

MÔ PHỎNG HỆ THỐNG LẠNH BẢO QUẢN THỰC PHẨM TRÊN SIMSCAPE CỦA MATLAB & SIMULINK

Dương Chính Cường^{1*}, Nguyễn Đức Trung²

¹Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – ĐH Thái Nguyên,

²Đại học Bách khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Hệ thống lạnh được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực với quy mô khác nhau. Đối với hệ thống dân dụng cũng như công nghiệp, ứng dụng nổi bật của hệ thống lạnh chính là thực hiện nhiệm vụ bảo quản thực phẩm. Nhằm tối ưu hoạt động hệ thống, nhiệm vụ tính toán và phân tích sự biến thiên theo thời gian thông số trạng thái của các phần tử cần bảo đảm sự chính xác cao. Sử dụng ngôn ngữ tựa BondGraph, hoạt động của hệ thống lạnh bảo quản thực phẩm được mô phỏng thông qua bộ công cụ Simscape của gói phần mềm Matlab & Simulink. Các điểm làm việc của từng phần tử thay đổi theo thời gian được biểu diễn một cách liên tục trên nền đồ thị logp-i, vốn rất quen thuộc với các kỹ sư nhiệt.

Từ khóa: Bảo quản thực phẩm, Simscape, chu trình lạnh, mô phỏng, đồ thị logp-i

Ngày nhận bài: 02/01/2019; Ngày hoàn thiện: 20/02/2019; Ngày duyệt đăng: 28/02/2019

SIMULATION THE FOOD COLD STORAGE USING A BOND GRAPH MODEL LIBRARY IMPLEMENTED IN SIMSCAPE

Duong Chinh Cuong^{1*}, Nguyen Duc Trung²

¹University of Information and Communication Technology – TNU,

²Hanoi University of Science and Technology

ABSTRACT

Refrigeration system is widely used in multi domain under different scales. For household and industrial system, the typical application of refrigeration system is food preservation. In order to optimize system performance, it is necessary to compute and analyze exactly the time – variance of state variable of elements. Using pseudo – BondGraph language, the operation of refrigeration system for food preservation is simulated via Simscape toolbox of Matlab & Simulink. The variation due to time of operational point of each element is described continuously in logp-i diagram which is very acquainted with thermal engineers.

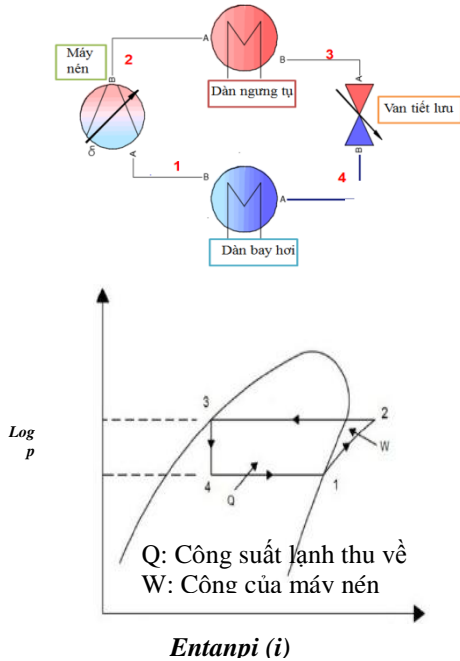
Keyword: Food storage, Simscape, refrigeration cycle, simulation, logp-i diagram

Received: 02/01/2019; Revised: 20/02/2019; Approved: 28/02/2019

* Corresponding author: Email: dccuong@ictu.edu.vn

GIỚI THIỆU

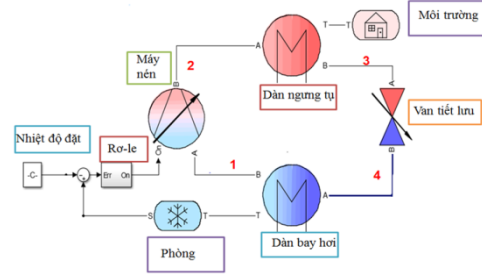
Một chu trình lạnh bao gồm các thiết bị chính sau: dàn bay hơi (còn gọi là dàn lạnh), máy nén, dàn ngưng tụ (còn gọi là dàn nóng) và van tiết lưu nối với nhau thành một vòng kín gọi là chu trình lạnh được mô tả trên Hình 1 dưới đây.



Hình 1. Các phần tử cơ bản và đồ thị Log p – i của một chu trình lạnh

Một luồng chất lưu dễ bay hơi (lưu chất vận động hay môi chất lạnh) được luân chuyển trong chu trình lạnh với nhiệm vụ vận chuyển nhiệt lượng từ môi trường tiếp nhận ra môi trường bên ngoài để mục đích hạ nhiệt độ của môi trường bên ngoài xuống nhiệt độ theo yêu cầu [1]. Việc điều chỉnh năng suất lạnh tương ứng với công suất máy nén theo nguyên tắc vô cấp thông qua biến tần hoặc đơn giản hơn với nguyên lý ON/OFF nhằm bảo đảm ổn định nhiệt độ trong một dải cho phép do tính chất quán tính nhiệt như trong Hình 2 mô tả hệ thống lạnh đối với một phòng bảo quản thực phẩm. Ở các hệ thống nhiệt nhỏ, tích hợp đầu đo và cơ cấu điều khiển trên một thiết bị tạo ra các rơ le nhiệt đi kèm hệ thống mao dẫn chứa hơi có đặc tính áp – nhiệt với độ nhạy cao nhằm thực hiện

nguyên tắc chuyển đổi đồng thời giữa các quá trình: nhiệt học – cơ học – điện tử [2]. Nhiệt độ đặt cho phòng bảo quản được điều chỉnh cụ thể đối với từng loại thực phẩm khác nhau.



Hình 2. Sơ đồ điều khiển một hệ thống lạnh theo nguyên tắc đơn giản

Đối tượng nghiên cứu có đặc tính phi tuyến và đa biến [3], [4], [5] được mô hình trên ngôn ngữ giả lập Bond Graph và mô phỏng trên Simscape của Matlab & Simulink [6], [7], [8], [9], [10] với kết quả biểu diễn trên đồ thị logp-i giúp cho không chỉ kỹ sư điều khiển đánh giá được tính chất biến thiên động theo thời gian của từng phần tử trong hệ thống mà còn cho phép các kỹ sư nhiệt đánh giá và hiệu chỉnh nâng cao hiệu suất hoạt động của hệ thống.

MÔ TẢ TOÁN HỌC CHU TRÌNH LẠNH

Đối với chu trình lạnh có mô hình toán học chi tiết rất phức tạp [3, 4, 5]. Nghiên cứu sẽ tóm lược một số phương trình chính. Mô tả toán học của dàn ngưng tụ và bay hơi có dạng tương tự nhau. Với các thông số của dàn ngưng tụ (con: condensator): h (400 W/mK), δ (10 mm), d (15 mm) và l (15000 mm) đặc trưng cho hệ số dẫn nhiệt, độ dày, đường kính và chiều dài của dàn; nhiệt lượng Q_{con} do môi chất bị ngưng tụ chuyển qua ra môi trường không khí làm thay đổi nhiệt độ vào và nhiệt độ ra khỏi dàn ngưng của không khí theo (1) và (4):

$$Q_{con} = m_{con} C_{con} (T_{23} - T_{con_in}) = \frac{h_{con} A_{con} (T_{con_out} - T_{con_in})}{\delta_{con}} \tag{1}$$

$$m_{con} = V_{con} \rho_{con} = A_{con} \delta_{con} \rho_{con} \tag{2}$$

$$A_{con} = \Pi d_{con} l_{con} \tag{3}$$

$$Q_{con} = G\Delta h = kA_{con} \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}}$$

$$\frac{\Delta t_2 = T_{23} - T_{con_in}; \Delta t_1 = T_{23} - T_{con_out}}{\Delta h = (I_1 - I_4); k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}} \quad (4)$$

$$\alpha_i = f_i(\text{Re}, \text{Nu}, \text{Pr}, f_{Halland})$$

$$G = V_{MC} \rho_{MC} = \frac{\Pi d_{con}^2 l_{con}}{4} \rho_{MC}$$

$$G(I_1 - I_4) = \frac{A_{con}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{con}}{\lambda_{con}} + \frac{1}{\alpha_2}} \frac{(T_{23} - T_{con_in})}{\ln \frac{T_{23} - T_{con_in}}{T_{23} - T_{con_out}}}$$

Thiết diện bề mặt dẫn nhiệt A_{con} và khối lượng m_{con} lần lượt được tính toán qua (2) và (3). Quá trình đẳng áp, đẳng nhiệt diễn ra ở dàn ngưng với nhiệt độ T_{23} có hiện tượng ngưng tụ của môi chất khiến cho nhiệt độ môi trường bị tăng lên ($T_{con_out} > T_{con_in}$), ngược lại với quá trình bay hơi đẳng áp, đẳng nhiệt (T_{14}) ở dàn bay hơi được đặt tiếp xúc với môi trường cần được làm lạnh. Quá trình trao đổi nhiệt được mô tả cụ thể hơn trong phương trình (4) với đặc trưng hệ số trao đổi nhiệt đối lưu phụ thuộc vào chế độ của dòng chảy bên trong ống được xác định qua các chuẩn số Re, Nu, Pr kết hợp với tương quan Halland với chi tiết trong [5], [11], [12].

Chu trình lạnh tuần hoàn kín môi chất lạnh có hai cấp (ngưng tụ hơi – bay hơi lỏng; nén hơi – tiết lưu lỏng) hiện tượng vật lý diễn ra ngược nhau tại các cụm phần tử khác nhau được kết nối bằng hệ thống đường ống có yêu cầu bảo ôn đặc biệt tại các đoạn ống kết nối với dàn bay hơi hay còn được gọi là dàn lạnh (đặt phía trong môi trường cần làm lạnh). Việc khởi động hay dừng máy nén thường dựa trên sự so sánh của tín hiệu nhiệt độ mong muốn của môi trường với nhiệt độ thực tế của môi trường.

Mô tả toán học cơ bản của máy nén với công nén W đưa áp suất của khối lượng hơi G từ P_1 lên P_2 được thể hiện qua phương trình sau đây:

$$W = G(E_2 - E_1) = G[(I_2 + K_2) - (I_1 + K_1)]$$

$$= G \left[(u_2 + p_2 v_2 + \frac{V_{EL_2}^2}{2}) - (u_1 + p_1 v_1 + \frac{V_{EL_1}^2}{2}) \right] \quad (5)$$

Phương trình trên dựa trên định luật bảo toàn năng lượng với công nén tương ứng với phần tổng năng lượng tăng thêm. Tổng năng lượng (E) của dòng hơi được xác định bằng tổng entanpi (I: được xác định bằng tổng nội năng u và phần năng lượng pv được tạo ra do áp suất p trong một thể tích v) và động năng (K). Quá trình nén hơi thực hiện theo nguyên tắc đoạn nhiệt (đẳng entropi: $S_2 = S_1$). Đặc trưng cho việc tính toán máy nén dựa vào tỉ số nén ($K = P_{23}/P_{41}$) yêu cầu phụ thuộc vào chính giá trị nhiệt độ mong muốn của môi trường cần lạnh. Việc làm lạnh sâu đòi hỏi nhiều cấp nén hơn. Tùy theo môi chất lạnh mà giới hạn tỷ số nén đối với một cấp nén được xác định. Đối với môi chất lạnh R22 trong nghiên cứu này, tỉ số tối hạn được xác định là 8.

Ngược lại với quá trình nén hơi là quá trình tiết lưu lỏng thực hiện tại van tiết lưu là quá trình hạ áp suất đẳng entanpi (không thực hiện sự trao đổi nhiệt với môi trường: $I_4 = I_3$). Về mặt lý thuyết, van tiết lưu được bảo ôn tuyệt đối. Tuy nhiên với các thiết bị lạnh công suất nhỏ, van tiết lưu thường được thay bằng ống mao dẫn có đường kính nhỏ, đồng thời việc bảo ôn không nhất thiết bắt buộc phải thực hiện quá nghiêm ngặt. Trong trạng thái hoạt động xác lập của hệ thống, van tiết lưu hạ áp suất của dòng môi chất lạnh ở trạng thái lỏng từ P_{23} về P_{41} ; trạng thái của môi chất lạnh tại các điểm 1, điểm 2, điểm 3 và điểm 4 lần lượt ở hơi bão hòa khô, hơi quá nhiệt; lỏng và hơi bão hòa ẩm như thể hiện trên Hình 1.

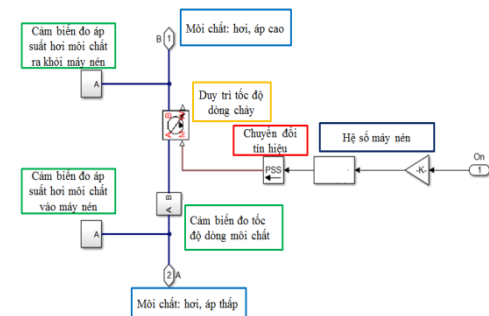
Mô tả trường hợp mô phỏng: bảo quản táo trong kho lạnh của siêu thị

Sau thu hoạch, táo thương được bảo quản trong kho lạnh để trước khi đưa ra bán tại siêu thị. Nhiệt độ bảo quản tối thiểu là 10°C. Trong nghiên cứu này, mô phỏng thực hiện với điều kiện bảo quản ở 4°C cho kho chứa

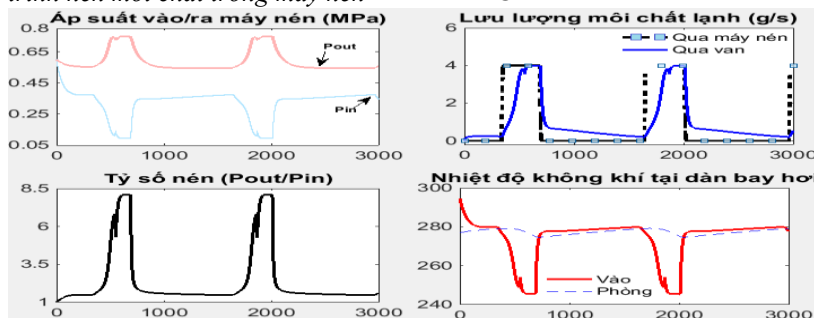
250 kg tảo có kích thước (m): 2x3x2. Việc trao đổi nhiệt với môi trường cần làm lạnh được hỗ trợ bởi quạt gió ở vận tốc gió là 0,2 m/s. Kho lạnh được bảo ôn bằng bông thủy tinh có độ dày 100 mm với lớp bao ngoài là tường gạch dày 120mm, lớp bao trong khoang lạnh là Inox 304 (bảo đảm hợp chuẩn an toàn vệ sinh thực phẩm) có độ dày 2 mm. Môi chất lạnh R22 được sử dụng trong nghiên cứu có thông số chi tiết [12] được đưa vào chương trình mô phỏng trên Simscape dưới dạng bảng.

MÔ PHỎNG VÀ TÍNH TOÁN

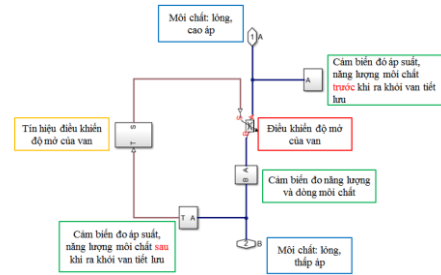
Gói công cụ Simscape của Matlab & Simulink [6,7,8] được phát triển dựa trên việc mô tả thiết bị, phần tử trong các hệ thống thông qua ngôn ngữ tựa BondGraph. Simscape được phân chia thành các gói tiện ích nhỏ phục vụ mô phỏng trong các lĩnh vực khác nhau như: kỹ thuật điện – điện tử, kỹ thuật thủy lực, kỹ thuật khí nén, kỹ thuật nhiệt cũng như các quá trình lai đối với các hệ thống phức tạp. Vận dụng các phần tử có sẵn thông qua cài đặt các tham số cho phép kết nối giữa các thiết bị, các chương trình mô phỏng được thực hiện với cấu trúc module như Hình 3 dưới đây:



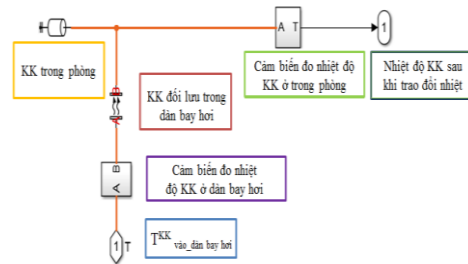
Hình 3. Quá trình nén môi chất trong máy nén



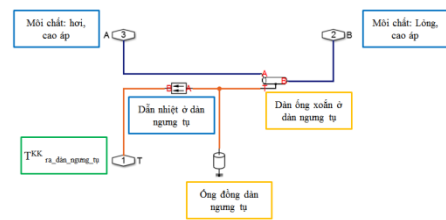
Hình 7. Sự biến thiên thông số trạng thái hệ thống và hoạt động của thiết bị



Hình 4. Quá trình biến đổi áp suất tại van tiết lưu

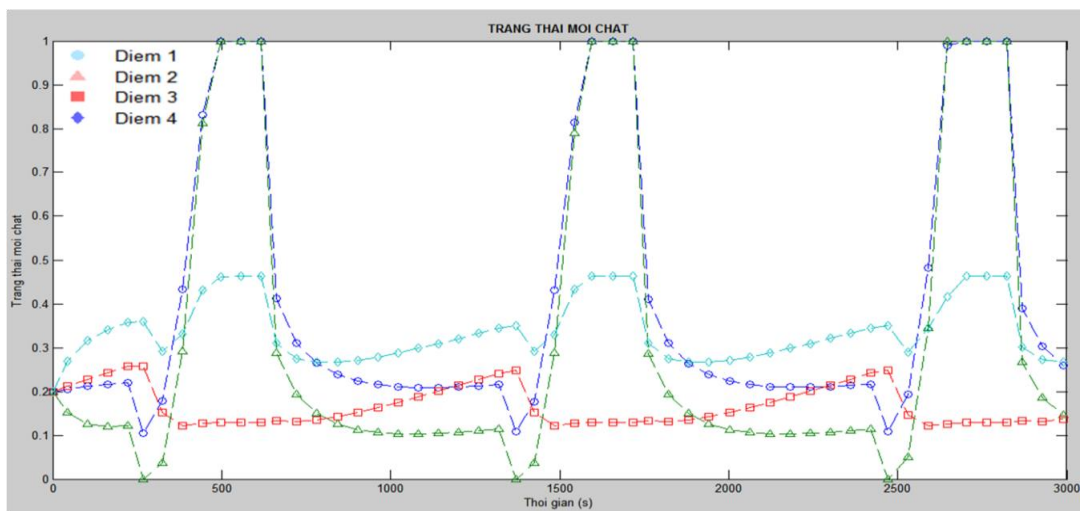


Hình 5. Quá trình trao đổi nhiệt cấp lạnh cho phòng qua dàn bay hơi

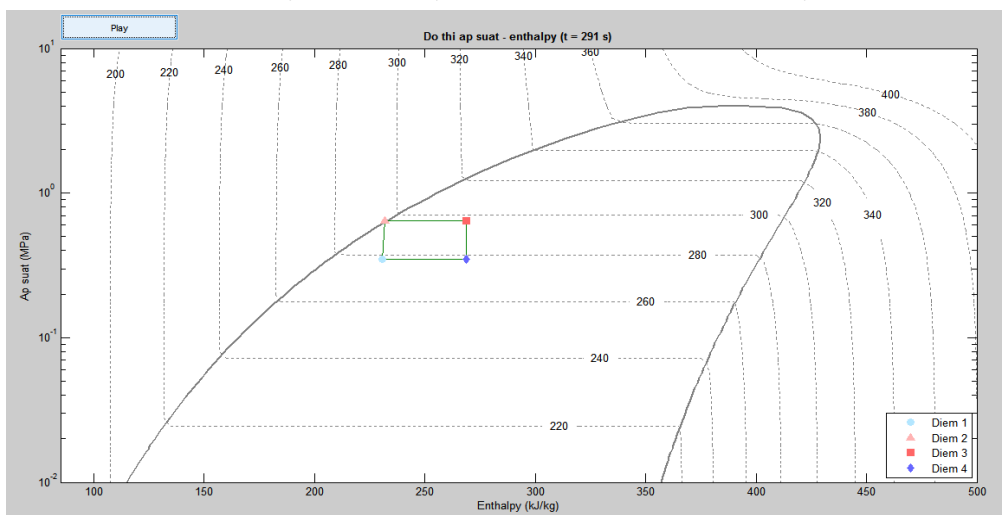


Hình 6. Quá trình trao đổi nhiệt với môi trường (làm mát dàn ngưng tụ)

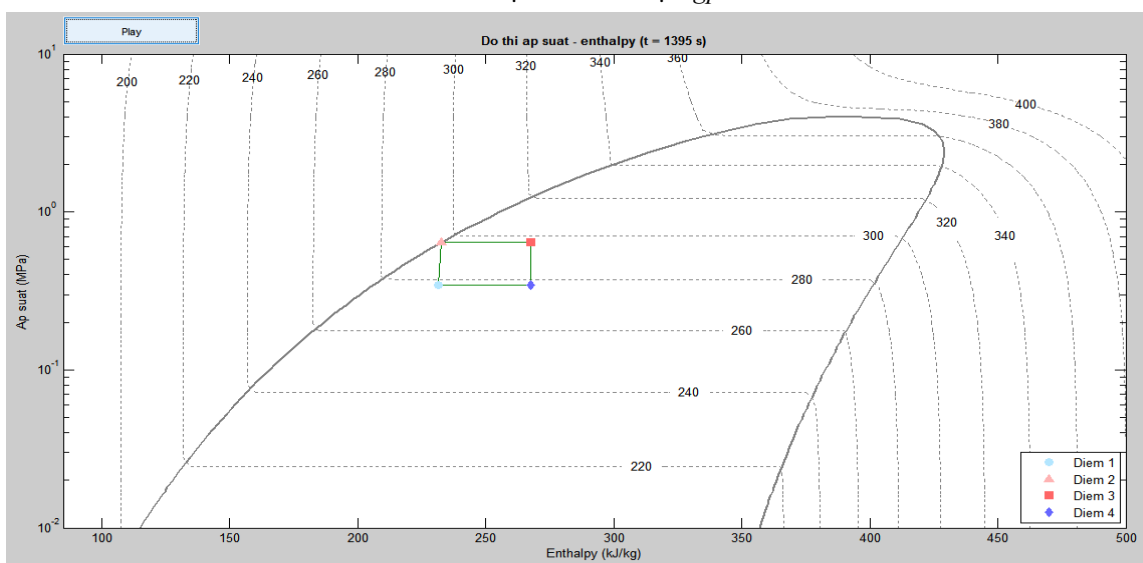
Kết quả mô phỏng được biểu diễn qua từ Hình 7 đến Hình 10 dưới đây cho các điểm làm việc trên chu trình lạnh ở các thời điểm đặc trưng khác nhau tương ứng với giai đoạn khởi động hệ thống (chu trình lạnh có môi chất đồng nhất tại các vị trí), bật máy nén và tắt máy nén. Hệ thống bảo quản lạnh hoạt động với nhiệt độ đặt: 4°C và nhiệt độ môi trường bên ngoài khoang bảo quản: 25°C. Dung sai điều khiển là 2°C.



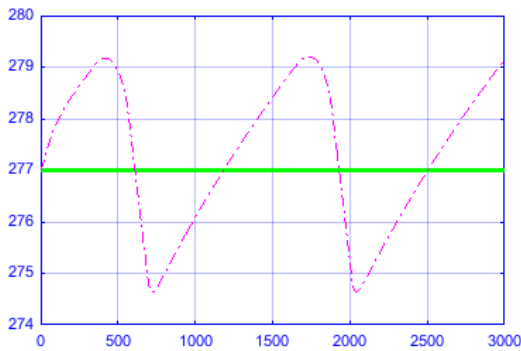
Hình 8. Sự biến thiên hệ 3 R22 ở các điểm của chu trình lạnh



Hình 9.a. Chu trình lạnh trên đồ thị logp-i với $t=1395$ s



Hình 9.b. Chu trình lạnh trên đồ thị logp-i với $t=1395$ s



Hình 10. Nhiệt độ đặt (4°C tương ứng 277K) và nhiệt độ thực của phòng

Các hình trên thể hiện kết quả mô phỏng của hệ thống bảo quản lạnh hoạt động với nhiệt độ đặt 4°C và nhiệt độ môi trường bên ngoài khoảng bảo quản 25°C . Đặc tính điều khiển kiểu on/off tạo ra chu kỳ dao động nhiệt độ thực của khoang bảo quản là 1065 (s). Tính chất chu kỳ thể hiện không chỉ ở trên Hình 10 với đáp ứng của nhiệt độ môi trường bảo quản mà còn thể hiện ở trong hoạt động của chu trình lạnh của toàn bộ hệ thống với biểu diễn thông qua đồ thị logp-i tại các thời điểm $t=291\text{s}$ và $t=1395\text{s}$ ứng với Hình 9.a và Hình 9.b. Trạng thái 4 điểm hoạt động của 4 phần tử chính trong chu trình lạnh được biểu diễn tại các vị trí có tọa độ gần giống nhau.

Trên Hình 8, các trạng thái của 4 điểm hoạt động của 4 phần tử chính được biểu hiện có vị trí rất gần nhau ở thời điểm ngay sau khi khởi động hệ thống thể hiện sự thay đổi trạng thái có quán tính của môi chất lạnh trong đường ống (vẫn đang ở trạng thái bão hòa ẩm). Sự biến đổi diễn ra ở trạng thái hoạt động ổn định có tính chu kỳ. Trong mỗi chu kỳ, tính chất biến thiên quá độ trạng thái hơi môi chất lạnh liên tục diễn ra. Hình 8 cũng như Hình 9.a và Hình 9.b có tính chất mô tả diễn tiến quá trình, thông số cụ thể các phần tử được thể hiện ở Hình 7.

KẾT LUẬN

Mô phỏng động lực học hệ thống bảo quản lạnh thực phẩm được thực hiện trong nghiên cứu cho phép xác định chính xác nhiệt độ môi trường bảo quản, trạng thái và chế độ hoạt

động của từng phần tử trong chu trình lạnh (máy nén, dàn ngưng tụ, dàn bay hơi, van tiết lưu). Nghiên cứu đã thực hiện việc chuyển trạng thái động học của 4 điểm làm việc trên đồ thị logp – i cho 4 phần tử kể trên trong 50h làm việc liên tục tính từ khi đưa tải cần làm lạnh: 250 kg tảo vào trong phòng lạnh có kích thước 12 m^3 . Tính lặp lại của trạng thái hệ thống được thể hiện rõ tùy theo đặc tính hoạt động của máy nén được chỉ ra cụ thể thông qua các biểu diễn trên đồ thị logp – i cũng như trên giản đồ thời gian thông số lưu lượng hơi của môi chất lạnh, tỷ số nén, áp suất vào và ra máy nén hay hệ số trạng thái (tỷ số hơi) của môi chất lạnh.

Với kết quả mô phỏng trên, việc thiết kế hệ thống được bảo đảm độ chính xác cao hơn. Hơn thế nữa, mô phỏng động học còn cho phép đánh giá chất lượng của thực phẩm bảo quản theo thời gian từ đó có thể ước lượng được thời gian bảo quản tối đa trong hệ thống, đồng thời cho phép đánh giá năng lượng tiêu hao trong quá trình bảo quản với các phụ tải chính (máy nén và quạt thông gió).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Granryd E. et al (2009), “Refrigerating engineering”, Royal Institute of Technology KTH – Stockholm Press, ISBN: 917415415X, 9789174154153.
2. Larsen F.S. (2006), “Model based control of refrigeration systems”, Ph.D. thesis, Aalborg University.
3. He X. D., Liu S., Asada H. H., Itoh H. (1998), “Multivariable Control of Vapour Compression Systems”, Int. J. HVAC&R. Vol. 4, No. 3, pp. 205-230.
4. Nyers J. and Stoyan G. (1992), “A Dynamical Model Adequate for Controlling the Evaporator of a Heat Pump”, Int. J. Refrig. Vol. 17, pp. 101-108.
5. Çengel Y.A., Boles M.A. (2003), “Thermodynamics: an engineering approach”, McGraw Hill, ISBN-13: 9780072884951, ISBN-10: 0072884959.
6. Mokhtari, Mohand, Martaj, Nadia (2012), “Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape & SimPowerSystems (Matlab/Simulink)”, Springer Press, ISBN: 978-3-642-24201-4.

7. Mohammad Nuruzzaman (2005), "Modeling and Simulation In SIMULINK for Engineers and Scientists," AuthorHouse Press, ISBN-13: 978-1418493837, ISBN-10: 141849383X.
8. Harold Klee, Randal Allen (2017), "Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink, Second Edition", CRC Press, ISBN-13: 978-1439836736, ISBN-10: 1439836736.
9. Agam Kumar Tyagi (2012), "Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink, Third Edition", Oxford University, ISBN: 9780198072447.
10. <https://mathworks.com/help/physmod/simscap> (truy cập 11h35'20/11/2019)
11. J. P. Holman (1997), "Heat Transfer", McGraw-Hill, ISBN: 9780070297234, pp. 289-311.
- Collier J. G., Thome J. R. (1996), "Convective Boiling and Condensation" Oxford University, ISBN-10: 0198562969; ISBN-13: 978-0198562962.

