

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ GIẢI PHÁP KỸ THUẬT TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG HVAC

RESEARCH ON OVERVIEW ENERGY SAVING TECHNICAL SOLUTIONS FOR HVAC SYSTEMS

Đặng Văn Bình^{1,*}, Bùi Mạnh Tú²

TÓM TẮT

Hệ thống HVAC có vai trò quan trọng trong đời sống, sản xuất của con người và cũng là nguồn tiêu thụ năng lượng chủ yếu. Do đó, việc tiết kiệm được vài phần trăm chi phí năng lượng cho hệ thống HVAC cũng có ý nghĩa lớn. Bài báo này, trình bày nghiên cứu tổng quan các giải pháp kỹ thuật tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC và khả năng tiết kiệm của các giải pháp. Từ đó, giúp chúng ta có thể lựa chọn được giải pháp tiết kiệm năng lượng phù hợp với hệ thống HVAC cụ thể.

Từ khóa: Hệ thống HVAC, tiết kiệm năng lượng, giải pháp kỹ thuật.

ABSTRACT

HVAC systems have an important role in production, the life of human and consumption and its consumes energy sources mainly. Therefore, just a few percent savings in energy costs for HVAC systems also have great significance. This paper presents, research on overview energy saving technical solutions for HVAC systems and the possibility energy saving of solutions. We can help select energy saving solutions matching specific HVAC systems.

Keywords: HVAC system, energy saving, technical solution.

¹Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Đại học Điện lực

*Email: dangbinh86nxb@gmail.com

Ngày nhận bài: 05/9/2017

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/3/2018

Ngày chấp nhận đăng: 25/10/2018

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống sưởi ấm, thông gió và điều hòa không khí (HVAC - Heat, Ventilation and Air Conditioning) đóng vai trò quan trọng trong đảm bảo điều kiện sống, sự thoải mái cho con người để sống, sinh hoạt và làm việc. Hệ thống HVAC là một trong những nguồn tiêu thụ năng lượng lớn trong các tòa nhà.

Theo [1] gần 50% nhu cầu năng lượng được sử dụng cho việc cung cấp tiện nghi nhiệt trong nhà ở các tòa nhà thương mại. Ở Mỹ, hệ thống HVAC chiếm hơn 50% năng lượng sử dụng cho các tòa nhà [2]. Ở Australia, 70% điện năng tiêu thụ trong các tòa nhà không phục vụ nhu cầu ở là sử dụng cho hệ thống HVAC [3]. Tại Ấn Độ, các hệ thống điều hòa không khí chiếm 32% lượng điện tiêu thụ trong

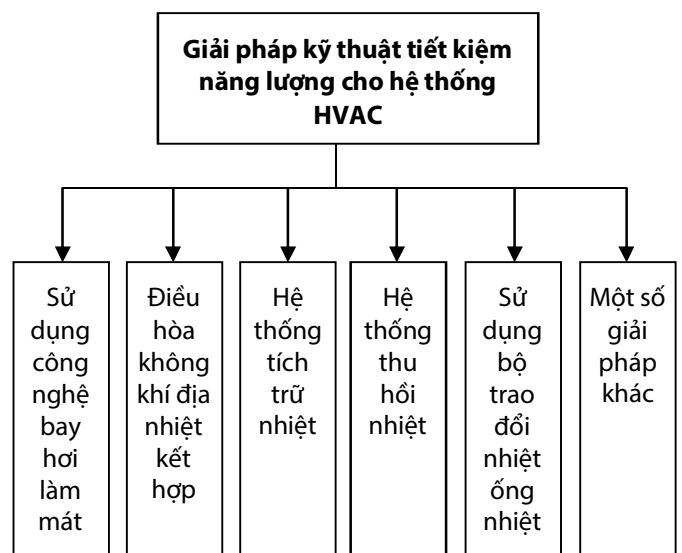
các tòa nhà [4]. Tại Hồng Kông, điều hòa không khí và hệ thống làm lạnh chiếm 33% vào năm 2006 [5]. Hơn 70% năng lượng tiêu thụ trong các tòa nhà là để sử dụng cho hệ thống làm mát ở Trung Đông [6].

Việc phát triển hệ thống HVAC trong khu dân cư, tòa nhà thương mại, công nghiệp đã dẫn đến sự gia tăng lớn trong sử dụng năng lượng, đặc biệt trong các tháng mùa hè. Vì vậy, chỉ cần tiết kiệm được vài phần trăm chi phí năng lượng trong các hệ thống HVAC đã mang lại hiệu quả kinh tế - xã hội to lớn như: giảm chi phí tiền mua điện, giảm lượng khai thác nhiên liệu hóa thạch, giảm ô nhiễm môi trường do quá trình sản xuất điện từ nhiên liệu hóa thạch gây ra,...

Bài báo giới thiệu các giải pháp kỹ thuật nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC. Qua đó giúp chúng ta có cái nhìn tổng quan về tiết kiệm năng lượng trong hệ thống HVAC và hiệu quả của từng giải pháp mang lại.

2. PHÂN LOẠI CÁC GIẢI PHÁP KỸ THUẬT TIẾT KIỆM NĂNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG HVAC

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả phân loại các giải pháp kỹ thuật tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC như hình 1.



Hình 1. Phân loại các giải pháp kỹ thuật trong nghiên cứu

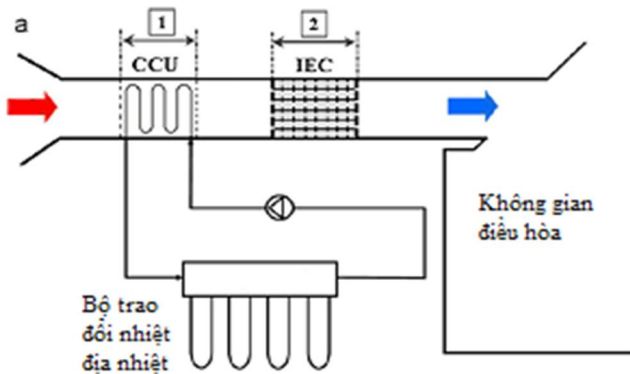
Nội dung tiếp theo của bài báo, nhóm tác giả sẽ đi tìm hiểu, nghiên cứu công nghệ, khả năng tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC của các giải pháp.

3. GIẢI PHÁP SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ BAY HƠI LÀM MÁT

Công nghệ bay hơi làm mát cung cấp nhiệt qua việc trao đổi nhiệt ẩn của môi chất (nước). Tuy nhiên, nhiệt độ thấp nhất của hệ thống có thể đạt được đến là nhiệt độ bầu ướt của không khí bên ngoài. Nhiệt độ không khí cung cấp sau khi làm mát bằng hệ thống bay hơi làm mát nằm ở gần vùng biên tiện nghi nhiệt. Và có thể tăng lên vài độ trên quá trình cung cấp vào phòng, khi đó nhiệt độ sẽ nằm ngoài vùng tiện nghi nhiệt. Do vậy, phải kết hợp hệ thống bay hơi làm mát với một hệ thống HVAC để cải thiện hiệu suất của hệ thống HVAC và đảm bảo các yêu cầu về tiện nghi nhiệt theo tiêu chuẩn. Giải pháp này được chia thành hai loại: (1) sử dụng trong giai đoạn làm lạnh không khí cung cấp; (2) sử dụng để giải nhiệt dàn ngưng của hệ thống HVAC.

3.1. Sử dụng trong giai đoạn làm lạnh không khí cung cấp

Khalajzadeh và cs [7] nghiên cứu các trạng thái nhiệt của hệ thống bay hơi làm mát gián tiếp (IEC) khi kết hợp với bộ trao đổi nhiệt địa nhiệt và bộ dàn ống làm mát (CCU), mô hình được thể hiện ở hình 2.



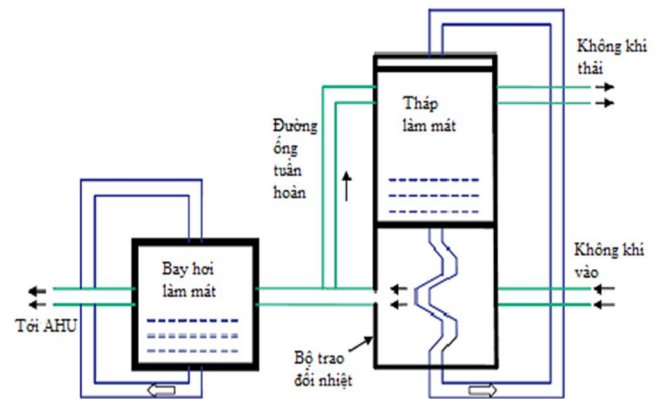
Hình 2. Mô hình hệ thống IEC kết hợp bộ trao đổi nhiệt địa nhiệt và CCU [7]

Trong hệ thống này, nước làm mát cung cấp cho bộ CCU từ bộ trao đổi nhiệt địa nhiệt để làm mát không khí trước khi vào bộ IEC. Kết quả cho thấy, hệ thống có hiệu quả cao mà vẫn đáp ứng được điều kiện tiện nghi nhiệt.

Vakiloroya và cs [8] nghiên cứu khả năng tăng hiệu quả cho hệ thống bay hơi làm mát bằng cách tích hợp các thiết bị trao đổi nhiệt không khí - không khí và dàn lạnh với quá trình bay hơi làm mát trực tiếp (DEC). Trong hệ thống này, ban đầu không khí được làm lạnh tới trạng thái yêu cầu thích hợp (không cần bổ sung độ ẩm ở giai đoạn sau). Trong giai đoạn đầu, bộ trao đổi nhiệt không khí - không khí được sử dụng để làm giảm nhiệt độ bầu khô của không khí vào dàn lạnh. Điều này có thể được thực hiện nhờ sự trao đổi nhiệt giữa luồng không khí hồi trong nhà và không khí cung cấp bên ngoài. Giai đoạn sau, không khí tiếp tục được làm mát ở dàn lạnh. Dàn lạnh được cung cấp nước lạnh từ tháp làm mát. Sau đó, không khí đi qua hệ thống

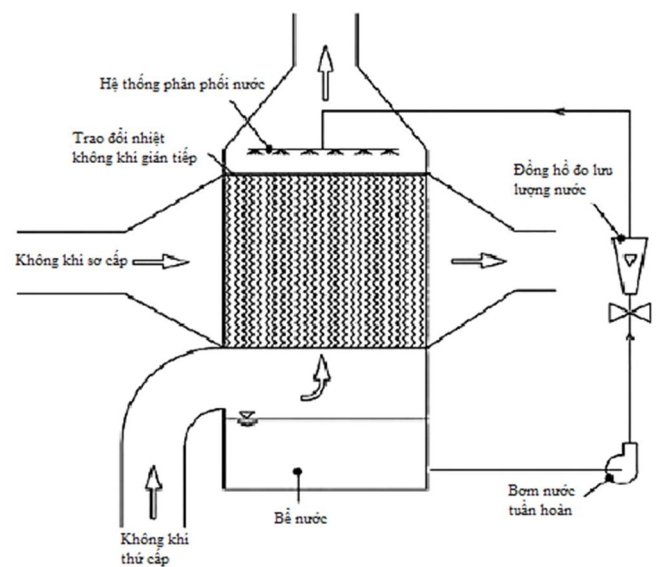
DEC để đạt nhiệt độ thấp hơn. Do đó, trong hệ thống này, nhiệt độ thấp nhất thu được có thể thấp hơn so với nhiệt độ bầu ướt của không khí bên ngoài. So sánh với thông số được giám sát của một hệ thống làm mát trung tâm lắp đặt tại tòa nhà thương mại thực tế trong điều kiện tiết kiệm năng lượng và nhiệt năng cho thấy, hệ thống này có tiềm năng tiết kiệm năng lượng lên đến 52% mà vẫn duy trì được các điều kiện tiện nghi nhiệt trong nhà.

Khandelwal và cs [9] đánh giá tiềm năng của việc giảm tiêu thụ năng lượng của một hệ thống làm mát trung tâm bằng cách kết hợp với công nghệ bay hơi làm mát tái sinh. Phương pháp này đã được giới thiệu bởi Lahoti và cs [10], được thể hiện ở hình 3. Kết quả cho thấy, hệ thống đề xuất đã tiết kiệm được 15,69% năng lượng so với hệ thống cũ.



Hình 3. Hệ thống làm mát trung tâm kết hợp với công nghệ bay hơi làm mát tái sinh [10]

Delfani và cs [11] nghiên cứu ảnh hưởng của việc kết hợp các bộ IEC với hệ thống điều hòa không khí đến lượng điện tiêu thụ. Trong hệ thống này, không khí được làm mát bằng bộ IEC trước khi vào dàn lạnh như hình 4. Kết quả cho thấy, khi sử dụng bộ IEC có thể giảm nhiệt tải đến 75%, dẫn đến giảm lượng điện năng tiêu thụ 55% cho hệ thống điều hòa không khí.

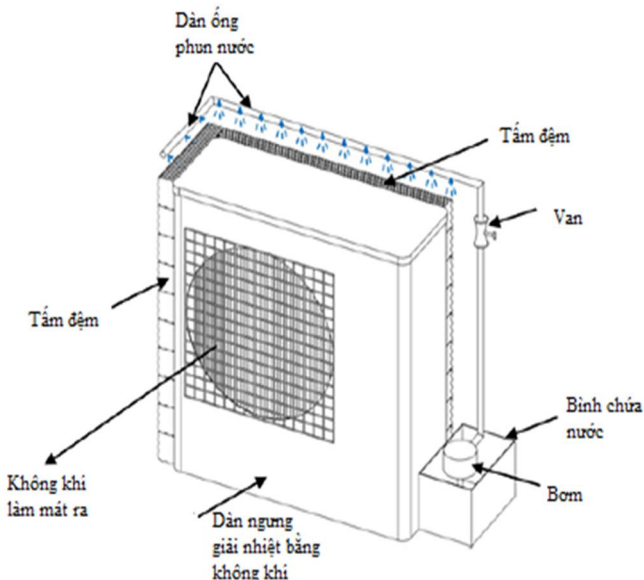


Hình 4. Hệ thống bay hơi gián tiếp trong hệ thống điều hòa không khí [11]

3.2. Sử dụng để giải nhiệt dàn ngưng của hệ thống HVAC

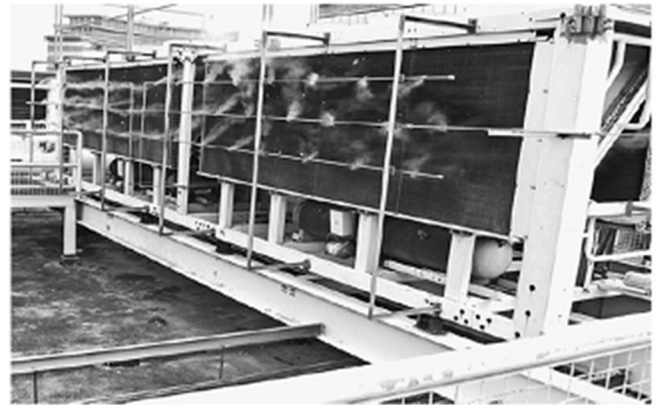
Các hệ thống điều hòa không khí sử dụng máy nén hơi cơ khí tiêu thụ một lượng lớn điện năng. Đối với các hệ thống điều hòa không khí sử dụng dàn ngưng làm mát bằng không khí khi nhiệt độ không khí làm mát dàn ngưng tăng đến nhiệt độ tại bề mặt dàn ngưng thì không khí làm mát không thể nhận thêm nhiệt thải nên việc tăng chỉ số hiệu quả năng lượng (COP) sẽ gặp nhiều khó khăn. Khi nhiệt độ ngưng tụ giảm, áp suất ngưng tụ giảm cho phép máy nén không chạy thường xuyên, qua đó sẽ tiết kiệm được điện năng sử dụng để chạy máy nén. Giải pháp bay hơi làm mát không khí trước khi vào dàn ngưng giải nhiệt gió sẽ làm tăng khả năng giải nhiệt, qua đó nâng cao hiệu quả, tiết kiệm năng lượng cho hệ thống.

Hajidavalloo và Eghtedari [12] tiến hành đánh giá, đo lường hiệu quả của bộ làm mát bay hơi lắp thêm vào dàn ngưng làm mát bằng không khí ở nhiệt độ môi trường đến 49°C (hình 5). Một hệ thống tuần hoàn nước gồm một bơm nước, một bình chứa, đường ống cung cấp nước cho tấm đệm bay hơi ở phía trước dàn ngưng làm mát bằng không khí được lắp thêm vào dàn ngưng. Nước được cấp cho tấm đệm qua các vòi phun nhỏ, khi không khí làm mát đi qua tấm đệm làm nước trong tấm đệm bay hơi, không khí làm mát giảm nhiệt độ và đi vào dàn ngưng. Không khí nhận được nhiều nhiệt thải hơn từ dàn ngưng làm tỉ lệ nén của máy nén giảm dẫn đến giảm điện năng tiêu thụ. Kết quả cho thấy, năng lượng tiêu thụ giảm đến 20% và chỉ số COP cải thiện khoảng 50%.



Hình 5. Mô hình lắp thêm hệ thống bay hơi làm mát không khí trước dàn ngưng giải nhiệt bằng không khí của hệ thống điều hòa không khí [12]

Yu và Chan [13] tính toán chỉ số COP của hệ thống lạnh làm mát dàn ngưng bằng không khí sử dụng phun sương làm mát không khí trước khi vào dàn ngưng (hình 6). Kết quả ước tính giảm 18% điện năng tiêu thụ hàng năm so với hệ thống cũ.



Hình 6. Dàn ống và vòi phun làm mát dàn ngưng giải nhiệt bằng không khí của một hệ thống điều hòa chiller [13]

4. GIẢI PHÁP ĐIỀU HÒA KHÔNG KHÍ ĐỊA NHIỆT KẾT HỢP

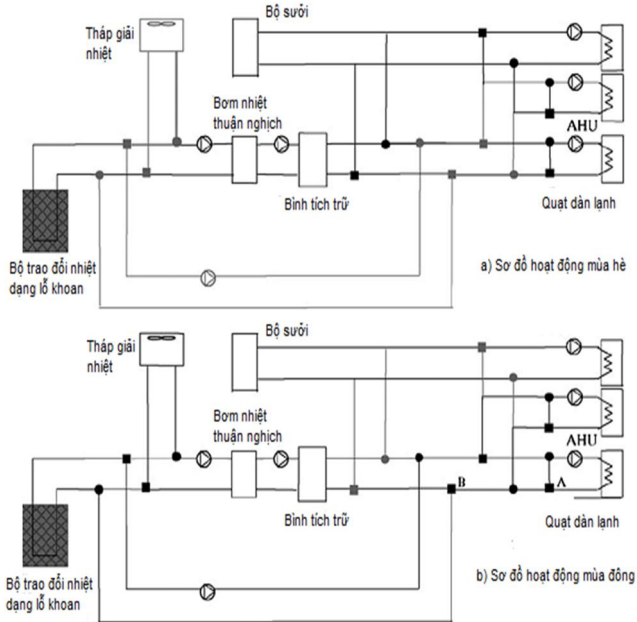
Công nghệ địa nhiệt kết hợp dựa trên thực tế là lòng trái đất có nhiệt độ nhất định, vào mùa hè nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ không khí, vào mùa đông nhiệt độ cao hơn nhiệt độ không khí. Ở chế độ làm mát, nhiệt hoạt động được cung cấp từ một bộ tản nhiệt trong lòng đất nơi có nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ không khí bên ngoài, ở chế độ sưởi ấm, nhiệt sưởi sẽ được lấy từ nhiệt độ trong lòng đất, nơi nhiệt độ cao hơn nhiệt độ không khí bên ngoài.

Theo Hwang Y. và cs [14], COP của bơm nhiệt địa nhiệt (GSHP - Ground Source Heat Pump) cao hơn so với bơm nhiệt nguồn nhiệt không khí là 74%, do giảm nhiệt độ ngưng tụ trong hệ thống GSHP. Theo [15], khi so sánh hệ thống GSHP với bơm nhiệt nguồn nhiệt không khí cho một tòa nhà, kết quả cho thấy trong khi chi phí ban đầu cho GSHP cao hơn so với bơm nhiệt nguồn nhiệt không khí nhưng chi phí vận hành của GSHP có thể giảm được 55,8%. Các thiết bị trao đổi nhiệt địa nhiệt có chi phí lắp đặt cao, làm tăng chi phí ban đầu của hệ thống lên 20-30% [16] và chi phí vốn ban đầu tăng từ 30-50% so với hệ thống dùng nguồn nhiệt không khí [17].

Magraner và cs [18] đánh giá hiệu suất năng lượng dài hạn bằng thực nghiệm của một hệ thống bơm nhiệt địa nhiệt với dự đoán từ một biện pháp thiết kế sử dụng công cụ tính toán TRNSYS. Hệ thống địa nhiệt bao gồm một bơm nhiệt nước có thể đảo chiều với công suất lạnh danh nghĩa là 15,9kW và công suất sưởi ấm (nhiệt) danh nghĩa là 19,3kW, một thiết bị trao đổi nhiệt thẳng đứng và hệ thống thủy lực. Bộ trao đổi nhiệt thẳng đứng được tạo thành bởi 6 lỗ khoan sâu 50m trong một vùng đất hình chữ nhật, với 2 lỗ khoan ở cạnh ngắn và 3 lỗ khoan ở cạnh dài. Hiệu quả năng lượng bơm nhiệt địa nhiệt được tính toán bằng cách sử dụng các phép đo tức thời nhiệt độ, lưu lượng và điện năng tiêu thụ. Kết quả cho thấy, hiệu suất danh nghĩa của bơm nhiệt là đại lượng ảnh hưởng lớn nhất đến các dự đoán hiệu suất năng lượng.

Gasparella và cs [19] đưa ra một hệ thống làm mát kết hợp một bơm nhiệt địa nhiệt với một bộ xử lý chất hút ẩm. Trong thiết kế này, hệ thống hút ẩm của đường ống không

khí thông gió có thể điều khiển nhiệt độ vào mùa hè trong khi bộ trao đổi nhiệt dạng lỗ khoan được sử dụng để đáp ứng tải lạnh hợp lý. Vào mùa đông, bộ xử lý ẩm có thể hoạt động ở mức nhiệt độ cao hợp lý cho phép và nhiệt ẩn hồi nhiệt. Kết quả cho thấy, tiết kiệm năng lượng sơ cấp khoảng 30% mỗi năm so với hệ thống HVAC thường với cung cấp nước nóng bằng đốt khí ga và làm lạnh bằng máy làm lạnh nén hơi. Hệ thống được trình bày ở hình 7.



Hình 7. Sơ đồ kết hợp của bơm nhiệt địa nhiệt và bộ xử lý chất hút ẩm [19]

Inalli và Esen [20] phân tích hiệu suất của một GSHP nằm ngang với R22 là môi chất lạnh cho chế độ sưởi ấm. Ảnh hưởng của các thông số hệ thống khác nhau như chiều sâu lắp đặt bộ trao đổi nhiệt và tỷ lệ dung dịch nước chống đông trong lưu lượng nước chảy đã được kiểm tra trên COP của hệ thống. COP trung bình của GSHP được xác định là 2,66 và 2,81 ở tương ứng 1m và 2m độ sâu.

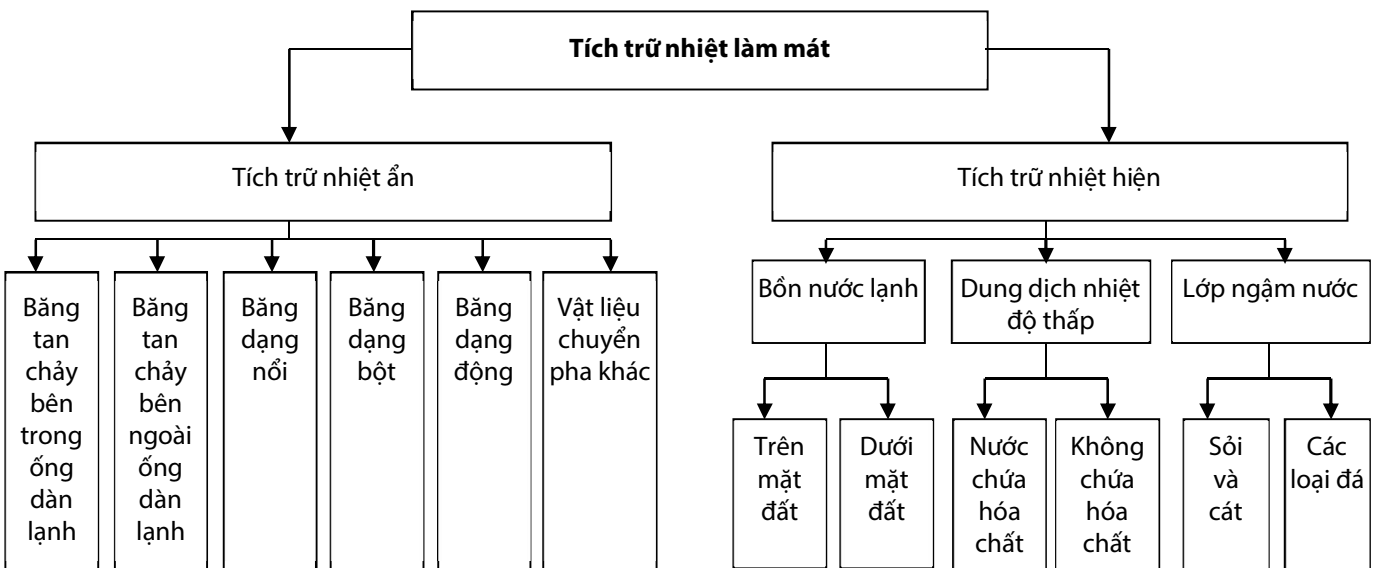
5. GIẢI PHÁP SỬ DỤNG HỆ THỐNG TÍCH TRỮ NHIỆT

Hệ thống tích trữ nhiệt nhằm mục đích giảm chi phí năng lượng sử dụng cho hệ thống HVAC ở thời kỳ cao điểm xuống. Năng lượng để làm mát được lưu trữ ở nhiệt độ thấp hơn 20°C, năng lượng để sưởi ấm được lưu trữ ở nhiệt độ trên 20°C [21]. Hệ thống tích trữ nhiệt làm mát được phân loại theo cách thức truyền nhiệt như hình 8.

Tích trữ nhiệt bằng và nước lạnh là hai loại phổ biến nhất, trong hệ thống này đá, nước lạnh được tích trữ trong bể để phục vụ làm mát tòa nhà trong thời gian điện cao điểm. Toàn bộ hệ thống tích trữ nước lạnh có thể làm giảm lượng điện tiêu thụ cho làm mát trong giờ cao điểm bằng 80-90% so với hệ thống làm mát thông thường [22]. Hệ thống tích trữ nhiệt không nhất thiết phải tiết kiệm năng lượng nhưng có thể làm giảm đáng kể chi phí năng lượng. Theo Chaichana và cs [23], khi so sánh hệ thống làm mát thông thường và hệ thống làm mát có tích trữ nhiệt cho thấy, hệ thống có tích trữ nhiệt có thể làm giảm 5% mức tiêu thụ năng lượng nhưng có thể tiết kiệm đến 55% chi phí điện năng làm mát mỗi tháng.

Rahman và cs [21] trình bày tính khả thi về kỹ thuật và kinh tế của hệ thống bể tích trữ nhiệt trong một tòa nhà ở vùng cận nhiệt đới Queensland (Australia). Họ thấy rằng, hệ thống tích trữ nhiệt kết hợp với hệ thống làm mát không khí thông thường là lựa chọn phù hợp, tiềm năng tiết kiệm năng lượng có thể lên đến 61,9%.

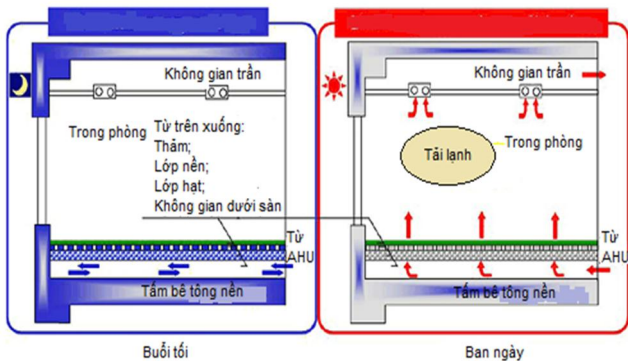
Hệ thống tích trữ lạnh cũng được sử dụng cho mục đích phân phối không khí, cho phép làm mát bằng không khí ở nhiệt độ thấp hơn, điều này làm giảm 30-40% nhu cầu điện do quạt và tiêu thụ năng lượng [24]. Vấn đề này đã được Stritih và Butala [25] trình bày trong một thí nghiệm làm mát tòa nhà sử dụng tích trữ lạnh trong vật liệu chuyển pha vào ban đêm. Trong hệ thống này, sử dụng paraffin tích trữ lạnh và nằm trong ống gió để không khí tích trữ lạnh vào ban đêm. Vào ban ngày, không khí nóng qua ống gió và được làm mát do sự tan chảy của paraffin. Kết quả cho thấy,



Hình 8. Phân loại hệ thống tích trữ nhiệt làm mát

phương pháp này có thể giảm năng lượng cần thiết làm mát cho tòa nhà.

Nagano và cs [26] đề xuất hệ thống điều hòa không khí làm mát sàn, trong đó vật liệu tích trữ nhiệt ẩn dạng hạt được sử dụng là các hạt bột thủy tinh với sáp paraffin. Như hình 9, trong hệ thống này, nhiệt độ không khí cấp vào từ dưới sàn không gian điều hòa giảm xuống nhờ các hạt tích trữ nhiệt. Kết quả mô phỏng cho một tòa nhà văn phòng chỉ ra rằng 89% tải lạnh làm mát hàng ngày có thể được tích trữ mỗi đêm bởi hệ thống sử dụng một tấm dày 30mm hạt tích trữ nhiệt.



Hình 9. Mô hình làm mát sàn bằng tấm tích trữ nhiệt bột thủy tinh và sáp paraffin [26]

Huang và cs [27] nghiên cứu hiệu suất nhiệt của “pin” sử dụng trong tích trữ băng của hệ thống điều hòa không khí như một bộ làm lạnh phụ. Trong thiết kế, bể chứa bao gồm các ống có cánh, bộ nạp và thiết bị trao đổi nhiệt, các bể chứa chứa đầy nước. Môi chất R22 nhiệt độ thấp đi vào thiết bị trao đổi nhiệt và thực hiện trao đổi nhiệt với nước. Sau khi trao đổi nhiệt với môi chất R22, nước trong bể trở thành dạng băng tích trữ và là bộ làm lạnh phụ cho hệ thống điều hòa không khí. Kết quả cho thấy, hệ thống này có thể cung cấp hơn 28% công suất lạnh và COP tăng 8%.

6. GIẢI PHÁP SỬ DỤNG HỆ THỐNG THU HỒI NHIỆT

Trong hệ thống điều hòa không khí trung tâm, lượng không khí tươi cấp vào phòng phụ thuộc vào nồng độ chất ô nhiễm trong nhà, thông thường tỷ lệ không khí tươi cấp vào khoảng 10 ÷ 30% [28]. Lượng không khí tươi cấp vào phòng có thể chiếm khoảng 50% tổn thất nhiệt [29,30]. Hệ thống thu hồi nhiệt được sử dụng với mục đích tận dụng nhiệt thải, giảm chi phí vận hành bằng cách trao đổi nhiệt giữa không khí thải lạnh và không khí tươi cấp. Việc trao đổi nhiệt này có thể được thực hiện nhờ các thiết bị dạng tấm cố định, bánh xe quay, ống nhiệt, cuộn dây/dàn chạy vòng. Nhiệt và ẩm phục hồi được có thể tiết kiệm khoảng 70 ÷ 90% năng lượng và được sử dụng để làm mát, khử ẩm không khí tươi [31].

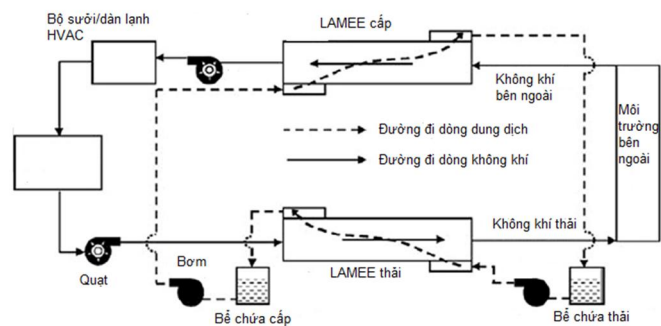
Nasif và cs [32] nghiên cứu việc tiêu thụ năng lượng của một máy điều hòa không khí kết hợp một bộ trao đổi nhiệt entanpi/màng với máy điều hòa không khí thông thường. Họ thấy rằng, với khí hậu ẩm ướt năng lượng hàng năm có thể tiết kiệm được khoảng 8% khi sử dụng bộ trao đổi nhiệt màng.

Ảnh hưởng của bộ thu hồi nhiệt thông gió đến năng lượng tiêu thụ cho làm lạnh và sưởi ấm hàng năm đã được Rasouli và cs [33] nghiên cứu tại 10 tòa nhà văn phòng. Kết quả chỉ ra rằng có khoảng 20 ÷ 40% năng lượng tiêu thụ để làm lạnh và sưởi ấm hàng năm có thể tiết kiệm được.

Delfani và cs [34] tiến hành đánh giá thực nghiệm bốn loại điều hòa không khí: loại thứ nhất, dàn lạnh làm lạnh không khí trong phòng, tỷ lệ không khí tươi cấp 30%, không thu hồi nhiệt; loại thứ hai, không khí được làm mát trước khi vào dàn lạnh bằng thiết bị trao đổi nhiệt, sau khi qua dàn lạnh không khí đi qua phần thứ hai của thiết bị trao đổi nhiệt để tăng nhiệt độ; loại thứ ba, không khí hồi được sử dụng để làm mát sơ bộ không khí bên ngoài trước khi vào dàn lạnh; loại thứ tư, sử dụng thiết bị thu hồi nhiệt để làm mát không khí bên ngoài. Kết quả cho thấy, loại thứ tư tiêu thụ ít hơn loại thứ ba 32% năng lượng ở vùng nóng ẩm, loại thứ hai tiêu thụ năng lượng ít hơn loại thứ nhất 12%.

Wallin và cs [35] so sánh ba hệ thống sử dụng thiết bị thu hồi nhiệt thông gió có các cuộn dây ở Stockholm (Thụy Điển): i) hệ thống thu hồi nhiệt có các cuộn dây; ii) hệ thống thu hồi nhiệt có các cuộn dây trang bị thêm bơm nhiệt 3 tầng on/off; iii) hệ thống thu hồi nhiệt có các cuộn dây trang bị thêm bơm nhiệt có công suất biến thiên. Kết quả mô phỏng cho thấy, hàng năm hệ thống có trang bị thêm bơm nhiệt 3 tầng on/off tỷ lệ thu hồi nhiệt tăng 47 ÷ 65%, hệ thống trang bị thêm bơm nhiệt có công suất biến thiên thì tỷ lệ thu hồi nhiệt tăng 47 ÷ 66%.

Mahmud và cs [36] xây dựng và chạy thử hệ thống trao đổi năng lượng màng chạy xung quanh (RAMEE) ứng dụng trong hệ thống HVAC, bao gồm hai bộ trao đổi năng lượng màng lỏng - không khí chảy ngược chiều chéo nhau, trong đó một lớp màng xốp rất nhỏ tách biệt dòng không khí và dung dịch hút ẩm (hình 10). Hệ thống này nằm trong dòng không khí cấp và thải của tòa nhà. Hệ thống này trao đổi năng lượng ẩn và hiện giữa dòng không khí cấp và xả bằng phương pháp hút ẩm. Tổng hiệu quả năng lượng tối đa của hệ thống này khoảng 55%.



Hình 10. Mô hình hệ thống HVAC sử dụng bộ LAMEE [36]

7. GIẢI PHÁP SỬ DỤNG BỘ TRAO ĐỔI NHIỆT ỐNG NHIỆT

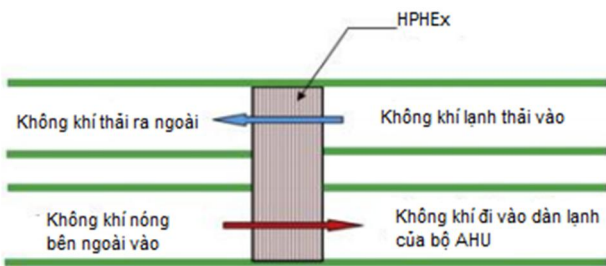
Ống nhiệt là thiết bị truyền nhiệt hiệu quả cao, hoạt động ổn định và khả năng vận chuyển một lượng lớn nhiệt trên một khoảng cách tương đối xa với độ chênh lệch nhiệt độ nhỏ. Thiết kế đơn giản và linh hoạt của ống nhiệt là lý do ống nhiệt được ứng dụng rộng rãi trong làm mát thiết

bị điện tử, thiết bị thu nhiệt năng lượng mặt trời, thiết bị tận dụng nhiệt thải, thiết bị tích trữ năng lượng và đặc biệt được ứng dụng trong lĩnh vực điều hòa không khí.

Trong hệ thống điều hòa không khí, bộ trao đổi nhiệt ống nhiệt (Heat Pipe Heat Exchangers - HPHEX) có thể được sử dụng: i) trao đổi nhiệt giữa không khí tươi bên ngoài cấp vào không gian điều hòa với không khí lạnh thải từ phòng ra ngoài (hoạt động giống như một bộ thu hồi nhiệt); ii) tăng cường khả năng khử ẩm và làm mát của dàn lạnh, đồng thời tiết kiệm năng lượng của bộ gia nhiệt sau dàn lạnh (dàn lạnh hệ thống điều hòa nằm giữa phần ngưng tụ và phần bay hơi của ống nhiệt) [37].

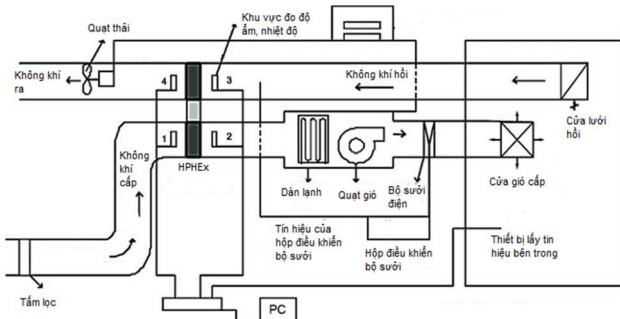
i) Trao đổi nhiệt giữa không khí tươi bên ngoài cấp vào không gian điều hòa với không khí lạnh thải từ phòng ra ngoài (hoạt động giống như một bộ thu hồi nhiệt)

Jadhav T. S. và Lele M. M. [37] tiến hành đánh giá khả năng tiết kiệm năng lượng, phù hợp với điều kiện khí hậu khi sử dụng bộ HPHEX tại 25 thành phố ở Ấn Độ. Một bộ HPHEX gồm 6 hàng ống được sử dụng để phân tích (hình 11). Kết quả điều tra, phân tích, đánh giá cho thấy, khả năng tiết kiệm năng lượng của giải pháp này đạt hiệu quả cao đối với các vùng có khí hậu nóng và khô, ẩm áp và ẩm ướt.



Hình 11. Mô hình sử dụng bộ HPHEX giữa không khí tươi cấp và không khí lạnh thải [37]

Ahmadzadehtalatapeh M. [38] nghiên cứu đánh giá khả năng tiết kiệm năng lượng của bộ HPHEX như một thiết bị hồi nhiệt trong hệ thống điều hòa không khí ở vùng nhiệt đới, với mô hình như hình 12.



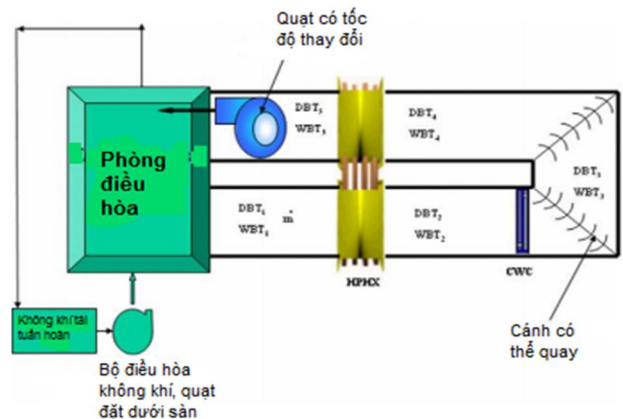
Hình 12. Mô hình sử dụng bộ HPHEX của Ahmadzadehtalatapeh M. [38]

Bộ HPHEX 2, 4, 6, 8 hàng được lắp vào hệ thống điều hòa không khí có tổng công suất lạnh là 9390 kW, có 5,5 kW công suất sưởi điện. Kết quả đánh giá được đo trong 1 tuần (168 giờ) với nhiệt độ ngoài trời dao động từ 25°C ÷ 35°C, độ ẩm dao động từ 36% ÷ 93%. Mức nhiệt trong phòng duy trì ở 24°C, tốc độ gió 2m/s. Kết quả cho thấy, đối

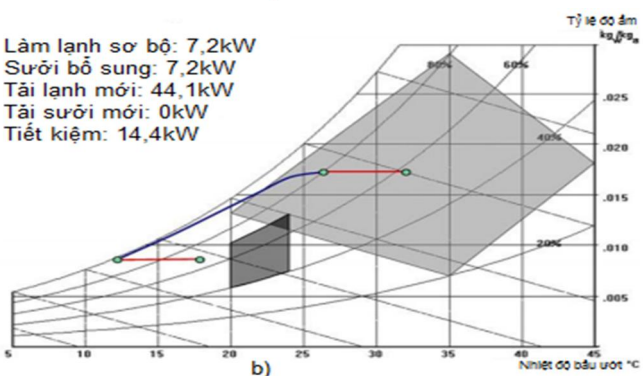
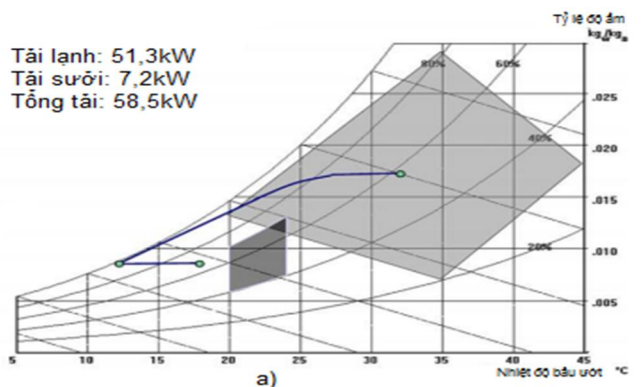
với bộ HPHEX 2 hàng ống có thể tiết kiệm được 2885 kWh/năm và sẽ tăng lên 7023 kWh/năm nếu sử dụng bộ HPHEX 8 hàng ống.

ii) Tăng cường khả năng khử ẩm và làm mát của dàn lạnh, đồng thời tiết kiệm năng lượng của bộ gia nhiệt sau dàn lạnh (dàn lạnh hệ thống điều hòa nằm giữa phần ngưng tụ và phần bay hơi của ống nhiệt)

Yau Y. H. [39] lắp đặt ống nhiệt vào hệ thống (hình 13) để khảo sát, đánh giá khả năng khử ẩm và tiết kiệm năng lượng. Kết quả cho thấy, ở điều kiện môi trường xung quanh có nhiệt độ trung bình 32°C, độ ẩm tương đối 58% và lưu lượng không khí là 2,2 kg/m².s với tổng tải làm mát là 58,5 kW có thể tiết kiệm được 14,4 kW nếu lắp thêm bộ HPHEX vào hệ thống (hình 14).



Hình 13. Mô hình lắp đặt ống nhiệt của Yau Y. H. [39]

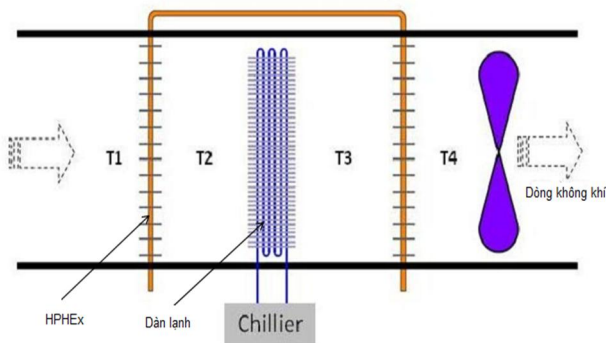


Hình 14. Đồ thị quá trình của không khí trong nghiên cứu của Yau Y. H [39]

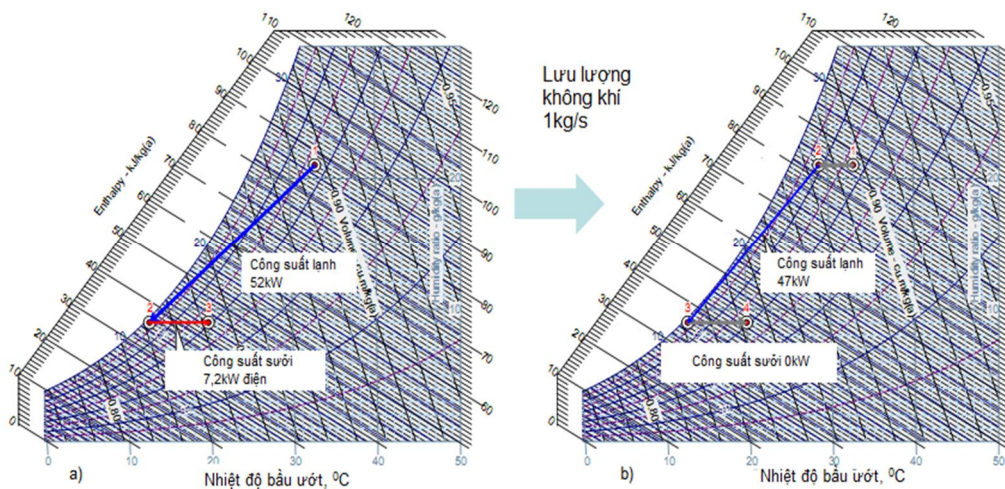
a) không sử dụng bộ HPHEX

b) khi sử dụng bộ HPHEX

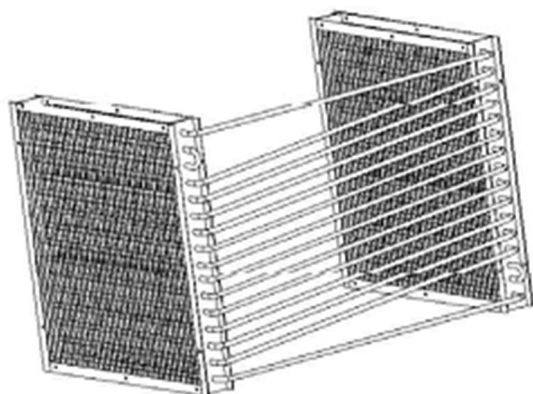
Jouhara [40] tiến hành đánh giá khả năng tiết kiệm năng lượng của bộ HPHEx khi lắp vào hệ thống điều hòa không khí như hình 15. Với lưu lượng không khí đi qua dàn lạnh là 1 kg/s, kết quả cho thấy khi sử dụng bộ HPHEx tiết kiệm được 5 kW công suất dàn lạnh (47 kW so với 52 kW, khoảng gần 10%) và không phải sử dụng bộ sấy có công suất điện 7,2 kW được thể hiện trên hình 16.



Hình 15. Sơ đồ lắp đặt bộ HPHEx của Jouhara [40]



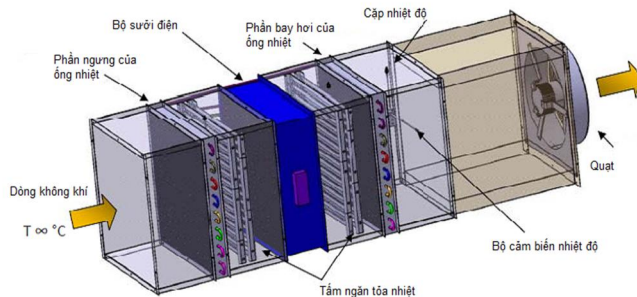
Hình 16. Đồ thị quá trình của không khí trong nghiên cứu của Jouhara [40]
a) không sử dụng bộ HPHEx b) khi sử dụng bộ HPHEx



Hình 17. Bộ HPHEx trong thử nghiệm của Jouhara và Meskimmon ở chế độ sấy [41]

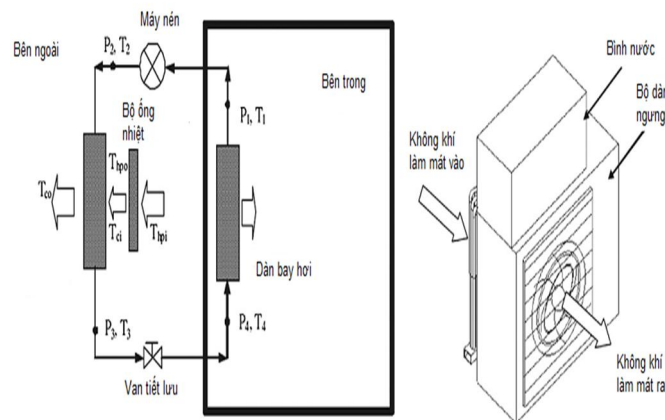
Đồng thời, Jouhara và Meskimmon [41] đánh giá khả năng tiết kiệm năng lượng và quan hệ giữa hiệu quả năng

lượng và tốc độ của luồng không khí ở chế độ sưởi khi lắp thêm bộ HPHEx (hình 17) một hàng với bảy vòng lặp sử dụng môi chất R134a. Họ đã sử dụng một bộ sấy điện 15 kW đặt giữa bộ HPHEx thay cho dàn lạnh (hình 18). Kết quả cho thấy, hiệu quả năng lượng tăng khi tốc độ luồng không khí tăng, lợi ích từ việc tiết kiệm năng lượng có thể trả thêm 01 tháng chi phí tiền điện của hệ thống.



Hình 18. Mô hình bố trí thí nghiệm của Jouhara và Meskimmon ở chế độ sấy [41]

Naphon [42] tính toán hiệu suất của một điều hòa 12.000 BTU/h khi kết hợp với bộ 3 ống nhiệt trước dàn ngưng tụ (hình 19). Các ống nhiệt chế tạo từ các ống thẳng có chiều dài 600mm, đường kính 10mm, phần ngưng ống nhiệt đặt trong bình nước. Khi nhiệt độ trong nhà giữ ở 25 ÷ 26°C, kết quả có thể làm tăng COP hệ thống 6,4%, tăng hệ số hiệu quả năng lượng 17,5%.

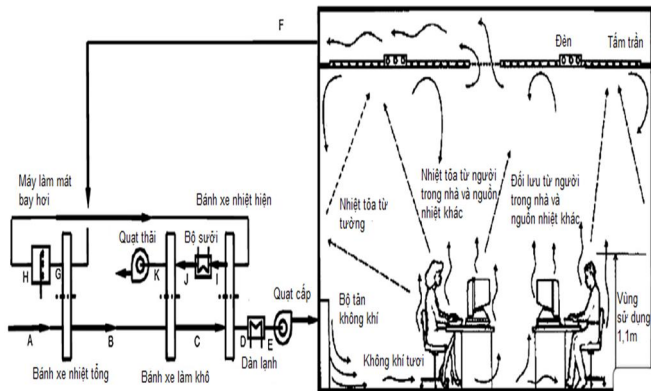


Hình 19. Mô hình điều hòa lắp thêm bộ 3 ống nhiệt trước dàn ngưng tụ [42]

8. MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHÁC

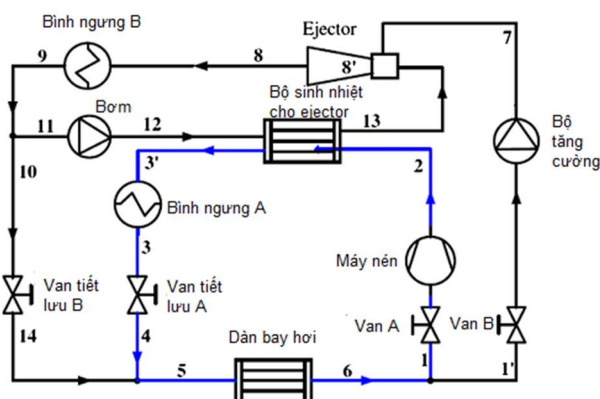
Hao và cs [43] thiết kế hệ thống kết hợp giữa phương pháp làm lạnh trần với thay đổi vị trí của thông gió, khử ẩm cho không gian điều hòa ở điều kiện khí hậu nóng ẩm (hình

20). Hệ thống đề xuất có thể tiết kiệm được 8,2% tổng mức tiêu thụ năng lượng sơ cấp trong khi điều kiện thoải mái trong không gian điều hòa tốt hơn.



Hình 20. Mô hình kết hợp giữa phương pháp làm lạnh trần với thay đổi vị trí của thông gió, khử ẩm cho không gian điều hòa [43]

Công nghệ làm mát ejector là một giải pháp khác để nâng cao hiệu quả năng lượng cho hệ thống lạnh nén hơi. Hệ thống lạnh ejector có thể hoạt động mà không sử dụng năng lượng cơ học [44]. Trong hệ thống bơm nhiệt, ejector có thể thay thế máy nén chạy bằng điện, sử dụng nhiệt để tạo ra quá trình nén. Hệ thống này cần nguồn nhiệt có nhiệt độ cao hơn 80°C. So với hệ thống nén hơi, hệ thống ejector có COP thấp hơn [45]. Guo và Shen [46] nghiên cứu hoạt động của một hệ thống lạnh ejector năng lượng mặt trời cho một tòa nhà văn phòng. Kết quả cho thấy, hệ thống này có thể tiết kiệm hơn 75% điện năng so với hệ thống điều hòa dùng máy nén truyền thống. Zhu và Jiang [47] kết hợp chu trình lạnh nén hơi với chu trình lạnh ejector (hình 21). Hệ thống lạnh ejector hoạt động nhờ nhiệt thải từ dàn ngưng của hệ thống nén hơi. Công suất lạnh từ chu trình ejector được đưa trực tiếp vào thiết bị bay hơi của chu trình nén hơi. Họ thấy rằng, COP của hệ thống kết hợp có thể tăng khi nhiệt độ ra khỏi máy nén lớn hơn 100°C. Kết quả cho thấy, với môi chất R152a COP hệ thống kết hợp tăng 5,5%, với môi chất R22 COP hệ thống kết hợp tăng 8,6%, đối với môi chất R134a COP hệ thống kết hợp tăng 0,7% do nhiệt độ ra khỏi máy nén thấp.



Hình 21. Chu trình lạnh nén hơi kết hợp với chu trình lạnh ejector [47]

Fasiuddin và Budaiwi [48] nghiên cứu một số giải pháp khác nhau để tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC trong một tòa nhà thương mại tại Dhahran (Saudi Arabia). Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc sử dụng hệ thống thay đổi lưu lượng không khí cho hệ thống một chế độ thì có thể tiết kiệm năng lượng 22%. Nếu tăng nhiệt độ trong nhà 3°C có thể tiết kiệm năng lượng 17%. Thay đổi chế độ hoạt động của quạt có thể tiết kiệm khoảng 21,4%. Nếu đặt nhiệt độ 28°C trong thời gian không có người có thể tiết kiệm năng lượng khoảng 18%. Tuy nhiên, họ kết luận rằng có thể tiết kiệm năng lượng 25% khi kết hợp các giải pháp khác nhau trong quá trình hoạt động của hệ thống HVAC.

Bảng 1 so sánh ưu điểm, nhược điểm và ứng dụng của các giải pháp trong thực tế. Bên cạnh các giải pháp kỹ thuật trên còn có các giải pháp khác tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC như: giải pháp thiết kế, cấu trúc tòa nhà; giải pháp thiết kế hệ thống HVAC; giải pháp thay thế môi chất lạnh có hiệu quả năng lượng cao hơn; giải pháp sử dụng máy lạnh hấp thụ sử dụng các nguồn nhiệt thải hoặc năng lượng mặt trời thay thế hệ thống lạnh nén hơi thông thường; giải pháp sử dụng năng lượng gió, mặt trời sản xuất điện sử dụng cho hệ thống HVAC thay thế cho điện lưới; giải pháp điều khiển hệ thống HVAC; giải pháp sử dụng hệ thống kiểm soát năng lượng tòa nhà;...

Bảng 1. So sánh ưu điểm, nhược điểm và ứng dụng của các giải pháp

Giải pháp	Chi phí	Ưu điểm	Nhược điểm	Ứng dụng
Bay hơi làm mát trực tiếp (DEC)	Chi phí rẻ	Không ô nhiễm không khí; Giảm nhu cầu năng lượng giờ cao điểm; Hiệu quả chi phí cao.	Không làm việc hiệu quả khi độ ẩm tương đối môi trường xung quanh cao hơn 40%.	Khi điều kiện nghi không phải là mục tiêu.
Bay hơi làm mát gián tiếp (IEC)	Chi phí vốn và vận hành cao hơn giải pháp DEC nhưng thấp hơn hệ thống điều hòa không khí nén hơi.	Chất lượng không khí cao hơn đáng kể so với giải pháp DEC; Hiệu quả năng lượng cao hơn so với chu trình nén hơi.	Lắp đặt và vận hành phức tạp hơn giải pháp DEC.	Tất cả các tòa nhà.
Bay hơi làm mát dàn ngưng hệ thống	Chi phí sử dụng nước tăng, chi phí điện giảm. Tổng cộng chi phí ít hơn các giải pháp khác.	Giảm đáng kể tiêu thụ năng lượng cho hệ thống điều hòa không khí trong giờ cao điểm.	Tiềm năng tiết kiệm năng lượng bị giới hạn trong thời gian nhiệt độ, độ ẩm môi trường xung quanh cao.	Giải nhiệt dàn ngưng hệ thống điều hòa không khí.
Điều hòa không khí địa nhiệt kết hợp	Chi phí vốn và vận hành cao	So với hệ thống nén hơi chuẩn, hệ thống này ít tạo ra tiếng ồn và giảm lượng phát thải khí nhà kính.	Chi phí đầu tư lớn; Yêu cầu khoan sâu dưới bề mặt trái đất.	Khu dân cư, tòa nhà thương mại.

Hệ thống tích trữ nhiệt	Chi phí vốn và vận hành cao	Giảm chi phí năng lượng; Hệ thống ống dẫn nhỏ hơn hệ thống thông thường.	Hiệu suất thấp hơn so với hệ thống nén hơi thông thường.	Tòa nhà có tải lạnh lớn và thời gian yêu cầu ngắn.
Hệ thống thu hồi nhiệt	Chi phí vốn và vận hành cao	Hiệu quả năng lượng cao trong vùng khí hậu ôn đới.	Hệ thống lớn hơn so với các thiết bị xử lý không khí thông thường.	Tòa nhà thương mại.
Sử dụng bộ trao đổi nhiệt ống nhiệt	Chi phí vốn và vận hành cao	Cải thiện chất lượng không khí; Hiệu quả tiết kiệm năng lượng cao không cần nguồn năng lượng để vận hành; Có nhiều cách lắp đặt bố trí vào hệ thống.	Hệ thống lớn và phức tạp hơn so với hệ thống thông thường.	Tòa nhà thương mại.
Công nghệ làm mát Ejector	Thời gian hoàn vốn bổ sung hợp lý.	Lắp đặt, bảo trì và xây dựng đơn giản hơn hệ thống thông thường.	Cần có nguồn nhiệt với nhiệt độ lớn hơn 80°C; Hệ số COP thấp hơn so với hệ thống thông thường.	Khi đã có nguồn nhiệt sẵn.

9. KẾT LUẬN

Hệ thống HVAC đóng vai trò quan trọng trong đời sống sinh hoạt, sản xuất của con người. Hệ thống HVAC là nguồn tiêu thụ phần lớn năng lượng điện của tòa nhà, chi phí vận hành của hệ thống HVAC là rất cao. Do đó, việc tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC là rất cần thiết và được nhiều nhà nghiên cứu, sản xuất quan tâm. Bài báo trình bày các giải pháp kỹ thuật nhằm tiết kiệm năng lượng cho hệ thống HVAC và tạo điều kiện tiên nghi nhiệt thoải mái cho con người. Trong quá trình áp dụng, tùy thuộc vào đặc điểm của công trình, vị trí địa lý, điều kiện khí hậu, đặc điểm hệ thống HVAC để chúng ta lựa chọn giải pháp tiết kiệm năng lượng một cách hợp lý, phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Enteria N, Mizutani K. The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2095-122.
 [2]. Perez-lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy Build* 2008;40:394-8.
 [3]. Australian Greenhouse Office. Australian Commercial Building Sector Green-House Gas Emission. AGO, Canberra, Australia; 1990-2010.
 [4]. Energy Conversation Building Code (ECBC). Bureau of Energy Efficiency, Ministry of Power, Government of India; 2007.

[5]. Fong KF, Chow TT, Lee CK, Lin Z, Chan LS. Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city. *Sol Energy* 2010;84:227-44.
 [6]. El-Dessouky H, Ettouney H, Al-Zeefari A. Performance analysis of two-stage evaporative coolers. *Chem Eng J* 2004;102:255-66.
 [7]. Khalajzadeh V, Farahani MF, Heidarnajad G. A novel integrated system of ground heat exchanger and indirect evaporative cooler. *Energy Build* 2012;49:604-10.
 [8]. Vakiloroya V, Khatibi M, Ha QP, Samali B. New integrated hybrid evaporative cooling system for HVAC energy efficiency improvement. *IEEE/SICE international symposium on system integration, Kyoto, Japan; 2011. p.591-6.*
 [9]. Khandelwal A, Talukdar P, Jain S. Energy savings in a building using regenerative evaporative cooling. *Energy Build* 2011;43:581-91.
 [10]. Lahoti U, Jain S, Kaushik V, Dhar PL. A novel air cooler. *International conference on emerging technologies in air conditioning and refrigeration, New Delhi, India; 2001. p. 250-8.*
 [11]. Delfani S, Esmaeliani J, Pasdarshahri H, Karami M. Energy saving potential of an indirect evaporative cooler as a pre-cooling unit for mechanical cooling system in Iran. *Energy Build* 2010;42:2169-76.
 [12]. Hajidavalloo E, Eghtedari H. Performance improvement of air-cooled refrigeration system by using evaporatively cooled air condenser. *Int J Refrig* 2010;33:982-8.
 [13]. Yu FW, Chan KT. Improved energy performance of air-cooled chiller system with mist pre-cooling mist improvement on air-cooled chiller. *Appl Therm Eng* 2011;31:537-44.
 [14]. Hwang Y, Lee JK, Jeong YM, Koo KM, Lee DH, Kim SW, et al. Cooling performance of a vertical ground-coupled heat pump system installed in a school building. *Renewable Energy* 2009;34:578-82.
 [15]. Yang Y, Zhai XQ. Experience on the application of a ground source heat pump system in an archives building. *Energy Build* 2011;43:3263-70.
 [16]. Hackel S, Pertzborn A. Effective design and operation of hybrid ground-source heat pumps: three case studies. *Energy Build* 2011;43:3497-504.
 [17]. Hepbasli A, Akdemir O, Hancioglu E. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system. *Energy Convers Managen* 2003;44:527-48.
 [18]. Magraner T, Montero A, Quilis S, Urchegui JF. Comparison between design and actual energy performance of a HVAC-ground coupled heat pump system in cooling and heating operation. *Energy Build* 2010;42:1394-401.
 [19]. Gasparella A, Longo GA, Marra R. Combination of ground source heat pumps with chemical dehumidification of air. *Appl Therm Eng* 2005:295-308.
 [20]. Inalli M, Esen H. Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system. *Appl Therm Eng* 2004;24:2219-32.
 [21]. Rahman MM, Rasul MG, Khan MMK. Feasibility of thermal energy storage system in an institutional building in subtropical climates in Australia. *Appl Therm Eng* 2011;31:2943-50.
 [22]. Hasnain SM, Alabbadi NM. Need for thermal-storage air-conditioning in Saudi Arabia. *Appl Energy* 2000;65:153-64.
 [23]. Chaichana C, Charters WWS, Aye L. An ice thermal storage computer model. *Appl Therm Eng* 2001;21:1769-78.
 [24]. ASHRAE Handbook-HVAC systems and equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA; 2008.

- [25]. Stritih U, Butala V. Experimental investigation of energy saving in buildings with PCM cold storage. *Int J Refrig* 2010;33:1676-83.
- [26]. Nagano K, Takeda S, Mochida T, Shimakura K, Nakamura T. Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage-Heat response in small scale experiments. *Energy Build* 2006;38:436-46.
- [27]. Huang MC, Chen BR, Hsiao MJ, Chen SL. Application of thermal battery in the ice storage air-conditioning system as a subcooler. *Int J Refrig* 2007;30:245-53.
- [28]. Stoecker WF, Jones JW. Refrigeration and air conditioning. New York: McGraw-Hill; 1982.
- [29]. Roulet CA, Heidt FD, Foradini F, Pibiri MC. Real heat recovery with air handling units. *Energy Build* 2001;33:495-502.
- [30]. Manz H, Huber H. Experimental and numerical study of a duct/heat exchanger unit for building ventilation. *Energy Build* 2000;32:189-96.
- [31]. Zhang LZ, Niu JL. Energy requirements for conditioning fresh air and the longterm savings with a membrane-based energy recovery ventilator in Hong Kong. *Energy* 2001;26:119-35.
- [32]. Nasif M, Al-Waked R, Morrison G, Behnia M. Membrane heat exchanger in HVAC energy recovery systems, systems energy analysis. *Energy Build* 2010;42:1833-40.
- [33]. Rasouli M, Simonson CJ, Besant RW. Applicability and optimum control strategy of energy recovery ventilators in different climatic conditions. *Energy Build* 2010;42:1376-85.
- [34]. Delfani S, Pasdarshahri H, Karami M. Experimental investigation of heat recovery system for building air conditioning in hot and humid areas. *Energy Build* 2012;49:62-8.
- [35]. Wallin J, Madani H, Claesson J. Run-around coil ventilation heat recovery system: A comparative study between different system configurations. *Appl Energy* 2012;90:258-65.
- [36]. Mahmud K, Mahmood GI, Simonson CJ, Besant RW. Performance testing of a counter-cross-flow run-around membrane energy exchanger (RAMEE) system for HVAC applications. *Energy Build* 2010;42:1139-47.
- [37]. Jadhav T. S., Lele M. M., Theoretical energy saving analysis of air conditioning system using heat pipe heat exchanger for Indian climatic zones, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2015; 18: 669-673.
- [38]. Ahmadzadehtalatapeh M., Measurements and Modeling of the Horizontal Heat Pipe Heat Exchangers for Saving Energy and Improving Thermal Comfort in Air-Conditioning Systems in the Tropics, Ph. D. thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.
- [39]. Yau Y. H. (2007), Application of a heat pipe heat exchanger to dehumidification enhancement in a HVAC system for tropical climates - a baseline performance characteristics study, *Int J Therm Sci* 2007; 46:164-171.
- [40]. Jouhara H. (2009), Economic assessment of the benefits of wraparound heat pipes in ventilation processes for hot and humid climates, *Int J Low Carbon Technol* 2009; 4:52-60.
- [41]. Jouhara H., Meskimmon R. (2010), Experimental investigation of wraparound loop heat pipe heat exchanger used in energy efficient air handling units, *Energy* 2010; 35:4592-4599.
- [42]. Naphon P. On the performance of air conditioner with heat pipe for cooling air in the condenser. *Energy Convers Manage* 2010;51:2362-6.
- [43]. Hao X, Zhang G, Chen Y, Zou S, Moschandreas DJ. A combined system of chilled ceiling, displacement ventilation and desiccant dehumidification. *Build Environ* 2007;42:3298-308.
- [44]. Chen X, Omer S, Worall M, Riffat S. Recent developments in ejector refrigeration technologies. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;19:629-51.
- [45]. Cardemil JM, Colle S. A general model for evaluation of vapor ejectors performance for application in refrigeration. *Energy Convers Manage* 2012;64:79-86.
- [46]. Guo J, Shen HG. Modeling solar-driven ejector refrigeration system offering air conditioning for office buildings. *Energy Build.* 2009;41:175-81.
- [47]. Zhu Y, Jiang P. Hybrid vapor compression refrigeration system with an integrated ejector cooling cycle. *Int J Refrig* 2012;35:68-78.
- [48]. Fasiuddin M, Budaiwi I. HVAC system strategies for energy conversation in commercial buildings in Saudi Arabia. *Energy Build* 2011;43:3457-66.