

**MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT
CẤP ĐÔNG CÁ NGỪ TRONG TỦ LẠNH 3 SAO (-18⁰C)
HEAT TRANSFER PROCESS SIMULATION FOR TUNA FREEZING
IN 3-STAR REFRIGERATOR (-18deg C)**

Lê Thành Niên

Trường Cao Đẳng Kỹ Nghệ II, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 21/2/2017, ngày phản biện đánh giá 24/2/2017, ngày chấp nhận đăng 27/2/2017

TÓM TẮT

Sự tiến bộ của khoa học, kỹ thuật đòi hỏi người kỹ sư thực hiện những đề án ngày càng phức tạp, đắt tiền và đòi hỏi độ chính xác, an toàn cao và đạt tối ưu cao nhất. Trong ngành kỹ thuật nhiệt cũng đòi hỏi những yêu cầu trên. Đặc biệt là tính toán thiết bị truyền nhiệt, trao đổi nhiệt một cách có hiệu quả và tối ưu nhất. Bài báo này trình bày kết quả tính toán truyền nhiệt cấp đông cá ngừ ở nhiệt độ (-18⁰C) bằng phương pháp mô phỏng theo phần mềm Comsol, kết quả thực nghiệm để kiểm chứng cho kết quả mô phỏng mặc định của bài toán này là xác định sự thay đổi trường nhiệt độ và thời gian cấp đông cá ngừ trong tủ lạnh phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường cấp đông, kích thước mẫu cá và vận tốc gió cấp đông. Kết quả tính toán lý thuyết, đo đạc thực nghiệm được so sánh với nhau, tác giả nhận thấy rằng nhiệt độ bề mặt và tâm của mẫu cá ở các chế độ cấp đông khác nhau thì sai số tuyệt đối không quá 7⁰C.

Từ khóa: Cấp đông; thời gian cấp đông; nhiệt độ cấp đông; cấp đông cá ngừ; mô phỏng truyền nhiệt.

ABSTRACT

The advancement of science and engineering requires engineers to make more complex, expensive projects that require the highest levels of accuracy, safety and optimization. Such requirements are also required in thermal engineering especially for calculating the heat transfer equipment and optimal heat transfer process. This paper presents the results of calculating heat transfer for tuna freezing at temperature (-180C) by the software Comsol Multiphysics simulation and experimental results to verify the simulation results. The default task is to identify changes in temperature and time of freezing tuna in the refrigerator in accordance with the ambient temperature, the sample size of fish and freezing wind velocity. When comparing the theoretical calculation results and experimental measurements, the authors found that the surface and center temperature of the fish samples in different freezing regimes had absolute error not exceeding 7⁰C.

Keywords: Freezing; freezing time; freezing temperature; frozen tuna; heat transfer simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chất lượng sản phẩm thủy, hải sản phụ thuộc vào cá nguyên liệu, quy trình công nghệ chế biến, trong đó quá trình bảo quản sau khi đánh bắt có vai trò rất quan trọng, đặc biệt là quá trình cấp đông sản phẩm. Vì vậy, quá trình cấp đông cá ngừ cũng ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng sản phẩm cũng như khả năng xuất khẩu hàng hóa. Để làm

được điều đó, chúng ta phải xác định được các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình cấp đông như: thông số nhiệt vật lý của thực phẩm, nhiệt độ môi trường cấp đông, vận tốc gió, kích thước sản phẩm. Để giải quyết vấn đề này, tác giả đã xây dựng mô hình cấp đông cá ngừ trong tủ lạnh -18⁰C và tiến hành mô phỏng sự thay đổi trường nhiệt độ và thời gian cấp đông bằng phần mềm Comsol.

Mô phỏng quá trình truyền nhiệt bên trong thực phẩm kết đông và quá trình trao đổi nhiệt với môi trường, các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình cấp đông cá ngừ trong tủ lạnh -18°C là những nội dung chính mà bài báo sẽ đề cập.

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

Stefan (1889) đã đưa ra phương trình vi phân dẫn nhiệt mô tả quá trình làm lạnh kết đông thực phẩm viết cho phân tử bất kỳ tại thời điểm τ như sau:

$$c(t)\rho(t)\frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda'(t)\nabla^2 t + q(\tau) \quad (1)$$

$c(t)$: Nhiệt dung riêng phụ, J/kgK

$\rho(t)$: Khối lượng riêng, kg/m³

$\lambda(t)$: Hệ số dẫn nhiệt, W/mK

$q_v(r, \tau)$: Nguồn nhiệt bên trong, W/m³

Điều kiện biên:

Theo phương ox:

$$\begin{cases} -\lambda_x(T)\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\pm\delta_x} = \pm\alpha(T-T_f) \\ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Theo phương oy:

$$\begin{cases} -\lambda_y(T)\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=\pm\delta_y} = \pm\alpha(T-T_f) \\ \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Điều kiện ban đầu:

$$\tau = 0 \quad T = T(x, y, 0) = \text{const}$$

$$\begin{cases} \lambda(T)\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q_v = \rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} \\ \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} \\ \pm\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\pm\delta_x} = \pm\frac{\alpha}{\lambda(T)}(T-T_f)_{x=\pm\delta_x} \\ \pm\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=\pm\delta_y} = \pm\frac{\alpha}{\lambda(T)}(T-T_f)_{y=\pm\delta_y} \\ \tau = 0; T = T(x, y, 0) = \text{const} \end{cases} \quad (4)$$

Kết hợp với các điều kiện biên (loại 3) và điều kiện ban đầu chúng ta có hệ phương trình (4) có thể giải được và cho phép xác định trường nhiệt độ, thời gian cấp đông của thực phẩm [1].

3. MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT CẤP ĐÔNG CÁ NGỪ

3.1 Lựa chọn đối tượng nghiên cứu

Đối tượng thực phẩm được lựa chọn nghiên cứu là cá ngừ dạng khoanh, có chiều dày 30mm. Thành phần khối lượng cá ngừ như sau: Thành phần nước $x_{w0} = 71,21\%$, thành phần khối lượng Protein $x_p = 15,25\%$, thành phần khối lượng mỡ $x_f = 12,24\%$, thành phần khối lượng tro $x_a = 0,97\%$, thành phần Carbonhydrat $x_{ch} = 0,32\%$. Nhiệt độ điểm kết đông là $t_{cr} = -2,2^{\circ}\text{C}$ [2].

3.2 Sử dụng phần mềm Comsol mô phỏng quá trình truyền nhiệt cấp đông cá ngừ

Trong bài toán dẫn nhiệt [1,3], phương trình vi phân dẫn nhiệt được viết:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right) + q_v - \rho c\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (5)$$

Để giải được phương trình (5) chúng ta cần lấy điều kiện biên theo [3]:

$$\begin{aligned} & -\int_V \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_A}{\partial x} + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_A}{\partial y} - N_A q_v + N_A \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) dV - \\ & - \int_S N_A q dS - \int_S N_A \alpha (T_m - T_k) dS = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Cần phải xác định các đạo hàm $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial \tau}$

Đạo hàm của nhiệt độ T theo tọa độ x và y: Nhiệt độ trong phần tử xác định theo hàm nội suy N_B và nhiệt độ tại các nút T_B . Hàm nội suy N_B chọn là hàm bậc nhất của x và y, còn nhiệt độ T_B tại các nút phần tử không đổi tại mỗi thời điểm theo [3].

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[N_i \quad N_j \dots \dots N_n \right] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ \dots \\ T_n \end{Bmatrix} = \frac{\partial N_B}{\partial x} T_B \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left[N_i \quad N_j \dots \dots N_n \right] \left\{ \begin{matrix} T_i \\ T_j \\ \dots \\ T_n \end{matrix} \right\} = \frac{\partial N_B}{\partial y} T_B \quad (8)$$

N_A, N_B : Hàm nội suy

Đạo hàm của nhiệt độ theo thời gian: vì N_B là hàm bậc nhất của x và y, không phụ thuộc vào thời gian [3].

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[N_i \quad N_j \dots \dots N_n \right] \left\{ \begin{matrix} T_i \\ T_j \\ \dots \\ T_n \end{matrix} \right\} = N_B \frac{\partial T_B}{\partial \tau} \quad (9)$$

Trong số hạng $\int_S N_A \alpha (T_m - T_k) dS$, T_m là nhiệt độ tại nút bề mặt, do đó:

$$T_m = T_B = N_B T_B \quad (10)$$

Thay các đạo hàm trên và nhiệt độ T_m vào (2.8) dẫn đến:

$$\left[\int_V (\rho c N_A N_B) dV \right] \left\{ \frac{\partial T_B(\tau)}{\partial \tau} \right\} + \left[\int_V \lambda \left(\frac{\partial N_A}{\partial x} \frac{\partial N_B}{\partial x} + \frac{\partial N_A}{\partial y} \frac{\partial N_B}{\partial y} \right) dV + \int_V (\alpha N_A N_B) dV \right] \{ T_B(\tau) \} = \int_S N_A q_v dS - \int_S N_A q dS + \int_S \partial N_A T_k dS \quad (11)$$

Phương trình (11) chính là phương trình đặc trưng của phần tử hữu hạn 2 chiều có bức xạ và đối lưu tại biên và nguồn trong [3].

Viết gọn lại ở dạng ma trận:

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial \tau} \right\} + [K] \{ T \} = \{ f \} \quad (12)$$

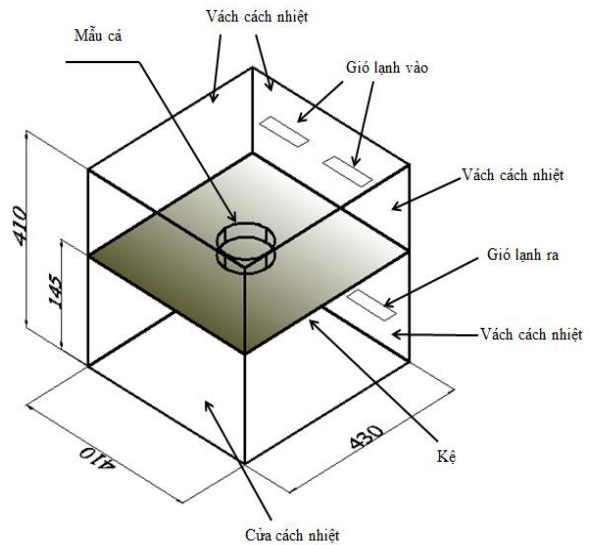
Trong đó:

$$[C] = \left[\int_V (\rho c [N]^T [N]) dV \right] - \text{là nhiệt dung ma trận.}$$

$$[K] = \left[\int_V (\lambda [B]^T [B]) dV + \int_S (\alpha [N]^T [N]) dV \right] - \text{là ma trận dẫn nhiệt.}$$

Bài toán nêu trên (4) được giải bằng phần mềm Comsol, kết quả thể hiện hình 4 đến hình 7.

3.3 Nghiên cứu thực nghiệm cấp đông cá ngừ



Hình 1. Mô hình thực nghiệm.

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình và lời giải dựa trên phần mềm Comsol, tác giả đã tiến hành thực nghiệm nhằm xác định biến thiên trường nhiệt độ trong thực phẩm kết đông. Nhiệt độ môi trường kết đông là -18°C , vận tốc gió là 2,5 m/s. Thiết bị sử dụng trong thí nghiệm là tủ lạnh ba sao (-18°C), kèm theo một thiết bị đo tự ghi nhiệt độ 2 kênh đo nhiệt độ tại bề mặt và tâm của mẫu cá và lưu trữ trên máy tính.

Các thông số nhiệt vật lý của thực phẩm bao gồm: tỷ lệ nước đóng băng, nhiệt dung riêng, enthalpy, hệ số dẫn nhiệt và khối lượng riêng.

Tỷ lệ nước đóng băng: xác định theo công thức [4]

$$x_{ice} = \frac{1,105 \cdot x_{w0}}{0,7138 + \ln(t_f - t + 1)} \quad (13)$$

Nhiệt dung riêng và enthalpy: xác định theo [1,5,6,7]

$$C_e(T) \rho(T) \frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \nabla \left(\lambda(T) \nabla T(\vec{r}, \tau) \right) \quad (14)$$

Enthalpy :(ASHRAE, 2010)

$$h(T) = \int_{-40}^t C_e(t) dT \quad (15)$$

Hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng theo [7,9]

$$\lambda(T) = \sum_i \lambda_i \cdot \frac{K_i - L_i}{\lambda_i - L_i} \quad (16)$$

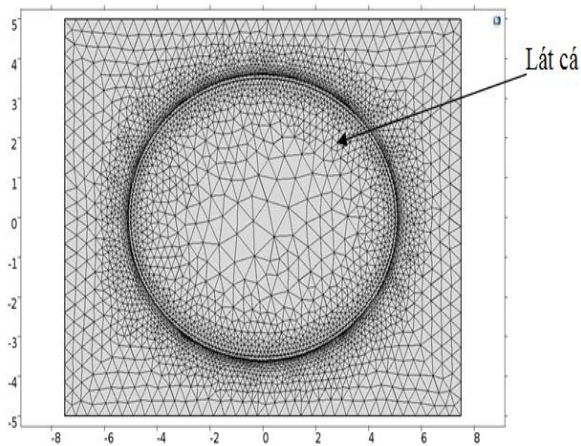
$$V_j = \frac{x_j \rho}{\rho_j} : \text{thành phần thể tích thứ } j.$$

Hệ số trao đổi nhiệt bề mặt được xác định theo [10]

$$\alpha = 25 \times \omega^{0,6} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (17)$$

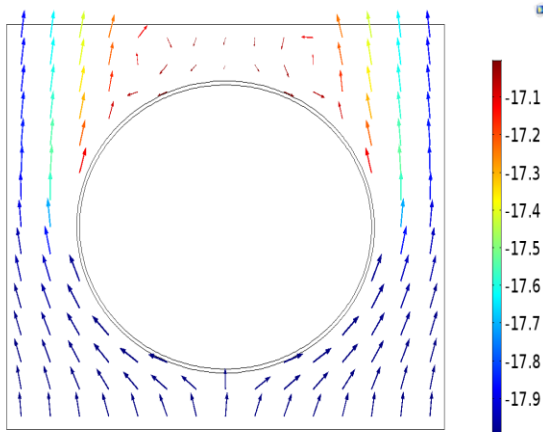
4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình không gian kết đông và khối thực phẩm được xây dựng trên phần mềm Comsol. Khối thực phẩm được chia lưới như hình 2.

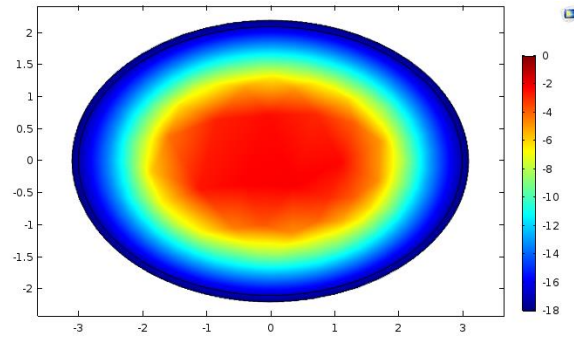


Hình 2. Chia lưới.

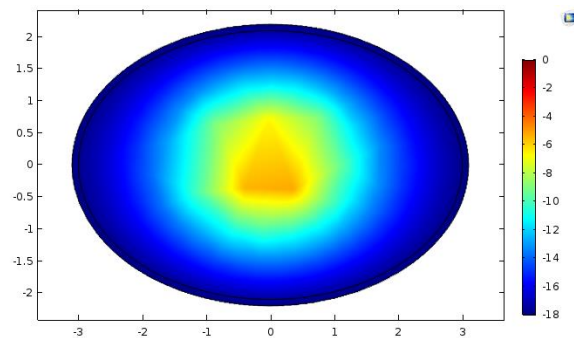
Ứng với các điều kiện môi trường kết đông, dòng không khí chuyển động qua mẫu thực phẩm như hình 3.



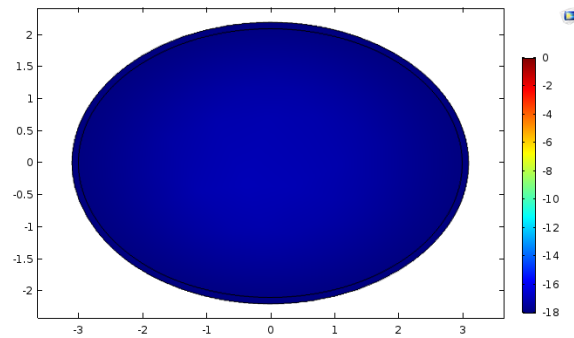
Hình 3. Dòng không khí chuyển động.



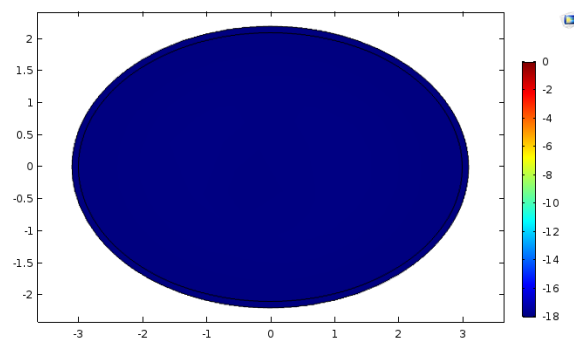
Hình 4. Trường nhiệt độ mẫu cá sau 30 phút.



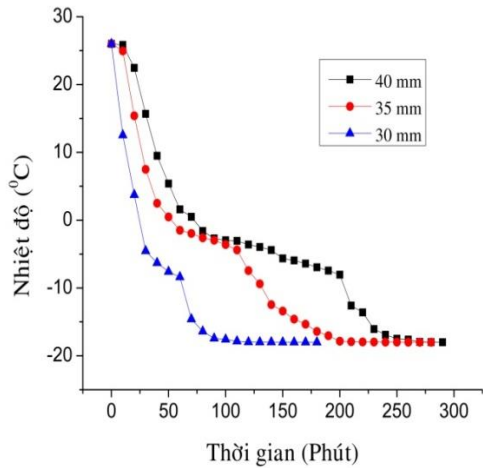
Hình 5. Trường nhiệt độ mẫu cá sau 60 phút.



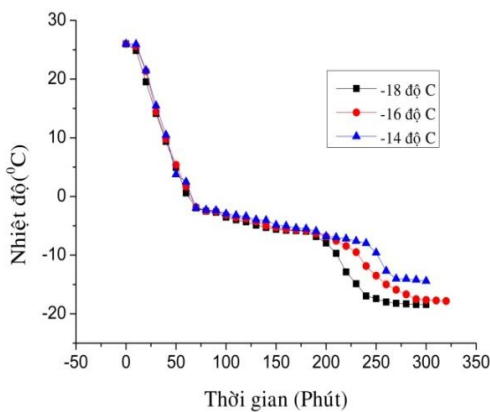
Hình 6. Trường nhiệt độ mẫu cá sau 90 phút.



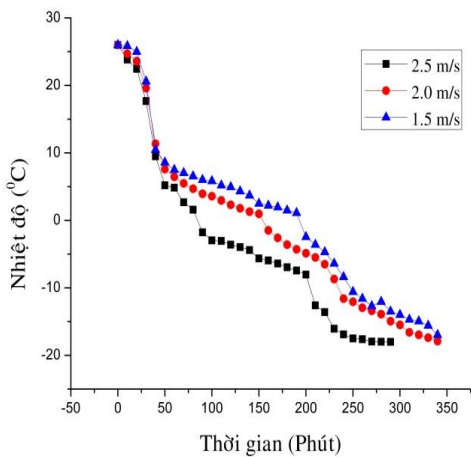
Hình 7. Trường nhiệt độ mẫu cá sau 120 phút.



Hình 8. Ảnh hưởng chiều dày sản phẩm đến thời gian cấp đông.



Hình 9. Ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường cấp đông đến thời gian cấp đông.



Hình 10. Ảnh hưởng của vận tốc đến thời gian cấp đông

Kết quả tính toán nhiệt độ tại tâm của mẫu cá được thể hiện trên hình 4, hình 5, hình 6, hình 7. Quan sát kết quả thu được ta nhận thấy kết quả tính toán lý thuyết đã phản

ánh đúng xu hướng biến biên của trường nhiệt độ bên trong tâm thực phẩm. Sai số của trường nhiệt độ tại tâm nhỏ hơn 7K tại mọi thời điểm, tác giả cũng nhận thấy rằng thời gian cấp đông nhiệt độ tâm thực phẩm đạt -18°C chênh lệch sai số giữa lý thuyết và thực nghiệm là khoảng 10 phút. Qua đó, tác giả đã nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng chiều dày sản phẩm, tốc độ gió và nhiệt độ môi trường cấp đông cá ngừ trong tủ lạnh -18°C thể hiện kết quả qua hình 8 đến hình 10.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình toán học quá trình dẫn nhiệt bên trong khối thực phẩm kết đông được chuyển về bài toán dẫn nhiệt phi tuyến với tính chất nhiệt vật lý biến đổi theo nhiệt độ.

Đường cong nhiệt độ tâm sản phẩm dự đoán bằng mô hình cũng phản ánh đúng giá trị thực nghiệm, được chia làm 3 giai đoạn. Trong giai đoạn đầu tiên nhiệt độ giảm khá nhanh, ở giai đoạn này thực phẩm chỉ trao đổi nhiệt hiện với môi trường bên ngoài. Giai đoạn tiếp theo, khi nước trong thực phẩm bắt đầu chuyển pha, xuất hiện thành phần nhiệt ẩn, nhiệt độ tâm hầu như ở trạng thái ổn định (nhiệt độ điểm băng). Giai đoạn tiếp theo, khi tâm sản phẩm kết thúc quá trình chuyển pha, nhiệt dung riêng hiệu dụng giảm xuống rất nhanh đồng thời hệ số dẫn nhiệt tăng lên, nhiệt độ tâm tiếp tục giảm nhanh hơn cả giai đoạn đầu cho đến khi sản phẩm đông băng hoàn toàn.

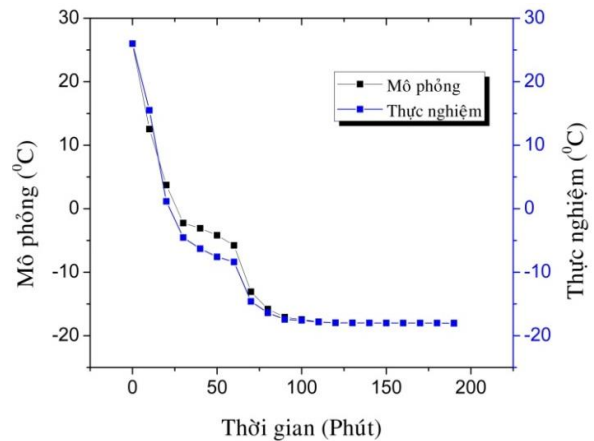
Quá trình cấp đông phụ thuộc vào kích thước sản phẩm, khi kích thước cá tăng, thời gian cấp đông tăng được thể hiện ở hình 8. Do trong quá trình kết đông thực phẩm chuyển pha phụ thuộc vào tỷ lệ nước kết đông nên thời gian cấp đông khác nhau theo sự thay đổi của tỷ lệ nước đóng băng.

Kết quả trên cho thấy, khi nhiệt độ không khí môi trường cấp đông giảm, thời gian cấp đông sẽ giảm, tuy nhiên mức độ giảm thời gian cấp đông không đồng đều ở các chế độ khác nhau ở hình 9.

Yếu tố vận tốc gió cũng rất quan trọng, tác giả nhận thấy rằng vận tốc không khí thay

đổi thì thời gian cấp đông cũng thay đổi, tuy nhiên mức độ thay đổi không đồng đều ở các chế độ khác nhau ở hình 10.

Sử dụng phần mềm mô phỏng Comsol, tác giả đã mô phỏng quá trình dẫn nhiệt giữa thực phẩm và môi trường cấp đông. Việc so sánh kết quả tính toán lý thuyết và kết quả đo thực nghiệm trên đối tượng thực phẩm là cá ngừ và sai số tuyệt đối không vượt quá 7°C đã chứng tỏ khả năng sử dụng mô phỏng Comsol vào việc nghiên cứu quá trình cấp đông thực phẩm trong điều kiện Việt Nam.



Hình 11. So sánh trường nhiệt độ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đỗ Hữu Hoàng. 2014. *Nghiên cứu mô phỏng và xác định chế độ cấp đông hợp lý cho cá tra Việt Nam*. Luận án tiến sĩ khoa học kỹ thuật nhiệt Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [2] Vũ Huy Khuê. 2015. *Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt truyền chất và các giải pháp tiết kiệm năng lượng trong lạnh đông cá thu*. Luận án tiến sĩ khoa học kỹ thuật nhiệt Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [3] PGS.TS Trịnh Văn Quang. 2013. *Cơ sở phương pháp phân tử hữu hạn trong truyền nhiệt*. NXB Thế giới.
- [4] Tchigeov, G. 1979. *Thermophysical processes in food refrigeration technology*. Food Industry, Moscow.
- [5] Chumak I.G., Onhishenko V.P., Golovsky S.E., Zheliba Y.A. (1995). *The method of prediction for characteristics of cooling and freezing processes of foodstuffs*. Proc. of In. Conference Commissions C2, D1, D2/3 of IIR, June 1994, Istanbul (Turkey). - Paris, IIR, - P. 361 -366
- [6] Tocci, A. M., & Mascheroni, R. H. (1995). *Freezing times of meat balls in belt freezers: experimental determination and prediction by different methods*. International Journal of Refrigeration, 17, 445–452
- [7] Onistchenko VP(2000). *Development of scientific base of the food refrigeration technology*. Thesis for the degree of Science, Odessa state academy of refrigeration, Ukraine (2000)p. 481
- [8] Choi, Y. and Okos, M.R., *Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods*, in Food Processing and Process Applications Vol. I Transport Phenomenon, LaMaguer, M. and Jelen, P. (Eds.), Elsevier, New York, 1986
- [9] Nguyen Viet Dung.2008. *Development of technological refrigerating processes for mango fruits by thermo physical modeling methods*. Ph.D. Thesis for. Odessa State Academy of Refrigeration. -Odessa, 2008 p.114-116.
- [10] Willix, J., Harris, M.B., and Carson, J.K.(2006), *Local surface heat transfer coefficients on a model beef side*. Journal of Food Engineering, 74 pp. 561 –567.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Lê Thành Niên

Trường Cao đẳng Kỹ nghệ II

Email: lethanhvien010286@gmail.com