của hộp acrylic, mỗi mặt có 6 bộ. Mỗi TEC có kích thước 40 mm x 40 mm, công suất tối đa 60 W, hoạt động ở điện áp 12 V và dòng 5,8 A. Phía lạnh của mỗi TEC được duy trì ổn định ở nhiệt độ 1 °C. Mỗi TEC được gắn với một đế tản nhiệt có diện tích là 16 cm^2. Tổng diện tích bề mặt lạnh của 18 bộ tản nhiệt là 288 cm^2. Quạt thông gió dọc trục được đặt trên đỉnh hệ thống để hút không khí ẩm từ môi trường vào

bên trong với lưu lượng không đổi là 70 m^3/giờ. Thử nghiệm trong 48 giờ trong điều kiện thực tế ngoài trời, với độ ẩm tương đối dao động từ 55% đến 85%, kết quả lượng nước thu hồi được là 3,432 L/24 giờ và 6,997 L/48 giờ.

Bảng 3. *Bảng thông tin tóm tắt một số mô hình tiêu biểu*

Tài liệu tham khảo	Cấu hình hệ thống	Điều kiện môi trường	COP	Sản lượng nước	Ghi chú cải tiến
[33]	3 TEC, 100 W, 2 quạt hướng trục	27 °C, RH 82%; 32 °C, Ghi chú cải tiến RH 90%	0,8 (tối ưu)	0,969 L/ngày (thực tế), 1,4 L/ ngày (dự đoán)	Tối ưu điện áp TEC (12–12,5 V) và quạt (180–190 V)
[34]	2 TEC (MT2-1, 6-127), tản nhiệt vây + quạt, dòng điện 1,9 A, điện áp 12 V	Không nêu cụ thể	0,88	-	Đặt quạt ở độ cao 30 – 40 mm → giảm nhiệt độ mặt nóng, tăng hiệu suất cánh tản nhiệt 95%
[35]	1 TEC (TEC1-12705), một tủ kín, công suất điện đầu vào 6,0 W	RH 40% - 90%	0,32 (tối đa)	0,0097 g/phút	Loại bỏ nhanh chóng các giọt chất lỏng ngưng tụ trên mặt lạnh → tăng hiệu suất
[36]	2 TEC, 1 bộ tạo ẩm, buồng trộn, kênh dẫn khí, công suất điện đầu vào 58,2W, diện tích mặt ngưng tụ 0,216 m^2	RH 90%	-	25 g/giờ	RH tăng → lượng nước thu hồi tăng. Tăng diện tích bề mặt tiếp xúc và tăng thời gian tiếp xúc giữa không khí với mặt lạnh của các mô-đun TEC→ tăng COP
[37]	2 TEC, sử dụng vật liệu kỵ nước (gel Nano SiO2) trên vây tản nhiệt, sử dụng không khí thải hồi làm mát mặt nóng	RH 90%,	-	31 g/giờ	Sử dụng không khí thải hồi từ mặt lạnh làm mát cho mặt nóng của TEC, sửa đổi tính chất thấm ướt của bề mặt lạnh để thúc đẩy sự ngưng tụ theo giọt → lượng nước thu hồi tăng.
[38]	1 TEC (TEC1-12706), đế tản nhiệt có lỗ (0 lỗ, 1 lỗ, 2 lỗ), điện áp 6 V, 8 V, 10 V, 12 V	28 °C, RH 90%, lưu lượng không khí 23 L/phút	Tăng 20% so với không có lỗ	Từ 8 g/giờ đến 13,8 g/giờ (Bảng 2)	Điện áp tăng, số lỗ tản nhiệt tăng → lượng nước thu hồi tăng
[39]	18 TEC	308 °K, RH 75%, lưu lượng khí đầu vào 0,0117 kg/giây	-	106 mL/giờ	RH tăng → lượng nước thu hồi tăng
[40]	1 TEC (TEC1-12706), tản nhiệt, pin mặt trời, máy nén khí, sử dụng bộ điều khiển	RH cao	-	1 L/giờ	Sử dụng năng lượng tái tạo, sử dụng bộ điều khiển tự động
[41]	1 TEC, bộ tản nhiệt mặt lạnh có hình nón + quạt, pin mặt trời	nhiệt độ không khí khô từ 24 °C đến 31 °C, RH từ 60% đến 80%, tốc độ luồng khí của quạt từ 0,59 m/s đến 1 m/s.	-	9,5 mL/giờ (RH 60%) 20 mL/giờ (RH 75%)	Tăng nhiệt độ và RH không khí → tăng tỷ lệ sản xuất nước. Sử dụng năng lượng tái tạo
[42]	18 TEC, điện áp 12 V và dòng 5,8 A, quạt thông gió	RH55-85%, Lưu lượng không khí 70 m^3/giờ	-	3,432 L/24 giờ 6,997 L/48 giờ	Tăng RH không khí → tăng tỷ lệ sản xuất nước. Thu nước hiệu quả nhất vào ban đêm và sáng sớm

Các ghi nhận của nghiên cứu cũng cho thấy sản lượng nước/giờ tỷ lệ thuận với độ ẩm tương đối. Thời gian thu hồi nước hiệu quả nhất vào ban đêm và sáng sớm, đây là khoảng thời gian có

độ ẩm tương đối cao nhất và nhiệt độ môi trường thấp nhất trong ngày, tạo điều kiện lý tưởng cho việc ngưng tụ hơi nước. Nghiên cứu này có ý nghĩa thực tiễn vì nó được thực hiện trong điều kiện thực tế ngoài trời, không phải trong môi trường phòng thí nghiệm được kiểm soát như phần lớn các nghiên cứu trước đây. Điều này cung cấp dữ liệu đáng tin cậy hơn cho việc ứng dụng công nghệ này vào cuộc sống.

Qua việc tìm hiểu các nguyên mẫu, có thể thấy thiết kế của hệ thống khá đơn giản và dễ tiếp cận, đồng thời có nhiều ưu điểm nổi bật như tính thân thiện với môi trường, khả năng vận hành ở quy mô nhỏ, và tiềm năng ứng dụng linh hoạt trong nhiều điều kiện khác nhau. Kết cấu, điều kiện làm việc, hệ số hiệu suất và sản lượng nước thu hồi của các hệ thống đã được xem xét và tổng hợp trong Bảng 3. Các nghiên cứu đều chỉ ra rằng điểm hạn chế cố hữu của công nghệ này là hiệu suất năng lượng và sản lượng nước thu hồi còn thấp, phụ thuộc vào điều kiện nhiệt độ và độ ẩm của môi trường. Tuy nhiên, hệ số hiệu suất của hệ thống vẫn có thể được cải thiện.

Dựa trên kết quả các thử nghiệm, một số khuyến nghị sau đây có thể được xem xét để hệ thống AWH sử dụng TEC trở thành một giải pháp hiệu quả: (1) Cải thiện hiệu suất năng lượng là yếu tố then chốt, bằng cách tìm kiếm các loại TEC có hiệu suất cao hơn, tối ưu hóa thiết kế tản nhiệt cho mặt nóng nhằm giảm tiêu thụ điện năng mà vẫn duy trì khả năng làm lạnh; (2) Nâng cao hiệu quả thu nước bằng cách tối ưu hóa luồng không khí đi qua bề mặt lạnh và tăng diện tích tiếp xúc. Nghiên cứu về hình dạng, vật liệu và lớp phủ bề mặt tản nhiệt để tăng cường khả năng ngưng tụ và thu gom nước; (3) Tích hợp các cảm biến thông minh (nhiệt độ, độ ẩm) cùng bộ điều khiển tự động cho phép điều chỉnh công suất TEC và tốc độ quạt theo thời gian thực dựa trên điều kiện môi trường giúp tối đa hóa lượng nước thu được và giảm thiểu năng lượng tiêu thụ; (4) Kết hợp hệ thống với các nguồn năng lượng tái tạo là một hướng đi bền vững. Điều này không chỉ giúp giảm chi phí vận hành mà còn biến hệ thống trở thành một giải pháp xanh, độc lập về năng lượng, phù hợp cho các khu vực không có lưới điện.

4. Kết luận

Trong bối cảnh khan hiếm nguồn nước sạch ngày càng gia tăng trên phạm vi toàn cầu, các công nghệ khai thác nước từ không khí đang nổi lên như một xu hướng nghiên cứu và ứng dụng quan trọng. Trong các giải pháp phổ biến hiện nay, hệ thống AWH sử dụng TEC được xem là một giải pháp tiềm năng. Bằng cách khai thác hiệu ứng Peltier để làm lạnh bề mặt ngưng tụ xuống dưới điểm sương, hệ thống này có khả năng chuyển hóa hơi ẩm trong không khí thành nước lỏng, phục vụ nhu cầu sinh hoạt của con người. Nhờ đặc tính không phụ thuộc vào nguồn nước sẵn có và khả năng hoạt động tại các khu vực khô hạn, hẻo lánh hoặc không có lưới điện, công nghệ AWH sử dụng TEC được đánh giá là đặc biệt phù hợp với các vùng có điều kiện tự nhiên khắc nghiệt. Tuy nhiên, công nghệ TEC vẫn còn hạn chế về hiệu suất làm lạnh và tiêu thụ năng lượng, do đó việc nghiên cứu nâng cao hiệu quả hoạt động, cải tiến thiết kế hệ thống và kết hợp nguồn năng lượng tái tạo vẫn là khoảng trống quan trọng cần được tập trung khai thác.

Với tiềm năng ứng dụng rộng rãi và xu hướng phát triển công nghệ xanh, hệ thống thu nước khí quyển sử dụng TEC hứa hẹn sẽ đóng góp tích cực vào chiến lược đảm bảo an ninh nguồn nước bền vững toàn cầu, đồng thời mở ra nhiều hướng nghiên cứu mới trong tương lai.

Lời cám ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ giáo dục và Đào tạo Việt Nam (theo mã số B2025-TNA-07).

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] Z. Ahrestani, S. Sadeghzadeh, and H. B. M. Emrooz, "An overview of atmospheric water harvesting methods, the inevitable path of the future in water supply," *RSC Adv.*, vol. 13, 2023, Art. no. 10273, doi: 10.1039/d2ra07733g.

[2] R. Peeters, H. Vanderschaeghe, J. Ronge, and J. A. Martens, "Fresh water production from atmospheric air: Technology and innovation outlook," *iScience,* vol. 24, November 19, 2021, Art. no. 103266, doi: 10.1016/j.isci.2021.103266.

[3] B. Wanga, X. Zhoua, Z. Guob, and W. Liuc, "Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications," *Nano Today*, vol. 40, 2021, Art. no. 101283, doi: 10.1016/j.nantod.2021.101283.

[4] N. Beithou, M. B. Khalid, S. As'ad, S. Alsaqoor, G. Borowski, N. Alshabatat, and A. Andruszkiewicz, "Atmospheric Water Harvesting Technology: Review and Future Prospects," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 291–302, 2024, doi: 10.12911/22998993/182814.

[5] A. M. K. El-Ghonemy, "Fresh water production from/by atmospheric air for arid regions, using solar energy: Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 6384–6422, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.06.029.

[6] H.-J. Li, L. Cheng, P. Sun, F.-F. Li, and J. Qiu, "Potential Analysis of Atmospheric Water Harvesting Technologies from the Perspective of "Trading-in Energy for Water," *Water*, vol. 15, 2023, Art. no. 878, doi: 10.3390/w15050878.

[7] T. H. Kwan, S. Yuan, Y. Shen, and G. Pei, "Comparative meta-analysis of desalination and atmospheric water harvesting technologies based on the minimum energy of separation," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10072-10087, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.175.

[8] F. Bagheri, "Performance investigation of atmospheric water harvesting systems," *Water resources and industry*, vol. 20, pp. 23-28, 2018, doi: 10.1016/j.wri.2018.08.001.

[9] S. Zolfagharkhani, M. Zamen, and M. M. Shahmardan, "Thermodynamic analysis and evaluation of a gas compression refrigeration cycle for fresh water production from atmospheric air," *Energy Convers. Manage.*, vol. 170, pp. 97–107, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.016

[10] A. Magrini, L. Cattani, M. Cartesegna, and L. Magnani, "Integrated systems for air conditioning and production of drinking water–Preliminary considerations," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1659–1665, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.406

[11] Z. Chen *et al.*, "Recent progress on sorption/desorptionbased atmospheric water harvesting powered by solar energy," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 230, 2021, Art. no. 111233, doi: 10.1016/j.solmat.2021.111233

[12] R. Li, Y. Shi, M. Alsaedi, M. Wu, L. Shi, and P. Wang, "A Hybrid hydrogel with high water vapor harvesting capacity for deployable solar-driven atmospheric water generator," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 19, pp. 11367–11377, 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b02852

[13] J. Xu *et al.*, "Efficient solar-driven water harvesting from arid air with metal–organic frameworks modified by hygroscopic salt," *Angew. Chem., Int. Ed.*, vol. 59, no. 13, pp. 5202–5210, 2020, doi: 10.1002/anie.201915170.

[14] W. Xu and O. M. Yaghi, "Metal–organic frameworks for water harvesting from air, anywhere, anytime," *ACS Cent. Sci.*, vol. 6, no. 8, pp. 1348–1354, 2020, doi: 10.1021/acscentsci.0c00678

[15] V. Joshi, V. Joshi, H. Kothari, M. Mahajan, M. Chaudhari, and K. Sant, "Experimental investigations on a portable fresh water generator using a thermoelectric cooler," *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 161–166, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.085.

[16] M. Jradi, N. Ghaddar, and K. Ghali, "Experimental and theoretical study of an integrated thermoelectric–photovoltaic system for air dehumidification and fresh water production," *Int. J. Energy Res.*, vol. 36, no. 9, pp. 963–974, 2012, doi: 10.1002/er.1848.

[17] J. K. Domen, W. T. Stringfellow, M. K. Camarillo, and S. Gulati, "Fog water as an alternative and sustainable water resource," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 16, no. 2, pp. 235-249, 2014, doi: 10.1007/s10098-013-0645-z.

[18] G. Morichi, L. B. Calixto, and A. Zanelli, "Novel applications for fog water harvesting," *J. Geosci. Environ. Prot.*, vol. 6, no. 3, pp. 26–36, 2018, doi: 10.4236/gep.2018.63004

[19] K. Oktor, M. G. R. Dhuol, and M. E. Kalkan, "Fog Harvesting: An Effective Solution to The Water Scarcity Problem," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 28, no. 4, pp. 866-878, 2024, doi: 10.16984/saufenbilder.1480488.

[20] L. T. Nguyen *et al.*, "Three-dimensional multilayer vertical filament meshes for enhancing efficiency in fog water harvesting," *ACS Omega*, vol. 6, no. 5, pp. 3910–3920, 2021, doi: 10.1021/acsomega.0c05776.

[21] D. Milani, A. Abbas, A. Vassallo, M. Chiesa, and D. Al, "Evaluation of using thermoelectric coolers in a dehumidification system to generate freshwater from ambient air," *Chem. Eng. Sci*., vol. 66, pp. 2491–2501, 2011, doi: 10.1016/j.ces.2011.02.018.

[22] A. H. Shourideh, W. B. Ajram, J. A. Lami, S. Haggag, and A. Mansouri, "A comprehensive study of an atmospheric water generator using Peltier effect," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 6, pp. 14–26, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.02.015

[23] C. Koc, A. B. Koc, F. C. Gok, and H. Duran, "Sustainable Water Harvesting from the Atmosphere Using Solar-Powered Thermoelectric Modules," *Pol. J. Environ. Stud*., vol. 29, no. 2, pp. 1197-1204, 2020, doi: 10.15244/pjoes/105419

[24] C. J. L. Hermes and J. R. B. Jr, "Thermodynamic comparison of Peltier, Stirling, and vapor compression portable coolers," *Appl. Energy*., vol. 91, pp. 51–58, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.043.

[25] F. Bagheri, "Performance investigation of atmospheric water harvesting systems," *Water Resour. Ind.*, vol. 20, pp. 23–28, 2018, doi: 10.1016/j.wri.2018.08.001.

[26] K. K. I. Al-Chlaihawi, A. Al-Saadi, and N. A. Jabbar, "An Experimental and Theoretical Study of Forced Convection from a Peltier Thermo-electric Cooling," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 870, 2020, Art. no. 012166, IOP Publishing, doi: 10.1088/1757-899X/870/1/012166.

[27] I. Casallas, M.Pérez, A. Fajardo, and C.-I. Paez-Rueda, "Experimental Parameter Tuning of a Portable Water Generator System Based on a Thermoelectric Cooler," *Electronics*, vol. 10, 2021, Art. no. 141, doi: 10.3390/electronics10020141.

[28] M. H. Esfe, S. Esfandeh, and D. Toghraie, "Numerical simulation of water production from humid air for Khuzestan province: Investigation of the Peltier effect (thermoelectric cooling system) on water production rate," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, 2021, Art. no. 101473, doi: 10.1016/j. csite.2021.101473.

[29] J. A. Lami, A. H. Shourideh, W. B. Ajram, S. Haggag, and A. Mansouri, "Determination of Temperature Distributions of Fully Wet Rectangular, Triangular, and Parabolic Straight Fins," *Columbia International Publishing American Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 3, no. 5, pp. 333-351, 2016, doi: 10.7726/ajhmt.2016.1019.

[30] S. Sharma, V. K. Dwivedi, and S. N. Pandit, "A review of thermoelectric devices for cooling applications," *International Journal of Green Energy*, vol. 11, pp. 899–909, 2014, doi: 10.1080/15435075.2013.829778.

[31] H. S. Dizaji, S. Jafarmadar, S. Khalilarya, and A. Moosavi, "An exhaustive experimental study of a novel air-water based thermoelectric cooling unit," *Applied Energy*, vol. 181, pp. 357-366, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.074.

[32] H. Wang and Z. Pan, "Performance optimization of thermoelectric devices and its dependence on materials properties," *Materials Lab*, vol. 2, 2023, Art. no. 220053, doi: 10.54227/mlab.20220053.

[33] J. G. Vián, D. Astrain, and M. Domınguez, "Numerical modelling and a design of a thermoelectric dehumidifier," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 22, pp. 407–422, 2002, doi: 10.1016/S1359-4311(01)00102-8.

[34] C. Udomsakdigool, J. Hirunlabh, J. Khedari, and B. Zeghmati, "Design optimization of a new hot heat sink with a rectangular fin array for thermoelectric dehumidifiers," *Heat Transf. Eng*., vol. 28, pp. 645–655, 2007, doi: 10.1080/01457630701266470.

[35] W. Huajun and Q. Chengying, "Experimental study of operation performance of a low power thermoelectric cooling dehumidifier," *Int. J. Energy Environ*., vol. 1, no. 3, pp. 459–466, 2010.

[36] S. Liu, W. He, D. Hu, S. Lv, D. Chen, X. Wu, F. Xu, and S. Li, "Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method," *Energy Procedia*., vol. 142, pp. 1609–1614, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.538.

[37] W. He, P. Yu, Z. Hu, S. Lv, M. Qin, and C. Yu, "Experimental Study and Performance Analysis of a Portable Atmospheric Water Generator," *Energies*, vol. 13, 2020, Art. no. 73, doi: 10.3390/en13010073.

[38] D.-H. Im, H.-C. Kwon, K.-J. Kim, and K.-H. Kim, "Study on the Design of a New Heatsink Cooling System for Thermoelectric Dehumidifer," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Springer, vol. 21, pp. 75–80, 2020, doi: 10.1007/s12541-019-00259-x.

[39] M. Eslami, F. Tajeddini, and N. Etaati, "Thermal analysis and optimization of a system for water harvesting from humid air using thermoelectric coolers," *Energy Convers. Manag.*, vol. 174, pp. 417–429, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.08.045

[40] S. Chinnarao, V. V. Reddy, and D. R. Srinivasan, "Solar Water Condensation Using Thermoelectric Coolers," *International Journal of Advance Engineering and Research Development (IJAERD)*, vol. 4, no. 9, pp.615-618, 2017.

[41] T. J. Kadhim, A. K. Abbas, and H. J. Kadhim, "Experimental study of atmospheric water collection powered by solar energy using the Peltier effect," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 671, 2020, Art. no. 012155, doi: 10.1088/1757-899X/671/1/012155.

[42] A. Riahi, N. A. Zakaria, N. M. Noh, M. Z. M. Amin, A. M. Jusoh, *et al.*, "Performance Investigation of 18 Thermoelectric Cooler (TEC) Units to Supply Continuous Daily Fresh Water from Malaysia's Atmosphere," *Sustainability*, vol. 13, 2021, Art. no. 1399, doi: 10.3390/su13031399.