

MÔ HÌNH HÓA PHÒNG ĐOÁN NHIỆT ĐỘ SẢN PHẨM TRONG QUÁ TRÌNH THANH TRÙNG ĐỒ HỘP DẠNG DUNG DỊCH CÓ CHỨA CÁC CHẤT RẮN

Lê Văn Tạng¹, Phan Văn Thom² và Võ Tấn Thành³

ABSTRACT

Data based mechanistic modeling approach was developed to predict particle temperature during pasteurization of liquid/particulate canned food. Fish balls in CMC solutions were filled in a 307x203 can as the examples of liquid/particulate canned food. During the experiments, step input of hot water was applied while particle temperature was recorded. The simplified refined instrument variable (SRIV) algorithm was used as the model parameter identification tool to obtain the best model order and parameters. A transfer function in form $\frac{b_0}{s^2 + a_1 \cdot s + a_2}$ from the dynamic response of particle temperature from heating medium with high coefficient of determination, low standard error, and low in YIC explained the heat exchange in a system. The measured data and the model providing a physically meaningful parameter related to both heat transfer coefficient from heating medium to liquid, and from liquid to particle could be used for predicting of particle temperature and calculating F value during pasteurization process.

Keywords: Modeling, pasteurization, thermal processing

Title: Data based mechanistic modeling approach for predicting particle temperature in liquid/particulate canned foods during pasteurization process

TÓM TẮT

Mô hình hộp đen chứa tham số vật lý có ý nghĩa được phát triển cho mục tiêu phỏng đoán nhiệt độ của vật thể rắn trong đồ hộp chứa vật thể rắn trong dung dịch. Chả cá viên trong môi trường có độ nhớt khác nhau (nồng độ CMC khác nhau) được sử dụng đại diện cho đồ hộp lỏng chứa cấu tử rắn trong quá trình mô hình hóa. Trong quá trình thí nghiệm, thí nghiệm “bước” được thực hiện với nhiệt độ nước gia nhiệt thay đổi từ 50°C đến 80°C, dữ liệu nhiệt độ môi trường gia nhiệt và nhiệt độ của chả cá viên được ghi nhận trong quá trình thí nghiệm được sử dụng trong việc mô hình hóa. Hàm truyền ghi nhận có dạng

$$\frac{b_0}{s^2 + a_1 \cdot s + a_2}$$

trong đó các tham số được tính toán từ thuật toán SRIV (the simplified refined instrument variable) có độ chính xác cao và có thể sử dụng biểu thị cho quá trình truyền nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến sản phẩm. Hàm truyền ghi nhận chứa tham số vật lý có ý nghĩa trong tham số b_0 . Tham số b_0 chứa cả hai hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch và từ dung dịch đến chả cá viên. Chính vì vậy, có thể sử dụng hàm truyền vừa tìm được cho việc phỏng đoán nhiệt độ các vật thể rắn trong đồ hộp dung dịch có chứa các vật thể lơ lửng nhằm kiểm soát thời gian chết nhiệt, giúp chế biến sản phẩm an toàn và tiết kiệm năng lượng.

Từ khóa: mô hình hóa, thanh trùng, chế biến nhiệt

¹ Khoa Nông nghiệp và Sinh học Ứng dụng, Trường Đại học Tiền Giang

² Trường Đại Học Tây Đô

³ Khoa Nông nghiệp và Sinh học Ứng dụng, Trường Đại học Cần Thơ

1 MỞ ĐẦU

Chế biến nhiệt là hình thức bảo quản thực phẩm với mục đích giảm mật số vi sinh vật trong sản phẩm nhằm bảo đảm an toàn cho người sử dụng (Ghani *et al.*, 2003). Trong chế biến nhiệt thực phẩm chứa trong bao bì, nhiệt được truyền từ môi trường gia nhiệt (*nước, hơi nước hoặc hỗn hợp hơi nước – không khí*) đến bề mặt bao bì theo hình thức đối lưu với hệ số truyền nhiệt bề mặt cao nên có thể bỏ qua nhiệt trở do dẫn nhiệt qua bao bì (Farid & Ghani, 2004). Chính vì vậy, hệ số truyền nhiệt tổng quát (*overall heat transfer coefficient*) ít được đề cập đến trong quá trình chế biến nhiệt thực phẩm. Nhiệt truyền từ môi trường gia nhiệt tới sản phẩm bên trong bao bì theo cơ chế: dẫn nhiệt, đối lưu nhiệt và kết hợp giữa đối lưu và dẫn nhiệt tùy thuộc vào dạng thực phẩm: rắn, lỏng, lỏng có các vật thể rắn (Herson & Hulland, 1980). Tuy nhiên, truyền nhiệt do dẫn nhiệt luôn được sử dụng trong các tính toán các quá trình (Ghani *et al.*, 2003). Các dạng thực phẩm như đồ hộp cá, xi rô nồng độ cao, các dung dịch có nồng độ cao quá trình truyền nhiệt trong gia nhiệt thực phẩm có thể xem là truyền nhiệt do dẫn nhiệt (Ghani & Ferid, 2010).

Trong quá trình chế biến nhiệt, nhiệt độ và thời gian là 2 yếu tố quan trọng không những ảnh hưởng tới chất lượng sản phẩm, mức độ an toàn của thực phẩm đến tay người tiêu dùng mà còn liên quan đến việc tiêu thụ năng lượng trong sản xuất (Ansorena *et al.*, 2010). Chính vì vậy, nhiệt độ là tham số cần được ghi nhận để kiểm soát trong quá trình chế biến nhiệt, đặc biệt là nhiệt độ sản phẩm.

Hiện tại, việc kiểm soát nhiệt độ sản phẩm bên trong đồ hộp gặp nhiều khó khăn. Đặc biệt là đồ hộp dạng lỏng có chứa các vật thể bên trong như: đồ hộp quả nước đường, bắp hạt trong dung dịch, nấm rơm trong dung dịch muối,... Chính vì vậy, nhiệt độ dung dịch thường được sử dụng trong tính toán đánh giá quá trình chế biến nhiệt, dẫn đến sai số lớn (*các nhà máy luôn thực hiện với hệ số an toàn cao*). Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến các vật thể trong dung dịch được các tác giả Nikolaos & Richard, 1990; Marquez *et al.*, 2003; Meng & Ramaswamy, 2005; Dwivedi & Ramaswamy, 2010; Ramaswamy & Dwivedi, 2011 thực hiện. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ ở mức độ tìm hiểu quá trình truyền nhiệt đến các vật thể để tính toán phân bố vận tốc của lưu chất bên trong hộp, so sánh nhiệt độ vật thể và môi trường, tính toán quá trình truyền có liên quan đến độ nhớt,... chưa có bất kỳ nghiên cứu nào liên quan đến việc phỏng đoán nhiệt độ các cấu tử từ môi trường gia nhiệt hoặc từ dung dịch nhằm có thể tính toán thời gian chết nhiệt (F-value) chính xác.

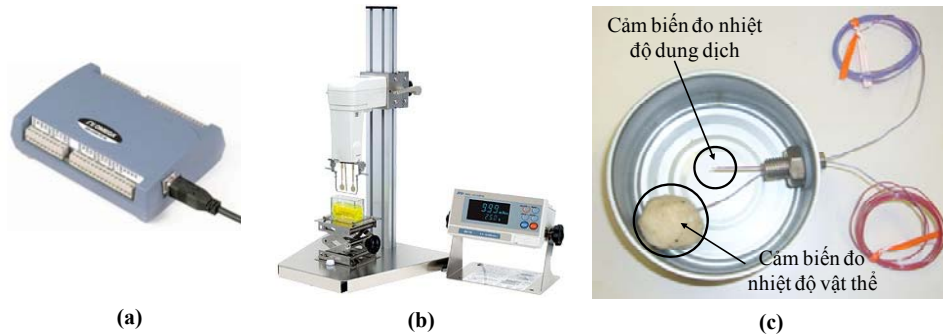
Nghiên cứu mô hình hóa quá trình truyền nhiệt trong thanh trùng đồ hộp dạng dung dịch có chứa các chất rắn giúp phỏng đoán chính xác nhiệt độ sản phẩm từ nhiệt độ môi trường nhằm tính toán chính xác thời gian chết nhiệt, quản lý tốt quá trình thanh trùng thực phẩm.

2 PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1 Phương tiện

Chả cá viên có đường kính 2,5 cm trong dung dịch CMC ở các mức nồng độ khác nhau chứa trong hộp 303x207 được lựa chọn cho quá trình phát triển mô hình (*mô hình có khả năng sử dụng cho chả cá viên thì cũng có khả năng sử dụng cho các*

sản phẩm tương tự). Hộp chứa vật liệu thí nghiệm được đặt vào một bể điều nhiệt với môi trường truyền nhiệt là nước có khuấy trộn, có khả năng điều chỉnh nhiệt độ theo yêu cầu của thí nghiệm. Nhiệt độ môi trường gia nhiệt, dung dịch trong hộp và vật thể rắn được ghi nhận bằng các cảm biến loại T với độ chính xác 0,01°C, kết nối với máy tính thông qua hệ thống analog OM-USB-TC (*Omega, Mỹ*) có độ phân giải 24 bit, có khả năng ghi nhận 8 kênh nhiệt độ độc lập (Hình 1a). Nhớt kế SV-100 (*Nhật*) có kết nối với máy tính được sử dụng đo đặc độ nhớt dung dịch CMC tại các nhiệt độ khác nhau (Hình 1b).

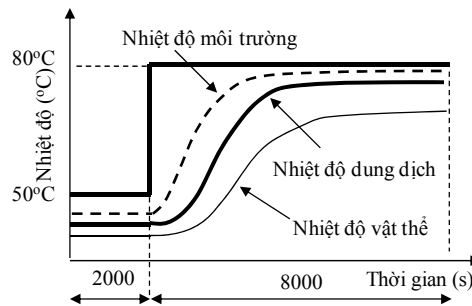


Hình 1: (a) Hệ thống ghi nhận nhiệt độ OM-USB-TC; (b) Nhớt kế SV 100; (c) Bộ trí cảm biến đo đặc nhiệt độ trong quá trình làm thí nghiệm

2.2 Phương pháp nghiên cứu

2.2.1 Chuẩn bị dữ liệu

Để thu nhận nhiệt độ thay đổi theo thời gian cho quá trình mô hình hóa, thí nghiệm “bước” được thực hiện với nhiệt độ môi trường gia nhiệt thay đổi từ 50°C tới 80°C với thời gian 2000 s ở trạng thái ổn định và 8000 s trong giai đoạn nâng nhiệt (Hình 2). Dữ liệu biến thiên nhiệt độ dung dịch, vật thể theo biến thiên nhiệt độ môi trường thu nhận được sử dụng cho quá trình mô hình hóa.



Hình 2: Thay đổi nhiệt độ môi trường, dung dịch và vật thể khi thực hiện thí nghiệm “bước”

2.2.2 Mô hình hộp đen có chứa tham số vật lý có ý nghĩa

Quá trình mô hình hóa và tìm các thông số vật lý có ý nghĩa được thực hiện theo 2 giai đoạn: (1) Từ dữ liệu thực nghiệm tiến hành mô hình hóa dựa trên cơ sở hộp đen tìm được hàm truyền thực tế; (2) Chuyển đổi các phương trình truyền nhiệt cơ bản tìm hàm truyền lý thuyết. Sau giai đoạn tìm 2 hàm truyền tương ứng, đồng dạng 2 hàm truyền nhằm tham số có ý nghĩa vật lý trong mô hình. Quá trình mô

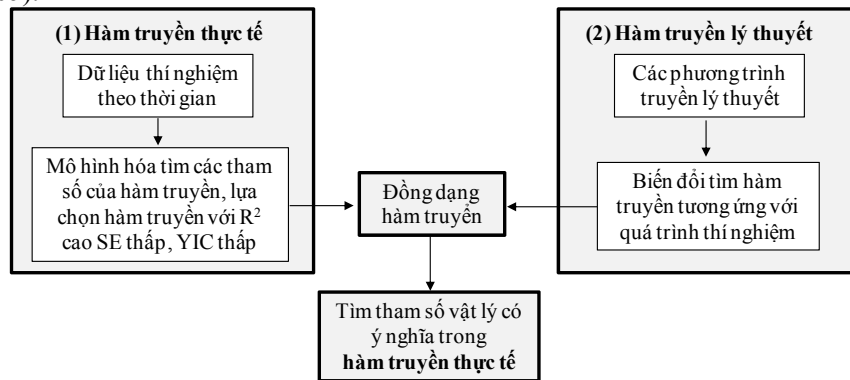
hình hóa thực hiện xem như đạt yêu cầu khi tìm được ít nhất 1 tham số có ý nghĩa vật lý chứa trong hàm truyền thực tế. Quá trình tính toán mô tả ở hình 3.

Giai đoạn 1: tìm hàm truyền thực tế

Dữ liệu biến đổi nhiệt độ theo thời gian trong quá trình thí nghiệm (*nhiệt độ môi trường và vật thể*) được sử dụng cho việc tìm hàm truyền và các tham số chứa trong hàm truyền tương ứng. Hàm truyền cho một dữ liệu thay đổi và một kết quả thu nhận khi dữ liệu thay đổi (*Single Input – Single Output*) có dạng:

$$x(t) = \frac{B(s)}{A(s)}u(t - \tau) \text{ và } y(t) = x(t) + e(t) \text{ hay } y(t) = \frac{B(s)}{A(s)}u(t - \tau) + e(t)$$

Với: A(s) và B(s) là hàm bậc cao chứa s = d/dt; e(t): sai số của mô hình; τ: thời gian trễ (s); t: thời gian (s); u(t): nguồn tác động; y(t): kết quả thu nhận do nguồn tác động (*có chứa sai số*); x(t): kết quả thu nhận do nguồn tác động (*không chứa sai số*).



Hình 3: Mô hình hộp đen chứa tham số vật lý có ý nghĩa

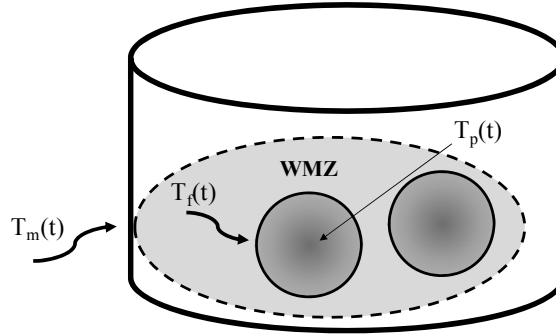
Mặc dù có nhiều phương pháp để tìm các tham số trong hàm truyền. Thuật toán Simplified Refined Instrumental Variable (SRIV) được lựa chọn và sử dụng cho tính toán với ưu điểm: có thể tính toán hàm truyền liên tục từ các dữ liệu không liên tục, các tham số được lựa chọn chính xác có khả năng tối ưu hóa nhằm làm giảm các bậc của hàm truyền và có khả năng mô hình hóa trực tuyến (Young, 1984). Các tham số của hàm truyền được tính toán dựa vào công cụ SRVIC được tích hợp trong captain toolbox matlab (<http://www.es.lancs.ac.uk/cres/captain/>).

Hàm truyền tốt nhất được lựa chọn dựa trên hệ số tương quan R² và chỉ số YIC (*Young Critical Identification*). YIC là tham số được tính toán rất phức tạp. Tuy nhiên, trong công thức YIC chứa các tham số biểu thị cho mức độ tương thích của phương trình như hệ số tương quan (R²), độ lệch chuẩn (SE) và bậc của hàm truyền (Young, 1984). Hàm truyền được lựa chọn theo giá trị YIC càng thấp. Việc tìm hàm truyền tương thích với các tham số trong các hàm truyền từ các dữ liệu thí nghiệm được gọi là hàm truyền thực tế.

Giai đoạn 2: tìm hàm truyền lý thuyết

Nghiên cứu sự đồng nhất nhiệt độ của không khí trong phòng không có vật thể. Berckmans *et al.*, 1992; De Moor & Berckmans, 1993 đã chứng minh rằng trong không gian không đồng nhất về nhiệt độ hoàn toàn có thể định nghĩa một vùng đồng nhất về nhiệt độ xung quanh cảm biến đo đặc nhiệt độ, độ lớn của vùng đồng

nhất được xác định thông qua một khác biệt nhiệt độ (ΔT) ở mức độ có thể chấp nhận.



Hình 4: Biểu diễn quá trình truyền nhiệt từ môi trường đến vật thể rắn trong quá trình thanh trùng

Ứng dụng trong trường hợp thanh trùng sản phẩm chứa các vật thể rắn lơ lửng trong dung dịch. Với giả sử đồng nhất nhiệt độ cho dung dịch chứa trong bao bì và đồng nhất nhiệt độ các vật thể lơ lửng với một mức khác biệt nhiệt độ có thể chấp nhận, nhiệt dung riêng của sản phẩm chứa trong hộp ít biến đổi theo nhiệt độ.

Hàm truyền lý thuyết được xây dựng trên cơ sở các định luật cơ bản của quá trình truyền nhiệt: từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch; từ dung dịch đến các vật thể rắn và từ môi trường gia nhiệt đến các vật thể rắn. Quá trình truyền được mô tả ở hình 4. Với nhiệt độ môi trường $T_m(t)$, nhiệt độ dung dịch $T_f(t)$ và nhiệt độ sản phẩm $T_p(t)$.

Trong trường hợp có một vùng đồng nhất nhiệt độ trong thiết bị thanh trùng (*môi trường gia nhiệt*). Trong môi trường đồng nhất có chứa một hộp, bên trong hộp chứa vật thể rắn lơ lửng trong dung dịch (*đồng nhất nhiệt độ dung dịch, đồng nhất nhiệt độ các vật thể*). Phân tích quá trình truyền nhiệt có thể thấy: (1) Quá trình truyền từ môi trường gia nhiệt đến bề mặt hộp là quá trình gia nhiệt do đối lưu và dung dịch ít chuyển động trong quá trình gia nhiệt (*xem như dẫn nhiệt*); (2) Quá trình truyền nhiệt từ dung dịch đến các vật thể rắn trong dung dịch là quá trình truyền nhiệt do đối lưu.

Cân bằng nhiệt lượng cho 2 trường hợp được mô tả:

Từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch (truyền nhiệt do đối lưu)

Phương trình truyền nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp được mô tả (Mritunjay & Hosahalli, 2009).

$$hS(T_m(t)-T_f(t)) = m_f C_{pf} \frac{dT_f(t)}{dt} \tag{1}$$

Với: m_f : khối lượng dung dịch (kg); C_{pf} : nhiệt dung riêng của dung dịch trong hộp ($J/kg^\circ C$); h : hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch ($W/m^2^\circ C$); S : diện tích bề mặt của hộp (m^2); $T_f(t)$: nhiệt độ dung dịch theo thời gian t ($^\circ C$); $T_m(t)$: nhiệt độ môi trường gia nhiệt theo thời gian t ($^\circ C$).

Phương trình (1) được viết lại:

$$\frac{dT_f(t)}{dt} = \frac{hS}{m_f C_{pf}} (T_m(t) - T_f(t)) \quad (2)$$

Ở trạng thái ổn định $\frac{dT_f(t)}{dt} = 0$ tương ứng với nhiệt độ môi trường gia nhiệt $\bar{T}_m(t)$ và nhiệt độ dung dịch bên trong hộp $\bar{T}_f(t)$. Phương trình cân bằng nhiệt được viết lại:

$$\frac{hS}{m_f C_{pf}} (\bar{T}_m(t) - \bar{T}_f(t)) = 0 \quad (3)$$

Khi xét thay đổi nhiệt độ môi trường gia nhiệt và nhiệt độ dung dịch bên trong hộp so với nhiệt độ môi trường gia nhiệt và dung dịch tại trạng thái ổn định.

Lấy phương trình (3) trừ cho phương trình (2) và đặt: $t_m(t) = T_m(t) - \bar{T}_m(t)$; $t_f(t) = T_f(t) - \bar{T}_f(t)$. Phương trình mới được thu nhận có dạng:

$$\frac{dt_f(t)}{dt} = \frac{hS}{m_f C_{pf}} (t_m(t) - t_f(t)) \quad (4)$$

Hay
$$\frac{dt_f(t)}{dt} = \alpha_1 (t_m(t) - t_f(t)) \quad (5)$$

Với
$$\alpha_1 = \frac{hS}{m_f C_{pf}} \quad (6)$$

α_1 : được định nghĩa là tốc độ gia nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp (1/s). Đây là tham số có liên quan đến: hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp (h); diện tích bề mặt hộp (S); nhiệt dung riêng dung dịch chứa bên trong hộp (C_{pf}); khối lượng dung dịch chứa trong hộp (m_f). Với một hộp có kích thước xác định và chứa sản phẩm biết trước, tốc độ gia nhiệt α_1 phụ thuộc vào hệ số truyền nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp (h).

Lấy Laplace phương trình (5), phương trình biểu thị cho quá trình truyền nhiệt từ bên ngoài môi trường đến dung dịch bên trong hộp với các giả sử tương ứng (phương trình (7)) được xác định:

$$t_f(t) = \frac{\alpha_1}{s + \alpha_1} t_m(t) \quad (7)$$

Phương trình (7) chứa tốc độ gia nhiệt α_1 , là tham số có liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt h từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp.

Từ dung dịch bên trong hộp đến vật thể rắn

Tương tự quá trình truyền nhiệt từ dung dịch bên trong hộp đến các cấu tử rắn. Cân bằng nhiệt cho quá trình được mô tả theo phương trình (8):

$$m_p C_p \frac{dT_p(t)}{dt} = h_f S_p (T_f(t) - T_p(t)) \quad (8)$$

Với: m_p : trọng lượng một vật thể rắn (kg); C_p : nhiệt dung riêng của cấu tử rắn (J/kg°C); h_f : hệ số truyền nhiệt bề mặt từ dung dịch bên trong hộp đến cấu tử rắn

(W/m²°C); S_p: diện tích bề mặt của một vật thể (m²); T_f(t): nhiệt độ dung dịch theo thời gian t (°C); T_p(t): nhiệt độ vật thể theo thời gian t (°C).

Phương trình (8) có thể viết lại:

$$\frac{dT_p(t)}{dt} = \frac{h_f S_p}{m_p C_p} (T_f(t) - T_p(t)) \quad (9)$$

Chứng minh tương tự trong trường hợp truyền nhiệt từ môi trường đến dung dịch với các giả sử tương ứng. Hàm truyền thể hiện cho quá trình truyền nhiệt từ dung dịch bên trong hộp đến vật thể có dạng:

$$t_p(t) = \frac{\alpha_2}{s + \alpha_2} t_f(t) \quad (10)$$

Với: t_f(t): nhiệt độ dung dịch theo thời gian (°C); t_p(t): nhiệt độ vật thể theo thời gian (°C); α₂: tốc độ gia nhiệt từ dung dịch bên trong hộp đến vật thể (1/s).

$$\alpha_2 = \frac{h_f S_p}{m_p C_p} \quad (11)$$

Hệ số α₂ trong phương trình (10) có chứa tham số liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt h_f từ dung dịch bên trong hộp đến vật thể (phương trình (11)).

Từ môi trường gia nhiệt đến vật thể rắn bên trong hộp

Phương trình cân bằng nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch bên trong hộp có chứa n vật thể rắn được thể hiện ở phương trình (12) (Mritunjay & Hosahalli, 2009).

$$hS(T_m(t) - T_f(t)) = m_f C_{pf} \frac{dT_f(t)}{dt} + n m_p C_p \frac{dT_p(t)}{dt} \quad (12)$$

Ở trạng thái ổn định nhiệt độ môi trường; nhiệt độ dung dịch và nhiệt độ vật thể trong hộp lần lượt là $\bar{T}_m(t)$, $\bar{T}_f(t)$, $\bar{T}_p(t)$.

Nếu chỉ xét biến thiên của nhiệt độ môi trường, dung dịch trong hộp và vật thể so với trạng thái nhiệt độ ổn định. Phương trình truyền nhiệt có thể viết lại:

$$hS(t_m(t) - t_f(t)) - m_f C_{pf} \frac{dt_f(t)}{dt} - n m_p C_p \frac{dt_p(t)}{dt} = 0 \quad (13)$$

Lấy Laplace phương trình (13):

$$hS(t_m(t) - t_f(t)) - s m_f C_{pf} t_f(t) - s n m_p C_p t_p(t) = 0 \quad (14)$$

Với s: toán tử Laplace s=d/dt.

Kết hợp phương trình (14), phương trình (10), phương trình (7) và rút gọn các phương trình. Hàm truyền biểu thị cho quá trình truyền thể hiện ở phương trình (15).

$$t_p(t) = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{s^2 + (\alpha_1 + \alpha_2 + n \alpha_2) s + \alpha_1 \alpha_2} t_m(t) \quad (15)$$

α_1 và α_2 là tốc độ gia nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch và từ dung dịch đến vật thể rắn trong quá trình thanh trùng.

Đặt $\alpha = \alpha_1\alpha_2$; $\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + n\alpha_2$. Phương trình (15) được rút gọn có dạng:

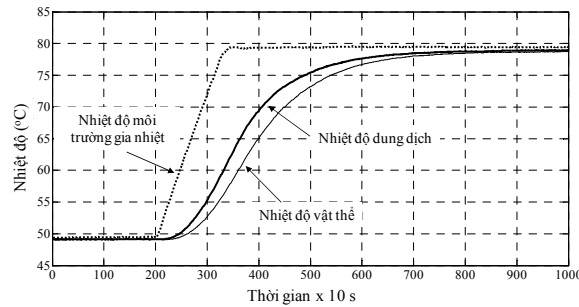
$$t_p(t) = \frac{\alpha}{s^2 + \beta s + \alpha} t_m(t) \tag{16}$$

Phương trình (16) được gọi là hàm truyền lý thuyết (hàm truyền từ chuyển đổi các phương trình truyền nhiệt với các giả sử tương ứng).

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Sự thay đổi nhiệt độ môi trường và sản phẩm trong quá trình thí nghiệm

Biến đổi nhiệt độ của dung dịch trong hộp và vật thể theo điều kiện nhiệt độ môi trường trong quá trình làm thí nghiệm được mô tả ở hình 5 như là ví dụ cho tính toán.



Hình 5: Sự thay đổi nhiệt độ môi trường và sản phẩm thu nhận trong thí nghiệm (nồng độ CMC 10%)

Có thể thấy khi thay đổi nhiệt độ của môi trường gia nhiệt từ 50 đến 80°C (trong thí nghiệm bước), nhiệt độ của dung dịch bên trong hộp và nhiệt độ vật thể tăng dần đến nhiệt độ cài đặt. Tuy nhiên, nhiệt độ vật thể tăng chậm hơn so với nhiệt độ của dung dịch.

3.2 Tính toán các tham số trong hàm truyền thực tế

Dữ liệu thay đổi nhiệt độ môi trường gia nhiệt và nhiệt độ vật thể được sử dụng cho việc mô hình hóa. Dữ liệu thí nghiệm cho một vật thể rắn (chả cá) chứa trong dung dịch CMC 10% được chọn như một ví dụ trong việc lựa chọn hàm truyền thích hợp. Các tham số dùng so sánh các hàm truyền được thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1: So sánh các tham số đánh giá các hàm truyền (một vật thể trong dung dịch CMC 10%)

Bậc hàm truyền	Hệ số tương quan R ²	Độ lệch chuẩn	Hệ số YIC
[1 1]	0,99522	5,05.10 ⁻¹	-14,99
[2 1]	0,99942	6,09.10 ⁻²	-15,93
[1 2]	0,99997	2,26.10 ⁻³	-21,99
[2 2]	0,99999	1,07.10 ⁻³	-18,53

Ghi chú: [b a]: b bậc của tử số; a bậc của mẫu số.

Ở bảng 1 có thể thấy, bậc hàm truyền càng cao tương ứng với hệ số tương quan càng tiến dần đến 1, sai số chuẩn (SE) cũng giảm dần theo chiều tăng của bậc hàm

truyền. Tuy nhiên, hàm truyền được lựa chọn dựa theo tiêu chí hệ số YIC càng thấp, nên hàm truyền bậc [1 2] được lựa chọn để biểu thị cho quá trình truyền nhiệt từ môi trường gia nhiệt đến các vật thể rắn chứa trong dung dịch. Hàm truyền được lựa chọn có dạng:

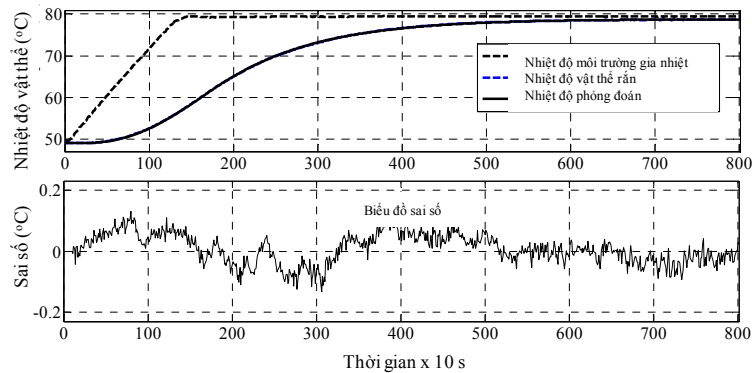
$$t_p(t) = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_2} t_m(t) \tag{17}$$

Kết quả tính toán các tham số chứa trong hàm truyền [1 2] cho trường hợp 1 vật thể chứa trong dung dịch ở các mức nồng độ và độ nhớt khác nhau thể hiện ở bảng 2:

Bảng 2: Các tham số trong hàm truyền [1 2] cho trường hợp vật thể trong các môi trường thay đổi

CMC (%)	Độ nhớt (mPa.s)		b ₀	a ₁	a ₂	R ²	SE	YIC
	50°C	80°C						
0	1,69	1,13	0,0049750	0,13860	0,005004	≈1	0,0031	-19,48
2	14,94	6,09	0,0029660	0,11250	0,003022	0,9994	0,0611	-14,09
4	62,54	31,23	0,0012540	0,14510	0,001246	0,9979	0,2211	-9,88
6	192,04	69,75	0,0004793	0,05731	0,000482	0,9990	0,1470	-13,03
8	423,12	156,53	0,0002413	0,03291	0,000242	≈1	0,0036	-21,62
10	976,52	370,20	0,0003035	0,04100	0,000306	≈1	0,0023	-21,99

R²: hệ số tương quan; SE: sai số chuẩn; YIC: hệ số YIC; b₀, a₁, a₂: các tham số trong hàm truyền [1 2].



Hình 6: Biểu diễn phỏng đoán nhiệt độ vật thể và đánh giá sai số tương ứng với hàm truyền bậc [1 2] (một vật thể trong dung dịch CMC 10%)

Biểu diễn cho thấy sự tương thích của hàm truyền được thể hiện thông qua giá trị phỏng đoán và sai số của hàm truyền (Hình 6). Kết quả cho thấy: giá trị phỏng đoán trùng khớp với nhiệt độ vật thể rắn được ghi nhận và sai số phỏng đoán nhỏ hơn 0,2°C tương ứng cho thấy việc lựa chọn hàm truyền bậc [1 2] biểu thị cho quá trình truyền nhiệt là chính xác.

3.3 Đồng dạng hàm truyền

Hàm truyền lý thuyết (phương trình (16)) có dạng $t_p(t) = \frac{\alpha}{s^2 + \beta.s + \alpha} t_m(t)$ với

$\alpha = \alpha_1.\alpha_2$ nên α chứa cả 2 tham số có liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt. α_1 liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường gia nhiệt đến dung dịch; α_2

liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt từ dung dịch đến vật thể. Hàm truyền thực tế thu nhận từ thí nghiệm (phương trình (17)) có dạng $t_p(t) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_2} t_m(t)$. Đồng

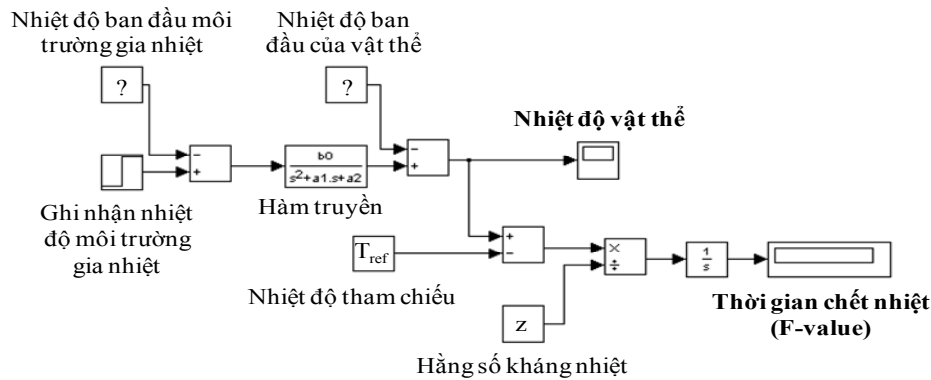
dạng 2 phương trình có thể thấy $\alpha = b_0$. Hệ số α hoàn toàn có thể thu nhận từ thí nghiệm. Nói cách khác, hàm truyền thực tế thu nhận từ dữ liệu thí nghiệm có chứa tham số vật lý có ý nghĩa. Tham số vật lý có ý nghĩa trong hàm truyền được ghi nhận là tham số có liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường gia nhiệt tới dung dịch và từ dung dịch tới vật thể.

Các kết quả tính toán ở bảng 2 cũng cho thấy: giá trị b_0 không khác biệt quá lớn so với tham số a_2 tương ứng với 1 điều kiện thí nghiệm cho thấy tính chính xác của hàm truyền được lựa chọn (hàm truyền bậc [1 2]).

Mặt khác, ở Bảng 2 cũng cho thấy α giảm khi nồng độ CMC cao, rất phù hợp với lý thuyết truyền nhiệt, càng cho thấy tham số α là tham số có ý nghĩa vật lý thực sự trong hàm truyền.

3.4 Sử dụng hàm truyền để phỏng đoán nhiệt độ sản phẩm trực tuyến

Hàm truyền thực tế (phương trình (16)) là phương trình hộp đen có chứa tham số vật lý có ý nghĩa nên có thể sử dụng để phỏng đoán nhiệt độ sản phẩm trong quá trình gia nhiệt (nếu không thể tìm ý nghĩa vật lý trong hàm truyền, hàm truyền chỉ đúng duy nhất với điều kiện làm thí nghiệm không thể sử dụng trong việc phỏng đoán với các điều kiện tương tự).



Hình 7: Mô hình phỏng đoán nhiệt độ sản phẩm và tính toán thời gian chết nhiệt trực tuyến

Việc phỏng đoán trực tuyến nhiệt độ sản phẩm cho phép tính toán trực tuyến thời gian chết nhiệt F của quá trình gia nhiệt (theo phương pháp Bigelow). Quá trình phỏng đoán và tính toán thời gian chết nhiệt F được thực hiện theo sơ đồ hình 7 với các dữ liệu cần có: nhiệt độ ban đầu của môi trường gia nhiệt, nhiệt độ ban đầu của sản phẩm, hằng số kháng nhiệt của vi sinh vật (z), nhiệt độ tham chiếu (T_{ref}) và hàm truyền tương ứng.

4 KẾT LUẬN

Hàm truyền [1 2] có dạng $\frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_2}$ thu nhận từ dữ liệu động học của nhiệt độ môi trường gia nhiệt và vật thể lơ lửng trong hộp có khả năng biểu thị cho quá

trình truyền với độ chính xác cao $R^2 > 0,999$, SE thấp và YIC thấp trong các thí nghiệm được lựa chọn biểu thị cho quá trình truyền. Hàm truyền được lựa chọn có chứa tham số vật lý liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt từ môi trường tới dung dịch và từ dung dịch tới vật thể, có khả năng sử dụng trong việc phỏng đoán nhiệt độ của vật thể trong đồ hộp dạng dung dịch có chứa các vật thể rắn trong quá trình thanh trùng. Việc phỏng đoán nhiệt độ vật thể giúp cho việc tính toán thời gian chết nhiệt (F-value) chính xác, góp phần cho việc quản lý quá trình sản xuất an toàn và tiết kiệm năng lượng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ansorena M R, Valle D C, Salvadori V O (2010) Application of transfer functions to canned tuna fish thermal processing. *Journal of Food Science Technology International*, 16(1), 43-51.
- Berckmans D, De Moor M, De Moor B (1992) New model concept to control the energy and mass transfer in a three-dimensional imperfectly mixed ventilated space. *Proceedings of Roomvent' 92, Aalborg, Denmark*, 2, 151-168.
- De Moor M & Berckmans D (1993) Analysis of the control of livestock environment by mathematical identification on measured data. Paper 93-4574. *International Winter Meeting ASAE, Chicago, IL*.
- Dwivedi M & Ramaswamy H S (2010) Dimensionless correlations for convective heat transfer in canned particulate fluids under axial rotation processing. *Journal of Food Process Engineering*, 33, 182-207.
- Farid M & Ghani A G A (2004) A new computational technique for the estimation of sterilization time in canned food. *Journal of Chemical Engineering and Processing*, 43, 523-531.
- Ghani A G A & Farid M (2010) *Computational Fluid Dynamics Analysis of Retort Thermal Sterilization in Pouches*. Trong: *Mathematical Modeling of Food Processing*, CRC Press.
- Ghani A G A, Farid M M, Chen X D (2003) A computational and experimental study of heating and cooling cycles during thermal sterilization of liquid foods in pouches using CFD. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 217(1), 1-9.
- Herson A C & Hulland E D (1980) *Canned Foods. Thermal Processing and Microbiology*, Churchill Livingstone, Edinburgh.
- Meng Y & Ramaswamy H S (2005) Heat transfer coefficients associated with canned particulate/non-Newtonian fluid (CMC) system during end-over-end rotation. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 83(C3), 229-237.
- Mritunjay D & Hosahalli S R (2009) Chapter 10: Heat Transfer in Rotary Processing of Canned Liquid/Particle. Mixtures. Trong: *Engineering Aspects of Thermal Food Processing*. CRC Press.
- Nikolaos G S & Richard L M (1990) Estimating heat transfer coefficients in liquid/particulate canned foods using only liquid temperature data. *Journal of Food Science*, 2(55), 478-483.
- Ramaswamy S H & Dwivedi M (2011) Effect of process variables on heat-transfer rates to canned particulate Newtonian fluids during free bi-axial rotary processing. *Journal of Food and Bioprocess Technology*, 4(1), 61-78.
- Young P C (1984). *Recursive estimation and time-series analysis*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.