

# ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP EXERGY TRONG ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG MÔI TRƯỜNG CỦA HỆ THỐNG LÀM LẠNH NÉN HƠI MỘT CẤP

## THE APPLICATION OF EXERGY METHOD TO EVALUATE THE ENVIRONMENTAL EFFECTS OF SINGLE VAPOR-COMPRESSION SYSTEMS

CAO NGỌC VI\*, THẨM BỘI CHÂU

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: vicn.vck@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.851>

### Tóm tắt

Trong bài báo này, phương pháp exergy được sử dụng để phân tích đặc tính nhiệt động lực học của hệ thống máy lạnh nén hơi một cấp. Một bộ thông số đánh giá tác động môi trường, bao gồm hệ số tác động môi trường và chỉ số phá hủy môi trường, được xác định trực tiếp từ lượng tiêu thụ exergy và hiệu suất exergy. Bên cạnh đó, phương pháp phân tích tham số được thực hiện để khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ ngưng tụ, nhiệt độ hóa hơi cũng như mức độ quá nhiệt trước máy nén của hơi công chất lạnh đến chỉ tiêu làm việc-môi trường của hệ thống.

**Từ khóa:** Exergy, tác động môi trường, máy lạnh nén hơi, tiêu thụ, hiệu suất exergy.

### Abstract

In this article, exergy method has been utilized to determine thermodynamical characteristics of simple vapor-compression refrigerators. A set of parameters, including environmental impact factor and environmental impact index were introduced directly from the amount of destroyed exergy and exergy efficiency. Additionally, parameter analysis has also been applied to examine the effect of evaporation, condensation, and superheated temperature of refrigerant on the exergoenvironmental indices.

**Keywords:** Exergy, environmental effect, vapor-compression refrigerators, consumption, exergy efficiency.

## 1. Tổng quan

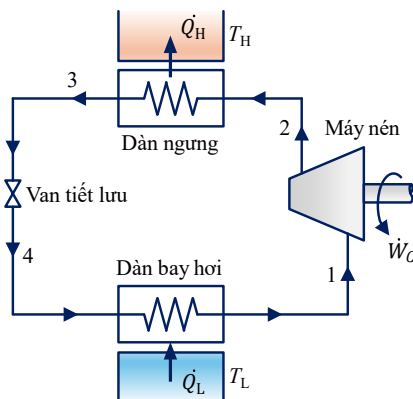
Hệ thống làm lạnh và điều hòa không khí đóng vai trò quan trọng trong đời sống và trong sản xuất, như bảo quản thực phẩm, chăm sóc sức khỏe, điều hòa không khí và nhiều hoạt động công nghiệp khác. Các hệ thống này sử dụng CFC và HCFC làm công chất lạnh do các đặc tính vượt trội của chúng về độ ổn định và hiệu quả năng lượng cao. Tuy nhiên, các chất này có

tính độc hại cao, dễ cháy nổ, khi giải phóng ra khí quyển sẽ góp phần làm suy giảm tầng ô-zôn và gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu [1]. Do đó, vấn đề khai thác hiệu quả, giảm thiểu tác động tiêu cực của các hệ thống làm lạnh hiện có, tìm kiếm các chất làm lạnh thân thiện với môi trường và phát triển các công nghệ làm lạnh mới là những thách thức đối với xã hội loại người ở thế kỷ 21.

Bhatti và cộng sự [1] trình bày phương pháp lựa chọn công chất lạnh theo chỉ tiêu phát triển bền vững. Theo đó, sử dụng các chất làm lạnh có nguồn gốc tự nhiên thân thiện với môi trường như A-mô-ni-ắc, các-bon đi-ô-xít, hy-đrô-các-bon, có thể giảm đáng kể khí nhà kính. Kulkarni và cộng sự [2] kết luận rằng sử dụng hỗn hợp hy-đrô-các-bon tự nhiên, hỗn hợp các chất làm lạnh khác nhau, hỗn hợp hạt na-nô với chất làm lạnh cơ bản có thể tăng cường hiệu quả truyền nhiệt, cải thiện hiệu suất của hệ thống cũng như giảm thiểu tác động góp phần gây ra hiện tượng nóng lên toàn cầu.

Exergy là một thông số nhiệt động, phản ánh “chất lượng” của dòng năng lượng. Phân tích exergy cho phép xác định nguyên nhân, vị trí và mức độ kém hiệu quả của chu trình, thiết bị. Cho đến nay, ngày càng có nhiều công trình nghiên cứu được công bố về ứng dụng phương pháp exergy nhằm tối ưu hóa, đánh giá hiệu quả hoạt động, tính kinh tế, tác động môi trường và tính bền vững của hệ thống năng lượng [3]. Trong [4], Paula cùng đồng nghiệp vận dụng phương pháp exergy vào phân tích tác động môi trường và thiết kế tối ưu hệ thống máy lạnh nén hơi một cấp (SVCR) sử dụng R290, R1234yf và R744 làm công chất lạnh thay thế cho R134a. Dincer và cộng sự [5], đề xuất tổ hợp gồm 6 thông số, bao gồm hệ số tác động, hệ số hiệu quả tác động, chỉ số phá hủy, hệ số cải tiến, hệ số và chỉ số bền vững dùng để đánh giá tác động môi trường của hệ thống máy lạnh hấp thụ. Tất cả các thông số tác động môi trường đều được xác định trực tiếp từ kết quả phân tích exergy của hệ thống. Alihosseini và cộng sự [6] phân tích tính kinh tế, môi trường và tối ưu hệ thống làm lạnh gia dụng 2 cấp song song bằng phương pháp exergy.

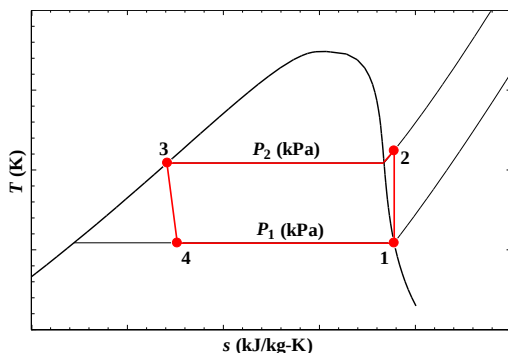
Hệ thống làm lạnh SVCR được sử dụng rộng rãi nhất, đáp ứng được nhu cầu làm lạnh cơ bản như điều hòa nhiệt độ, bảo quản thực phẩm,... [7]. Sơ đồ cấu tạo của một hệ thống SVCR được trình bày như trên Hình 1. Hệ thống gồm 4 thành phần cấu tạo cơ bản, lần lượt là máy nén, dàn ngưng, van tiết lưu và dàn bay hơi.



**Hình 1. Sơ đồ hệ thống SVCR**

Chu trình nhiệt động lý tưởng của hệ thống SVCR trên đồ thị  $T-s$  được biểu diễn như trên Hình 2, gồm 4 quá trình cơ bản sau [7]:

- 1-2: Nén đoạn nhiệt trong máy nén;
- 2-3: Nhả nhiệt đẳng áp trong dàn ngưng;
- 3-4: Tiết lưu đoạn nhiệt qua van tiết lưu;
- 4-1: Hấp thụ nhiệt đẳng áp trong dàn bay hơi.



**Hình 2. Chu trình nhiệt động của hệ thống SVCR trên đồ thị  $T-s$**

Các thông số công tác cơ bản của chu trình máy lạnh SVCR, được trình bày như trên Hình 2, bao gồm [7]: Nhiệt độ nguồn lạnh,  $T_L$  (K); Nhiệt độ nguồn nóng,  $T_H$  (K); Công suất làm lạnh,  $Q_L$  (kW); Tốc độ nhả nhiệt ra môi trường,  $Q_H$  (kW) và Công suất dẫn động máy nén,  $W_C$  (kW).

Nguyên lý làm việc của hệ thống được trình bày trong các giáo trình Nhiệt động kỹ thuật nên sẽ không được trình bày chi tiết. Bài báo tập trung vào ứng dụng

phương pháp exergy vào phân tích đặc tính nhiệt động lực học, làm cơ sở đánh giá hiệu quả hoạt động và tác động môi trường của hệ thống SVCR.

## 2. Xây dựng mô hình toán học

### 2.1. Giả thiết

Mô hình tính được thiết lập dựa trên những giả thiết sau [6]:

- Hệ làm việc bình ổn;
- Nhiệt độ và áp suất môi trường lần lượt là  $T_0=300K$  và  $P_0=101.325kPa$ ;
- Bỏ qua tổn thất ma sát trong hệ thống;
- Bỏ qua trao đổi nhiệt trên đường ống dẫn và van tiết lưu;
- Không có sự dò rỉ công chất lạnh từ hệ thống ra môi trường;
- Bỏ qua exergy động năng và thế năng của dòng công chất lạnh;
- Không có tương tác hóa học trong hệ thống.

### 2.2. Phân tích exergy

Phân tích exergy được thực hiện cho từng phần tử cấu thành và cho toàn bộ hệ thống. Kết quả phân tích exergy được sử dụng để đánh giá tác động môi trường của hệ thống máy lạnh.

Phương trình cân bằng exergy tổng quát áp dụng cho hệ thống máy lạnh, làm việc ở chế độ bình ổn có thể viết như sau [4-7]:

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x^Q - \dot{E}x^W + \dot{E}x_{in}^{fl} - \dot{E}x_{out}^{fl} \quad (1)$$

Trong đó:  $\dot{E}x_D$  là tốc độ tiêu thụ exergy của hệ thống;  $\dot{E}x^Q$ ,  $\dot{E}x^W$ ,  $\dot{E}x_{in}^{fl}$  và  $\dot{E}x_{out}^{fl}$  lần lượt là tốc độ truyền exergy của các dòng nhiệt, dòng công và dòng công chất lạnh.

Tốc độ truyền exergy của dòng công chất lạnh, xác định theo công thức (2) [4-7]:

$$\dot{E}x^{fl} = \dot{m} [h - h_0 - T_0 (s - s_0)] \quad (2)$$

Trong đó:  $\dot{m}$  (kg/s) là lưu lượng khối lượng của dòng chảy;  $h$  (kJ/kg) và  $s$  (kJ/kg.K) là en-tan-pi riêng và en-trô-pi riêng của công chất lạnh;  $h_0$  (kJ/kg) và  $s_0$  (kJ/kg.K) là en-tan-pi riêng và en-trô-pi riêng của công chất lạnh ở điều kiện nhiệt độ và áp suất môi trường;

Tốc độ truyền exergy của dòng nhiệt được tính theo công thức (3) [4-7]:

$$\dot{E}x^Q = \dot{Q} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (3)$$

Trong đó:  $\dot{Q}$  (kW) là tốc độ truyền nhiệt ở nhiệt độ  $T$  (K).

Tốc độ truyền exergy của dòng công tính theo công thức (4) [4-7]:

$$\dot{E}x^W = \dot{W} \quad (4)$$

Phương trình cân bằng exergy của máy nén:

$$\dot{E}x_{D,comp} = \dot{W}_{comp} + \dot{E}x_1^fl - \dot{E}x_2^fl \quad (5)$$

Trong đó:  $\dot{W}_{comp}$  (kW) là công suất cung cấp cho máy nén, xác định theo công thức (6) [4-7]:

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (6)$$

Phương trình cân bằng exergy của dàn ngưng [4-7]:

$$\dot{E}x_{D,cond} = \dot{E}x_2^fl - \dot{E}x_3^fl - \dot{E}x_{cond}^Q \quad (7)$$

Trong đó:  $\dot{E}x_{cond}^Q$  (kW) là tốc độ thải exergy ra môi trường, xác định theo công thức (8) [4-7]:

$$\dot{E}x_{cond}^Q = \dot{m}(h_2 - h_3) \left( 1 - \frac{T_0}{T_{cond}} \right) \quad (8)$$

Phương trình cân bằng exergy của van tiết lưu [4-7]:

$$\dot{E}x_{D,val} = \dot{E}x_3^fl - \dot{E}x_4^fl \quad (9)$$

Phương trình cân bằng exergy của máy dàn bay hơi [4-7]:

$$\dot{E}x_{D,eva} = \dot{E}x_{eva}^Q + \dot{E}x_4^fl - \dot{E}x_1^fl \quad (10)$$

Trong đó:  $\dot{E}x_{eva}^Q$  (kW) là tốc độ hấp thụ exergy từ không gian cần làm lạnh, xác định theo công thức (11) [4-7]:

$$\dot{E}x_{eva}^Q = \dot{m}(h_1 - h_4) \left( 1 - \frac{T_0}{T_{eva}} \right) \quad (11)$$

Tốc độ tiêu thụ exergy của hệ thống [4-7]:

$$\dot{E}x_D = \dot{E}x_{D,comp} + \dot{E}x_{D,cond} + \dot{E}x_{D,val} + \dot{E}x_{D,eva} \quad (12)$$

Hiệu suất exergy của hệ thống [4-7]:

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\dot{E}x_D}{\dot{W}_{comp}} \quad (13)$$

## 2.3. Phân tích tác động môi trường

Mức độ tác động môi trường phản ánh tính hoàn

thiện của chu trình, thiết bị có mặt trong hệ thống. Các thông số đánh giá bao gồm:

Hệ số tác động môi trường, được định nghĩa là tỷ số giữa tổng lượng tổn thất exergy và tổng lượng exergy cung cấp cho hệ thống, xác định theo công thức (14) [3, 5]:

$$f_{ei} = \frac{\dot{E}x_D}{\sum \dot{E}x_{in}} \quad (14)$$

Chỉ số phá hủy môi trường, được xác định bởi tỷ số giữa hệ số tác động môi trường và hiệu suất exergy của hệ thống, tính theo công thức (15) [5]:

$$\theta_{ei} = \frac{f_{ei}}{\eta_{ex}} \quad (15)$$

## 3. Kết quả và thảo luận

Một chương trình máy tính được nhóm tác giả phát triển, trên nền tảng phần mềm EES, để tự động tra các thông số nhiệt động của công chất lạnh và giải mô hình toán với các phương trình từ (1) đến (15). Nghiên cứu được thực hiện trên hệ thống máy lạnh với các thông số cơ bản được trình bày trong Bảng 1 [7].

**Bảng 1. Tham số công tác của hệ thống khảo sát**

| Tham số                                    | Giá trị | Đơn vị |
|--------------------------------------------|---------|--------|
| Công chất lạnh, R134a                      | -       | -      |
| Nhiệt độ hóa hơi, $T_L$                    | -13     | °C     |
| Nhiệt độ môi trường, $T_0$                 | 27      | °C     |
| Độ quá nhiệt trước máy nén, $\Delta T$     | 6.4     | °C     |
| Nhiệt độ ngưng tụ tại dàn ngưng, $T_H$     | 39.4    | °C     |
| Áp suất hơi trước máy nén, $P_1$           | 100     | kPa    |
| Hiệu suất đoạn nhiệt của máy nén, $\eta_c$ | 0.85    | -      |
| Lưu lượng khối lượng công chất, $\dot{m}$  | 0.05    | kg/s   |

### 3.1. Độ tin cậy của chương trình tính

**Bảng 2. Kết quả phân tích exergy của hệ thống**

| Tham số             | Đơn vị | Giá trị           |               | Sai số (%) |
|---------------------|--------|-------------------|---------------|------------|
|                     |        | Tính thủ công [7] | Tính bằng EES |            |
| $\dot{E}x_{D,comp}$ | kW     | 0.3945            | 0.3936        | 0.23       |
| $\dot{E}x_{D,cond}$ | kW     | 0.4314            | 0.4271        | 1.00       |
| $\dot{E}x_{D,val}$  | kW     | 0.6726            | 0.6702        | 0.36       |
| $\dot{E}x_{D,eva}$  | kW     | 0.4037            | 0.4049        | 0.30       |
| $\dot{E}x_D$        | kW     | 1.902             | 1.896         | 0.32       |
| $\dot{W}_{comp}$    | kW     | 2.919             | 2.914         | 0.17       |
| $\dot{E}x_{eva}^Q$  | kW     | 1.017             | 1.018         | 0.10       |
| $\eta_{ex}$         | -      | 0.348             | 0.3494        | 0.40       |

Bảng 2 so sánh kết quả phân tích exergy, bằng chương trình EES và tính toán thủ công, đối với hệ thống SVCR, hoạt động với các thông số cho trong Bảng 1. Sai số tính toán giữa hai phương pháp không vượt quá 1%. Như vậy, chương trình tính bằng EES đảm bảo độ tin cậy cần thiết. Do đó, có thể dùng để khảo sát tác động môi trường của hệ thống máy lạnh nén hơi 1 cấp với các tham số hoạt động khác nhau.

### 3.2. Đánh giá tác động môi trường của chu trình máy lạnh nén hơi một cấp

Hệ số tác động môi trường, tính theo công thức (14):

$$f_{ei} = \frac{\dot{E}x_D}{\sum \dot{E}x_{in}} = \frac{\dot{E}x_D}{\dot{W}_{comp}} = \frac{1.896}{2.914} = 0.6506, \quad (14)$$

Chỉ số phá hủy môi trường, tính theo công thức (15):

$$\theta_{ei} = \frac{f_{ei}}{\eta_{ex}} = \frac{0.6506}{0.3494} = 1.862. \quad (15)$$

Với  $f_{ei}=0,6506$ , nghĩa là đến 65% tổng lượng exergy cung cấp bị tiêu hủy nhằm thay đổi trạng thái của công chất khi lưu động qua các thành phần thiết bị. Chỉ số phá hủy môi trường  $\theta_{ei}$  phản ánh độ lớn tương đối của phần năng lượng tổn thất so với phần năng lượng hữu ích. Chỉ số  $\theta_{ei}$  càng lớn, mức độ phá hủy môi trường càng mạnh. Đối với hệ thống máy lạnh khảo sát,  $\theta_{ei}=1,862$ , chi phí năng lượng để vận hành gấp gần hai lần hiệu quả làm lạnh có thể đạt được. Hệ thống không những làm việc kém hiệu quả mà còn có tác động tiêu cực đến môi trường.

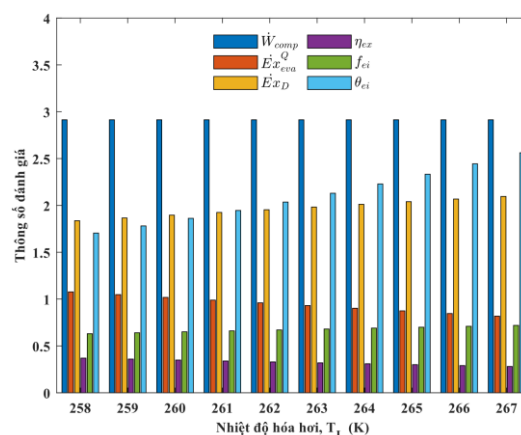
### 3.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ hóa hơi TL

Hình 3 trình bày kết quả khảo sát exergy-môi trường, của hệ thống SVCR, đối với sự thay đổi nhiệt độ hóa hơi của công chất lạnh. Khi tăng nhiệt độ hóa hơi từ 258K (-15°C) lên 267K (-6°C), mức tiêu thụ exergy tăng 14,1%, từ 1,84kW lên 2,1kW; công suất làm lạnh có ích giảm 24%, từ 1,08kW xuống 0,82kW. Kết quả là, hiệu suất exergy giảm 24,1%, từ 0,37 xuống 0,28; hệ số tác động và phá hủy môi trường tăng tương ứng là 14,1% (từ 0,63 lên 0,72) và 50,3% (từ 1,71 lên 2,56). Tăng nhiệt độ hóa hơi của công chất lạnh dẫn đến giảm hiệu quả làm lạnh của hệ thống, làm tăng lượng exergy tiêu thụ ở dàn bay hơi. Kết quả là tổng mức tiêu thụ exergy tăng lên, hiệu suất exergy giảm, hệ số tác động và chỉ số phá hủy môi trường tăng.

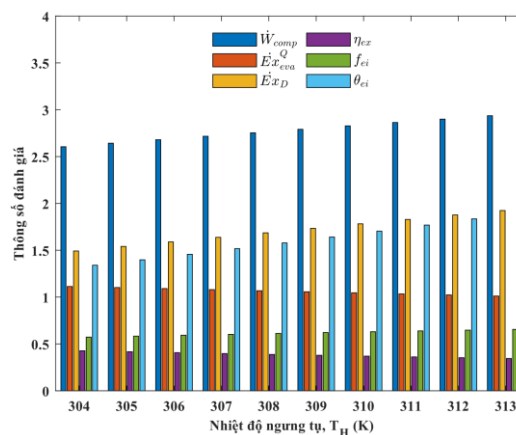
### 3.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ ngưng tụ TH

Ảnh hưởng của nhiệt độ ngưng tụ TH, của công

chất lạnh đến các thông số exergy-môi trường của hệ thống SVCR, được trình bày như trên Hình 4. Tăng nhiệt độ ngưng tụ của công chất lạnh từ 304K (31°C) lên 313K (40°C), công dẫn động cần cung cấp cho hệ thống tăng 12,7%, từ 2,61kW lên 2,94kW; mức tiêu thụ exergy tăng 28,95%, từ 1,49kW lên 1,92kW; công suất làm lạnh có ích giảm 9,16%, từ 1,1kW xuống 1,0kW. Do đó, hiệu suất exergy giảm 19,4%, từ 0,43 xuống 0,34; hệ số tác động và phá hủy môi trường tăng tương ứng là 14,5% (từ 0,57 lên 0,66) và 41,9% (từ 1,34 lên 1,90). Nhiệt độ ngưng tụ của công chất lạnh càng cao, yêu cầu về công dẫn động cung cấp cho hệ thống càng lớn, tổng mức tiêu thụ exergy tăng lên làm giảm hiệu suất, gia tăng mức độ phá hủy môi trường của hệ thống.



Hình 3. Sự thay đổi của các thông số exergy-môi trường theo nhiệt độ hóa hơi của công chất lạnh

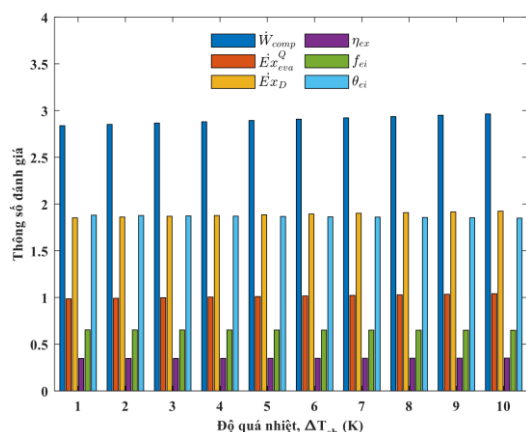


Hình 4. Sự thay đổi của các thông số exergy-môi trường theo nhiệt độ ngưng tụ của công chất lạnh

### 3.5. Ảnh hưởng độ quá nhiệt của hơi công chất lạnh trước máy nén $\Delta T_{sh}$

Ảnh hưởng của độ quá nhiệt hơi công chất lạnh trước máy nén  $\Delta T_{sh}$  đến các thông số exergy-môi trường được thể hiện trên Hình 5. Khi tăng độ quá

hiệt của hơi công chất lạnh trước máy nén từ 1K lên 10K, công dẫn động cần cung cấp cho hệ thống tăng 4,4%, từ 2,84kW lên 2,96kW; mức tiêu thụ exergy tăng 3,89%, từ 1,85kW lên 1,92kW; exergy có ích tăng 5,55%, từ 0,98kW lên 1,04kW; hiệu suất exergy tăng nhẹ 1,1%, từ 0,34 lên 0,35; hệ số tác động và phá hủy môi trường giảm nhẹ, lần lượt là 0,58% (từ 0,65 xuống 0,64) và 1,65% (từ 1,88 xuống 1,85). Khi tăng độ quá nhiệt của hơi công chất trước máy nén, hiệu quả làm lạnh tăng nhanh hơn chi phí exergy cần thiết để vận hành hệ thống. Do đó, hiệu suất hệ thống tăng, mức độ phá hủy môi trường giảm.



Hình 5. Sự thay đổi của các thông số exergy-môi trường theo độ quá nhiệt của công chất lạnh trước

## 5. Kết luận

Bài báo trình bày một phương pháp đánh giá tác động môi trường, dựa trên kết quả phân tích exergy của hệ thống SVCR. Ảnh hưởng của các thông số công tác, nhiệt độ hóa hơi, nhiệt độ ngưng tụ và độ quá nhiệt trước máy nén của công chất lạnh, đến các thông số công tác-môi trường của hệ thống được thực hiện bằng phân tích tham số. Tăng nhiệt độ hóa hơi hoặc tăng nhiệt độ ngưng tụ của công chất lạnh sẽ làm mức độ phá hủy môi trường của hệ thống trở nên nghiêm trọng hơn. Ngược lại, có thể hạn chế tác động tiêu cực đến môi trường bằng việc gia tăng mức độ quá nhiệt của hơi công chất lạnh trước máy nén. Có thể sử dụng phương pháp trong bài báo để đánh giá tác động môi trường của các hệ thống năng lượng khác.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT24-25.50.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bhatti, S.S., et al. (2024). *Environment-Friendly Refrigerants for Sustainable Refrigeration and Air Conditioning: A Review*. Current World Environment, Vol.18(3), pp.933-947.
- [2] Kulkarni, S., S. Chavali, and S. Dikshit (2023), *A review on analysis of Vapour Compression Refrigeration System (VCRS) for its performance using different ecofriendly refrigerants and nanofluids*. Materials Today: Proceedings, Vol.72, pp.878-883.
- [3] Sinha, A.A., et al. (2023), *Estimation of exergy-based sustainability index and performance evaluation of a novel intercooled hybrid gas turbine system*. International Journal of Hydrogen Energy, Vol.48(23), pp.8629-8644.
- [4] de Paula, C.H., et al. (2020), *Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a*. International Journal of Refrigeration, Vol.113, pp.10-20.
- [5] Dincer, I. and T.A.H. Ratlamwala (2016), *Integrated Absorption Refrigeration Systems: Comparative Energy and Exergy Analyses*. Springer International Publishing.
- [6] Alihosseini, N., A. Jahangiri, and M. Ameri (2024), *Energy, exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses and multi-objective optimization of parallel two-stage compression on the domestic refrigerator-freezer*. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, Vol.32(1).
- [7] Çengel, Y.A (2014), *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Ngày nhận bài:     | 11/04/2025 |
| Ngày nhận bản sửa: | 16/04/2025 |
| Ngày duyệt đăng:   | 17/04/2025 |