

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**

ĐỖ HỮU HOÀNG

**NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG VÀ XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ CẤP
ĐỒNG HỢP LÝ CHO CÁ TRA VIỆT NAM**

Chuyên ngành:: Kỹ Thuật Nhiệt

Mã số: 62520115

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT NHIỆT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. GS.TSKH. : **ĐẶNG QUỐC PHÚ**
2. TS. : **NGUYỄN VIỆT DŨNG**

Hà Nội – 2014

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ LĨNH VỰC NGHIÊN CỨU

1.1 Tổng quan về công nghệ làm lạnh và cấp đông cá da trơn

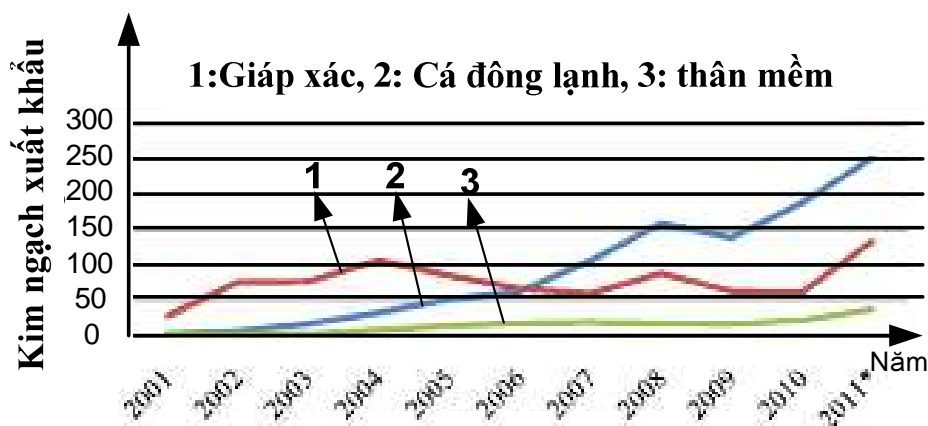
1.1.1 Hiện trạng sản xuất thủy sản của Việt Nam

Công nghiệp chế biến thủy sản của Việt Nam rất đa dạng và khác nhau về mặt vận hành và trình độ sản xuất. Trong đó một số lĩnh vực chế biến của ngành rất phụ thuộc vào mùa vụ của nguyên liệu. Hơn nữa công nghệ chế biến thủy sản xuất khẩu của Việt Nam từ nhiều năm nay vẫn chưa thoát khỏi tình trạng xuất khẩu nguyên liệu thô hoặc cao hơn là dạng bán thành phẩm. Ngoài ra vẫn còn nhiều mặt hàng thủy sản được bán qua khách hàng trung gian nên kim ngạch xuất khẩu chưa cao so với năng lực sản xuất. Hơn nữa tổn thất sau thu hoạch trong khâu chế biến, bảo quản và vận chuyển thủy sản là trên 20% là tỉ lệ cao so với các nước trong khu vực.

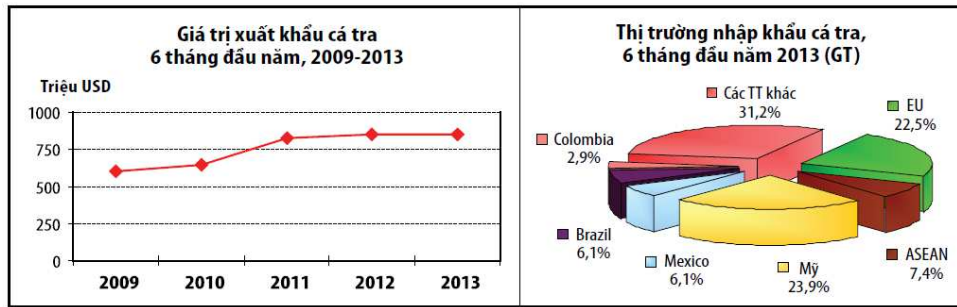
Sản phẩm thủy sản rất đa dạng và phong phú tập trung vào các dạng chính đó là đông lạnh, đồ hộp, khô, muối, nước mắm. Trong đó, thủy sản lạnh đông chiếm tỷ trọng lớn nhất trong sản phẩm xuất khẩu của Việt Nam [1-3,15].

Nguyên liệu thủy sản được vận chuyển từ ngư trường về xí nghiệp, tại đó nó được xử lý bằng cách tách bỏ nội tạng, mang, vây, vây ... làm sạch và rửa, tùy theo yêu cầu của mỗi sản phẩm mà có các cách thức xử lý khác nhau. Xử lý nhằm loại bỏ những phần có giá trị thấp, những phần không ăn được, tạo ra các dạng của sản phẩm. Đối với sản phẩm đông lạnh, thì bán thành phẩm sau xử lý được đưa đi cấp đông ở nhiệt độ $-40 \div -42^{\circ}\text{C}$ và trữ đông ở $-18 \div -25^{\circ}\text{C}$ [1-3,15]. Tuy nhiên, công nghệ chế biến sản phẩm thủy sản của Khu vực đồng bằng sông Cửu Long chủ yếu mang tính thủ công, chỉ sử dụng một số máy móc thiết bị ở một vài công đoạn như cấp đông trong tủ cấp đông (đối với sản phẩm đông lạnh), đóng hộp và tiệt trùng (sản phẩm đồ hộp), sấy, cán, xé... (sản phẩm khô), bao gói hút chân không...

Tính tới thời điểm hiện nay trên thế giới chưa có một sản phẩm thủy sản nào chỉ trong một thời gian ngắn mà được nhiều thị trường chấp nhận, ưa chuộng và có tốc độ phát triển nhanh như sản phẩm cá tra (và basa) của Việt Nam xem hình 1.1 và hình 1.2. Trong vòng 10 năm qua, sản lượng cá tra của Việt Nam đã tăng 50 lần, giá trị xuất khẩu tăng 65% lần và hiện đang chiếm tới 90% thị phần thế giới [1-3,15].



Hình 1.1 Kim ngạch xuất khẩu cá đông lạnh và giáp xác, thân mềm của Việt nam 2002 - 2011 (triệu USD)[1-3]



Hình 1.2 Tình hình xuất khẩu cá tra từ năm 2009 đến ngày 15/6/2013[1-3]

Ở nước ta khu vực sản xuất cá da trơn là đồng bằng sông Cửu Long xuất khẩu sản phẩm cá tra đem lại nguồn thu to lớn và quan trọng cho đất nước bởi vậy duy trì và phát triển bền vững nguồn lợi từ xuất khẩu cá da trơn là rất quan trọng.

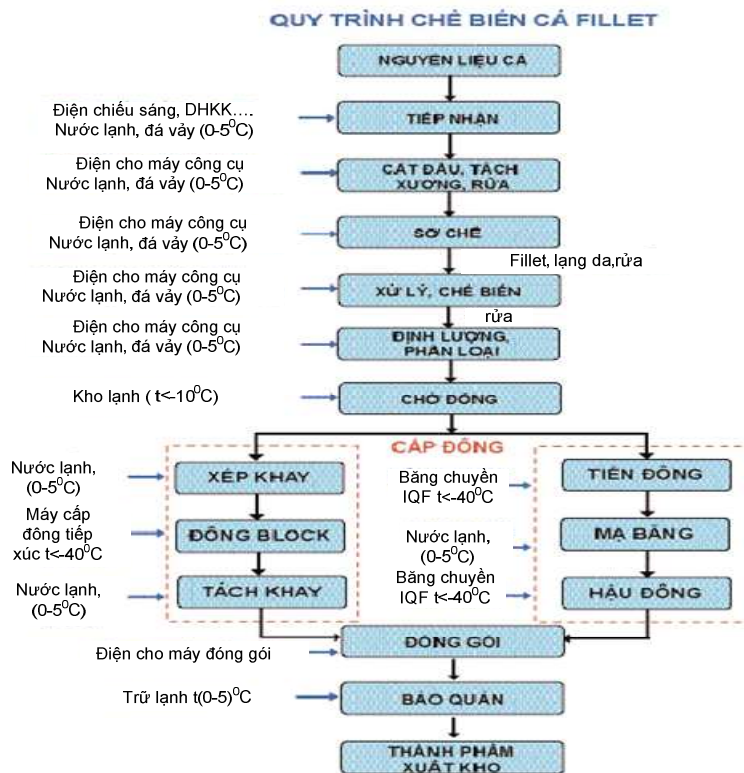
1.1.2 Quy trình công nghệ chế biến và bảo quản đông lạnh cá da trơn tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long - Việt nam

Theo [15] quy trình công nghệ chế biến và bảo quản cá fillet được trình bày trên hình 1.3. Tùy theo đặc điểm của sản phẩm chế biến và năng lực của nhà máy mà chủng loại và số lượng trang thiết bị chế biến được các doanh nghiệp trang bị tương đối khá đầy đủ, đảm bảo cho chế biến chủ yếu bao gồm: Thiết bị cấp đông chính như tủ đông tiếp xúc, tủ đông gió, tủ đông IQF dạng thẳng, tủ đông IQF dạng xoắn, hầm đông gió. Thiết bị chế biến như máy phân cỡ, thiết bị hấp, luộc, máy rửa nguyên liệu, máy sấy, máy xay, máy cắt, máy trộn, thiết bị chiên, thiết bị đóng gói, máy dò kim loại. Tùy qui mô của mỗi doanh nghiệp mà có trang bị các kho lạnh để bảo quản nguyên liệu, bán thành phẩm và thành phẩm lạnh. Đồng thời phân xưởng sản xuất nước đá cây hoặc thiết bị làm nước đá vảy cũng được lắp đặt phục vụ cho việc bảo quản lạnh thủy sản trong suốt quá trình sản xuất. Các máy móc thiết bị chế biến được sử dụng trên địa bàn khu vực nam bộ có nguồn gốc rất đa dạng như Việt Nam, Nhật (Mycom, Mitsubishi, Nissui, Hitachi, Nikka...), Đức (Gunner, Komet), Hà Lan (Grasso), Mỹ (Bally), Đan Mạch (Sabroe), Thụy Điển, Canada (Sandvik), Đài Loan (Sangchi, Mingjia, Cheafen), Malaysia, Bỉ (Isocab), Ý, Indonesia, Singapore (Marisco), Thái Lan, Pháp... trong đó thiết bị xuất xứ từ Nhật chiếm nhiều hơn cả. [15]

Mặc dù quy trình chế biến cá có một vài khác biệt trong quy trình chế biến tùy thuộc vào loại cá ở mức độ "khâu" công nghệ. Nhưng nhìn chung quy trình chế biến cá da trơn đều có rất nhiều sự tương đồng với nhau về thiết bị và công nghệ được thể hiện như sau ở hình 1.3. Trong đó cá da trơn thường được chế biến thành các miếng fillet, sau đó được cấp đông bằng hệ thống cấp đông rời dạng IQF. Ở một vài xí nghiệp chế biến thủy sản đông lạnh tủ cấp đông tiếp xúc (CF) cũng được dùng để cấp đông bánh fillet cá da trơn. Đối với phương pháp này các miếng fillet được xếp vào các khay nhôm, sau đó được châm nước và đưa vào cấp đông trong tủ đông tiếp xúc. Tuy nhiên phương pháp cấp đông này có nhược điểm là hàm lượng nước trong bánh cá cao, chất lượng sản phẩm không cao cũng như khi tiêu thụ phải rã đông cả bánh cá vì thế loại sản phẩm này không thể xuất được vào các thị trường khó tính. Do vậy phương pháp cấp đông bằng tủ tiếp xúc hiện nay được dùng hết sức hạn chế.

Mặt khác trong cơ cấu thành phần cá da trơn của Việt Nam dành cho xuất khẩu, cá tra chiếm tới khoảng 90%, phần còn lại là cá basa.

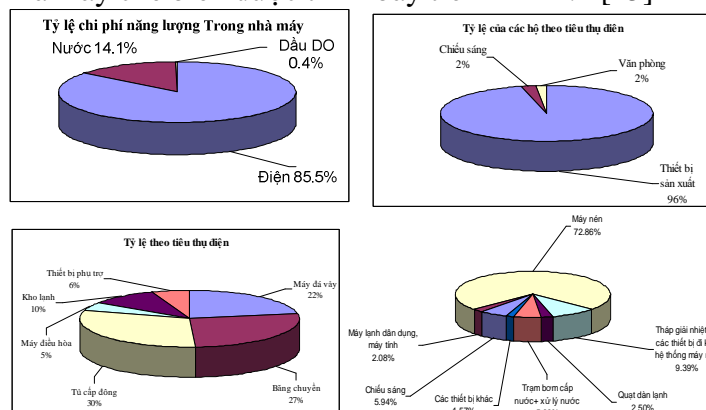
Vì lý do nêu trên, trong khuôn khổ luận án này, đối tượng nghiên cứu là quá trình cấp đông cá tra bằng các thiết bị cấp đông rời dạng IQF.



Hình 1.3 Quy trình công nghệ chế biến và bảo quản tôm và cá fillet [15]

1.1.3 Tiêu hao năng lượng trong chế biến cá da trơn

Điện năng là năng lượng tiêu thụ chính trong các nhà máy chế biến cá da trơn tại khu vực đồng bằng sông cửu long, theo thống kê tại các nhà máy chế biến, suất tiêu thụ điện năng để chế biến 1kg các da trơn từ nguyên liệu đến thành phẩm dao động từ 0.4 đến 0,45 kWh/kgSP. Số liệu này tính trung bình chung, tuy nhiên giá trị này rất biến động tùy thuộc và sản lượng nguyên liệu cung cấp cho nhà máy. Cụ thể tiêu hao điện năng điển hình của thiết bị trong nhà máy chế biến được trình bày trên hình 1.4 [15]



Hình 1.4 Tỷ lệ tiêu thụ điện năng điển hình của các thiết bị tiêu thụ điện tại các nhà máy [15]

Theo thống kê về suất tiêu hao năng lượng [18],[50],[51],[60],[61],[97] đánh giá suất tiêu hao năng lượng trong chế biến thủy sản giữa Việt nam, các nước đang phát triển và các nước phát triển như sau:

Bảng 1.1 Tiêu hao năng lượng trong chế biến thủy sản

Stt	Ngành	Loại SP	Suất tiêu hao điện	Đơn vị	Suất tiêu hao NL			Đơn vị
					DO	FO	Than	
1	Thủy sản		637,11	kWh/tấn SP	35,837			lít/tấnSP

Bảng 1.2 Đánh giá tỷ lệ suất tiêu hao năng lượng

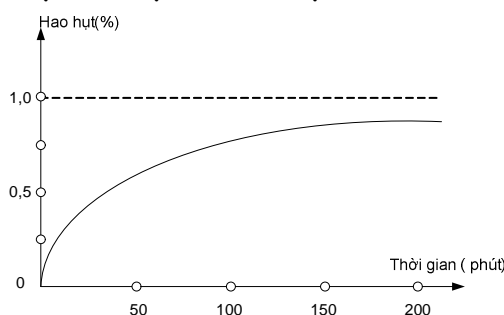
STT	Ngành	Suất tiêu hao năng lượng Việt nam (MJ/tấn SP)	Suất tiêu hao năng lượng trung bình các nước trên thế giới (MJ/tấn SP)	Tỷ lệ chênh lệch suất tiêu hao năng lượng giữa VN và thế giới(%)
1	Thủy sản	3.690,9	1.166,4-15.883,2	68

Từ các số liệu ở trên chúng ta thấy rằng để bảo đảm khả năng cạnh tranh sản phẩm thủy hải sản đông lạnh nói chung và cá da trơn nói riêng việc giảm tiêu hao năng lượng trong quá trình chế biến và bảo quản sản phẩm thủy hải sản đông lạnh là vấn đề cấp thiết, đặc biệt là trong giai đoạn làm lạnh và cấp đông trong giai đoạn này năng lượng sử dụng chiếm trên 70%.

1.1.4 Hao hụt sản phẩm trong quá trình cấp đông

Đối với sản phẩm thủy hải sản trong quá trình đông lạnh, đặc biệt là các sản phẩm có giá trị kinh tế cao hao hụt khối lượng trong quá trình cấp đông ảnh hưởng rất lớn đến giá thành sản phẩm. Hao hụt khối lượng sản phẩm trong cấp đông do bốc hơi nước từ bề mặt sản phẩm vào không khí do có sự chênh lệch của áp suất riêng phần của hơi nước trong quá trình cấp đông.

Đối với công nghệ cấp đông cá da trơn bằng IQF độ hao hụt khối lượng sản phẩm tỷ lệ với diện tích bề mặt sản phẩm và thời gian cấp đông. Khi tiết diện bề mặt sản phẩm càng lớn thì độ hao hụt càng lớn. Ảnh hưởng của thời gian cấp đông đến độ hao hụt khối lượng sản phẩm cấp đông được thể hiện trên đồ thị sau:



Hình 1.5 Ảnh hưởng của thời gian cấp đông đến hao hụt khối lượng.

Tuy nhiên trên thực tế trong công nghệ làm lạnh và cấp đông cá da trơn, sản phẩm sau khi cấp đông được mạ băng trước khi đóng gói, do đó ảnh hưởng hao hụt khối lượng trong khuôn khổ nghiên cứu này có thể bỏ qua.

1.1.5 Xác định thời gian cấp đông

Hầu hết các nhà máy đều xác định thời gian cấp đông cá da trơn một cách thủ công, thông qua kiểm tra nhiệt độ tâm sản phẩm. Thường trong một ca sản xuất, bộ phận kiểm tra chất lượng sẽ kiểm tra định kỳ, thông thường từ 2 hay 3 tiếng đồng hồ kiểm tra một lần

bằng cách khoan miếng cá sau cấp đông tại vị trí dày nhất đến tâm và đo nhiệt độ tại vị trí này (hình 1.6). Còn công nhân vận hành thiết bị cấp đông (IQF) sẽ kiểm tra bằng cách gõ 2 miếng cá lại với nhau, nếu cá cứng không mềm, hay lật miếng cá lên, nếu ở dưới màu trắng, không còn đường nước ở trong miếng cá là đạt. Nếu cá chưa đạt hay quá già (đur đạt), họ sẽ tăng hay giảm tốc độ của băng chuyền bằng biến tần. Đồng thời trên tủ điều khiển của IQF có thiết bị hiển thị thời gian cấp đông (bằng phút) [15]



Hình 1.6 Đo nhiệt độ của cá sau cấp đông [15]

Hạn chế của phương pháp nêu trên, là miếng cá thường có hình dạng hình học phi tiêu chuẩn, do đó việc xác định chính xác tâm của miếng cá là không khả thi. Đồng thời định nghĩa tâm cũng không rõ ràng là tâm thẩm nhiệt hay là tâm hình học. Do đó kết quả xác định thời gian cấp đông là hoàn toàn chủ quan phụ thuộc vào người thực hiện và kinh nghiệm của họ. Việc này ảnh hưởng không nhỏ tới chất lượng sản phẩm và tiêu hao năng lượng cho quá trình cấp đông sản phẩm. Do đó cần thiết phải có những nghiên cứu để dự đoán thời gian cấp đông của sản phẩm chính xác hơn.

1.1.6 Các yếu tố ảnh hưởng tới chất lượng cấp đông cá

Đối với sản phẩm thủy hải sản nói chung và cá da trơn nói riêng yếu tố quyết định chất lượng sản phẩm là tốc độ cấp đông. Tốc độ càng nhanh, thời gian cấp đông càng ngắn thì chất lượng sản phẩm càng tốt và thời gian bảo quản càng được kéo dài. Tuy nhiên để thực hiện được điều này, nhiệt độ môi trường cấp đông phải rất thấp, tốc độ gió cao, dẫn tới công suất điện tiêu thụ của hệ thống lạnh tăng lên, hiệu suất năng lượng giảm đi, giá thành sản phẩm tăng cao. Do đó, việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số môi trường cấp đông là nhiệt độ và tốc độ gió có ý nghĩa rất quan trọng trong việc kiểm soát chất lượng sản phẩm và tiêu hao năng lượng trong quá trình làm lạnh và cấp đông.

Trên thực tế sản xuất nghiên cứu vấn đề này bằng thực nghiệm là hết sức khó khăn và thậm chí là bất khả thi, do chiều dài buồng cấp đông lớn và có cấu trúc đóng kín với trường nhiệt độ và tốc độ là thông số rải, không cho phép chúng ta đo đạc trực tiếp khi thiết bị đang vận hành. Hơn nữa cần thiết phải thực hiện một khối lượng thí nghiệm không hề nhỏ để có thể giải quyết vấn đề trên, đòi hỏi chi phí rất lớn. Do vậy giải pháp tốt nhất là xây dựng mô hình mô phỏng quá trình làm lạnh và cấp đông cá da trơn để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số của môi trường cấp đông. Mô hình này cho phép chúng ta xác định các thông số (1) thời gian cấp đông, (2) trường nhiệt độ của thực phẩm.

1.1.7 Kết luận

Cá da trơn là nguồn lợi thủy sản lớn của Việt Nam với tổng kim ngạch xuất khẩu đạt gần hai tỉ USD trong thời gian gần đây. Trong đó cá tra chiếm chủ đạo tới khoảng 90%. Tuy nhiên việc phát triển xuất khẩu mặt hàng cá da trơn đông lạnh đang gặp nhiều thách thức. Trong đó thách thức lớn là chất lượng chế biến chưa cao do công nghệ cấp đông chưa hợp lý với tỷ lệ tổn thất sản phẩm sau thu hoạch khá cao khoảng 20%.

Một trong những nguyên nhân chính dẫn đến tình trạng này là công nghệ cấp đông cá da trơn chưa được nghiên cứu một cách chặt chẽ có hệ thống. Trong hơn hai mươi năm qua tuy sản lượng xuất khẩu cá da trơn tăng trưởng vượt bậc, trang thiết bị cấp đông của

các nhà máy được đầu tư khá hiện đại, nhưng công nghệ cấp đông vẫn chỉ dựa trên kinh nghiệm thực tế và mỗi nhà máy lại có quy trình riêng không giống nhau. Do đó dẫn tới chất lượng sản phẩm cấp đông không ổn định, độ hao hụt lớn, suất tiêu hao năng lượng cao, giảm tính cạnh tranh của mặt hàng này trên thị trường xuất khẩu.

Không những thế việc thiếu nghiên cứu một cách có hệ thống về quá trình cấp đông cá da trơn, đặc biệt là nghiên cứu về tính chất nhiệt vật lý của đối tượng cũng như ảnh hưởng của các thông số chính của môi trường làm lạnh tới kết quả cấp đông dẫn tới việc thiết kế lắp đặt, vận hành, hệ thống cấp đông chưa thật hợp lý với suất tiêu hao năng lượng cao, trong khi chất lượng sản phẩm khó kiểm soát được.

Trong khi đó việc nâng cao chất lượng chế biến các loại hải sản sau thu hoạch nói chung và cá da trơn nói riêng, đang được đặt ra như một thách thức đối với nước ta. Điều này đã được cụ thể hóa trong Nghị Quyết 48/ NQ-CP ngày 23/9/2009[5] của Chính phủ về giảm một nửa tổn thất sau thu hoạch đối với các sản phẩm nông, lâm, thủy hải sản cho tới năm 2020. Vì đây là chìa khóa giải quyết vấn đề an ninh lương thực, đồng thời góp phần giảm ô nhiễm và hủy hoại môi trường thiên nhiên, đảm bảo sự phát triển bền vững của nông nghiệp nước ta.

Để giải quyết được vấn đề nêu trên, thực hiện thành công Nghị Quyết 48, một trong những khâu then chốt là hoàn thiện công nghệ chế biến lạnh thực phẩm của Việt Nam theo hai tiêu chí: nâng cao chất lượng chế biến và sử dụng năng lượng tiết kiệm hiệu quả [5]. Muốn vậy cần thiết phải có những nghiên cứu đầy đủ, có hệ thống hơn về công nghệ lạnh thực phẩm cả về đối tượng được chế biến, cũng như công nghệ và thiết bị được sử dụng làm lạnh hay cấp đông.

1.2 Tổng quan về mô phỏng quá trình làm lạnh cấp đông thực phẩm

1.2.1 Vai trò của việc nghiên cứu mô phỏng quá trình lạnh đông

Trong quá trình làm lạnh hay cấp đông rất quan trọng: (1) dự đoán được thời gian cấp đông, (2) trường nhiệt độ của thực phẩm theo thời gian. **Giải quyết được vấn đề (1) giúp giải quyết bài toán nâng cao chất lượng chế biến, giải quyết được vấn đề (2) cho phép thiết kế, chọn lựa hệ thống lạnh hợp lý (bài toán tiết kiệm năng lượng).** Muốn dự đoán được các thông số trên và đánh giá chất lượng quá trình chế biến lạnh trong điều kiện thực nghiệm không phải bao giờ cũng thực hiện được, cùng với sự đa dạng về đối tượng cấp đông và thiết bị trong thực tế sản xuất. Rất cần thiết phải kết hợp lý thuyết - thực nghiệm xây dựng được mô hình làm lạnh, cấp đông cho thực phẩm. Đây là vấn đề được quan tâm cả ở trong và ngoài nước từ mấy chục năm trở lại đây.

1.2.2 Thực trạng của việc nghiên cứu mô phỏng quá trình lạnh đông

Cho tới nay đã có hàng chục dạng mô hình dùng để mô phỏng quá trình cấp đông thực phẩm được đưa ra sử dụng trong và ngoài nước. Tuy nhiên về bản chất các mô hình này đều dựa trên cơ sở giải hệ phương trình vi phân dẫn nhiệt phi tuyến kết hợp với điều kiện biên cho thực phẩm ở môi trường cấp đông. Phương trình vi phân dẫn nhiệt tổng quát viết cho một phân tử của vật thể được cấp đông có dạng như sau:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(T) \cdot \text{grad}T(\vec{r}, \tau)] + q_v(\vec{r}, \tau) \quad (1.1^a)$$

Trong đó:

$C(T)$ - nhiệt dung riêng phụ thuộc vào nhiệt độ của thực phẩm, kJ/kg.K

$\rho(T)$ - khối lượng riêng phụ thuộc vào nhiệt độ của thực phẩm, kg/m³

$\lambda(T)$ - hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào nhiệt độ của thực phẩm, W/m.K

$q_v(r, \tau)$ - nguồn nhiệt trong, sinh ra do sự chuyển pha của nước phụ thuộc vào tọa độ của phân tử và thời gian τ , W/m³

$T(r, \tau)$ - nhiệt độ của phân tử phụ thuộc vào tọa độ và thời gian, K.

Phương trình dạng (1.1) lần đầu tiên do Stefan đề xuất năm 1889 khi nghiên cứu quá trình đóng băng của lớp nước. Phương trình trên là phương trình viết cho một phân tử của đối tượng được cấp đông. Kết hợp các phân tử lại với nhau ta sẽ có hệ phương trình vi phân dẫn nhiệt, mô tả quá trình dẫn nhiệt không ổn định bên trong vật thể được cấp đông. Tại bề mặt của vật thể bài toán dẫn nhiệt của chúng ta sẽ kết hợp với các điều kiện biên xác định bản chất quá trình trao đổi nhiệt ở bề mặt của vật thể được cấp đông với môi trường cấp đông.

Điều kiện biên: Trong bài toán làm lạnh và cấp đông thực phẩm, chủ yếu gặp điều kiện biên loại 3 hoặc điều kiện biên liên hợp (điều kiện biên loại 4). Điều kiện biên loại 3 đặc trưng cho trường hợp bề mặt thực phẩm tiếp xúc trực tiếp với môi trường làm lạnh và quy luật truyền nhiệt giữa bề mặt và môi trường đã biết trước.

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_n = \alpha [T(\vec{x}_n, \tau) - T_a(\tau)] \quad (1.1^b)$$

Đối với cá da trơn hiện nay chủ yếu là dùng công nghệ cấp đông rời bằng thiết bị cấp đông dạng IQF. Do đó điều kiện biên trong khuôn khổ luận án này được hiểu là điều kiện biên loại 3, có tính đối xứng.

Như vậy, có thể nói bản chất mô hình toán học mô tả quá trình cấp đông của thực phẩm chính là sự liên hợp của hệ phương trình vi phân dẫn nhiệt không ổn định trong vật thể và phương trình trao đổi nhiệt mô tả điều kiện biên ở bề mặt của vật thể. Điều kiện ban đầu của hệ phương trình vi phân là trường nhiệt độ trong lòng thực phẩm đồng đều nhau và bằng nhiệt độ môi trường không khí.

$$T(\vec{x}, \tau = 0) = T_{in}(\vec{x}), \quad (1.1^c)$$

Lời giải của hệ (1.1) cho chúng ta phân bố trường nhiệt độ trong lòng sản phẩm và thời gian cấp đông.

Tuy nhiên khi giải hệ phương trình vi phân dạng (1.1) gặp phải một số vấn đề khó khăn. Tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm như nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt thay đổi đột ngột lân cận điểm đóng băng, dẫn đến những phương trình vi phân từng phần có độ phi tuyến cao, rất phức tạp để giải. Đối với những vật thể có hình dạng phức tạp như thực phẩm, quá trình đóng băng càng khó dự đoán. Lạnh đông trong thực tế bao gồm một vài hiện tượng vật lý diễn ra đồng thời: truyền nhiệt, truyền chất, sự lớn lên của mầm tinh thể, thay đổi thể tích, căng cơ học và các ứng suất.

Các cách tiếp cận khác nhau để giải quyết hệ phương trình vi phân dạng (1.1) sẽ cho các dạng mô hình mô phỏng khác nhau của quá trình cấp đông thực phẩm với độ chính xác khác nhau. Như đã trình bày ở trên các dạng mô hình này rất đa dạng, tuy nhiên nhìn chung có thể chia làm hai dạng chính liên quan tới phương pháp giải quyết bài toán nêu trên. (1) các lời giải dựa trên phương pháp giải tích, (2) các lời giải dựa trên phương pháp số. Dưới đây chúng ta sẽ khảo sát chi tiết từng phương pháp.

1.2.3 Phương pháp giải tích

Phương pháp giải tích dựa trên giả thuyết quá trình chuyển pha là lý tưởng, sự chuyển pha và giải phóng nhiệt ẩn đóng băng diễn ra ở nhiệt độ điểm băng không đổi, thường được ký hiệu là T_f , đồng thời tồn tại bề mặt phân pha giữa vùng đóng băng và vùng chưa đóng băng. Bỏ qua thành phần nhiệt hiện giải phóng trong quá trình kết đông, thông số nhiệt vật lý được xem là hằng số, thực phẩm được xem là dung dịch đồng chất và đẳng hướng. Kết quả nhận được bằng cách giải mô hình 1.1^a trong hai vùng tương ứng với cùng điều kiện biên $T = T_f$ ở bề mặt phân pha.

Phương pháp giải tích nổi tiếng nhất cho bài toán lạnh đông là phương trình Plank (1913)[90], hay còn gọi là phương pháp giả ổn định. Lời giải của bài toán cho thời gian cấp đông, τ_{Plank} , tìm được khi bề mặt phân pha đạt tới tâm sản phẩm.

$$\tau_{Plank} = \frac{\rho L_f}{(T_f - T_a)} \left(\frac{2PR}{\alpha} + \frac{4QR^2}{\lambda} \right) \quad (1.2)$$

Trong đó:

$P = 1/2$ với tấm phẳng rộng vô hạn, $1/4$ với hình trụ dài vô hạn, $1/6$ với khối cầu và $Q = P/4$; R : chiều dày sản phẩm

Do sử dụng phương pháp giải tích phải sử dụng quá nhiều giả thiết không phù hợp với bản chất vật lý của hiện tượng như đã nêu ở trên, do đó kết quả tính toán thời gian cấp đông bằng dạng nghiệm thuần túy của Plank cho thực phẩm có sự sai lệch rất lớn trong thực tế, đặc biệt với các loại thực phẩm có cấu trúc phức tạp, có dạng hình học phi tiêu chuẩn sai số lên đến 50% khi dự đoán thời gian cấp đông.

Khắc phục các nhược điểm trên các tác giả trong các công trình [23-30,35-37,40-44,80-88] đã cải tiến mô hình do R. Plank đề xuất, bằng cách đưa thêm một số hệ số hiệu chỉnh. Chẳng hạn Phạm (1986a) mở rộng cho những vật có hình dáng tiêu chuẩn khác (hình trụ hữu hạn, thanh hình chữ nhật dài vô hạn...) bằng cách sử dụng hệ số hình học E như sau: $E=1$ đối với tấm phẳng, $E=2$ với hình trụ dài vô hạn, $E=3$ với hình cầu. Đối với những vật có hình dáng xác định nhiều chiều (thanh hình chữ nhật dài vô hạn, hình trụ hữu hạn...), biểu thức giải tích cho hệ số E cho dưới dạng chuỗi vô hạn (McNabb, 1990a, 1990b)[69-70] và đồ thị (Hossain, 1992a) [71]. Nhìn chung các hệ số này được xác định bằng phương pháp hồi quy từ số liệu thực nghiệm cho trước [19-22, 62-63,106-108..]. Bảng 1.3 trình bày tổng hợp các dạng công thức tính toán thời gian cấp đông là biến thể của dạng nghiệm của phương trình Plank (1.2).

Bảng 1.3 Tổng hợp các mô hình xác định thời gian cấp đông điển hình

Stt	Tác giả	Mô hình toán
1	R Plank	$\tau_{Plank} = \frac{\rho L_f}{(T_f - T_a)} \left(\frac{2PR}{\alpha} + \frac{4QR^2}{\lambda} \right)$
2	J Nagaoka, S Takagi, S Hotan	$\tau_f = \frac{\Delta H \rho}{t_f - t_i} \left[\frac{Pa}{\alpha_c} + \frac{Ra^2}{\lambda_i} \right]$ $\Delta H' = (1 + 0,008t_i)(C_{pu}(t_i - t_f) + L_v C_{pi}(t_f - t))$
3	FL Levy	$\Delta H' = (1 + 0,008(t_i - t_f))(C_{pu}(t_i - t_f) + L_v C_{pi}(t_f - t))$
4	Cleland	$t_f = \frac{1,3179\rho C_{pi} a^2}{\lambda_i E} \left[\frac{0,5}{N_{Bi} N_{ste}} + \frac{0,125}{N_{ste}} \right]^{0,9576} N_{ste}^{0,0550}$ $\times 10^{0,0017N_{Bi} + 0,1727N_{pk}} \left[1 - \frac{1,65N_{ste}}{\lambda_i} \ln \left(\frac{t - t_f}{t_{ref} - t_f} \right) \right]$
5	Q.T. Phạm	$\tau_{slab} = \frac{\rho a}{2\alpha} \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left[1 + \frac{N_{Bi}}{4} \right]; \tau_{batky} = \frac{\tau_{tam\ phang}}{E}$ $E = 1 + \frac{1 + \frac{2}{\beta_1 + \frac{2\beta_1}{N_{Bi}}}}{\beta_1 + \frac{2\beta_1}{N_{Bi}}} + \frac{1 + \frac{2}{\beta_2 + \frac{2\beta_2}{N_{Bi}}}}{\beta_2 + \frac{2\beta_2}{N_{Bi}}}; \beta_1 = \frac{A}{\pi R^2}; \beta_2 = \frac{V}{\beta_1 \left(\frac{4}{3\pi R^3} \right)}$

Từ bảng 1.3 có thể thấy những hạn chế của phương pháp giải tích là chỉ cho thời gian cấp đông, mà không xác định được trường nhiệt độ.

Hơn nữa những dạng công thức trong bảng 1.3 chỉ có thể áp dụng cho một số loại thực phẩm có thông số nhiệt vật lý được xác định trước. Đồng thời cũng một câu hỏi đặt ra là các đại lượng nhiệt vật lý được sử dụng trong các công thức ở trên như hệ số trao đổi nhiệt đối lưu α , hệ số dẫn nhiệt λ , hiệu enthalpy của thời điểm đầu và cuối của quá trình cấp đông ΔH sẽ được tính toán như thế nào nếu không biết được trường nhiệt độ, hàm lượng nước đóng băng phụ thuộc vào nhiệt độ.

Giả thiết quá trình chuyển pha là lý tưởng, sự chuyển pha và giải phóng nhiệt ẩn đóng băng diễn ra ở nhiệt độ điểm băng không đổi đồng thời tồn tại bề mặt phân pha giữa vùng đóng băng và vùng chưa đóng băng là không đúng. Vì trong khi thực tế trong quá trình kết đông diễn ra ở nhiệt độ thay đổi do sự phát triển của mầm tinh thể băng và không tồn tại bề mặt phân pha

Do đó với cá tra tại Việt nam đặc biệt với thông số nhiệt vật lý chưa được xác định, không thể áp dụng các mô hình toán trên để xác định thời gian cấp đông của thực phẩm. Giải pháp tốt nhất để mô phỏng quá trình cấp đông cá tra là giải phương trình dạng (1.1) bằng phương pháp số.

1.2.4 Phương pháp số giải hệ phương trình vi phân dẫn nhiệt

Bản chất phương pháp số để giải hệ phương trình (1.1) bao gồm hai bước: rời rạc hóa các miền liên tục để thu được một bộ phương trình vi phân thường (ODE) tương ứng với các nút nhiệt độ, sau đó giải bộ phương trình ODE bằng cách chuyển phương trình vi phân về phương trình đại số tuyến tính qua phép xấp xỉ sai phân. Bộ phương trình vi phân thường có thể viết dưới dạng ma trận như sau:

$$C \frac{dT}{d\tau} + \lambda T = f \quad (1.3)$$

Trong đó T là vectơ các nút nhiệt độ, C là ma trận nhiệt dung (bao gồm nhiệt dung riêng c), λ là ma trận dẫn nhiệt (bao gồm hệ số dẫn nhiệt λ), f là ma trận nguồn nhiệt (bao gồm nguồn nhiệt bên trong và dòng nhiệt từ biên). Dạng chính xác của hệ phương trình dạng (1.3) phụ thuộc vào phương pháp rời rạc hóa được sử dụng. Hiện nay có 3 phương pháp rời rạc hóa thông dụng là: sai phân hữu hạn (FDM), phân tử hữu hạn (FEM) và thể tích hữu hạn (FVM).

- *Phương pháp Sai phân hữu hạn (SPHH)* là phương pháp số tương đối đơn giản và ổn định. Nội dung của phương pháp này là biến đổi một cách gần đúng các đạo hàm riêng của phương trình vi phân chủ đạo thành sai phân, tức là tỉ số của các số gia tương ứng. Bằng cách dùng các họ đường song song với các trục tọa độ để tạo thành một mạng lưới chia miền nghiệm trong vật thể thành một số hữu hạn các điểm nút, rồi xác định nhiệt độ của phân tử tại các nút đó thay cho việc tính nhiệt độ trên toàn miền. Như vậy phương pháp SPHH đã xấp xỉ các phương trình vi phân đạo hàm riêng thành các phương trình đại số. Kết quả thiết lập được hệ phương trình đại số gồm n phương trình tương ứng với giá trị nhiệt độ của n nút cần tìm.

Mức độ chính xác của nghiệm trong phương pháp SPHH có thể được cải thiện nhờ việc tăng số điểm nút. Phương pháp SPHH rất hữu hiệu trong việc giải nhiều bài toán truyền nhiệt phức tạp mà phương pháp giải tích gặp khó khăn. Tuy nhiên khi gặp phải vật thể có hình dạng bất quy tắc hoặc điều kiện biên giới bất thường, phương pháp SPHH cũng có thể khó sử dụng.

Theo phương pháp SPHH, nhiệt độ tại các điểm nút được xác định như sau:

- Từ phương trình vi phân dẫn nhiệt, chuyển về phương trình ma trận đặc trưng: