

# MÁY LẠNH EJECTOR DẪN ĐỘNG BẰNG NGUỒN NHIỆT CÓ NHIỆT THỂ THẤP: TIỀM NĂNG VÀ THÁCH THỨC TRONG KHÍ HẬU NÓNG

Nguyễn Trung Kiên

*Khoa Công nghệ Nhiệt lạnh, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh (IUH)*

## Tóm tắt

Nhu cầu làm lạnh và điều hòa không khí ngày càng tăng, kéo theo nhu cầu sử dụng điện lớn hơn, đặc biệt trong những thời điểm thời tiết nóng. Trong khi đó, tại nhiều quá trình công nghiệp và hệ thống năng lượng vẫn tồn tại các nguồn nhiệt có nhiệt độ không quá cao nhưng chưa được tận dụng hiệu quả. Máy lạnh ejector là một trong những công nghệ có khả năng sử dụng các nguồn nhiệt này để tạo ra hiệu ứng làm lạnh. Trong hệ thống ejector dẫn động bằng nhiệt, hơi môi chất áp suất cao được giãn nở qua vòi phun để tạo dòng tốc độ cao, lôi cuốn hơi môi chất từ dàn bay hơi, hòa trộn hai dòng và nâng áp dòng hỗn hợp tới mức cần thiết cho quá trình ngưng tụ. Bản thân ejector không có chi tiết chuyển động, nhưng đặc tính làm việc phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ nguồn nhiệt, nhiệt độ bay hơi, nhiệt độ ngưng tụ, môi chất lạnh và hình học thiết bị. Đặc biệt, trong điều kiện khí hậu nóng, nhiệt độ và áp suất ngưng tụ thường tăng, làm giảm khoảng dự trữ so với áp suất ngược tới hạn. Khi vượt giới hạn này, ejector chuyển khỏi chế độ làm việc tới hạn, khiến khả năng lôi cuốn và năng suất lạnh suy giảm nhanh. Bài viết trình bày nguyên lý làm việc, các chế độ vận hành và các chỉ tiêu đặc trưng của máy lạnh ejector; phân tích ảnh hưởng của điều kiện vận hành và môi chất lạnh; đồng thời tổng hợp một số kết quả thực nghiệm gần đây với các môi chất GWP thấp R1234ze(E) và R1233zd(E). Trên cơ sở đó, tiềm năng tận dụng nhiệt thải và năng lượng mặt trời cho làm lạnh trong điều kiện Việt Nam, cùng các thách thức về vận hành trong khí hậu nóng và chi phí hệ thống, được thảo luận.

**Từ khóa:** ejector; máy lạnh ejector; nguồn nhiệt thể thấp; nhiệt thải; R1234ze(E); R1233zd(E); điều hòa không khí; khí hậu nóng.

## 1. Đặt vấn đề

Làm lạnh và điều hòa không khí ngày càng đóng vai trò quan trọng trong các tòa nhà, công nghiệp, bảo quản thực phẩm, y tế và nhiều hoạt động kinh tế khác. Theo Global Cooling Watch 2025 của Chương trình Môi trường Liên Hợp Quốc (UNEP), nếu xu hướng hiện nay tiếp tục, nhu cầu làm lạnh trên thế giới có thể tăng hơn ba lần vào năm 2050 [1]. Sự gia tăng này không chỉ làm tăng tổng nhu cầu năng lượng mà còn gây áp lực đáng kể lên hệ thống điện trong những giai đoạn có phụ tải làm lạnh cao.

Phần lớn các hệ thống lạnh và điều hòa không khí hiện nay sử dụng chu trình nén hơi. Trong đó, máy nén sử dụng điện để đưa hơi môi chất lạnh từ áp suất bay hơi lên áp suất ngưng tụ. Đây là công nghệ đã phát triển ở mức độ rất cao, có hiệu quả tốt và khả năng điều chỉnh tải linh hoạt. Tuy nhiên, cùng với sự gia tăng nhu cầu làm lạnh, lượng điện tiêu thụ cho các hệ thống này cũng tiếp tục tăng.

Trong khi nhu cầu điện cho làm lạnh tăng, nhiều quá trình công nghiệp lại thải ra môi trường một lượng nhiệt đáng kể dưới dạng nước nóng, khí nóng hoặc nhiệt từ các thiết bị

và quá trình công nghệ. Một phần năng lượng này có nhiệt độ không đủ cao hoặc không thuận lợi để tiếp tục chuyển thành công cơ học, nhưng vẫn có thể được sử dụng để dẫn động các quá trình cần nhiệt ở mức thấp hơn. Năng lượng mặt trời dưới dạng nhiệt cũng là một nguồn năng lượng có đặc tính tương tự.

Một trong những công nghệ có khả năng khai thác nguồn năng lượng này là hệ thống lạnh ejector dẫn động bằng nhiệt. Hệ thống có cấu hình tương đối đơn giản; bản thân ejector không có bộ phận chuyển động, trong khi chu trình có thể được dẫn động bằng nhiệt thải hoặc năng lượng mặt trời. Hạn chế chính của hệ thống là COP nhiệt thường không cao và đặc tính làm việc của ejector khá nhạy với điều kiện vận hành [2].

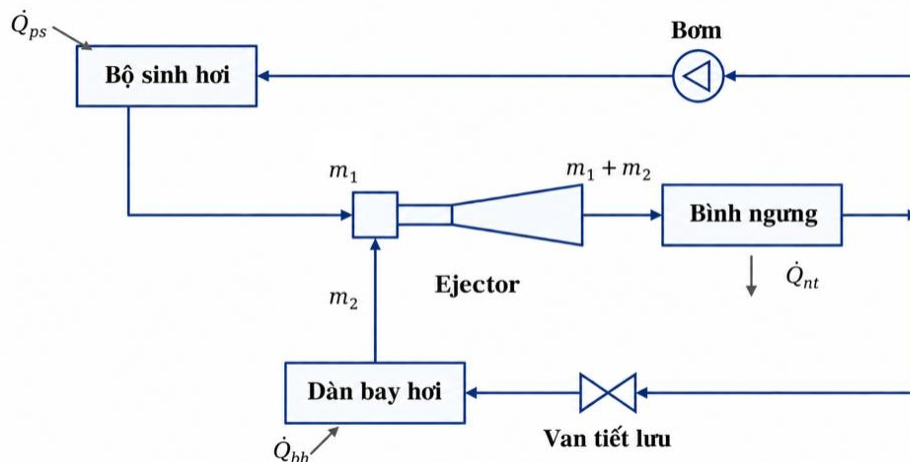
Trong bài viết này, thuật ngữ ejector được dùng để chỉ ejector hơi dẫn động bằng nhiệt, trong đó dòng sơ cấp và dòng thứ cấp chủ yếu ở pha hơi. Các ejector hai pha được sử dụng như thiết bị giãn nở để thu hồi tổn thất tiết lưu trong chu trình nén hơi là một hướng công nghệ khác và không nằm trong phạm vi bài viết.

## 2. Nguyên lý làm việc của hệ thống lạnh ejector

### 2.1. Chu trình lạnh ejector cơ bản

Một hệ thống lạnh ejector cơ bản gồm bộ sinh hơi, ejector, bình ngưng, van tiết lưu, dàn bay hơi và bơm. Nguồn nhiệt được cấp cho bộ sinh hơi để hóa hơi môi chất lạnh ở áp suất cao. Dòng hơi này đi vào ejector và đóng vai trò dòng sơ cấp (primary flow). Trong ejector, dòng sơ cấp lôi cuốn hơi môi chất áp suất thấp từ dàn bay hơi, gọi là dòng thứ cấp (secondary flow).

Hai dòng sau đó hòa trộn và được nâng áp trong ejector đến mức có thể đi vào bình ngưng. Sau quá trình ngưng tụ, môi chất lỏng được chia thành hai nhánh: một nhánh được bơm trở lại bộ sinh hơi, nhánh còn lại được giảm áp qua van tiết lưu rồi đưa vào dàn bay hơi để tạo lạnh [2].



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống lạnh ejector dẫn động bằng nhiệt.

Trong Hình 1,  $\dot{m}_1$  và  $\dot{m}_2$  lần lượt là lưu lượng dòng sơ cấp và dòng thứ cấp;  $Q_{ps}$ ,  $Q_{bh}$  và  $Q_{nt}$  lần lượt là công suất nhiệt cấp cho bộ sinh hơi, năng suất lạnh tại dàn bay hơi và công suất nhiệt thải tại bình ngưng.

Điểm khác biệt căn bản so với máy lạnh nén hơi là năng lượng dẫn động chính của chu trình được cấp dưới dạng nhiệt tại bộ sinh hơi, thay vì công cơ học trực tiếp của máy nén. Hệ thống vẫn cần điện cho bơm, quạt, tháp giải nhiệt, thiết bị điều khiển và các phụ tải phụ trợ; do đó lợi ích thực sự phụ thuộc đáng kể vào giá trị và tính sẵn có của nguồn nhiệt dẫn động.

## 2.2. Từ dòng áp suất cao đến dòng siêu thanh

Ejector lạnh siêu thanh (supersonic) thường sử dụng vòi phun hội tụ - phân kỳ cho dòng sơ cấp. Khi hơi môi chất áp suất cao đi qua phần hội tụ, vận tốc tăng dần. Tại tiết diện nhỏ nhất của vòi phun - cổ vòi phun - dòng có thể đạt trạng thái nghẽn (choked flow), khi số Mach bằng 1. Sau cổ vòi phun, dòng tiếp tục giãn nở trong phần phân kỳ và có thể đạt trạng thái siêu thanh ( $M > 1$ ).

Trong quá trình giãn nở, áp suất tĩnh và entanpi của dòng sơ cấp giảm mạnh, trong khi động năng tăng. Dòng sơ cấp tốc độ cao tạo ra vùng áp suất thấp tại buồng hút và tạo điều kiện để hơi môi chất từ dàn bay hơi đi vào ejector. Quá trình hút trong ejector phức tạp hơn hiệu ứng Venturi của dòng tốc độ thấp, do dòng môi chất có tính nén được và có thể xuất hiện nghẽn, sóng giãn nở, sóng xung kích và các vùng hòa trộn phức tạp.

## 2.3. Lôi cuốn, hòa trộn và phục hồi áp suất

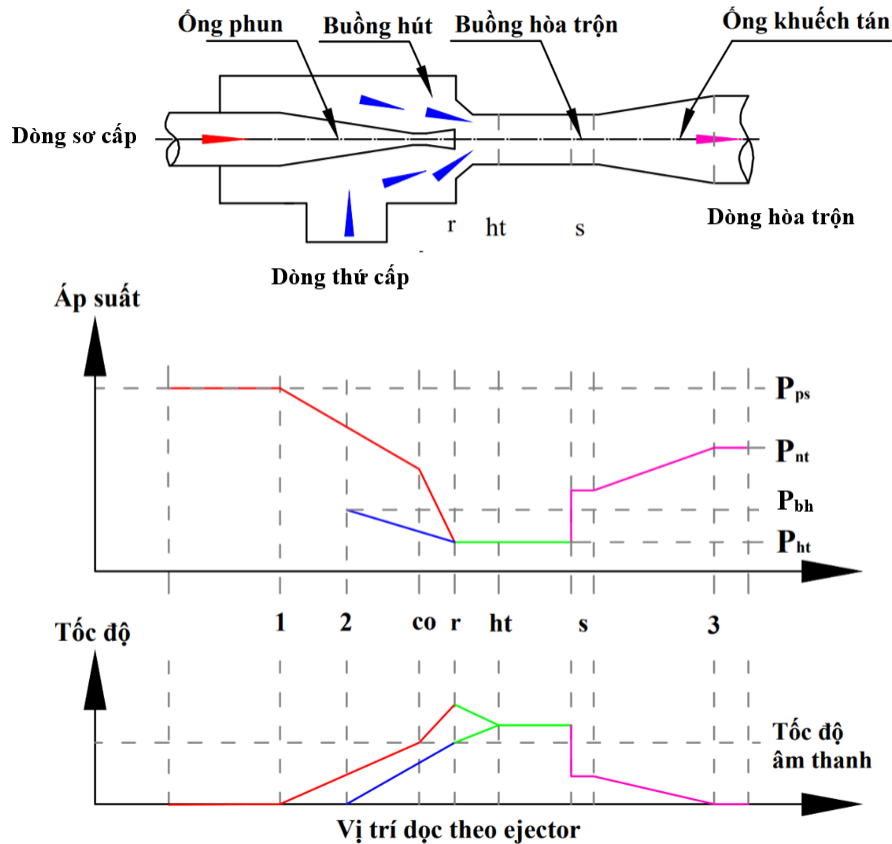
Dòng sơ cấp sau vòi phun tiếp tục giãn nở trong buồng hút. Chênh lệch áp suất cùng với sự truyền động lượng từ tia sơ cấp tốc độ cao làm dòng thứ cấp được lôi cuốn vào vùng hòa trộn. Quá trình lôi cuốn vì vậy không chỉ do áp suất thấp, mà còn liên quan trực tiếp đến trao đổi động lượng giữa hai dòng qua lớp cắt hình thành tại bề mặt tia sơ cấp.

Sau khi được lôi cuốn, hai dòng trao đổi khối lượng và động lượng trong vùng hòa trộn. Trong ejector siêu thanh, quá trình tăng áp thường gắn với hệ sóng xung kích và quá trình giảm tốc của dòng hỗn hợp. Qua các vùng nén này, vận tốc giảm còn áp suất tăng, đồng thời entropy tăng do tổn thất không thuận nghịch. Dòng sau đó chuyển về trạng thái dưới âm (subsonic) và tiếp tục được phục hồi áp suất trong bộ khuếch tán (diffuser).

Như vậy, dòng môi chất trong ejector lần lượt trải qua các quá trình giãn nở, nghẽn, tăng tốc lên siêu thanh, lôi cuốn và hòa trộn, sau đó được nén qua hệ sóng xung kích, chuyển về dưới âm và tiếp tục phục hồi áp suất trong bộ khuếch tán.

Trong Hình 2, các vị trí 1 và 2 lần lượt là cửa vào dòng sơ cấp và cửa vào dòng thứ cấp; co là cổ ống phun; r là cửa ra ống phun; ht là tiết diện đặc trưng trong vùng hòa trộn; s là vị trí vùng nén/sóng xung kích; và 3 là cửa ra ejector. Các ký hiệu  $P_{ps}$ ,  $P_{bh}$ ,  $P_{ht}$  và  $P_{nt}$  lần lượt

chỉ áp suất bộ sinh hơi, áp suất bay hơi, áp suất tại tiết diện hòa trộn và áp suất ngưng tụ. Các đường áp suất và tốc độ trong hình mang tính định tính.



Hình 2. Cấu tạo ejector và sự biến đổi định tính của áp suất, tốc độ dọc theo ejector hơi siêu thanh.

### 3. Chế độ làm việc và các chỉ tiêu đặc trưng

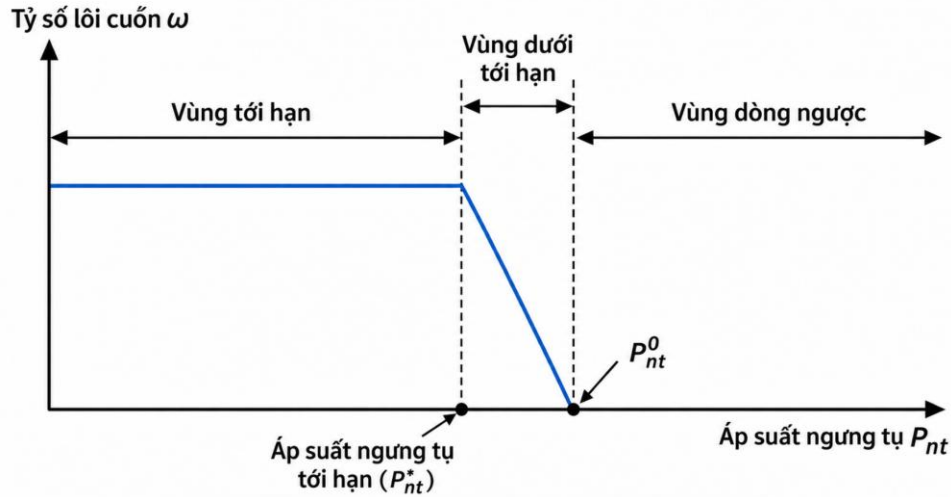
#### 3.1. Chế độ tới hạn, dưới tới hạn và dòng ngược

Ở nhiều ejector lạnh siêu thanh, trong điều kiện thiết kế điển hình, dòng sơ cấp bị nghẽn tại cổ vòi phun và dòng thứ cấp cũng có thể đạt trạng thái nghẽn tại một tiết diện hữu hiệu hình thành trong vùng hút - hòa trộn. Trạng thái này thường được gọi là double choking. Khi đó, lưu lượng dòng thứ cấp gần như không còn phụ thuộc vào áp suất phía sau ejector trong một phạm vi nhất định; đây là chế độ tới hạn (critical mode).

Khi áp suất ngưng tụ tiếp tục tăng và vượt quá một giá trị giới hạn - thường gọi là áp suất ngược tới hạn - cấu trúc dòng bên trong ejector thay đổi, trạng thái nghẽn của dòng thứ cấp không còn được duy trì và lưu lượng hút bắt đầu giảm. Đây là chế độ dưới tới hạn (subcritical mode). Nếu áp suất ngược tiếp tục tăng, khả năng hút có thể mất hoàn toàn và cuối cùng xuất hiện dòng ngược về phía buồng hút [2].

Hình 3 minh họa sự biến đổi của tỷ lệ lôi cuốn khi áp suất ngưng tụ tăng. Trong đó,  $P_{nt}^*$  biểu thị áp suất ngưng tụ tới hạn, tại đó ejector bắt đầu rời khỏi vùng làm việc tới hạn. Khi

áp suất ngưng tụ tiếp tục tăng, tỷ lệ lôi cuốn giảm và tiến về 0 tại  $P_{nt}^0$ ; trên giới hạn này, dòng thứ cấp có thể bị đảo chiều và ejector đi vào vùng dòng ngược.



Hình 3. Quan hệ định tính giữa tỷ lệ lôi cuốn và áp suất ngưng tụ trong các chế độ làm việc của ejector.

### 3.2. Tỷ lệ lôi cuốn, khả năng nâng áp và COP

Khả năng hút của ejector thường được mô tả bằng tỷ lệ lôi cuốn (entrainment ratio), là tỷ số giữa lưu lượng dòng thứ cấp và lưu lượng dòng sơ cấp:

$$\omega = \dot{m}_2 / \dot{m}_1$$

Tỷ lệ lôi cuốn càng cao thì với cùng một lưu lượng dòng sơ cấp, ejector càng hút được nhiều môi chất từ phía dàn bay hơi. Tuy nhiên, khả năng hút lớn chưa phải là điều kiện duy nhất. Ejector còn phải nâng dòng hơi từ áp suất bay hơi lên mức đủ cao để dòng hỗn hợp có thể đi vào bình ngưng.

Khả năng nâng áp (pressure lift) thể hiện khả năng ejector đưa dòng hơi từ áp suất hút lên áp suất phía ra. Trong thực tế, đặc tính này có thể được đánh giá thông qua mức hoặc tỷ số tăng áp giữa cửa hút và cửa ra. Một ejector có tỷ lệ lôi cuốn cao nhưng chỉ làm việc được với áp suất ngưng tụ thấp sẽ gặp khó khăn trong khí hậu nóng. Ngược lại, thiết kế có khả năng nâng áp lớn thường phải đánh đổi một phần khả năng lôi cuốn [7].

Đối với hệ ejector dẫn động bằng nhiệt, COP thường được xác định bằng tỷ số giữa năng suất lạnh tại dàn bay hơi và công suất nhiệt cấp cho bộ sinh hơi:

$$COP = Q_{bh} / Q_{ps}$$

Hệ thống vẫn tiêu thụ điện cho bơm, quạt, tháp giải nhiệt và thiết bị điều khiển; các phụ tải này cần được xét riêng khi đánh giá hiệu quả năng lượng của toàn hệ thống.

Vì đầu vào chính của chu trình là nhiệt, COP nhiệt của hệ ejector không nên được so sánh trực tiếp với COP điện của máy lạnh nén hơi nếu không xét chất lượng và giá trị của nguồn năng lượng đầu vào. Khi nguồn nhiệt là nhiệt thải vốn không có mục đích sử dụng

khác, một giá trị COP nhiệt không cao vẫn có thể đem lại lợi ích về điện năng và sử dụng năng lượng tổng thể.

#### 4. Ảnh hưởng của điều kiện vận hành và môi chất lạnh

##### 4.1. Nhiệt độ bộ sinh hơi, bay hơi và ngưng tụ

Ba mức nhiệt độ quan trọng nhất của hệ thống là nhiệt độ bộ sinh hơi  $T_{ps}$ , nhiệt độ bay hơi  $T_{bh}$  và nhiệt độ ngưng tụ  $T_{nt}$ .  $T_{ps}$  quyết định áp suất, trạng thái và lưu lượng của dòng sơ cấp. Nguồn nhiệt cần đủ cao để tạo dòng sơ cấp có khả năng lôi cuốn và nén dòng thứ cấp. Tuy nhiên, đối với ejector có hình học cố định, tăng  $T_{ps}$  vượt khỏi vùng vận hành phù hợp không nhất thiết làm COP tăng; lưu lượng dòng sơ cấp có thể tăng nhanh hơn dòng thứ cấp và tỷ lệ lôi cuốn giảm.

Khi  $T_{bh}$  giảm, áp suất hút giảm và ejector phải tạo tỷ số nâng áp lớn hơn. Do đó, ejector dẫn động bằng nhiệt thường thuận lợi hơn cho điều hòa không khí hoặc làm lạnh ở mức nhiệt độ vừa phải hơn là cấp đông sâu.

$T_{nt}$  là thông số đặc biệt quan trọng trong khí hậu nóng. Khi điều kiện giải nhiệt trở nên bất lợi, nhiệt độ và áp suất ngưng tụ tăng, đồng nghĩa với áp suất ngược tại cửa ra ejector tăng. Khi áp suất này tiến tới giá trị tới hạn, khoảng vận hành ổn định bị thu hẹp; nếu vượt giới hạn, tỷ lệ lôi cuốn giảm nhanh và ejector chuyển sang chế độ dưới tới hạn.

Một tổng quan gần đây về hệ ejector dẫn động bằng năng lượng mặt trời trong điều kiện khí hậu nóng cho thấy vấn đề quan trọng không còn chỉ là đạt COP cực đại ở một điểm thiết kế, mà còn là khả năng duy trì chế độ vận hành ổn định trong điều kiện nguồn nhiệt và môi trường biến động. Các chỉ tiêu về khoảng dự trữ nhiệt độ và áp suất ngược được đề xuất để đánh giá tính vận hành của hệ thống ngoài điểm thiết kế [8].

##### 4.2. Lựa chọn môi chất lạnh và xu hướng GWP thấp

Máy lạnh ejector đã được nghiên cứu với nhiều môi chất, từ nước, amoniac, hydrocarbon tới các thế hệ CFC, HCFC, HFC và các môi chất không no GWP thấp. Không có một môi chất nào tốt nhất cho mọi điều kiện vận hành. Việc lựa chọn phải đồng thời xét đặc tính nhiệt động, áp suất làm việc, khả năng lôi cuốn, khả năng nâng áp, nhiệt độ tới hạn, tính cháy, độc tính, GWP, giá thành và khả năng cung ứng.

Besagni, Croci và Nesa cho thấy sự thay đổi môi chất làm thay đổi đồng thời đặc tính làm việc của ejector, tỷ lệ lôi cuốn và COP; kết quả cũng phụ thuộc mạnh vào  $T_{ps}$ ,  $T_{bh}$  và  $T_{nt}$  [3]. Vì vậy, ejector được thiết kế cho một môi chất không thể mặc nhiên giữ nguyên hình học rồi thay bằng môi chất khác mà vẫn kỳ vọng đặc tính tương đương.

Trong số các hướng nghiên cứu gần đây, R1234ze(E) và R1233zd(E) được quan tâm do có GWP thấp. Hai môi chất này đã được thử nghiệm trên các hệ ejector dẫn động bằng nhiệt

ở quy mô hàng chục kW, vì vậy có dữ liệu thực nghiệm để đánh giá bên cạnh các kết quả mô hình.

## **5. Một số kết quả thực nghiệm với môi chất GWP thấp**

### **5.1. Hệ R1234ze(E) sử dụng nguồn nhiệt dưới 70°C**

Śmierciew và cộng sự công bố năm 2017 một nguyên mẫu hệ thống lạnh ejector sử dụng R1234ze(E). Hệ thống được dẫn động bằng nguồn nhiệt có nhiệt độ dưới 70°C, với công suất nhiệt cấp khoảng 90 kW và tạo được trên 30 kW năng suất lạnh. Các thí nghiệm trình bày tỷ lệ lõi cuộn, COP, năng suất lạnh và tỷ số nén của hệ thống dưới các điều kiện vận hành khác nhau [4].

Kết quả cho thấy ejector không nhất thiết phải sử dụng nguồn nhiệt xấp xỉ 100°C. Với môi chất và thiết kế phù hợp, nguồn nhiệt dưới 70°C cũng có thể được khai thác để tạo lạnh, qua đó mở rộng phạm vi tận dụng nhiệt thải nhiệt độ thấp.

### **5.2. Nguyên mẫu R1233zd(E) có công suất lạnh danh định 40 kW**

Mahmoudian, Rocchetti, Mazzelli và Milazzo tiếp tục phát triển nguyên mẫu hệ thống lạnh ejector của nhóm Florence bằng cách chuyển sang môi chất R1233zd(E). Nguyên mẫu có công suất lạnh danh định 40 kW, được thử nghiệm ở nhiệt độ bay hơi từ 2,5 đến 10°C và nhiệt độ bão hòa tại bộ sinh hơi từ 95 đến 105°C. Nhiệt độ bay hơi 2,5-10°C phù hợp với các ứng dụng làm lạnh điều hòa, trong khi nhiệt độ bộ sinh hơi 95-105°C đại diện cho nguồn nhiệt thải ở mức nhiệt độ tương đối thấp [5].

Kết quả cho thấy hệ ejector quy mô hàng chục kW có thể vận hành với R1233zd(E) trong vùng nhiệt độ phù hợp với ứng dụng điều hòa không khí.

### **5.3. Thử nghiệm thực địa trong môi trường công nghiệp với R1233zd(E)**

Gagan và cộng sự công bố năm 2023 kết quả thử nghiệm thực địa một hệ ejector sử dụng R1233zd(E) tại một cơ sở công nghiệp nhằm thu hồi nhiệt thải từ các cụm máy nén piston. Nguồn nhiệt cấp cho hệ thống nằm trong khoảng 53-70°C, với công suất nhiệt thải khả dụng khoảng 200 kW. Trong chiến dịch thử nghiệm, hệ thống đạt tỷ lệ lõi cuộn tới khoảng 0,24 và năng suất lạnh tới khoảng 45 kW [6].

Khác với hai trường hợp trên, hệ thống này được thử nghiệm với nguồn nhiệt thải thực tế tại nhà máy thay vì chỉ trong phòng thí nghiệm. Tuy nhiên, đây nên được xem là một minh chứng thực địa công nghiệp hơn là bằng chứng về một sản phẩm thương mại đã vận hành thường xuyên; mục tiêu chính của nghiên cứu là đánh giá khả năng thu hồi nhiệt thải nhiệt độ rất thấp bằng công nghệ ejector.

Các kết quả trên xác nhận khả năng tạo lạnh bằng nguồn nhiệt tương đối thấp ở quy mô hàng chục kW. Tuy nhiên, nhiệt độ nguồn nhiệt thấp chỉ là một mặt của bài toán; trong khi

hậu nóng, khả năng duy trì tỷ lệ lõi cuộn khi  $T_{nt}$  tăng vẫn là điều kiện quan trọng đối với khả năng vận hành thực tế.

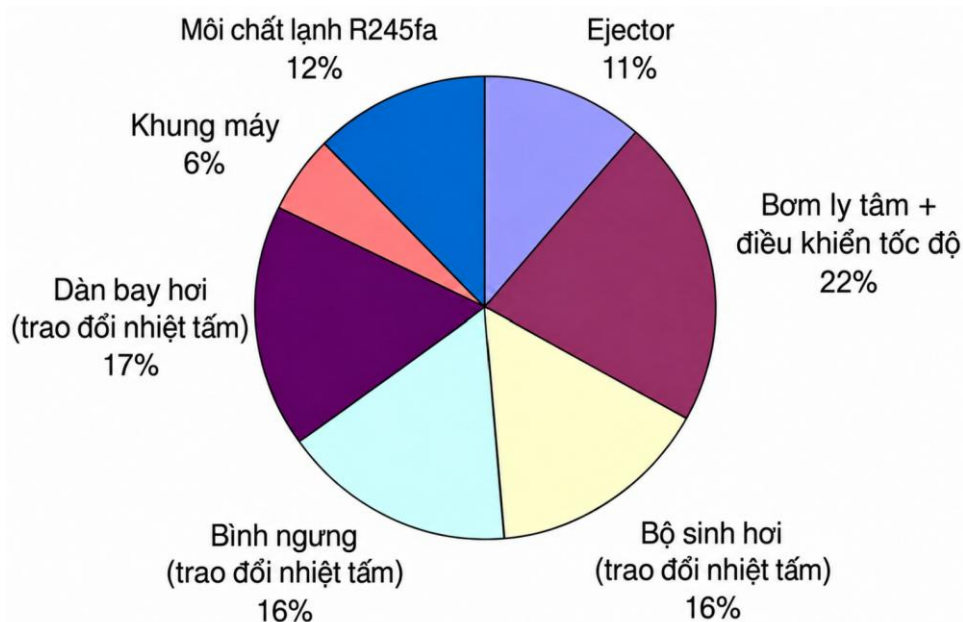
**Bảng 1. Một số hệ ejector dẫn động bằng nhiệt sử dụng môi chất GWP thấp**

| Nghiên cứu               | Môi chất   | Nhiệt độ nguồn nhiệt | Quy mô/Kết quả nổi bật                                     |
|--------------------------|------------|----------------------|------------------------------------------------------------|
| Śmierciew et al. (2017)  | R1234ze(E) | < 70°C               | Công suất nhiệt cấp ~90 kW; năng suất lạnh >30 kW          |
| Mahmoudian et al. (2021) | R1233zd(E) | 95-105°C             | Nguyên mẫu, công suất lạnh danh định 40 kW                 |
| Gagan et al. (2023)      | R1233zd(E) | 53-70°C              | Thử nghiệm thực địa công nghiệp; năng suất lạnh tới ~45 kW |

## 6. Chi phí và khả năng thương mại hóa

Mặc dù ejector không có chi tiết chuyển động, điều đó không đồng nghĩa toàn bộ hệ thống lạnh ejector có chi phí thấp. Bản thân ejector chỉ là một phần của toàn hệ thống. Trong phân tích của Milazzo và Mazzelli đối với một nguyên mẫu hệ thống lạnh ejector (hình 4), ba bộ trao đổi nhiệt - bộ sinh hơi, bình ngưng và dàn bay hơi - chiếm gần một nửa tổng chi phí thiết bị; bơm nhiều cấp và hệ điều khiển cũng là một khoản đáng kể [7].

Các con số chi phí trong nghiên cứu này phản ánh một nguyên mẫu và mặt bằng giá tại thời điểm nghiên cứu, không phải giá thị trường hiện nay. Giá trị của phân tích nằm ở việc chỉ ra rằng chi phí chính của hệ thống không nhất thiết nằm ở bản thân ejector, mà ở các bộ trao đổi nhiệt và thiết bị phụ trợ. Do các bộ trao đổi nhiệt vốn là những thiết bị thương mại tương đối tiêu chuẩn, khả năng giảm giá chỉ bằng sản xuất hàng loạt có giới hạn.



Hình 4. Phân bố chi phí các thành phần chính của nguyên mẫu hệ thống lạnh ejector sử dụng R245fa [7]

Nâng COP có thể góp phần giảm chi phí hệ thống vì COP cao hơn giúp giảm nhiệt lượng phải cấp tại bộ sinh hơi và giảm lượng nhiệt phải thải tại bình ngưng cho cùng một năng suất lạnh, từ đó có thể giảm kích thước các bộ trao đổi nhiệt. Milazzo và Mazzelli ước tính rằng để đưa chi phí hệ thống xuống dưới khoảng 400 euro/kW năng suất lạnh trong bối cảnh phân tích của họ, COP cần đạt khoảng 0,6 và nhiệt độ ngưng tụ tối hạn phải được nâng lên đáng kể so với mức khoảng 30°C [7].

Như vậy, nâng cao hiệu quả ejector không chỉ là bài toán nhiệt động mà còn liên quan trực tiếp đến kích thước thiết bị và khả năng cạnh tranh kinh tế của toàn hệ thống. Khi nguồn năng lượng cấp là nhiệt thải hoặc nhiệt tái tạo có chi phí thấp, chi phí đầu tư ban đầu càng trở thành yếu tố quyết định.

## 7. Tiềm năng ứng dụng tại Việt Nam và những vấn đề cần giải quyết

### 7.1. Thu hồi nhiệt thải

Một nhóm ứng dụng phù hợp là các cơ sở đồng thời có nguồn nhiệt thải tương đối ổn định và nhu cầu lạnh hoặc điều hòa không khí. Nguồn nhiệt có thể là nước nóng hoặc nhiệt được thu hồi thông qua bộ trao đổi nhiệt từ khí thải, động cơ, máy nén khí hay các quá trình sản xuất.

Các kết quả thực nghiệm với R1234ze(E) và R1233zd(E) cho thấy ejector có thể được dẫn động bởi nguồn nhiệt dưới 70°C và tạo năng suất lạnh ở quy mô hàng chục kW [4,6]. Điều này mở rộng đáng kể phạm vi nguồn nhiệt có thể khai thác so với quan niệm rằng ejector luôn cần nguồn nhiệt gần 100°C.

Trong các trường hợp thu hồi nhiệt thải, câu hỏi thực tế không chỉ là COP nhiệt đạt bao nhiêu, mà là từ một nguồn nhiệt vốn phải thải bỏ có thể tạo được bao nhiêu năng suất lạnh hữu ích và giảm được bao nhiêu nhu cầu điện của hệ thống lạnh hiện có.

### 7.2. Làm lạnh bằng năng lượng mặt trời

Sử dụng nhiệt mặt trời để dẫn động ejector cũng là một hướng đáng quan tâm. Nguồn nhiệt mặt trời và tải điều hòa có xu hướng cùng tăng vào các thời điểm bức xạ mặt trời cao. Tuy nhiên, nhiệt độ môi trường cao đồng thời làm điều kiện thải nhiệt của bình ngưng bất lợi hơn.

Tổng quan năm 2026 về hệ ejector mặt trời cho thấy biến động của  $T_{ps}$ ,  $T_{nt}$  và  $T_{bh}$  phải được xét đồng thời. Trong khí hậu nóng, vấn đề lớn không chỉ là đạt nhiệt độ bộ sinh hơi đủ cao mà còn là duy trì ejector trong miền vận hành tối hạn khi nhiệt độ ngưng tụ tăng. Các giải pháp như tích trữ nhiệt, ejector có hình học điều chỉnh được, nhiều ejector làm việc

theo cấp và điều khiển thích ứng được đề xuất chủ yếu nhằm mở rộng miền vận hành thay vì chỉ tối đa hóa COP tại một điểm [8].

### 7.3. Kết hợp với hệ thống lạnh nén hơi

Chu trình ejector dẫn động bằng nhiệt có thể được kết hợp với chu trình lạnh nén hơi để tận dụng ưu điểm của cả hai công nghệ. Một cấu hình được nghiên cứu là hệ thống ghép tầng ejector - máy nén hơi, trong đó một tiểu chu trình sử dụng ejector dẫn động bằng nhiệt và tiểu chu trình còn lại sử dụng máy nén. Hai tiểu chu trình liên kết với nhau qua bộ trao đổi nhiệt trung gian, nhờ đó năng lượng được truyền từ chu trình này sang chu trình kia. Cấu hình kết hợp này có thể mở rộng phạm vi ứng dụng của hệ ejector, đồng thời giúp giảm sự biến động của điều kiện làm việc và duy trì vận hành ổn định hơn [2].

Nguyễn Trung Kiên và Lê Chí Hiệp đã phân tích nhiệt động học một hệ thống lạnh ghép tầng ejector - máy nén hơi, trong đó R134a được sử dụng cho chu trình ejector và R410A cho chu trình nén hơi. Trong điều kiện nghiên cứu, COP của chu trình kết hợp cao hơn khoảng 30,8% so với chu trình nén hơi đơn [9]. Khả năng tích hợp này sau đó được đánh giá bằng thực nghiệm với cùng cặp môi chất R134a/R410A. Kết quả cho thấy COP cơ của chu trình tích hợp tăng khoảng 21,7–30,7% so với chu trình máy nén hơi đơn, tùy theo điều kiện vận hành [10].

### 7.4. Những vấn đề cần tiếp tục giải quyết

Vấn đề đầu tiên là vận hành ngoài điểm thiết kế. Một ejector hình học cố định thường chỉ duy trì đặc tính tốt trong một phạm vi nhất định của  $T_{ps}$ ,  $T_{bh}$  và  $T_{nt}$ , trong khi ba nhiệt độ này liên tục thay đổi trong thực tế. Thiết kế vì vậy cần chuyển từ mục tiêu tối ưu tại một điểm sang duy trì hiệu quả chấp nhận được trong một miền vận hành đủ rộng.

Một thách thức khác trong khí hậu nóng là khả năng nâng áp khi nhiệt độ ngưng tụ cao. Yếu tố này có thể quan trọng hơn việc đạt tỷ lệ lôi cuốn cực đại. Ejector phải được thiết kế sao cho vẫn còn đủ khoảng dự trữ so với áp suất ngược tới hạn khi nhiệt độ ngoài trời tăng. Thiết kế bình ngưng và hệ thống giải nhiệt cũng có vai trò trực tiếp, bởi giảm nhiệt độ và áp suất ngưng tụ giúp mở rộng thời gian ejector hoạt động ở chế độ tới hạn.

Việc lựa chọn môi chất lạnh cũng ảnh hưởng trực tiếp đến đặc tính làm việc của hệ thống. R1234ze(E) và R1233zd(E) cho các đặc tính khác nhau về áp suất, lưu lượng, tỷ lệ lôi cuốn và hình học tối ưu. Chuyển đổi môi chất vì vậy nên được xem như một bài toán thiết kế hệ thống, không đơn thuần là thay chất làm việc.

Khả năng điều khiển và điều chỉnh công suất là một hạn chế khác. Ejector truyền thống là thiết bị thụ động nên khả năng điều chỉnh tải kém linh hoạt hơn máy nén. Ejector thay đổi tiết diện, vòi phun có thể dịch chuyển, nhiều ejector song song hoặc tích trữ nhiệt là

những giải pháp có thể mở rộng vùng hoạt động, nhưng đồng thời làm tăng độ phức tạp và chi phí.

Bên cạnh các vấn đề kỹ thuật, hiệu quả kinh tế cần được đánh giá cho từng nguồn nhiệt cụ thể. Nhiệt thải 60°C vốn không có mục đích sử dụng khác có giá trị kinh tế rất khác so với nhiệt 100°C phải được tạo ra bằng nhiên liệu. Vì vậy, cùng một giá trị COP có thể dẫn tới kết luận kinh tế hoàn toàn khác nhau tùy bối cảnh ứng dụng.

## 8. Kết luận

Máy lạnh ejector dẫn động bằng nguồn nhiệt thể thấp là một công nghệ có khả năng chuyển nhiệt thải hoặc nhiệt tái tạo thành năng suất lạnh. Nguyên lý của ejector dựa trên quá trình giãn nở dòng sơ cấp qua vòi phun tới trạng thái siêu thanh, lôi cuốn dòng hơi áp suất thấp từ dàn bay hơi, hòa trộn hai dòng và phục hồi áp suất thông qua các quá trình nén và khuếch tán.

Mặc dù bản thân ejector không có chi tiết chuyển động, đặc tính làm việc của nó không đơn giản. Tỷ lệ lôi cuốn, khả năng nâng áp và COP phụ thuộc đồng thời vào nhiệt độ nguồn nhiệt, nhiệt độ bay hơi, nhiệt độ ngưng tụ, hình học và môi chất lạnh. Đặc biệt, khi áp suất ngưng tụ vượt quá giá trị tới hạn, ejector chuyển khỏi chế độ làm việc thuận lợi và khả năng hút có thể suy giảm nhanh.

Các kết quả thực nghiệm với R1234ze(E) và R1233zd(E) cho thấy hệ ejector dẫn động bằng nhiệt đã được triển khai ở quy mô hàng chục kW. Các hệ thống đã được thử nghiệm với nguồn nhiệt dưới 70°C hoặc khoảng 95-105°C; một hệ R1233zd(E) cũng đã được thử nghiệm thực địa trong môi trường công nghiệp với nguồn nhiệt thải 53-70°C và đạt năng suất lạnh tới khoảng 45 kW [4-6].

Đối với Việt Nam, các trường hợp có sẵn nguồn nhiệt thải và nhu cầu lạnh đồng thời là nhóm ứng dụng phù hợp để xem xét. Năng lượng mặt trời cũng có tiềm năng, nhưng điều kiện ngưng tụ cao trong khí hậu nóng phải được xem là một ràng buộc thiết kế quan trọng. Các cấu hình kết hợp ejector dẫn động bằng nhiệt với máy lạnh nén hơi có thể là một hướng tiếp cận thực tế khi cần duy trì tải lạnh ổn định trong điều kiện nguồn nhiệt biến động.

Về lâu dài, mục tiêu phát triển không nên chỉ là đạt COP cực đại tại một điểm, mà là xây dựng hệ thống có miền vận hành đủ rộng, khả năng nâng áp phù hợp với khí hậu nóng, sử dụng môi chất GWP thấp và có chi phí đầu tư cạnh tranh. Khả năng ứng dụng thực tế của hệ thống sẽ phụ thuộc đồng thời vào miền vận hành, khả năng nâng áp, môi chất lạnh và chi phí đầu tư.

## Tài liệu tham khảo

- [1] United Nations Environment Programme (UNEP), *Global Cooling Watch 2025: The Free Degrees: How Sustainable, Passive-First Cooling Can Save Lives, Money and Food*. Nairobi: UNEP, 2025. DOI: 10.59117/20.500.11822/48926.
- [2] G. Besagni, R. Mereu, F. Inzoli, “Ejector refrigeration: A comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 373-407, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.08.059.
- [3] G. Besagni, L. Croci, R. Nesa, “A Screening of Low-GWP Refrigerant for Ejector Refrigeration,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 70, pp. 1291-1296, 2018. DOI: 10.3303/CET1870216.
- [4] K. Śmierciew, J. Gagan, D. Butrymowicz, M. Łukaszuk, H. Kubiczek, “Experimental investigation of the first prototype ejector refrigeration system with HFO-1234ze(E),” *Applied Thermal Engineering*, vol. 110, pp. 115-125, 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.140.
- [5] J. Mahmoudian, A. Rocchetti, F. Mazzelli, A. Milazzo, “A heat-powered ejector chiller working with low-GWP fluid R1233zd(E) (Part 1: Experimental results),” *International Journal of Refrigeration*, vol. 121, pp. 1-9, 2021. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2020.10.015.
- [6] J. Gagan, K. Śmierciew, M. Łukaszuk, D. Butrymowicz, A. Pawluczuk, M. Mastrowski, M. Bergander, A. Cebula, “Experimental assessment of the first industrial implementation of ejector refrigeration system operating with R1233zd(E) driven by ultra-low temperature heat source,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 154, pp. 138-150, 2023. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.07.003.
- [7] A. Milazzo, F. Mazzelli, “Future perspectives in ejector refrigeration,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 121, pp. 344-350, 2017. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.088.
- [8] M. El Hassan, N. Bukharin, G. Martins, E. P. Bandarra Filho, J. R. Andrade, “Solar-driven ejector cooling under transient operation and hot-climate constraints: A critical review and operability-based framework,” *Energy Conversion and Management*, vol. 366, 121876, 2026. DOI: 10.1016/j.enconman.2026.121876.
- [9] N. T. Kien, L. C. Hiep, “Thermodynamic analysis of an ejector–vapour compressor cascade refrigeration system,” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, no. 6, pp. 2189–2200, 2020. DOI: 10.1007/s10973-020-09635-6.
- [10] N. T. Kien, “Experimental study of ejector integrated in vapor compression refrigeration systems utilizing low-grade heat sources,” in *Proceedings of the International Conference on Sustainable Energy Technologies: ICSET2023, 10–11 Nov., Ho Chi Minh City, Vietnam*, Green Energy and Technology. Singapore: Springer, 2024, pp. 111–119. DOI: 10.1007/978-981-97-1868-9\_12.