

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH CẤP ĐÔNG CÁ TRA FILLET TRÊN BĂNG CHUYỀN IQF

Đỗ Hữu Hoàng*

Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM

*Email: hoangdh02@cntp.edu.vn

Ngày nhận bài: 28/6/2017; Ngày chấp nhận đăng: 20/9/2017

TÓM TẮT

Quá trình làm đông lạnh cá là quá trình dẫn nhiệt có sự biến đổi pha hết sức phức tạp, bao gồm rất nhiều quá trình xảy ra đồng thời: truyền nhiệt, truyền chất, hình thành và phát triển pha rắn của các tinh thể đông băng làm mất phân pha thay đổi liên tục, ngoài ra thể tích cũng như cơ tính của cá cũng thay đổi. Đặc biệt tại điểm kết đông, các tính chất nhiệt vật lý của cá biến đổi đột ngột, khi đó phương trình vi phân mô tả quá trình là phi tuyến trở nên vô cùng khó giải. Bài toán có thể giải bằng phương pháp gần đúng. Phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng để giải bài toán dẫn nhiệt không ổn định có biến đổi pha với điều kiện biên loại 3 trong quá trình đông lạnh cá tra.

Từ khóa: Truyền nhiệt, biến đổi pha, phần tử hữu hạn, mô phỏng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số tỏa nhiệt bề mặt.

1. MỞ ĐẦU

Cá tra là một trong những mặt hàng xuất khẩu chủ lực của nước ta. Tuy nhiên, trong những năm gần đây sản lượng khai thác liên tục tăng nhưng tổng kim ngạch xuất khẩu không tăng tương ứng do một số sản phẩm phải bán hạ giá vì không đạt yêu cầu chất lượng [1]. Một trong những yếu tố chủ yếu quyết định chất lượng sản phẩm thủy, hải sản sau đánh bắt là công nghệ kết đông và bảo quản lạnh. Về nguyên tắc tốc độ cấp đông càng nhanh, thời gian cấp đông càng ngắn thì chất lượng sản phẩm càng tốt và thời gian bảo quản càng được kéo dài. Điều này dẫn tới nhiệt độ môi trường cấp đông phải rất thấp, tốc độ không khí môi trường cấp đông phải lớn. Do đó công suất hệ thống lạnh tăng lên, hiệu suất năng lượng giảm, giá thành sản phẩm tăng cao [1]. Cho nên, xác định chính xác thời gian cấp đông sản phẩm trong quá trình cấp đông cá tra nói riêng và thực phẩm nói chung có ý nghĩa rất quan trọng trong việc đánh giá chất lượng sản phẩm, công nghệ cấp đông và tiêu hao năng lượng trong quá trình làm lạnh và cấp đông.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Cấp đông là một quá trình phức tạp, trong đó nhiều quá trình cùng xảy ra đồng thời như : quá trình truyền nhiệt, quá trình truyền chất, quá trình biến đổi pha, sự thay đổi cơ tính của sản phẩm... Đặc biệt tại điểm kết đông, các tính chất nhiệt vật lý (nhiệt dung riêng C , hệ số dẫn nhiệt λ , khối lượng riêng ρ) biến đổi đột ngột, khi đó bài toán trở nên phi tuyến và rất khó giải. Các nhà nghiên cứu đã đưa ra một số mô hình xác định thời gian cấp đông theo phương pháp giải tích [3, 8, 9, 10, 11] và theo phương pháp hồi quy từ số liệu cho trước [1, 2, 4, 7, 14]; Tuy nhiên độ chính xác không cao, đồng thời các phương pháp này chỉ xác định

được thời gian cấp đông mà không xác định được trường nhiệt độ bên trong sản phẩm. Công trình nghiên cứu này sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng bài toán dẫn nhiệt không ổn định có biến đổi pha với điều kiện biên loại 3 nhằm mục đích xác định thời gian cấp đông cá tra fillet trên băng chuyền IQF và ứng dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố cơ bản như: nhiệt độ và tốc độ đến quá trình cấp đông.

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

2.1.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng khảo sát là các mẫu sản phẩm cá tra fillet dạng hình hộp có các kích thước như Bảng 1 [13].

Bảng 1. Thông số hình học cá tra fillet

Stt	Khối lượng, (g)	Dày δ , (mm)	Rộng W, (mm)	Dài L, (mm)	W/L	δ/L
1	85,5-124,5	10-14	60-80	150-200	0,35-0,4	0,06-0,067
2	124,5-199,5	14-16	80-90	200-250	0,32-0,35	0,06-0,064
3	199,5-256,5	16-18	90-110	250-270	0,32-0,33	0,064-0,067
4	256,5-313,5	18-21	110-120	270-290	0,37-0,38	0,072- 0,104
5	≥ 320	≥ 24	120-130	280-300	0,37-0,38	0,085- 0,089

2.1.2. Số liệu ban đầu và giới hạn nghiên cứu

2.1.2.1. Phân tích thành phần cá

Mẫu cá được phân tích tại trung tâm dịch vụ phân tích thí nghiệm TP. Hồ Chí Minh với thành phần như sau: chất béo 15,4%; nước 67,3%; protein 16,3%; carbohydrate 0%; sugar 0%; tro 1,02%.

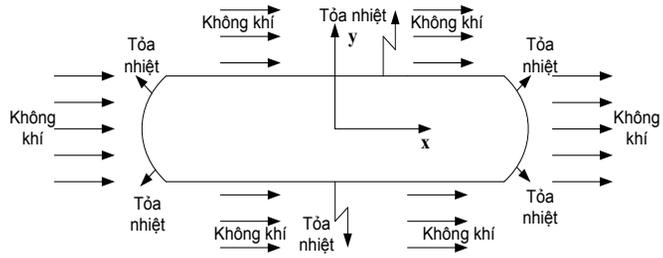
2.1.2.2. Thông số nhiệt vật lý của cá

Thông số nhiệt vật lý được xác định theo công thức của các tác giả như sau: Hàm lượng băng: Chen (1985b) [15]; Nhiệt dung riêng: Schwartzberg (1976) [16]; Hệ số dẫn nhiệt: Choi và Okos (1986) [17]; Khối lượng riêng: Choi và Okos (1986) [17]. Hệ số tỏa nhiệt bề mặt: Willix (2006) [18].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Xây dựng mô hình toán cho bài toán cấp đông

Trong bài báo này, đối tượng được nghiên cứu là cá tra fillet được xem là dạng hình hộp có thông số được trình bày trong Bảng 1. Do các mẫu sản phẩm cá trên có kích thước dài lớn hơn nhiều bề rộng và dày, truyền nhiệt dọc theo chiều dài sản phẩm rất nhỏ có thể bỏ qua, nên coi nhiệt độ chỉ thay đổi theo hai hướng bề rộng (hướng x) và bề dày (hướng y): $T = f(x, y, \tau)$ (xem Hình 1).



Hình 1. Mô tả sơ đồ vị trí xếp đặt sản phẩm

Việc xác định thời gian cấp đông sản phẩm cá tra fillet là giải phương trình vi phân dẫn nhiệt không ổn định với điều kiện biên loại 3, phương trình vi phân chủ đạo và các điều kiện như sau:

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

Điều kiện ban đầu:

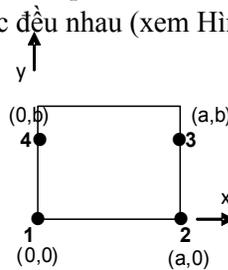
$$T = T_0 \text{ tại } \tau = 0 \quad (2)$$

Điều kiện biên: toả nhiệt tại mặt ngoài biểu thị bởi:

$$-\lambda(T)\left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}\right) = h(T_m - T_k) \quad (3)$$

2.2.2. Phương trình ma trận đặc trưng phần tử hữu hạn (PTHH) mô phỏng quá trình cấp đông fillet cá tra

Bằng cách dụng phương pháp PTHH, phần tử sẽ được chọn là hai chiều chữ nhật bậc nhất 4 nút, lưới được chia theo cấu trúc đều nhau (xem Hình 2).



Hình 2. Phần tử hữu hạn chữ nhật bậc nhất 4 nút

Theo phép biến đổi Galerkin [12] Phương trình ma trận đặc trưng PTHH cho phần tử có dạng tổng quát sau:

$$[C]\left\{\frac{\partial T}{\partial \tau}\right\} + [K]\{T\} = \{f\} \quad (4)$$

Trong đó

$$[C] = \int_V \rho.c_p [N]^T [N] dV \text{ là ma trận nhiệt dung;}$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV + \int_S h[N]^T [N] dS \text{ là ma trận dẫn nhiệt ;}$$

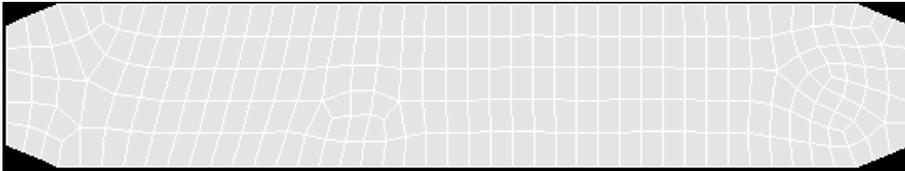
$\{f\} = \int_S hT_K [N]^T dS$ là véc tơ phụ tải nhiệt.

$[N]$ là hàm nội suy; $[B]$ là đạo hàm của hàm nội suy; $[D]$ là ma trận hệ số dẫn nhiệt; V là thể tích phần tử, S là diện tích mặt có bức xạ và đối lưu; T là véc tơ nhiệt độ nút; $\{\partial T/\partial \tau\}$ là đạo hàm nhiệt độ theo thời gian; t_K là nhiệt độ môi trường.

2.2.3. Kết quả giải bài toán cấp đông cá tra

2.2.3.1. Tạo lưới các PTHH

Mẫu sản phẩm cá tra được chọn để thực hiện tính toán có kích thước (cm): $12 \times 60 \times 180$; khối lượng 120 gam. PTHH là chữ nhật một chiều 4 nút, Hình 1, mặt cắt ngang được chia bởi lưới chữ nhật tạo thành 5×55 phần tử (xem Hình 3).



Hình 3. Sơ đồ chia lưới tiết diện ngang của fillet cá tra

2.2.3.2. Các điều kiện ban đầu và điều kiện biên

- Điều kiện ban đầu: Nhiệt độ mẫu sản phẩm ban đầu đồng nhất $12\text{ }^\circ\text{C}$
- Điều kiện biên loại 3 biểu thị chế độ cấp đông khác nhau gồm

Tốc độ không khí lạnh ω (m/s): 5; 7,5; 10; 12,5; 15.

Nhiệt độ môi trường không khí làm lạnh t_K ($^\circ\text{C}$): -35; -37,5; -40; -42,5; -45.

2.2.3.3. Rời rạc theo thời gian

Để xác định được nhiệt độ cần rời rạc (4) theo thời gian. Có thể rời rạc theo bước thời gian $\Delta\tau = (\tau^{p+1} - \tau^p)$, khi đó $\Delta T = (T^{p+1} - T^p)$, nhiệt độ T có thể lấy tại thời điểm p hoặc thời điểm $p+1$ tương ứng là T^p và T^{p+1} , tức là (4) trở thành:

$$[C] \left\{ \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta\tau} \right\} + [K] \{T^{p+1}\} = \{f^{p+1}\} \quad (a)$$

hay (5)

$$[C] \left\{ \frac{T^{p+1} - T^p}{\Delta\tau} \right\} + [K] \{T^p\} = \{f^p\} \quad (b)$$

Từ đó giải ra nghiệm tương ứng là:

$$T^{p+1} = [[C] - [K]\Delta\tau]^{-1} * [[C]T^p + \{f^{p+1}\}\Delta\tau] \quad (a)$$

hay (6)

$$T^{p+1} + = [C]^{-1} * [[C] - [K]\Delta\tau] \{T^p\} + \{f^p\}\Delta\tau] \quad (b)$$

Nghiệm (6a) là dạng ẩn hoàn toàn có thể chọn $\Delta\tau$ tùy ý nghiệm vẫn hội tụ, tuy nhiên khi chọn $\Delta\tau$ lớn, nghiệm sẽ kém chính xác. Nghiệm (6b) là dạng hiển hoàn toàn cần chọn $\Delta\tau$ đủ nhỏ để nghiệm hội tụ.

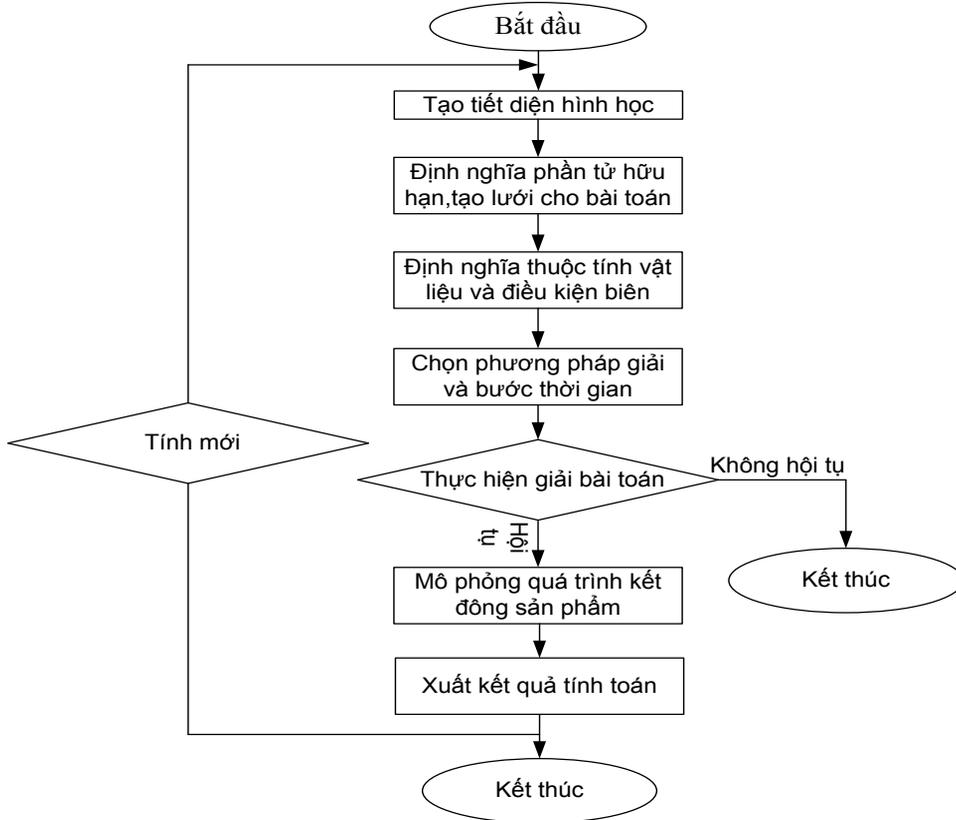
2.2.4. Kết quả tính toán

Bài toán được giải bằng phần mềm Ansys theo sơ đồ rời rạc sau:

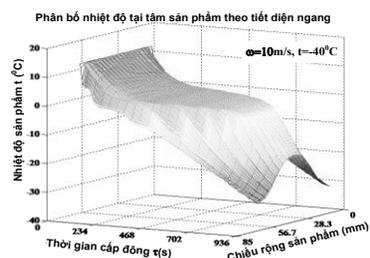
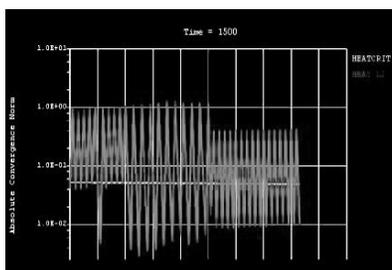
$$\left(\frac{1}{\theta \Delta \tau} [C] + [K] \right) \{T^{p+1}\} = \{f\} + [C] \left(\frac{1}{\theta \Delta \tau} \{T^p\} + \frac{1-\theta}{1} \{T^p\} \right) \quad (7)$$

Với $\theta = 1$, bước thời gian được chọn $\Delta \tau = 5s$, và được lập tự động, bằng phần mềm Ansys giải phương trình (7) với bước phụ tải được áp dụng là theo bước thời gian xác định được thời gian cấp đông và trường nhiệt độ của sản phẩm trong quá trình cấp đông.

Bằng phương pháp áp dụng phần mềm ANSYS với lưu đồ thuật toán (xem Hình 4), quá trình tính lập đã thể hiện nghiệm hội tụ tuyệt đối (xem Hình 5)

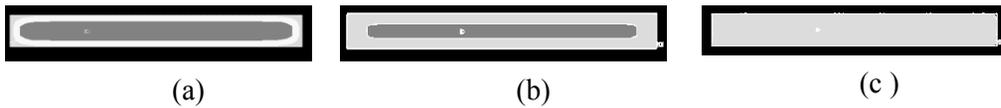


Hình 4. Lưu đồ thuật toán



Hình 5. Kết quả mô phỏng quá trình cấp đông

Quá trình biến đổi pha trong mẫu sản phẩm (Hình 6)



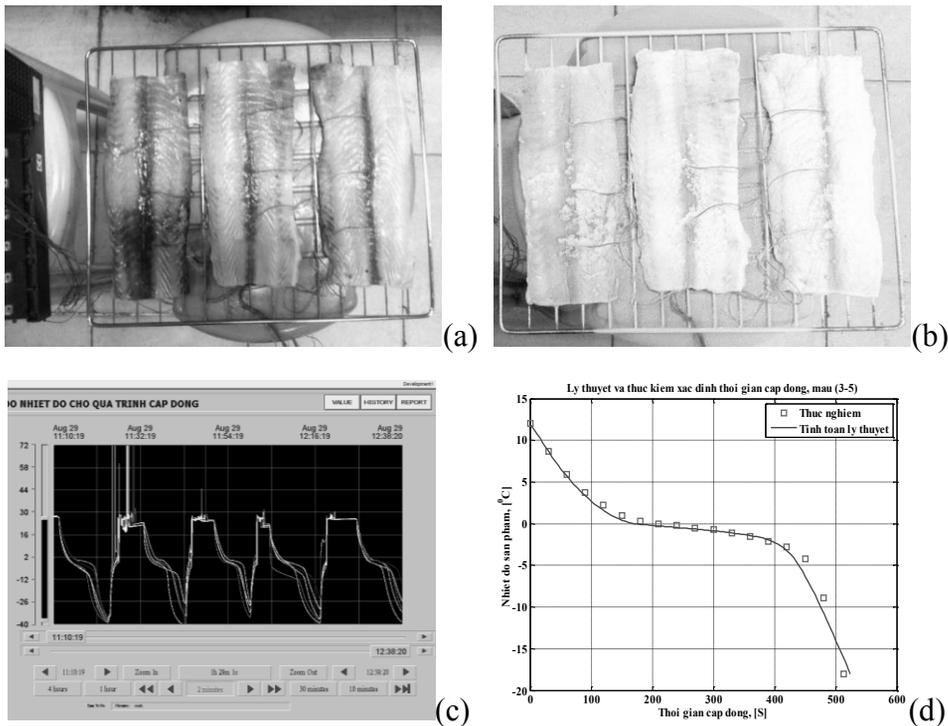
Hình 6. Quá trình hình thành và phát triển pha rắn trong mẫu sản phẩm cá

(a) Bắt đầu hình thành pha rắn tại mặt ngoài (màu xanh lá), bên trong chưa đông đặc (màu đỏ), vùng đang biến đổi pha (vàng); (b) Pha rắn phát triển, biên giới phân pha di chuyển dần vào sâu trong vật; (c) Pha rắn chiếm toàn bộ vật, cá đông lạnh hoàn toàn.

2.2.5. Đánh giá độ tin cậy của kết quả bài toán

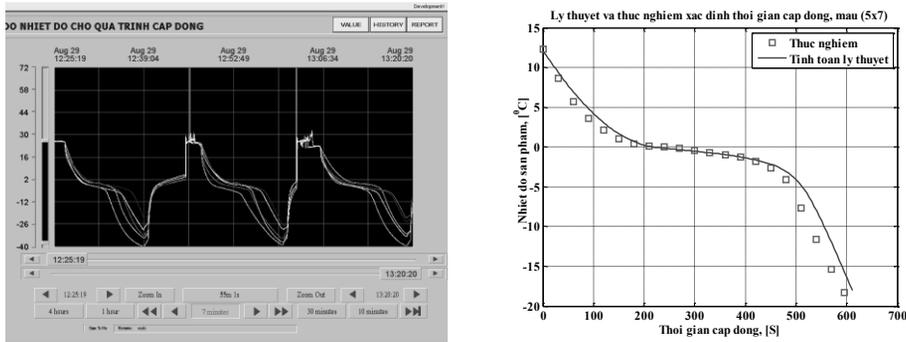
Để làm đối chứng đã tiến hành khảo sát trên mô hình thực nghiệm, được xây dựng tại Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh, trên ba mẫu sản phẩm có cùng kích thước và khối lượng trong cùng điều kiện nhiệt độ cấp đông $t_f = -40\text{ }^\circ\text{C}$ và tốc độ không khí $w = (18 \pm 0,3)\text{ m/s}$, kết quả thu được thể hiện trên Hình 7. Nhiệt độ sản phẩm được đề cập đến dưới đây là nhiệt độ ở tâm sản phẩm và thời gian cấp đông là thời gian cần thiết để sản phẩm được làm lạnh từ nhiệt độ ban đầu đồng đều đến một nhiệt độ tâm nào đó tùy thuộc vào yêu cầu cấp đông.

- Mẫu sản phẩm có kích thước dày x rộng (12 x 70) mm, khối lượng 100 g



Hình 7. Đồ thị so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm xác định thời gian cấp đông, mẫu cá tra có khối lượng 100 g, kích thước (12 x 70) mm, (a) mẫu cá trước cấp đông, (b) mẫu cá sau cấp đông, (c) kết quả thí nghiệm, (d) so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm

- Mẫu sản phẩm có kích thước dày x rộng (15 x 85) mm, khối lượng 160 g.



Hình 8. Đồ thị so sánh giữa lý thuyết và thực nghiệm xác định thời gian cấp đông, mẫu cá tra có khối lượng 160 g, kích thước (15 x 85) mm

Theo kết quả thí nghiệm, thời gian cấp đông từ nhiệt độ $t = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ đến nhiệt độ $t = -18\text{ }^{\circ}\text{C}$ trung bình cho ba lần thí nghiệm là $\bar{\tau} = 27,3$ phút. Theo kết quả tính toán lý thuyết thời gian cấp đông cần thiết để đạt nhiệt độ trên là 26,7 phút, sai lệch tương đối giữa 2 kết quả $\delta = 2,3\%$. Sai lệch giữa nhiệt độ tính toán lý thuyết và thực nghiệm trong suốt quá trình cấp đông là không đồng đều, ở gần cuối quá trình sai lệch lớn hơn (xem Hình 7, Hình 8).

Tuy nhiên, xét đến độ phức tạp của quá trình, đặc biệt là sự biến đổi đột biến của tính chất nhiệt vật lý tại điểm kết đông thì sự sai khác trên đây là hoàn toàn chấp nhận được và mô hình lý thuyết này có thể áp dụng để nghiên cứu quá trình cấp đông của nhiều loại thực phẩm, trước hết là của cá da trơn dạng fillet với độ tin cậy cao.

2.2.6. Nghiên cứu ảnh hưởng của môi trường cấp đông đến thời gian cấp đông

Dưới đây trình bày kết quả về việc áp dụng mô hình lý thuyết nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ, tốc độ gió của môi trường cấp đông đến quá trình cấp đông cá da trơn dạng fillet.

2.2.6.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc không khí đến thời gian cấp đông

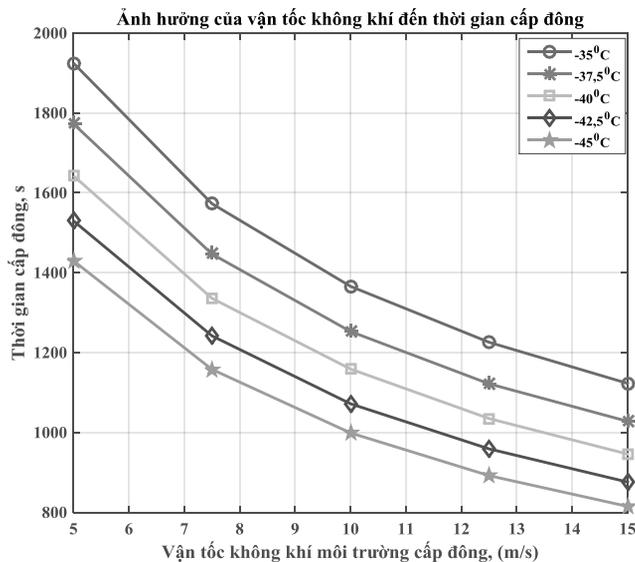
Bảng 2. Kết quả tính toán thời gian cấp đông của cá tra với mẫu 18×100

Kích thước	Nhiệt độ ($^{\circ}\text{C}$)	Vận tốc ω , (m/s)				
		5	7,5	10	12,5	15
		Thời gian cấp đông τ ,(s)				
(18x100) mm	-35	1925	1573	1366	1226	1123
	-37,5	1773	1447	1253	1122	1028
	-40	1643	1336	1159	1035	946
	-42,5	1530	1242	1072	959	876
	-45	1430	1158	999	892	815

Ảnh hưởng của tốc độ gió đến thời gian cấp đông được trình bày trên Bảng 3 và Hình 8 thời gian cấp đông (từ nhiệt độ ban đầu đông nhất bằng $t_0 = 12\text{ }^\circ\text{C}$ đến khi nhiệt độ tại tâm sản phẩm đạt $t_1 = -18\text{ }^\circ\text{C}$) ở các tốc độ và nhiệt độ môi trường cấp đông khác nhau.

Bảng 3. Phương trình hồi quy thể hiện mối quan hệ của vận tốc không khí đến thời gian cấp đông

Vận tốc không khí $\omega = (5 \div 15)\text{ m/s}$	Phương trình hồi quy
Thời gian cấp đông τ , (S) ở $t_e = -35\text{ }^\circ\text{C}$ (a)	$\tau = 2788,0 - 207,183\omega + 6,45714\omega^2$
Thời gian cấp đông τ , (S) ở $t_e = -37,5\text{ }^\circ\text{C}$ (b)	$\tau = 2577,6 - 193,057\omega + 6,02286\omega^2$
Thời gian cấp đông τ , (S) ở $t_e = -40\text{ }^\circ\text{C}$ (c)	$\tau = 2390,8 - 179,571\omega + 5,58857\omega^2$
Thời gian cấp đông τ , (S) ở $t_e = -42,5\text{ }^\circ\text{C}$ (d)	$\tau = 2239,2 - 170,383\omega + 5,33714\omega^2$
Thời gian cấp đông τ , (S) ở $t_e = -45\text{ }^\circ\text{C}$ (e)	$\tau = 2099,2 - 160,869\omega + 5,05143\omega^2$



Hình 8. Ảnh hưởng của vận tốc không khí đến thời gian cấp đông (a) $t_e = -35\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $t_e = -37,5\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $t_e = -40\text{ }^\circ\text{C}$; (d) $t_e = -42,5\text{ }^\circ\text{C}$; (e) $t_e = -45\text{ }^\circ\text{C}$

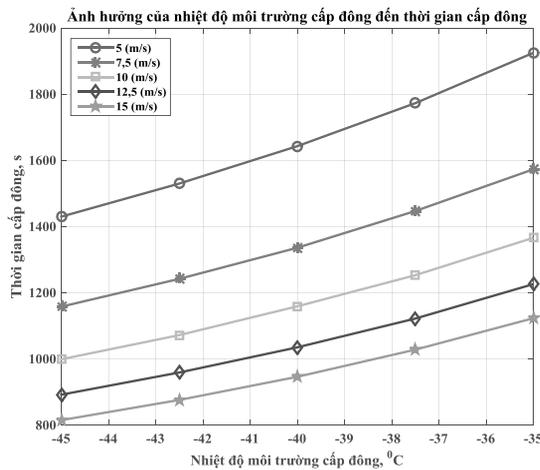
- Với mọi tốc độ trong khoảng $(5 \div 15)\text{ m/s}$, khi tăng tốc độ không khí lạnh sẽ làm thời gian cấp đông giảm đi đáng kể;
- Khi tăng tốc độ không khí lạnh, độ giảm thời gian cấp đông ở nhiệt độ $t_e = -35\text{ }^\circ\text{C}$ luôn lớn hơn ở nhiệt độ $t_e = -45\text{ }^\circ\text{C}$ tại mọi tốc độ trong khoảng $\omega = (5 \div 15)\text{ m/s}$;
- Khi tăng tốc độ không khí lạnh, độ giảm thời gian cấp đông ở tốc độ thấp sẽ lớn hơn ở tốc độ cao;

2.2.6.2. Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường đến thời gian cấp đông

Để đánh giá tổng quát sự ảnh hưởng của thay đổi nhiệt độ đến thời gian đông kết, có thể hồi quy thời gian τ theo nhiệt độ (trong khoảng $t_e = (-35 \div -45)\text{ }^\circ\text{C}$). Với sai số $< 0,05\%$ quan hệ giữa τ và t_e được thể hiện trong Bảng 4 và Hình 9.

Bảng 5. Quan hệ giữa thời gian cấp đông với nhiệt độ môi trường cấp đông

Nhiệt độ cấp đông $t_e = (-45 \div -35) ^\circ\text{C}$	Phương trình hồi quy
Thời gian cấp đông $\tau, (s)$ ở $\omega = 5 \text{ m/s}$ (a)	$\tau = 5828,29 + 159,949 t_e + 1,38286 t_e^2$
Thời gian cấp đông $\tau, (s)$ ở $\omega = 7,5 \text{ m/s}$ (b)	$\tau = 4839,63 + 133,743 t_e + 1,15429 t_e^2$
Thời gian cấp đông $\tau, (s)$ ở $\omega = 10 \text{ m/s}$ (c)	$\tau = 4212,23 + 116,143 t_e + 0,994286 t_e^2$
Thời gian cấp đông $\tau, (s)$ ở $\omega = 12,5 \text{ m/s}$ (d)	$\tau = 3918,54 + 110,954 t_e + 0,971429 t_e^2$
Thời gian cấp đông $\tau, (s)$ ở $\omega = 15 \text{ m/s}$ (e)	$\tau = 3637,83 + 103.863 t_e + 0,914286 t_e^2$



Hình 9. Quan hệ giữa nhiệt độ không khí môi trường cấp đông với thời gian cấp đông ở các chế độ vận tốc khác nhau

Có thể thấy rằng khi giảm nhiệt độ không khí lạnh sẽ làm giảm đáng kể thời gian cấp đông, ảnh hưởng của nhiệt độ nhỏ hơn ảnh hưởng của vận tốc không khí lạnh và khi nhiệt độ kết đông càng cao thì ảnh hưởng của vận tốc càng lớn.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tử hữu hạn đã giải quyết hữu hiệu bài toán xác định thời gian cấp đông của cá tra, bài toán biến đổi pha phức tạp mà các phương pháp khác gặp khó khăn.

Các kết quả tính toán lý thuyết theo phương pháp trên phù hợp rất tốt với kết quả đo đạc thực nghiệm, chứng tỏ phương pháp nghiên cứu đã chọn là phù hợp, kết quả có độ tin cậy và tính thuyết phục cao.

Kết quả giải bài toán cho phép đánh giá ảnh hưởng của thay đổi nhiệt độ môi trường làm lạnh và ảnh hưởng của thay đổi vận tốc không khí lạnh đến thời gian cấp đông.

Các kết quả xác định thời gian cấp đông của cá tra và các ảnh hưởng trên đến thời gian cấp đông, có thể được sử dụng làm cơ sở dữ liệu cho các nghiên cứu liên quan đến đông lạnh này như tối ưu hóa quá trình chế biến và bảo quản sản phẩm xuất khẩu quan trọng này của đất nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Đỗ Hữu Hoàng - Nghiên cứu mô phỏng và xác định chế độ cấp đông hợp lý cho cá tra Việt Nam, Luận văn Tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2014.
2. Cleland A. C., Earle R. L. - Predicting freezing times of food in rectangular packages, *Journal of Food Science* **44** (1979) 964-970.
3. Fleming A. K.- Immersion freezing small meat products, *Proceedings of the 12th International Congress of Refrigeration* **2** (1967) 683-694.
4. Lacroix C., Castaigne F. - Simple method for freezing time calculations for infinite flat slabs, infinite cylinders and spheres, *Canadian Institution of Food Science and Technology Journal* **20** (1987) 251-259.
5. Cleland A. C., Earle R. L. - A comparison of analytical and numerical methods of predicting the Freezing times of foods, *Journal of Food Science* **42** (1977) 1390-1395.
6. Stoecker W. F. – Chapter 17: The refrigeration and freezing of food, In: *Industrial refrigeration handbook*, The McGraw-Hill Companies, 2004, 567-589.
7. Succar J., Hayakawa K. - Parametric analysis for predicting freezing time of infinitely slab shaped food, *Journal of Food Science* **49** (1984) 468-477.
8. 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.
9. Pham Q. T. - Extension to Plank's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes, *International Journal of Refrigeration* **7** (1984) 377-383.
10. Plank R.- Beitrage zur Berechnung und Bewertung der Gefrigeschwindigkeit von Lebensmitteln zeitschrift fur die gesamte kalte Industrie, *Beih Rcihe* **3** (10) (1941) 1-16.
11. Mascheroni R. H., Calvelo A. - A simplified model for freezing time calculation in foods, *Journal of Food Science* **47** (1982) 1201-1207.
12. Roland W. Lewis, Perumal Nithiarasu, Kankanhalli N. Seetharamu. - *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow*, John Wiley & Sons Ltd., 2004, 154-170.
13. Số liệu thu thập từ các nhà máy chế biến thủy hải sản (Cửu Long, Nam Việt, Vĩnh Hoàn, Afifex, Công ty Cataco, Công ty Cafatex....).
14. Hung Y. C, Thompson D. R. - Freezing time prediction for slab shape foodstuffs by an improved analytical method, *Journal of Food Science* **48** (1983) 555-560.
15. Chen, C.S. - Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Ice content and mollier diagram, *Journal of Food Science* **50** (4) (1985b) 1163-1166.
16. Schwartzberg H. G. - Effective heat capacities for the freezing and thawing of food, *Journal of Food Science* **41**(1) (1976) 152-156.
17. 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.
18. 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) 561-567.

ABSTRACT

**MODELLING OF FREEZING PROCESS FOR PANGASIU FILLET
ON IQF CONVEYOR**

Do Huu Hoang*

Ho Chi Minh City University of Food Industry

*Email: *hoangdh02@cntp.edu.vn*

Cooling and freezing of Pangasius is a terribly complex process of heat conduction with phase change, which includes many processes occurring simultaneously: heat and mass transfer, formation and development of solid phase of ice crystals which makes the phases frontier face moves continually, besides that the volume as well as the mechanical properties of food also vary. Especially, around the freezing point, there are large and sudden variations in thermophysical properties such as specific heat, density and thermal conductivity. Then, the differential equation describing the process of nonlinear partial one becomes extremely difficult to solve. In this paper, the finite element computation of unsteady phase change heat transfer during freezing of Pangasius had been applied to determine the accurate freezing time.

Keywords: Freezing time, heat transfer, phase change, finite element, simulation.