

MÔ PHỎNG CẤP ĐÔNG THỊT HEO NỬA CON BẰNG ANSYS

Võ Văn Sim, Đỗ Hữu Hoàng

Khoa CN Hóa Học, Trường Đại Học Công Nghiệp Thực Phẩm Tp. HCM

E-mail: hoangdhuu@hufi.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/01/2021

Ngày nhận bài được sửa theo ý kiến phản biện: 21/05/2021

Ngày bài được duyệt đăng: 29/06/2021

Tóm tắt: Bài báo này trình bày kết quả mô phỏng xác định thời gian cấp đông thịt heo nửa con bằng phương pháp CFD. Sai số thời gian cấp đông giữa mô phỏng và thực nghiệm tương ứng 4%. Trên cơ sở kết quả mô phỏng đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và vận tốc dòng khí lên thời gian cấp đông, kết quả mô phỏng được sử dụng để tối ưu hóa điều kiện vận hành và thiết kế kho cấp đông thịt heo.

Từ khóa: Ansys, cấp đông heo, CFD, mô phỏng cấp đông, thời gian cấp đông.

KÝ HIỆU:

α : Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu, $W.m^{-2}.K^{-1}$;

ω : Vận tốc dòng, $m.s^{-1}$;

c : Nhiệt dung riêng, $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

c_w : Nhiệt dung riêng nước, $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

c_{ice} : Nhiệt dung riêng băng, $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

c_u : Nhiệt dung riêng chưa cấp đông, $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

c_a : Nhiệt dung riêng nguyên liệu, $J.kg^{-1}.K^{-1}$;

H : enthalpy, $J.kg^{-1}$;

ρ : Khối lượng riêng, $Kg.m^{-3}$;

λ : Hệ số dẫn nhiệt, $W.m^{-1}.K^{-1}$;

R : $8.314 kJ.kg^{-1}.mol^{-1}.K^{-1}$;

L_0 : Nhiệt ẩn đông đặc của nước tại 273,15 K

T_0 : nhiệt độ đông đặc của nước tại 273,15 K;

E : Tỷ lệ giữa khối lượng phân tử nước với khối lượng phân tử chất khô;

M_w : Khối lượng phân tử nước $kg.kmol^{-1}$;

M_s : Khối lượng phân tử chất khô $kg.kmol^{-1}$;

ε : Độ xốp của nguyên liệu;

x_i : Thành phần khối lượng thứ i , %;

x_i^v : thành phần thể tích, %;

x_b : Thành phần Protein trong thực phẩm %;

x_{ice} : Thành phần băng;

x_{wo} : thành phần nước chưa đóng băng, %;

t_f : Nhiệt độ bắt đầu kết đông, $^{\circ}C$;

t : Nhiệt độ, $^{\circ}C$;

τ : Thời gian, s^{-1} ;

T : Nhiệt độ, K;

I. MỞ ĐẦU

Thịt heo từ lâu là loại thực phẩm được ưa chuộng và tiêu thụ rất nhiều trên toàn thế giới. Ngày nay, trong chuỗi cung ứng từ nông trại đến bàn ăn, quá trình vận chuyển, bảo quản chiếm vị trí quan trọng, ảnh hưởng rất lớn chất lượng thịt. Sự biến tính các thành phần của thịt phụ thuộc chế độ cấp đông. Vì thế chọn chế độ bảo quản phù hợp là điều hết sức quan trọng. Lợi ích cấp đông không chỉ lưu giữ gần như nguyên vẹn được các thành phần dinh dưỡng, giá trị cảm quan và hạn chế sự phát triển của vi sinh vật [1]. Trong đó, thời gian cấp đông bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố khác

nhau như nhiệt độ nguyên liệu ban đầu, nhiệt độ phòng cấp đông, vận tốc dòng khí lạnh. Từ những lý do trên, bài báo này xây dựng quan hệ giữa nhiệt độ và vận tốc ảnh hưởng đến thời gian cấp đông thịt heo nửa con.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Thực nghiệm

2.1.1. Xây dựng thực nghiệm

Quá trình cấp đông thịt heo ½ con được thực hiện tại Trung tâm thí nghiệm thực hành, Trường Đại Học Công Nghiệp Thực Phẩm, Tp

Hồ Chí Minh. Kho lạnh có kích thước dài (4000 mm), rộng (3000 mm) và cao (1800 mm). Thịt được treo lên thanh ngang phía trên cách trần 420 mm và sàn 460mm. Điều này giúp quá trình tiếp xúc dòng khí lạnh tốt nhất, xuyên suốt quá trình cấp đông. Dòng lạnh cung cấp dòng khí ($t = (-35 \pm 0.1)^\circ\text{C}$, $\omega = (2.5 \pm 0.1) \text{ m/s}$). Nhiệt độ tại tâm sản phẩm ở 9 mẫu khác nhau (hình 1) được ghi nhận liên tục qua hệ thống cảm biến nhiệt độ khi đạt -18°C tại mọi điểm. Số liệu được ghi nhận sau mỗi 100s.

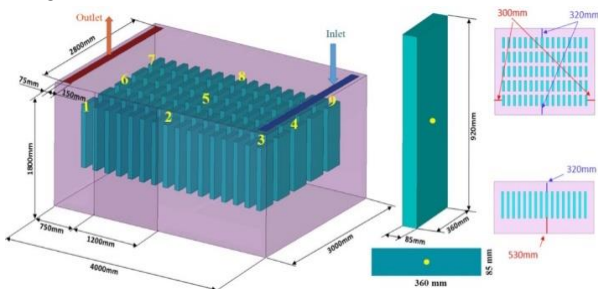
2.1.2. Tiến trình thực nghiệm

Thịt được đặt mua của hệ thống cung cấp Vissan phù hợp yêu cầu của mẫu thí nghiệm nửa con. Trước khi tiến hành cấp đông, thịt được xử lý nhiệt đạt đồng nhất 25°C . Đầu dò nhiệt sẽ đặt tại tâm sản phẩm. Quá trình cấp đông ở 9 chế độ nhiệt và vận tốc khác nhau. Hệ thống sẽ dừng lại khi các điểm ghi nhận đạt (-18°C) . Sau quá trình cấp đông, sản phẩm sẽ được rã đông trong 12h để tiến hành cho quá trình tiếp theo.

2.2. Xây dựng mô hình toán cho quá trình mô phỏng

2.2.1. Xây dựng mô hình vật lý.

Mô hình hóa thịt heo nửa con dạng hình hộp được có kích thước (920x360x85)mm được treo thẳng đứng trong kho cấp đông. Khối lượng mỗi miếng thịt 30.15 kg. Mô hình này được đo theo kích thước mẫu gần đúng với sản phẩm thực tế. Mẫu được xếp thành 5 hàng, mỗi hàng treo 16 miếng thịt với kích thước bố trí như hình 1. Dòng khí lạnh vào và ra được bố trí ở 2 đầu kho. Nhiệt độ sẽ được ghi nhận tại vị trí tâm cách đều theo chiều dọc, ngang của của mẫu.



Hình 1. Mô hình bố trí nguyên liệu trong phòng lạnh

2.2.2. Tạo lưới.

Miền toán học chính được mô tả trên sản phẩm. Quá trình chia lưới được thực hiện không đồng nhất. Với ưu tiên kết quả thật chính xác tại tâm sản phẩm. Vì thế, lưới được chia mịn hơn tại tâm và sẽ dần thô hơn ra phía ngoài [2]. Tại phía tâm, lưới chia 5 lớp, lớp đầu

0.6 mm tăng dần 1.2 lần ra ngoài. Tổng số phần tử 1,384,632.

2.2.3. Mô hình toán

Mẫu có kích thước theo chiều dài rất lớn so với chiều rộng và dày, truyền nhiệt theo phương dọc sản phẩm rất nhỏ nên có thể bỏ qua, nên xem nhiệt độ chỉ thay đổi theo hai hướng rộng và dày của mẫu, tương ứng với phương x và y .
 $T = f(x, y, \tau)$

2.2.3.1. Điều kiện biên

Quá trình cấp đông thịt được mô tả bằng phương trình vi phân dẫn nhiệt không ổn định với điều kiện biên loại 3, phương trình toán học mô tả và các điều kiện sau [3]:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (1)$$

Điều kiện đầu:

$$\tau = 0, \quad T = t_0 = 25^\circ\text{C}.$$

Điều kiện biên, tỏa nhiệt tại mặt ngoài sản phẩm:

$$\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \alpha(T_m - T_k) \quad (2)$$

Quá trình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm ANSYS 19.2 Khí động học bên trong kho được mô tả theo phương trình Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS). Quá trình truyền nhiệt theo mô hình rối $k-\varepsilon$ và the Enhanced Wall Treatment (EWT). Dòng khí lạnh truyền nhiệt đối lưu cưỡng bức bên trong kho cấp đông, bỏ qua bức xạ nhiệt và bay hơi ẩm.

2.2.3.2. Đặc tính nhiệt của nguyên liệu và dòng khí

Mô phỏng quá trình cấp đông thịt heo bản chất là giải bài toán dẫn nhiệt không ổn định với điều kiện biên loại 3, với nhiệt độ môi trường cấp đông $t_m = (-40 \div -35)^\circ\text{C}$, hệ số trao đổi nhiệt đối lưu trên bề mặt sản phẩm được xác định theo [4]:

$$\alpha = 25\omega^{0.6} (W.m^{-2}K^{-1}) \quad (3)$$

Đối với mẫu là thịt heo trong bài nghiên cứu này, xem như toàn bộ khối thịt đồng nhất về thành phần. Thịt heo có tỷ lệ protein: 22.32%, fat: 5.71%, nước 68.26% và một số thành phần khác. Theo [5], các giá trị tính chất nhiệt của vật liệu: nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số cấp nhiệt, khối lượng riêng phụ thuộc vào nhiệt

độ và thành phần. Tính chất nhiệt vật lý này được xác định như sau:

Hàm lượng băng phụ thuộc vào nhiệt độ được xác định theo phương trình (4) Chen (1985) [4]:

$$x_i = \frac{1.105x_{w0}}{0.8765 + \ln(t_f - t + 1)} \quad (4)$$

Khối lượng riêng và hệ số dẫn nhiệt được xác định theo Choi, Y. and Okos M. R (1986) [5] như sau:

$$\rho = \frac{(1 - \varepsilon)}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\rho_i}} \quad (5)$$

Hệ số dẫn nhiệt

$$\lambda = \sum_{i=1}^n x_i^v \lambda_i \quad (6)$$

Nhiệt dung riêng nguyên liệu khi cấp đông được xác định theo phương trình (7) Schwartzberg, H.G.,(1976) [6]:

$$C_a = C_u + (x_b - x_{w0})\Delta C + Ex_s \left[\frac{RT_0^2}{M_w t^2} - 0.8\Delta C \right] \quad (7)$$

Trong đó:

$$M_s = \frac{x_s RT_0^2}{-(x_{w0} - x_b)L_0 t_f} : \text{Khối lượng phân tử của chất khô;}$$

tử của chất khô;

$$x_{ice} = \frac{x_s RT_0^2 (t_f - t)}{M_s L_0} : \text{Hàm lượng băng;}$$

$x_b = 0,4x_p$: Thành phần nước không kết đông;

$$E = \frac{M_w}{M_s} : \text{Tỷ số giữa khối lượng phân tử}$$

nước đối với khối lượng phân tử chất khô;

$\Delta C = c_w - c_{ice}$: độ chênh lệch giữa nhiệt dung riêng của nước và băng;

$$x_i^v = \frac{x_i / \rho_i}{\sum_{i=1}^n (x_i / \rho_i)} : \text{thành phần thể tích;}$$

2.2.3.3. Quá trình mô phỏng

Quá trình cấp đông là quá trình phức tạp, bao gồm quá trình dẫn nhiệt, chuyển pha của nước bên trong sản phẩm. Thời gian cấp đông

diễn ra rất lâu để nhiệt tại tâm đạt (-18°C). Chọn nhiệt độ ban đầu để cài đặt cho phần mềm là rất quan trọng, quyết định thời gian của quá trình. Vì thế giai đoạn đầu, bài toán sẽ chạy chế độ Steady đến hội tụ. Sử dụng kết quả cài đặt lại cho quá trình chạy chế độ không ổn định [7]. Với phương pháp chạy như trên, thời gian mô phỏng giảm hơn 40%. Với bước thời gian 50 giây, kích thước phần tử khi mesh (Δx) 40mm.

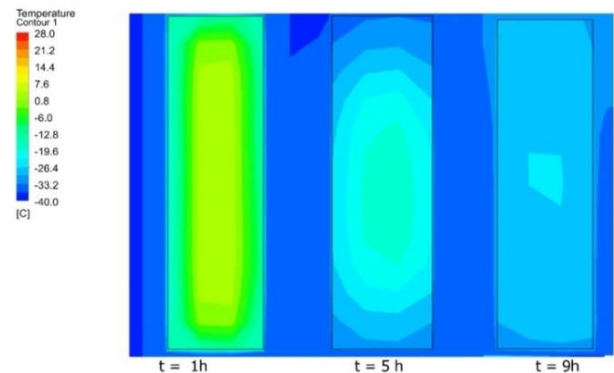
Sử dụng phương pháp số tìm giá trị của các tính chất vật lý của thịt theo nhiệt độ. Thiết lập định nghĩa hàm: “user specific heat”, “user thermal conductivity”, “user density” để nhập biến array tương đương các giá trị theo nhiệt độ của mẫu. Thêm dữ liệu vào Interpreted – Functions để hoàn thiện khai báo dữ liệu cho Ansys [8]. Đây là bước cực kỳ quan trọng giúp quá trình tính chính xác thời gian cấp đông [9], [10].

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN.

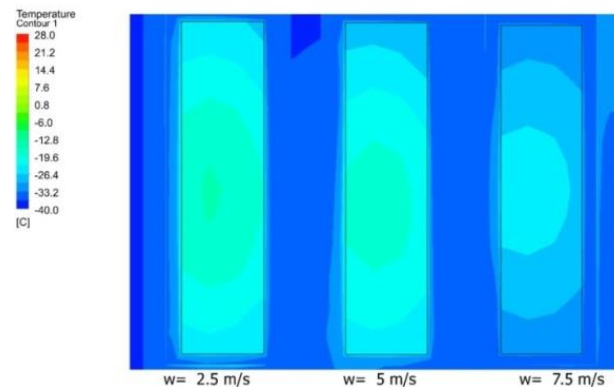
3.1. Kết quả mô phỏng

3.1.1. Trường nhiệt độ phân bố

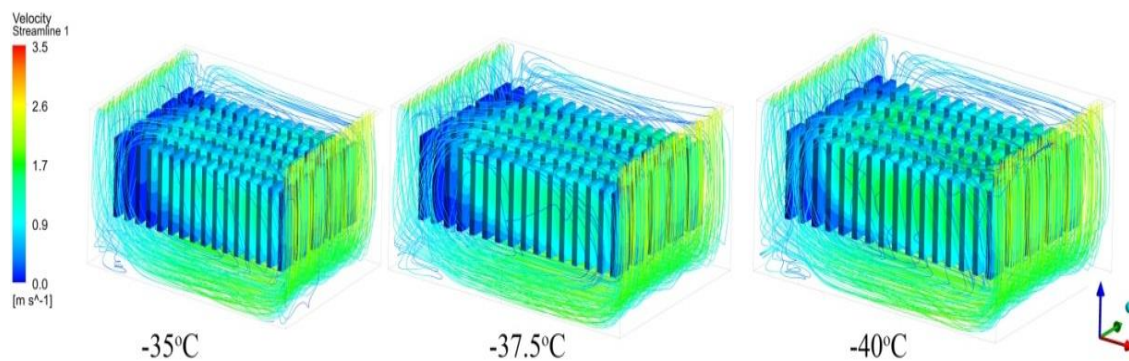
Kết quả mô phỏng thể hiện trên hình (2-8)



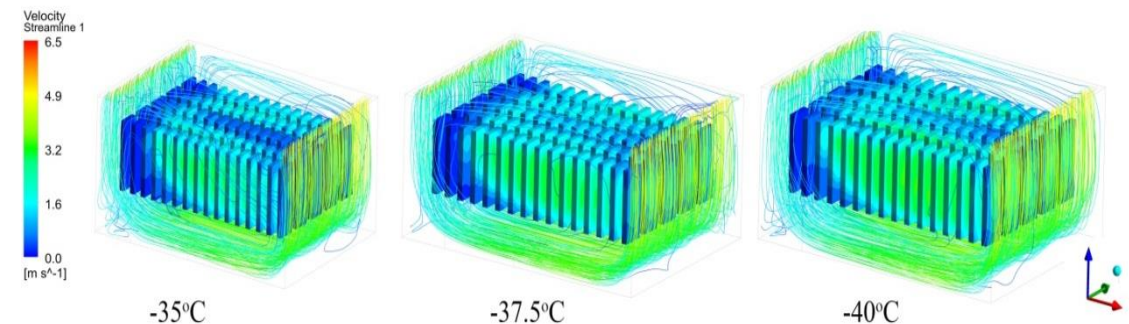
Hình 2. Trường nhiệt mặt cắt tâm phương ngang của mẫu ở -40°C



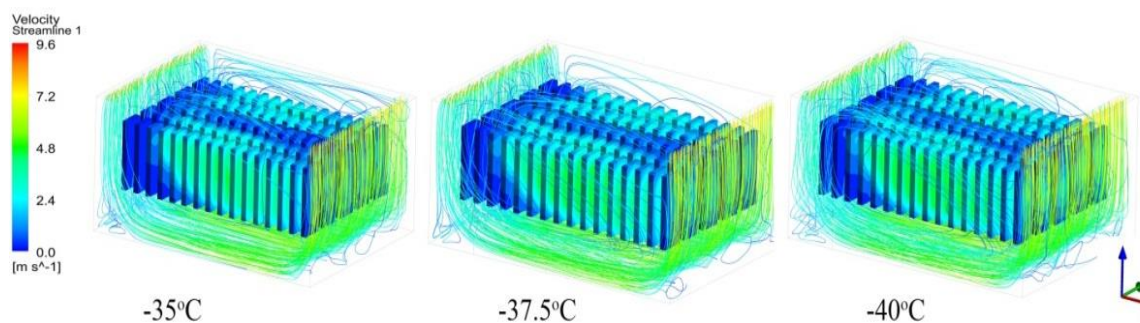
Hình 3. Trường nhiệt mặt cắt tâm phương ngang của mẫu ở -35°C



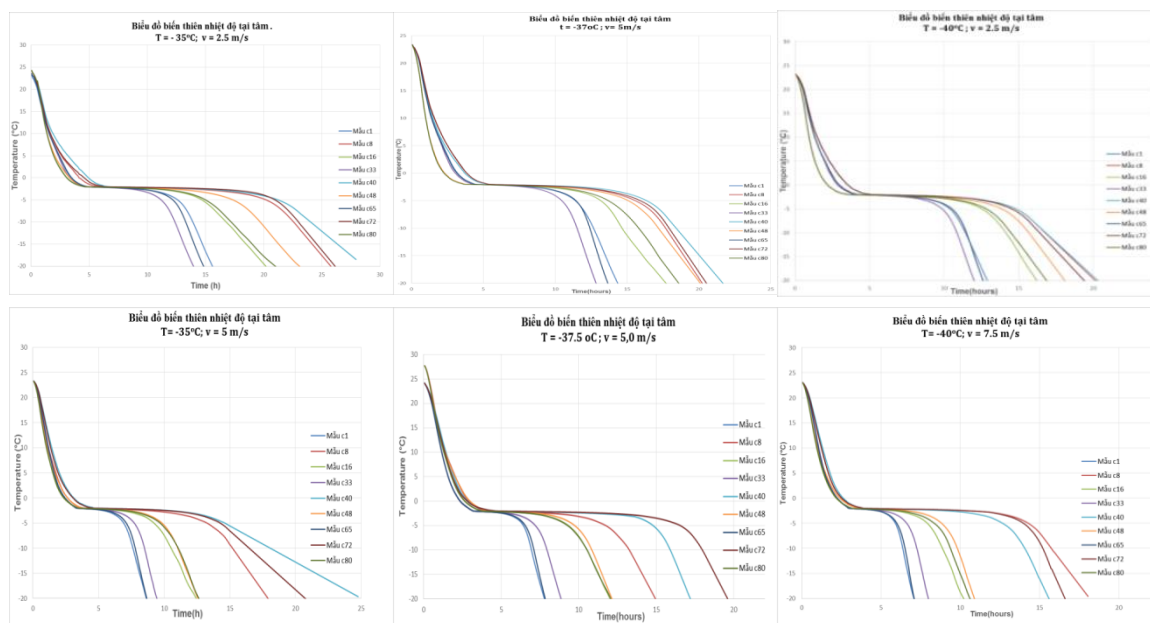
Hình 4: Phân bố dòng khí lạnh vận tốc 2,5 m/s

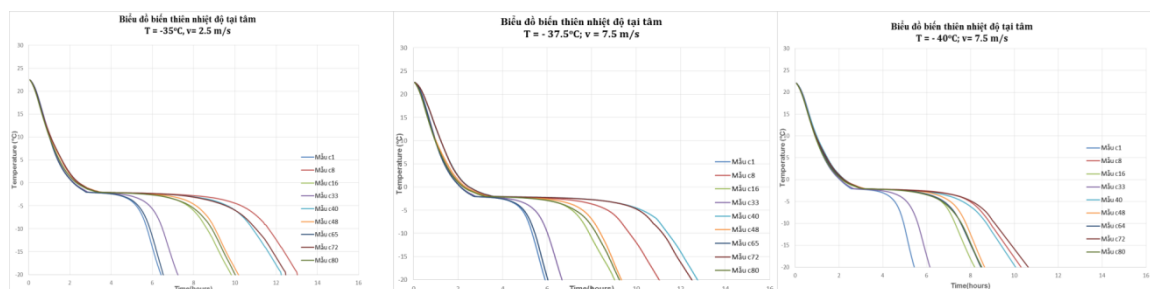


Hình 5: Phân bố dòng khí lạnh vận tốc 5 m/s

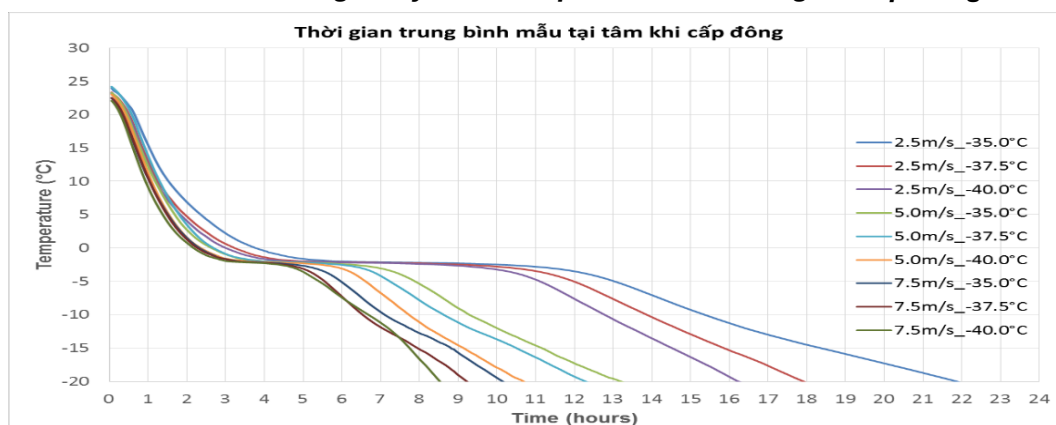


Hình 6: Phân bố dòng khí lạnh vận tốc 7.5 m/s





Hình 7: Ảnh hưởng các yếu tố và vị trí mẫu đến thời gian cấp đông



Hình 8: Thời gian cấp đông trung bình ở các chế độ khác nhau

3.2 So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm.

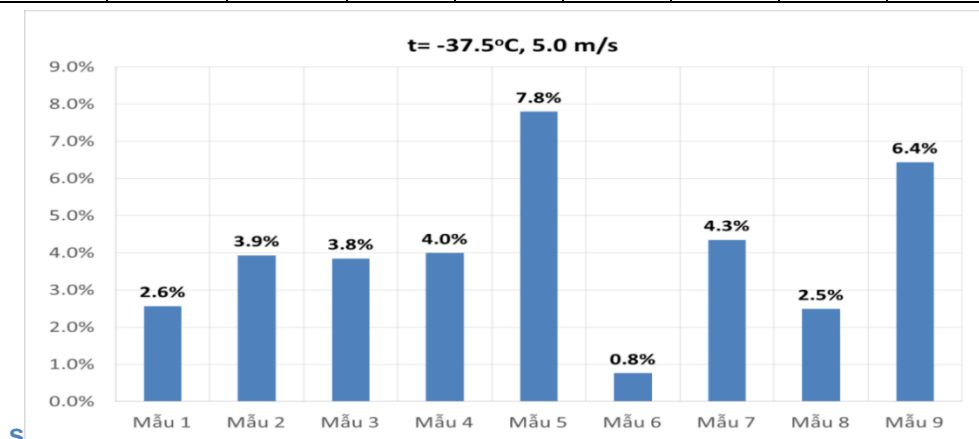
Quá trình thực nghiệm được thực hiện tại khu thực hành Trường Đại học Công Nghiệp Thực Phẩm Tp HCM. Nhiệt độ được ghi và lưu trên thiết bị lưu nhiệt Model R3-NM1-R; No:OLO24692 MSYSTEM. Kết quả thu được được thể hiện trên bảng 1, hình 9 và hình 10.

Kiểm chứng thực nghiệm tại chế độ hoạt động (-37.5°C) và 5.0m/s tại 9 mẫu, độ lệch chuẩn dương giữa thời gian cấp đông mô phỏng và

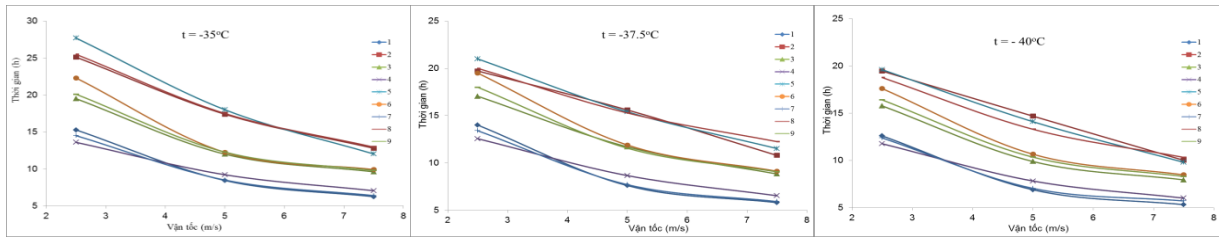
thực nghiệm cao nhất $\delta_{\max} = 7.8\%$, thấp nhất 0.8%. Sai số trung bình 4.0%. Điều này có thể lý giải sai số do bản chất sai lệch về thành phần của, ảnh hưởng đến các giá trị nhiệt vật lý mẫu. Các giá trị nhiệt vật lý được lấy gần đúng theo tỷ lệ dinh dưỡng của thịt nên các thông số nhiệt dung riêng, enthalpy và khối lượng riêng có sai số lớn làm ảnh hưởng đến quá trình mô phỏng.

Bảng 1: Thời gian cấp đông mô phỏng và thực nghiệm chế độ -37.5°C và 5.0m/s

Thứ tự	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3	Mẫu 4	Mẫu 5	Mẫu 6	Mẫu 7	Mẫu 8	Mẫu 9
Mô phỏng (h)	7.60	15.60	11.70	8.66	15.40	11.89	7.70	15.28	11.56
Thực nghiệm (h)	7.8	15.01	11.25	9.02	14.2	11.8	8.05	14.9	12.35



Hình 91. Độ lệch chuẩn dương thời gian cấp đông giữa mô phỏng và thực nghiệm.



Hình 20. Ảnh hưởng vận tốc đến thời gian cấp đông.

3.3 Ảnh hưởng của các yếu tố đến thời gian cấp đông.

Thời gian cấp đông sản phẩm chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố nhiệt độ, vận tốc dòng khí lạnh[11],[12]. Quá trình khảo sát bằng thực nghiệm và mô phỏng được thể hiện trên bảng 1 và hình 9.

Ảnh hưởng vận tốc đến thời gian cấp đông.

Khi tăng vận tốc dòng khí từ 2.5 m/s lên 5.0 m/s, thời gian cấp đông giảm khoảng 5.6h. Trong khi đó, vận tốc 5.0 m/s lên đến 7.5 m/s, thời gian giảm ít hơn, khoảng 2.5h. Tỷ lệ giữa thời gian cấp đông và vận tốc dòng khí lạnh có xu hướng giảm dần. Có thể thấy khi tăng vận tốc dòng, thời gian cấp đông giảm đi đáng kể nhưng độ giảm thời gian cấp đông ở tốc độ thấp sẽ lớn hơn ở tốc độ cao.

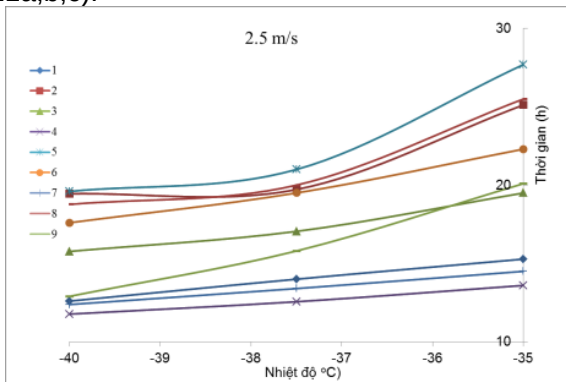
Ảnh hưởng nhiệt độ đến thời gian cấp đông.

- Có thể thấy tỷ lệ giữa biến thiên thời gian cấp đông và biến thiên nhiệt độ dòng khí có xu hướng giảm đều, gần như tuyến tính.

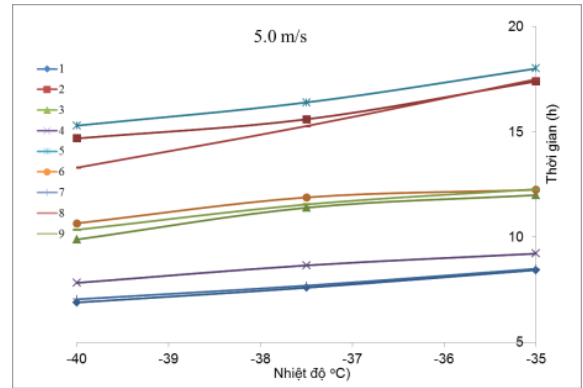
- Ở vận tốc 2.5 m/s, vị trí 2,5,8, thời gian giảm khoảng 5.2 h khi hạ từ -35 °C xuống -37.5°C. Và hạ tiếp nhiệt độ xuống -40 °C, thời gian giảm khoảng 2h. - Ở vận tốc 7.5m/s, khi thay đổi nhiệt độ thì thời gian giảm thấp nhất so với các chế độ khác, khoảng 0.5h.

- Trong khi đó, chế độ 2,5 m/s, khoảng thời gian giảm đáng kể nhất, khoảng 3.1h từ -35°C xuống -37.5°C.

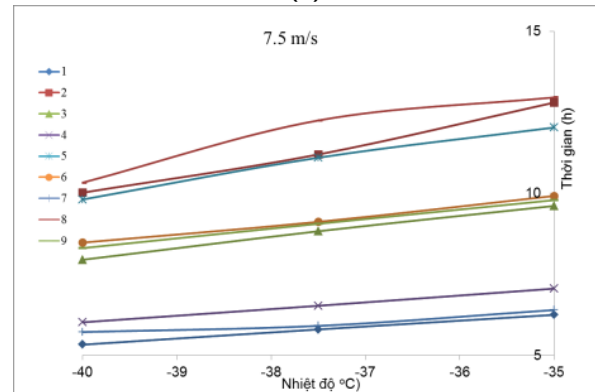
Có thể thấy rằng khi giảm nhiệt độ không khí lạnh sẽ làm giảm đáng kể thời gian cấp đông. Tuy nhiên, ảnh hưởng của nhiệt độ nhỏ hơn ảnh hưởng của vận tốc không khí lạnh (Hình 11a,b,c).



(a)



(b)



(c)

Hình 31. Ảnh hưởng nhiệt độ dòng khí đến thời gian cấp đông.

IV. KẾT LUẬN

Các kết quả tính toán trên Ansys so với kết quả thực nghiệm cùng điều kiện có độ lệch chuẩn dương thời gian trung bình 4.0%. Với tính chất vật liệu không đồng nhất về thành phần, quá trình cấp đông nhiều giai đoạn phức tạp. Dẫn đến các giá trị vật lý nhiệt như khối lượng riêng, hệ số dẫn nhiệt, nhiệt dung riêng,... có sai số đáng kể. Nên sai số giữa mô phỏng và thực nghiệm trung bình như trên có thể chấp nhận được. Dữ liệu bài nghiên cứu này có thể làm cơ sở cho các bài toán thiết kế hệ thống lạnh trong cùng điều kiện. Cũng như làm cơ sở cho bài toán về tối ưu hóa thời gian cấp đông khi thay đổi các yếu tố ảnh hưởng, vị trí sản phẩm trong kho.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lene Meinert, "Stability of pork during frozen storage", Consultant, Danish Meat Research Institute.
- [2] Duy K. Hoang, Simon J. Lovatt, Jamal R. Olatunji, James K. Carson, "Validated numerical model of heat transfer in the forced air freezing of bulk packed whole chickens", International Journal of Refrigeration 118 (2020) 93–103.
- [3] Đỗ Hữu Hoàng, "Nghiên cứu mô phỏng và xác định chế độ cấp đông cá tra fillet trên băng chuyền IQF", Tạp chí Khoa học công nghệ và thực phẩm 12, 2017.
- [4] Chen, C.S. (1985b). *Thermodynamic Analysis of the Freezing and Thawing of Foods: Ice Content and Mollier Diagram*. Journal of Food Science 50(4):1163-1166..
- [5] Choi, Y. and Okos M. R. - *Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods*, In: *Food Engineering and Process Applications 1* (1986) 93-101.
- [6] Schwartzberg, H.G., *Effective Heat Capacities for the Freezing and Thawing of Food*. Journal of Food Science 41(1) (1976) pp.152-156;
- [7] Willix, J., Harris, M.B., and Carson, J.K., *Local surface heat transfer coefficients on a model beef side*. Journal of Food Engineering, 74, (2006), pp. 561–567;
- [8] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Tutorial Guide, 01, 2019..
- [9] Cleland, A.C., and R.L. Earle. 1982b. Freezing time prediction for foods—A simplified procedure. International Journal of Refrigeration 5(3):134-140.
- [10] Cleland, A.C., and R.L. Earle. 1984. Freezing time predictions for different final product temperatures. Journal of Food Science 49(4):1230-1232.
- [11] Đỗ Hữu Hoàng, "Nghiên cứu mô phỏng và xác định chế độ cấp đông cá tra fillet trên băng chuyền IQF", Tạp chí Khoa học công nghệ và thực phẩm 12, 2017.
- [12] Pham Q. T. - *An approximate analytical method for predicting freezing times for rectangular blocks of food stuffs*, International Journal of Refrigeration 8 (1985) 3-47.

SIMULATION HALF PORKS FREEZING BY USING ANSYS

Vo Van Sim, Do Huu Hoang

Faculty of Chemical Engineering, Ho Chi Minh City University of Food Industry

E-mail: hoangdhuu@hufi.edu.vn

ABSTRACT:

This article presents the results of half- pork freezing time by CFD. Freezing pork is the process of heat conduction with phase change including heat and mass transfer occur simultaneously. At the freezing point, the physical thermal properties of the product change dramatically. Using ANSYS software to simulate the process, determine the time when the center of products reach -18 °C. Error of simulating and experimental freezing time are 4%. Based on simulation results assessing the effects of temperature and airflow velocity on freezing time, the data can be used to optimize operating conditions and the design of pork freezer storage.

Key words: Ansys, freezing pork, CFD, freezing simulation, freezing time.