

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ QUÁ NHIỆT ĐẾN HIỆU SUẤT VẬN HÀNH CỦA HỆ THỐNG LÀM LẠNH NÉN HƠI

INVESTIGATING THE INFLUENCE OF SUPERHEATING DEGREE ON THE PERFORMANCE OF VAPOR-COMPRESSOR REFRIGERATION SYSTEMS

TS. Cao Ngọc Vi*, TS. Thẩm Bội Châu

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

TÓM TẮT

Bài báo tập trung phân tích nhiệt động lực học nhằm đánh giá tác động của độ quá nhiệt trước cửa nạp (ΔT_{sh}) của hơi môi chất đến các thông số nhiệt động của môi chất, công nén riêng và hệ số làm lạnh (COP) của hệ thống làm lạnh nén hơi. Mô phỏng được thực hiện cho môi chất R134a và mở rộng so sánh với các môi chất thay thế tiềm năng gồm R1234yf, R290 (Propan) và R717 (Amoniac). Kết quả cho thấy, đối với chu trình cơ bản có xét đến hiệu ứng làm lạnh từ quá trình quá nhiệt trong dàn bay hơi, COP của R134a có xu hướng tăng nhẹ từ 1.732 lên 1.788. Nghiên cứu cung cấp cái nhìn định lượng về sự đánh đổi giữa hiệu quả năng lượng và giới hạn vận hành an toàn của máy nén.

Từ khóa: Độ quá nhiệt; Làm lạnh nén hơi; Phân tích nhiệt động; Mô phỏng; Hệ số làm lạnh.

ABSTRACT

This article presents a thermodynamic analysis to evaluate the impact of intake vapor's superheating degree (ΔT_{sh}) on the refrigerant's properties, specific compression work, and the coefficient of performance (COP) of the vapor compression refrigeration system. Simulations were performed for R134a refrigerant and extended with comparisons to potential alternative refrigerants including R1234yf, R290 (propane), and R717 (ammonia). The results show that, for the standard cycle considering the cooling effect from superheating in the evaporator, the COP of R134a tends to increase slightly, from 1.732 to 1.788. The study provides a quantitative view of the trade-off between energy efficiency and safe operating limits of compressors.

Keywords: Superheating degree; Vapor compression refrigeration; Thermodynamic analysis; Simulation; COP.

1. TỔNG QUAN

Trong các hệ thống làm lạnh và điều hòa không khí, việc kiểm soát độ quá nhiệt hơi môi chất về máy nén đóng vai trò then chốt trong việc bảo vệ máy nén khỏi hiện tượng thủy kích và tối ưu hóa hiệu suất năng lượng [1]. Độ quá nhiệt cao đảm bảo môi chất đi vào máy nén hoàn toàn ở trạng thái hơi, tuy nhiên nó lại làm tăng công tiêu thụ riêng và tăng nhiệt độ cuối nén [2, 3]. Ngày nay, kỹ thuật điều khiển hiện đại cho phép giảm thiểu độ quá nhiệt xuống mức ổn định tối thiểu nhằm tận dụng tối đa bề mặt trao đổi nhiệt hai pha trong dàn bay hơi, từ đó cải thiện đáng kể hệ số truyền nhiệt và hiệu suất hệ thống [4, 5].

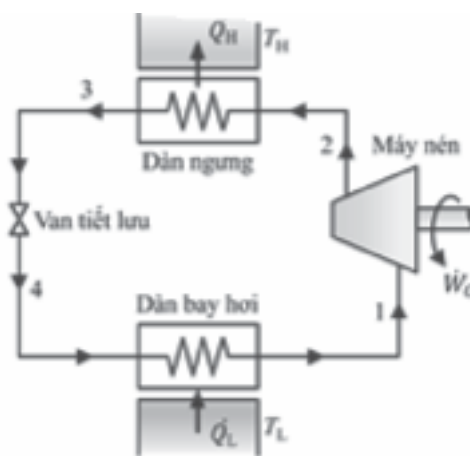
Sencan và cộng sự phân tích ảnh hưởng đồng thời của độ quá lạnh và quá nhiệt đến hiệu suất chu trình [1]. Kết quả chỉ ra rằng tác động của độ quá nhiệt đến COP phụ thuộc mạnh mẽ vào loại môi chất và cấu hình chu trình. Đối với các hệ thống siêu tới hạn CO₂, Sanchez và cộng sự [2] đã chứng minh rằng độ quá nhiệt hữu ích cao làm giảm đáng kể lưu lượng khối lượng và hiệu suất làm lạnh. Các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc mô hình hóa và điều khiển thông minh để cân bằng giữa tiết kiệm năng lượng và ổn định hệ thống [3, 6].

Việc cung cấp một bức tranh tổng quan về xu hướng biến thiên của các thông số nhiệt động cơ bản theo ΔT_{sh} có ý nghĩa quan trọng trong đào tạo, thiết kế và vận hành hệ thống. Bài báo này phân tích chi tiết ảnh hưởng của ΔT_{sh} đến các đặc tính công tác của hệ thống lạnh sử dụng R134a, đồng thời so sánh với các môi chất thay thế có GWP thấp hơn như R1234yf [7] và các môi chất tự nhiên (R290, R717).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Chu trình làm lạnh nén hơi

Sơ đồ nguyên lý hệ thống máy lạnh nén hơi tiêu chuẩn được minh họa trên Hình 1, bao gồm các thiết bị chính như: máy nén, thiết bị bay hơi, thiết bị ngưng tụ và van tiết lưu. Chu trình nhiệt động lý tưởng của hệ thống được tạo thành từ bốn quá trình nhiệt động liên tiếp: nén đoạn nhiệt, ngưng tụ đẳng áp, tiết lưu đẳng enthalpy và hóa hơi đẳng áp [8].



Hình 1. Chu trình làm lạnh nén hơi tiêu chuẩn

2.2. Các giả thiết

Mô hình khảo sát ảnh hưởng của độ quá nhiệt đến đặc tính làm việc và hiệu quả làm lạnh của hệ thống được xây dựng dựa trên những giả thiết sau:

- Hệ thống làm việc ở chế độ làm việc ổn định;
- Quá trình tiết lưu là đẳng enthalpy;
- Bỏ qua tổn thất áp suất tại dàn bay hơi, dàn ngưng và đường ống;
- Năng suất lạnh riêng (q_{cold}) được tính từ điểm môi chất vào thiết bị bay hơi đến điểm vào cửa hút của máy nén.

2.3. Các thông số đánh giá

Độ quá nhiệt của hơi môi chất tính theo công thức (1) [3]:

$$\Delta T_{sh} = T_1 - T_{eva} \quad (1)$$

Công nén riêng được xác định theo công thức (2) [1]:

$$w_{comp} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

Năng suất làm lạnh riêng xác định theo công thức (3) [8]:

$$q_{cold} = h_1 - h_4 \quad (3)$$

Hệ số làm lạnh của chu trình, tính theo công thức (4) [8]:

$$COP = \frac{q_{cold}}{w_{comp}} \quad (4)$$

Trong đó:

T_1 : Nhiệt độ môi chất tại cửa hút, °C;

h_1, h_2 : Enthalpy môi chất tại cửa hút và cửa đẩy, kJ/kg;

h_4 : Enthalpy môi chất tại cửa vào của thiết bị bay hơi, kJ/kg;

w_{comp} : Công suất máy nén, kW.

Thông số về điều kiện làm việc dùng để khảo sát đáp ứng của hệ thống dưới tác động của các mức độ quá nhiệt khác nhau được cho trong Bảng 1.

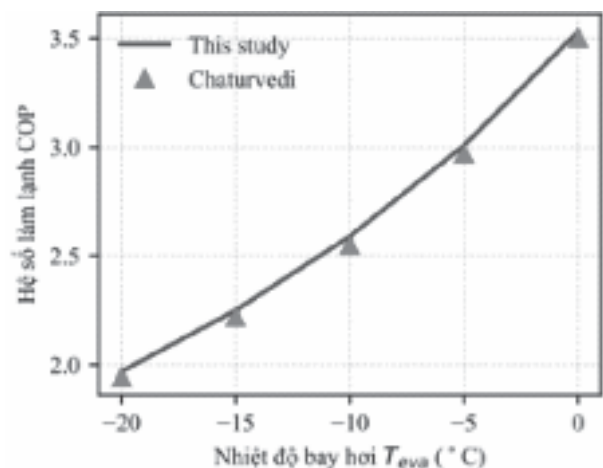
Bảng 1. Thông số về điều kiện khai thác

Thông số	Ký hiệu	Trị số
Nhiệt độ bay hơi (°C)	T_{eva}	-25
Nhiệt độ ngưng tụ (°C)	T_{con}	40
Công suất lạnh (kW)	$\dot{Q}_{eva}$	3.517
Độ quá nhiệt (°C)	ΔT_{sh}	0 ÷ 25

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

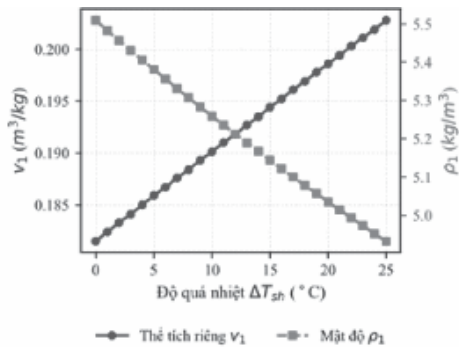
3.1. Xây dựng và kiểm chứng chương trình mô phỏng

Chương trình mô phỏng được phát triển từ phần mềm EES, tự động hóa việc giải các phương trình từ (1) đến (4) đối với mỗi loại môi chất. Tính chính xác của mô hình toán và độ tin cậy của chương trình tính được kiểm chứng bằng việc so sánh kết quả tính với số liệu được công bố bởi Chaturvedi và cộng sự [9], trong cùng một điều kiện làm việc: Môi chất lạnh R134a, nhiệt độ bay hơi khác nhau (-25÷0°C), nhiệt độ ngưng tụ 40°C, độ quá nhiệt 5°C. Kết quả kiểm nghiệm mô hình tính được thể hiện trên Hình 2. Sai lệch tương đối nhỏ hơn 3%, chứng tỏ mô hình có độ chính xác cao. Do đó, có thể sử dụng chương trình đã xây dựng để khảo sát tác động của độ quá nhiệt đối với đặc tính nhiệt động của môi chất, các thông số công tác và hiệu suất nhiệt của chu trình.



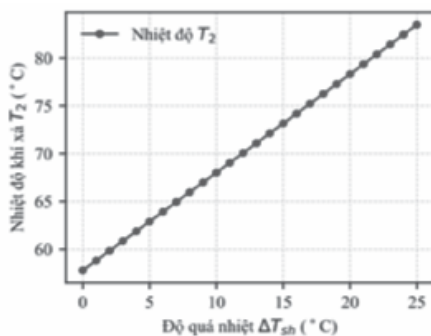
Hình 2. Kết quả kiểm chứng chương trình mô phỏng số

3.2. Ảnh hưởng đến thông số nhiệt động của môi chất



Hình 3. Biến thiên thể tích riêng v_1 và mật độ môi chất ρ_1 theo ΔT_{sh}

Hình 3 biểu diễn sự thay đổi về thể tích riêng v_1 và mật độ ρ_1 của R134a khi tăng ΔT_{sh} từ 0°C lên 25°C, v_1 tăng tuyến tính từ 0.1815 m³/kg lên 0.2028 m³/kg. Kết quả là ρ_1 giảm từ 5.51 kg/m³ xuống 4.932 kg/m³. Trong trường hợp áp suất hút không đổi, mật độ môi chất đi vào máy nén giảm, dẫn đến lưu lượng khối lượng tuần hoàn giảm nếu máy nén chạy ở tốc độ cố định. Đây là nguyên nhân chính gây suy giảm năng suất lạnh tổng của hệ thống khi độ quá nhiệt tăng cao [2].

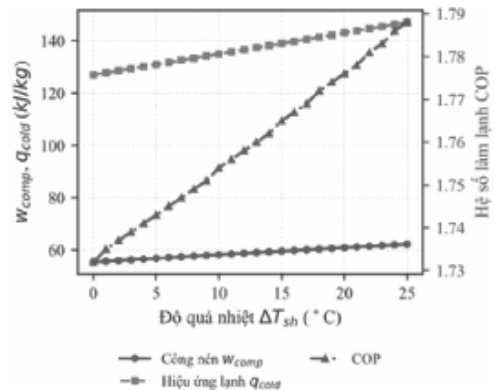


Hình 4. Biến thiên nhiệt độ khí xả của máy nén T_2 theo ΔT_{sh}

Sự thay đổi của nhiệt độ khí xả T_2 tăng gần như tuyến tính với độ quá nhiệt, từ 57.79°C lên đến 83.49°C (Hình 4). T_2 tăng làm suy giảm độ bền hóa học của môi chất và tính chất dầu

bôi trơn, gia tăng ứng suất nhiệt trong các chi tiết cơ khí của máy nén.

3.3. Ảnh hưởng đến các thông số công tác của hệ thống



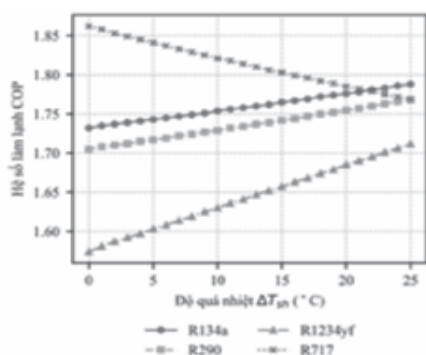
Hình 5. Biến thiên công nén, năng suất lạnh và COP theo ΔT_{sh}

Ảnh hưởng của ΔT_{sh} đến các thông số công tác của hệ thống được trình bày trên Hình 5. Năng suất lạnh riêng q_{cold} tăng mạnh, đạt mức 15.83%, từ 127 kJ/kg lên 147.1 kJ/kg. Công nén riêng w_{comp} cũng tăng từ 55.43 kJ/kg lên 62.22 kJ/kg ($\approx 12.55\%$). Do đó, hệ số làm lạnh COP tăng nhẹ từ 1.732 lên 1.788 ($\approx 3.23\%$).

3.4. Ảnh hưởng của môi chất lạnh

Hình 6 so sánh xu hướng COP của R134a với R1234yf, R290 và R717 trong cùng dải đo $\Delta T_{sh} = 0 \div 25^\circ\text{C}$. Các chất R134a, R290 và R1234yf đều thể hiện xu hướng cải thiện COP ở mức lớn hơn của ΔT_{sh} , trong đó R1234yf có mức tăng đáng kể nhất ($\approx 8.77\%$). Tuy nhiên, COP của cả R290 và R1234yf luôn thấp hơn so với R134a, tương ứng là 1.12-1.56% và 4-9%. Ngược lại, COP của R717 suy giảm khi ΔT_{sh} lớn, đạt mức cao nhất 1.862 ở 0°C và giảm mạnh xuống 1.769 ở 25°C.





Hình 6. Biến thiên COP theo ΔT_{sh} và môi chất lạnh

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã mô phỏng và phân tích chi tiết ảnh hưởng của độ quá nhiệt trước nén (ΔT_{sh}) đến thông số vận hành của chu trình lạnh nén hơi sử dụng R134a và so sánh với các môi chất thay thế. Các kết luận chính được rút ra như sau:

- COP có thể tăng nhẹ theo ΔT_{sh} do quá nhiệt nói rộng hiệu ứng làm lạnh. Tuy nhiên, điều này đi kèm với sự sụt giảm mật độ hơi nạp, gây bất lợi cho năng suất lạnh thể tích thực tế.

- Nhiệt độ khí xả T_2 tăng cao đặt ra thách thức về ổn định nhiệt và độ bền dầu bôi trơn, đặc biệt với các môi chất có nhiệt độ cuối nén cao như R717.

- R290 và R1234yf có COP thấp hơn R134a không đáng kể nhưng có tiềm năng thay thế rất tốt xét về khía cạnh môi trường.

- Cần duy trì ΔT_{sh} ở mức ổn định tối thiểu (khoảng $5\div 7^\circ\text{C}$) để cân bằng giữa an toàn máy nén và hiệu quả trao đổi nhiệt của dàn bay hơi, thay vì chạy ở độ quá nhiệt quá cao.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường

Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.54.❖

Ngày nhận bài: 23/3/2026

Ngày phản biện: 10/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Şencan, A., et al., “Thermodynamic analysis of subcooling and superheating effects of alternative refrigerants for vapour compression refrigeration cycles”. International Journal of Energy Research, 2006. 30(5): p. 323-347.
- [2]. Sánchez, D., et al., “Influence of the superheat associated to a semihermetic compressor of a transcritical CO2 refrigeration plant”. Applied Thermal Engineering, 2010. 30(4): p. 302-309.
- [3]. Shang, Y., A. Wu, and X. Fang, “A study on the modeling of the minimal stable superheat for a variable speed refrigeration system”. International Journal of Refrigeration, 2015. 59: p. 182-189.
- [4]. Estrada, A., L. Córdova-Castillo, and S. Piedra, “Enhancing Vapor Compression Refrigeration Systems Efficiency via Two-Phase Length and Superheat Evaporator MIMO Control”. Processes, 2024. 12(8).
- [5]. Guo, F., et al., “Seasonal performance evaluation of zero-superheat active refrigerant charge control for variable-speed heat pumps”. Energy and Buildings, 2026. 351.
- [6]. Nguyễn, M.C., H.D. Nguyễn, and T.H. Ngô, “Ổn định độ quá nhiệt kho lạnh bằng phương pháp đóng, mở bình hồi nhiệt”. Can Tho University Journal of Science, 2023. 59(ETMD): p. 234-242.
- [7]. Navarro-Esbrí, J., et al., “Experimental analysis of R1234yf as a drop-in replacement for R134a in a vapor compression system”. International Journal of Refrigeration, 2013. 36(3): p. 870-880.
- [8]. Çengel, Y.A., “Thermodynamics: An Engineering Approach”. 2014: McGraw-Hill Education.
- [9]. Chaturvedi, S., N.K. Sharma, and C. Ranganayakulu, “Exergy analysis and performance evaluation of a vapor compression refrigeration system using R-134a, R-600a, and R-125”. International Journal of Refrigeration, 2025. 175: p. 74-84.