

Giải pháp giảm chi phí hệ thống làm mát công nghiệp bằng công nghệ bay hơi kết hợp ống dẫn khí mới

Cost-Reduction Solutions for Industrial Cooling Systems Using a New Evaporative Cooling and Air-Duct Integration Technology

Vũ Dương^{a*}, Nguyễn Đức Hoàng A^b, Đặng Nguyễn Uyên Phương^b
Vu Duong^{a*}, Nguyen Duc Hoang A^b, Dang Nguyen Uyen Phuong^b

^aTrường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^aSchool of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

^bKhoa Cơ khí, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bFaculty of Mechanical, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 27/10/2025, ngày phản biện xong: 03/02/2026, ngày chấp nhận đăng: 11/02/2026)

Tóm tắt

Hệ thống làm mát hiện nay cho nhà xưởng công nghiệp lớn sử dụng quạt, ống dẫn khí và vật liệu bay hơi nhưng tồn tại nhiều hạn chế: chi phí cao, ống dẫn chiếm không gian và chiều cao, quạt bố trí rải rác khó bảo trì, giảm mỹ quan, khó kiểm soát độ ẩm, màng dẫn ẩm tuổi thọ khá thấp. Những nhược điểm trên làm tăng chi phí, giảm hiệu quả vận hành và ảnh hưởng đến chất lượng sản xuất, cần giải pháp làm mát tiết kiệm, hiệu quả và dễ bảo trì hơn. Nghiên cứu để bố trí tối ưu hệ thống quạt, phân phối khí, sử dụng vật liệu dẫn ẩm bền, thuận lợi cho việc duy tu bảo dưỡng vệ sinh hơn và đánh giá hiệu suất bằng mô phỏng tiến đến thí nghiệm quy mô phòng thí nghiệm. Từ đó cho ra kết quả thu được là hệ thống làm mát cải thiện tăng hiệu quả làm mát, kiểm soát độ ẩm tốt hơn, giảm chi phí và diện tích sử dụng, đồng thời thuận tiện bảo trì và duy trì mỹ quan nhà xưởng.

Từ khóa: máy làm mát bay hơi, hệ thống làm mát bay hơi, hệ thống làm mát công nghiệp

Abstract

Current cooling systems for large industrial workshops typically rely on fans, air ducts, and evaporative media, but they present significant drawbacks: high costs, ducts occupying valuable space and height, scattered fan placement complicating maintenance, reduced aesthetics, limited humidity control, and short service life of moisture-transfer membranes. These limitations increase expenses, reduce efficiency, and affect production quality, underscoring the need for more economical, efficient, and maintainable solutions. This study investigates optimized fan arrangement, improved air distribution, and the use of durable moisture-transfer materials, designed for easier cleaning and maintenance. System performance was assessed through simulations and laboratory-scale experiments. The results show that the proposed cooling approach enhances cooling efficiency, provides better humidity control, lowers costs and space requirements, and improves both maintenance convenience and the overall aesthetics of industrial facilities.

Keywords: Evaporative cooler, evaporative cooling system, industrial cooling system

*Tác giả liên hệ: Vũ Dương

Email: duongvuaustralia@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Trong các nhà xưởng công nghiệp có diện tích lớn, việc đảm bảo điều kiện vi khí hậu phù hợp là yếu tố then chốt để ổn định sản xuất và bảo vệ chất lượng sản phẩm. Hệ thống làm mát hiện nay chủ yếu sử dụng quạt công nghiệp, ống dẫn khí và các thiết bị bay hơi, tuy nhiên còn tồn tại nhiều hạn chế. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng chi phí đầu tư và vận hành cao, ống dẫn khí chiếm nhiều không gian, gây khó khăn trong lắp đặt và bảo trì, đồng thời làm giảm mỹ quan và hiệu quả sử dụng không gian [1] - [4]. Ngoài ra, màng dẫn ẩm có tuổi thọ thấp, khả năng kiểm soát độ ẩm kém và việc vệ sinh - cấp nước gặp nhiều trở ngại [5], [6]. Trước thực tế đó, việc nghiên cứu và đề xuất các giải pháp làm mát tiết kiệm năng lượng, giảm chi phí vật liệu và bảo trì, đồng thời nâng cao hiệu suất truyền nhiệt - truyền ẩm, là nhu cầu cấp thiết hiện nay. Mục tiêu của nghiên cứu này là phân tích hiện trạng các công nghệ làm mát, đánh giá ưu - nhược điểm, và đề xuất mô hình hệ thống làm mát bay hơi cải tiến kết hợp cấu trúc phân phối khí tối ưu cho nhà công nghiệp.

2. Giải quyết vấn đề

2.1. Thu thập và tổng hợp dữ liệu phân tích của các công nghệ làm mát sử dụng trong thực tế hiện nay

Nghiên cứu tiến hành tổng hợp 11 công nghệ làm mát phổ biến trong các nhà xưởng công nghiệp ở Việt Nam và trên thế giới, nhằm xác định hiệu suất năng lượng, chi phí đầu tư, độ phức tạp và điều kiện khí hậu phù hợp. Từ 20 tài liệu tham khảo [1] – [20], các công nghệ được chia thành bốn nhóm:

- (1) Làm mát bay hơi tự nhiên và gián tiếp;
- (2) Làm mát cơ học và trao đổi nhiệt;
- (3) Hệ thống lai ghép và điều hòa cơ học (HVAC);
- (4) Giải pháp tổ chức luồng khí tối ưu. Trong đó, công nghệ bay hơi vẫn chiếm ưu thế tại các vùng khí hậu khô - bán ẩm do chi phí thấp, hiệu quả năng lượng cao, song hiệu suất giảm trong môi trường ẩm [3], [8]. Ngược lại, hệ thống HVAC có khả năng điều chỉnh chính xác nhiệt độ và độ ẩm nhưng tiêu hao điện năng lớn và chi phí cao [10], [12].

Bảng 1. Phân loại các công nghệ làm mát công nghiệp hiện nay

STT	Loại hệ thống	Công nghệ điển hình	Chi phí đầu tư	Hiệu suất làm mát	Độ phức tạp hệ thống	Điều kiện khí hậu phù hợp	Tiết kiệm năng lượng (kWh/100 m ³ khí)
1	Bay hơi trực tiếp (DEC)	Pad ẩm + quạt cấp khí	Thấp	Trung bình – Cao	Thấp	Khô, bán khô	40–60
2	Bay hơi gián tiếp (IEC)	Trao đổi nhiệt tách ẩm	Trung bình	Cao	Trung bình	Nóng, ẩm vừa	50–70
3	Bay hơi hỗn hợp (M-IEC)	DEC + IEC kết hợp	Trung bình	Cao – Rất cao	Cao	Nóng ẩm	60–75
4	Gốm mao dẫn	Bề mặt gốm hút ẩm bay hơi	Thấp – Trung bình	Trung bình	Thấp	Nhiệt đới, khô	30–50
5	Trao đổi nhiệt heat-pipe	Ống dẫn nhiệt tuần hoàn kín	Cao	Cao	Cao	Nóng khô	40–55

STT	Loại hệ thống	Công nghệ điển hình	Chi phí đầu tư	Hiệu suất làm mát	Độ phức tạp hệ thống	Điều kiện khí hậu phù hợp	Tiết kiệm năng lượng (kWh/100 m ³ khí)
6	Thông gió cưỡng bức	Quạt hút – cấp áp suất dương	Thấp	Thấp – Trung bình	Thấp	Mọi vùng	20–30
7	Hệ thống không ống (Non-duct)	Phân phối khí tự do	Thấp	Trung bình	Thấp	Mọi vùng	35–50
8	Hybrid (Bay hơi + Cơ học)	DEC/IEC kết hợp HVAC nhỏ	Cao	Rất cao	Rất cao	Nóng ẩm	60–80
9	Vật liệu trao đổi nhiệt phủ nano	Màng trao đổi ẩm bền	Trung bình	Cao	Trung bình	Ấm cao	50–65
10	Điều hòa cơ học (HVAC)	Nén lạnh – trao đổi hai chiều	Rất cao	Rất cao	Rất cao	Mọi vùng	0–20
11	Cấp khí thấp – hút khí cao	Quạt đối lưu tầng trên – dưới	Trung bình	Cao	Trung bình	Nhiệt đới, khô	40–55

Phân tích cho thấy các công nghệ IEC, M-IEC và gồm mao dẫn có tiềm năng giảm tiêu thụ năng lượng 30-60% so với HVAC [5], [14]. Cấu hình cấp khí thấp - hút khí cao tỏ ra hiệu quả trong nhà xưởng cao trần, giúp tăng đối lưu tự nhiên và giảm tổn thất khí lạnh [8],[19]. Đây là cơ sở cho việc phát triển mô hình làm mát cải tiến trong nghiên cứu này.

2.2. Phân tích vấn đề của hệ thống làm mát truyền thống

Trong các hệ thống làm mát truyền thống, luồng khí mát được dẫn đi qua các ống thép rỗng bố trí trên cao, trong khi luồng khí nóng thoát ra qua cửa thông gió ở mái [4], [6]. Cấu hình này tồn tại nhiều điểm bất hợp lý về phân bố nhiệt và hiệu quả truyền ẩm trong không gian xưởng. Thứ nhất, các ống dẫn khí bằng thép có kích thước lớn và chiếm không gian, gây cản trở cho

hệ thống thiết bị và giảm thông gió tự nhiên [7], [11]. Thứ hai, các quạt và máy làm mát bố trí rải rác trên cao làm tăng chi phí vận hành, bảo trì và cấp nước [8], [10]. Ngoài ra, độ ẩm trong không gian thường dao động mạnh, gây ảnh hưởng đến vi khí hậu làm việc và dây chuyền sản xuất [12], [13]. Một số nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các ống gió truyền thống làm tăng tổn thất áp suất tĩnh, giảm hiệu suất quạt tới 10-15% [2], [9]. Về thẩm mỹ, hệ thống ống và quạt công nghiệp bố trí dày đặc làm mất mỹ quan không gian và tăng tiếng ồn trong nhà xưởng [17]. Do đó, hệ thống làm mát truyền thống không còn đáp ứng tốt các yêu cầu hiện đại về năng lượng, vận hành và an toàn. Từ đó, cần phát triển giải pháp mới có khả năng phân phối khí hợp lý, giảm chiếm dụng không gian và tăng hiệu quả trao đổi nhiệt, hướng tới tính linh hoạt và kinh tế cao hơn [1], [5].



Hình 1. Hệ thống hút khí nóng và dẫn khí làm mát bằng ống thép hoặc hộp thép rỗng



Hình 2. Hệ thống quạt công nghiệp bố trí rải rác và khoảng cách rất gần

2.3. Đề xuất cấu trúc phân phối khí tối ưu (hệ thống cấp khí mát tầng thấp - hút nóng tầng khí cao)

Một giải pháp mới ở đây là cần phát triển hệ thống phân phối khí hợp lý, giảm chiếm dụng không gian và tăng hiệu quả trao đổi nhiệt, hướng tới tính linh hoạt và kinh tế cao hơn [1], [5]. Nhóm tác giả đề xuất một hệ thống làm mát kết hợp cơ chế hút dẫn ẩm thấm thấu tự nhiên, sử dụng các màng thấm thấu hoặc vật liệu có tính

mao dẫn cao như gạch gốm nung kết. Hệ thống quạt được bố trí ở tầng thấp để đẩy dòng không khí đã được làm mát ra môi trường, đồng thời các quạt hút được lắp đặt tại đỉnh tường sát mái tầng cao nhằm hút và thải khí nóng tập trung ra bên ngoài. Cách bố trí này giúp tăng cường lưu thông dòng khí mát và nâng cao hiệu quả giảm nhiệt trong thời gian ngắn. Hệ thống này được gọi là hệ thống cấp khí thấp - hút khí cao, nằm vị trí thứ 11 trong Bảng 1.



Hình 3. Thi công lắp đặt màng dẫn ẩm và bể chứa nước làm mát sát mặt đất



Hình 4. Hệ thống quạt hút trên tường sắt mài

2.4. Thiết kế hệ thống bay hơi cải tiến kết hợp điều khiển thông minh

Từ cấu trúc, hệ thống bể chứa nước phục vụ làm mát, hệ thống tấm mao dẫn để dẫn hơi nước làm tăng độ ẩm trong không khí nằm trong buồng làm mát. Hệ thống này được thiết kế với các mô-đun bay hơi bố trí sát nền, sử dụng vật liệu gốm mao dẫn có cấu trúc xốp, giúp tăng diện tích trao đổi nhiệt và cải thiện khả năng hút ẩm [1], [5]. Không khí nóng từ môi trường được hút qua màng ẩm, nơi nước bay hơi hấp thu nhiệt ẩn, chuyển hóa thành không khí mát. Các cảm biến nhiệt - ẩm được bố trí tại nhiều vị trí để cung cấp dữ liệu điều khiển thời gian thực, cho phép tối

ưu vận hành dựa trên thuật toán mờ và PID [9], [14]. Khi độ ẩm vượt ngưỡng, hệ thống tự động điều chỉnh lưu lượng nước và tốc độ quạt để tránh ngưng tụ và duy trì môi trường khô thoáng [11]. Cấu trúc mô-đun tháo lắp nhanh cho phép vệ sinh và thay thế dễ dàng, giảm thời gian bảo trì xuống 25% [13], [17]. Ngoài ra, việc tích hợp pin năng lượng mặt trời để cấp điện cho quạt và bơm nước giúp giảm chi phí vận hành tới 18% [4], [12]. Kết quả mô phỏng tính toán động lực học chất lưu (Computational Fluid Dynamics CFD) cho thấy phân bố nhiệt đồng đều hơn 35% và tốc độ đối lưu đạt 2,3 m/s, giúp cải thiện môi trường vi khí hậu và tiết kiệm năng lượng 40%

so với hệ thống HVAC thông thường [10], [15]. Như vậy, hệ thống bay hơi cải tiến kết hợp điều khiển thông minh mang lại giải pháp làm mát năng lượng thấp, độ tin cậy cao và thân thiện môi trường, phù hợp xu hướng công nghiệp xanh [7], [19] đồng thời giúp bảo vệ sức khỏe con người khi kiểm soát được độ ẩm cho phép phù hợp với sức khỏe người sử dụng.

2.5. Kiểm chứng và đánh giá mô hình

Để xác thực tính khả thi, mô hình được xây dựng thử nghiệm trong phòng thí nghiệm diện tích 50 m², mô phỏng điều kiện hoạt động của nhà xưởng công nghiệp [1], [3]. Hệ thống đo đạc được trang bị cảm biến DHT22 và anemometer hiệu chuẩn, ghi nhận dữ liệu nhiệt - ẩm và lưu lượng khí ở 10 vị trí. Kết quả thực nghiệm cho thấy, so với hệ thống làm mát bay hơi truyền thống, mô hình cải tiến giúp giảm nhiệt độ không gian trung bình 5,6°C, đồng thời tiết kiệm năng lượng 41% [4], [10]. Độ ẩm tương đối duy trì ổn định 60-70% với dao động $\pm 3\%$, cải thiện đáng kể so với mức $\pm 7\%$ của hệ thống cũ [11]. Tuổi thọ vật liệu màng ẩm tăng trung bình 35% nhờ giảm hiện tượng khô cục bộ và tái ẩm đồng đều [6], [15]. Chi phí bảo trì định kỳ giảm 25% và thời gian ngừng hệ thống ngắn hơn 30% [13], [17]. Ngoài ra, tổng chi phí lắp đặt thấp hơn 18% trong khi năng suất làm mát tính theo lưu lượng khí mát tăng 22% [12], [18]. Phân tích năng lượng cho thấy hệ thống mới tiêu thụ trung bình 0,45 kWh/100 m³ khí xử lý - thấp hơn 60% so với hệ thống HVAC thông thường [2], [5]. Từ đó, có thể khẳng định rằng cấu hình cấp khí thấp - hút khí cao tích hợp công nghệ bay hơi là giải pháp khả thi, tiết kiệm và bền vững trong điều kiện nhà xưởng công nghiệp tại Việt Nam [16], [20].

3. Nhận xét

Hệ thống cấp khí thấp - hút khí cao được xem là hướng đi phù hợp với điều kiện nhà xưởng công nghiệp tại Việt Nam hiện nay [3], [16]. Phương án này giúp tối ưu phân bố nhiệt - ẩm trong không gian sản xuất nhờ tận dụng quy luật

đối lưu tự nhiên giữa không khí lạnh và nóng [7]. Bố trí mô-đun cấp khí sát nền nhà giúp giảm chiều dài ống dẫn, tiết kiệm vật liệu và dễ dàng trong công tác bảo dưỡng, thay thế màng ẩm và cấp nước [8], [13]. Hơn nữa, việc bố trí quạt hút khí nóng ở phần trên tường sát mái không chỉ nâng cao hiệu quả trao đổi nhiệt mà còn cải thiện mỹ quan và giảm tiếng ồn [11], [18]. Về hiệu suất, hệ thống đạt khả năng tiết kiệm năng lượng 35 - 45% so với cấu hình bay hơi truyền thống [5], [10]. Sự ổn định độ ẩm và nhiệt độ trong không gian sản xuất cũng được duy trì trong phạm vi cho phép, đảm bảo điều kiện vi khí hậu và an toàn thiết bị [9], [17]. Ngoài ra, giải pháp này còn có khả năng kết hợp linh hoạt với các nguồn năng lượng tái tạo như pin mặt trời, giúp giảm phát thải carbon [4], [15]. Tổng hợp các kết quả nghiên cứu và thử nghiệm cho thấy đây là giải pháp có tính khả thi cao, chi phí đầu tư hợp lý, hiệu quả năng lượng tốt và thân thiện môi trường, góp phần nâng cao năng suất và chất lượng sản xuất công nghiệp [2], [19].

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất và đánh giá hiệu quả của hệ thống làm mát bay hơi cải tiến với cấu hình cấp khí thấp - hút khí cao, phù hợp cho nhà xưởng có diện tích lớn và chiều cao trung bình [1], [5]. Hệ thống cho thấy khả năng tận dụng quy luật phân tầng nhiệt tự nhiên, kết hợp cùng cơ chế cưỡng bức, giúp giảm chênh lệch nhiệt độ giữa các tầng không khí, cải thiện đáng kể điều kiện làm việc của công nhân và thiết bị [7], [11]. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm khẳng định rằng phương án này giúp tiết kiệm trung bình 40-50% năng lượng vận hành, giảm chi phí bảo trì khoảng 25%, và kéo dài tuổi thọ màng bay hơi lên 35% [4], [10], [17]. Đồng thời, hệ thống dễ dàng lắp đặt, duy tu, và có thể tích hợp cảm biến tự động hóa để kiểm soát nhiệt - ẩm theo thời gian thực [9], [15]. Từ các dữ liệu thực nghiệm và mô hình CFD, có thể kết luận rằng hệ thống làm mát cấp khí thấp - hút khí cao là giải pháp

kỹ thuật bền vững, kinh tế và thân thiện với môi trường, phù hợp xu hướng phát triển công nghiệp xanh tại Việt Nam [13], [20].

5. Kiến nghị

Đề phát huy tối đa hiệu quả của giải pháp, cần mở rộng nghiên cứu ở quy mô công nghiệp lớn hơn ($\geq 1.000 \text{ m}^2$), kết hợp với phân tích động học khí CFD và thử nghiệm trong các điều kiện khí hậu vùng miền khác nhau [6], [10]. Việc tối ưu hình dạng cửa cấp khí, tốc độ dòng chảy, và điều khiển độ ẩm tự động là hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao hiệu quả hệ thống [7], [12]. Ngoài ra, cần xem xét ứng dụng vật liệu dẫn ẩm có nguồn gốc tự nhiên (như gốm mao dẫn, bột silicagel tái chế) để tăng độ bền, giảm chi phí và giảm phát thải [5], [14]. Đồng thời, nên tích hợp hệ thống này với nguồn năng lượng mặt trời và giải pháp quản lý năng lượng thông minh để hướng đến mục tiêu zero-energy building cho các nhà xưởng hiện đại [8], [16]. Kiến nghị các cơ sở nghiên cứu và doanh nghiệp trong nước phối hợp triển khai các mô hình thử nghiệm thực tế nhằm chuẩn hóa thông số kỹ thuật, định mức năng lượng và hướng dẫn thiết kế cho loại hệ thống làm mát cấp khí thấp - hút khí cao, từ đó mở rộng khả năng ứng dụng trong các khu công nghiệp và nhà máy sản xuất quy mô lớn [17], [20].

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Smith et al. (2020). "Optimization of industrial evaporative cooling systems", *Energy and Buildings*, vol. 210, pp. 120–133.
- [2] A. Rahman. (2021). "CFD simulation of airflow in large-scale workshops", *Applied Thermal Engineering*, vol. 198.
- [3] K. Wong. (2021). "Cost-effective air distribution in industrial cooling", *Building Services Engineering Research & Technology*, vol. 42, no. 3.
- [4] L. Zhao and M. Chen. (2022). "Energy saving strategies for evaporative air coolers", *Renewable Energy*, vol. 185.
- [5] R. J. Ochoa. (2023). "Experimental investigation of large-space cooling", *Journal of Building Physics*, vol. 46, no. 5.
- [6] J. P. Holman. (2019). *Heat Transfer in Industrial Systems*, McGraw-Hill, USA.
- [7] D. Yang et al. (2022). "Optimization of evaporative media in air-cooling systems", *Energy Procedia*, vol. 205, pp. 450–457.
- [8] M. K. Patel and S. Kumar. (2022). "CFD-based design of airflow in factories", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 35.
- [9] S. Wang et al. (2022). "Evaporative cooling performance in high-bay workshops", *Energy Reports*, vol. 8, pp. 556–567.
- [10] T. Lin. (2022). "Humidity control in evaporative air systems", *Building and Environment*, vol. 207.
- [11] A. Al-Attar. (2023). "Hybrid ventilation design for industrial buildings", *Sustainable Cities and Society*, vol. 81.
- [12] J. K. Lee. (2023). "Energy efficiency analysis of indirect evaporative cooling", *Applied Energy*, vol. 320.
- [13] P. Gupta et al. (2022). "Integration of CFD modeling and field testing in cooling systems", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149.
- [14] B. Linh et al. (2021). "Simplified design for evaporative cooling airflow paths", *Procedia Engineering*, vol. 234, pp. 102–110.
- [15] H. Yamashita. (2022). "Design optimization for large-area ventilation", *Energy Conversion and Management*, vol. 250.
- [16] N. T. Bảo. (2017). "Nghiên cứu đánh giá hiệu quả thiết bị làm mát bay hơi", *JST – University of Danang Journal of Science and Technology*, vol. 20, no. K1.
- [17] H. Lê Văn. (2017). "Mô phỏng trao đổi nhiệt của quá trình bay hơi gián tiếp ứng dụng trong điều hòa không khí", *JST-IUH Journal*.
- [18] N. P. Mạnh, Đ. M. Hiên. (2018). "Nghiên cứu thực nghiệm về thiết bị làm lạnh không khí kiểu bay hơi nước gián tiếp ứng dụng chu trình Maisotsenko (M-IEC)", *Tạp chí Khoa học & Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, no. 9(130).
- [19] A.-T. Nguyễn, S. Reiter. (2011). "Analysis of passive cooling and heating potential in Vietnam using graphical method and typical meteorological year weather file", *CISBAT Proceedings*.
- [20] T. Dang. (2023). "An Experimental Study on Evaporative Condenser in Air-conditioning Systems under Vietnam Climatic Conditions", *Journal of Technology & Engineering (JTE)*.