

ỨNG DỤNG KỸ THUẬT MÔ HÌNH HÓA NHẪM KIỂM SOÁT PHÂN BỐ HỆ SỐ TRUYỀN NHIỆT TRONG KHÔNG GIAN BA CHIỀU CỦA THIẾT BỊ THANH TRÙNG

Lê Thị Hoa Xuân¹ và Võ Tấn Thành²

ABSTRACT

In this research, a data-based mechanistic modeling approach was developed to online controlling of three-dimensional temperature distribution of products during pasteurization process. 75 pure water cans (200x504) were used in this research. During the experiments, step input on a water inlet temperature (hot water) was applied while temperature of water inside cans (product temperature) was recorded (18 sensors for hot water and 18 sensors for products in a matrix 3x3x2). The simplified refined instrument variable (SRIV) algorithm was used as the model parameter identification tool to obtain the best model order and parameters. A first order transfer function from the dynamic response of product temperature from hot water with a high coefficient of determination and a low standard error explained the heat exchange in a system. The measured data and the model providing a physically meaningful parameter related to a heat transfer coefficient from hot water to products could be used for online controlling of the 3D temperature distribution of products in the pasteurization equipment.

Keywords: Modeling, Temperature distribution, Thermal processing

Title: Data based mechanistic modeling for control of three demensional of heat transfer coefficient distribution in pasteurization equipment

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu, mô hình hộp đen có chứa tham số vật lý có ý nghĩa được sử dụng để tính toán phân bố hệ số truyền nhiệt bề mặt trong không gian 3 chiều của thiết bị thanh trùng giúp kiểm soát sự đồng nhất của các sản phẩm. 75 hộp (200x504) chứa nước cất biểu thị cho sản phẩm được sử dụng. Thí nghiệm “bước” được thực hiện khi thay đổi nhiệt độ môi trường gia nhiệt từ 40°C đến 60°C. Sử dụng 36 cảm biến nhiệt độ ghi nhận thay đổi nhiệt độ môi trường và sản phẩm với khoảng cách 2 lần ghi là 10 s. Các cảm biến được bố trí theo ma trận 3x3x2 trong hệ thống thí nghiệm. Thuật toán SRIV được lựa chọn tính toán các tham số của hàm truyền. Kết quả, hàm truyền bậc 1 từ quan hệ giữa nhiệt độ môi trường và nhiệt độ bên trong hộp thu nhận từ thí nghiệm có hệ số tương quan cao, sai số thấp có chứa tham số liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt. Biểu diễn phân bố tham số liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt trong không gian 3 chiều là cơ sở để điều chỉnh thiết kế hoặc thiết kế hệ thống điều khiển trực tuyến nhằm kiểm soát sự đồng nhất của sản phẩm.

Từ khóa: Mô hình hóa, Phân bố nhiệt độ, Chế biến nhiệt

¹ Trường Cao Đẳng Cộng Đồng Đồng Tháp

² Bộ môn Công Nghệ Thực Phẩm, Khoa NN & SHƯĐ, Trường Đại học Cần Thơ

1 MỞ ĐẦU

Gia nhiệt và làm lạnh là hai quá trình được sử dụng rất phổ biến trong chế biến thực phẩm. Trong khi gia nhiệt và làm lạnh, nhiệt độ và sự dao động của nhiệt độ là các yếu tố cần kiểm soát để làm giảm tổn thất trong quá trình chế biến bảo quản và phân phối (Vigneault *et al.*, 2006). Việc thiết kế và hoạt động của hệ thống điều khiển nhiệt độ hoạt động (*đặc biệt là các thiết bị có không gian lớn*) không tốt là nguyên nhân chính làm cho nhiệt độ sản phẩm không đồng nhất, làm ảnh hưởng tới mức độ an toàn, tính đồng nhất về chất lượng của các sản phẩm chế biến cũng như làm tổn thất năng lượng (Sun D W, 2007). Trong quá trình thanh trùng, khác biệt nhiệt độ sản phẩm là 1°C sẽ làm cho thời gian chết nhiệt (*F-value*) khác nhau 25% (Lewis, 2006). Thực tế trong quá trình thanh trùng và tiệt trùng tại các nhà máy, nhiệt độ môi trường gia nhiệt luôn thay đổi và sự khác biệt nhiệt độ giữa các vùng trong thiết bị chế biến luôn xảy ra dẫn đến có những vùng sản phẩm chưa đạt mức an toàn cho bảo quản (Houlzer & Hill, 1977). Việc kiểm soát nhiệt độ trong các hệ thống chế biến hiện tại chỉ kiểm soát nhiệt độ môi trường tại một hoặc vài vị trí trong thiết bị thanh trùng chưa thể đại diện cho toàn bộ không gian 3 chiều của thiết bị (*nhiệt độ sản phẩm có liên quan mật thiết đến sự phân bố vận tốc của lưu chất truyền nhiệt được thể hiện qua hệ số truyền nhiệt bề mặt*). Trong khi mức độ an toàn của thực phẩm liên quan trực tiếp đến nhiệt độ sản phẩm và mối quan hệ giữa nhiệt độ môi trường và nhiệt độ sản phẩm không rõ rệt (Thanh V T *et al.*, 2008). Chính vì vậy việc sử dụng nhiệt độ môi trường để kiểm soát nhiệt độ sản phẩm là không chính xác, dẫn đến không thể xác định các vị trí cần kiểm soát (*vùng có nhiệt độ thấp*) cũng như không thể kiểm soát mức độ đồng nhất của sản phẩm sau khi chế biến.

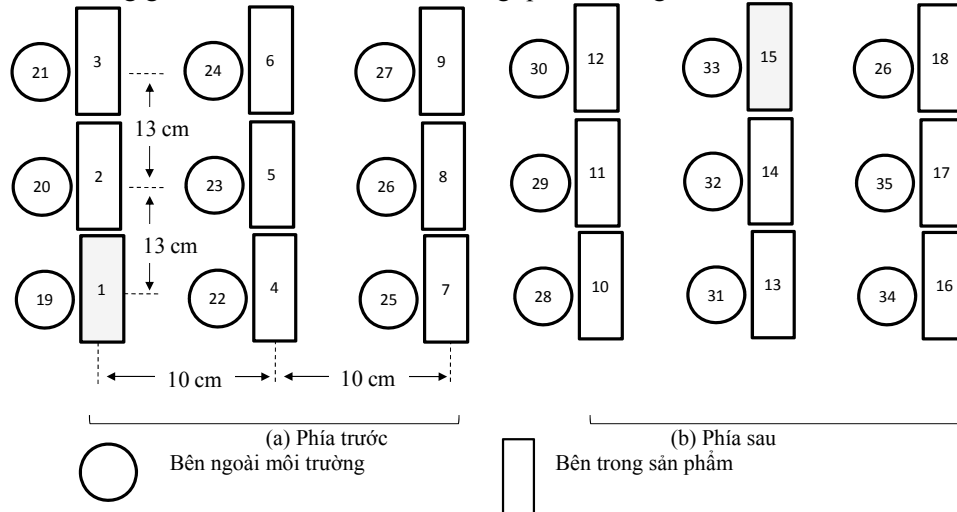
Nghiên cứu được thực hiện nhằm xác định mối quan hệ phân bố nhiệt độ sản phẩm và môi trường gia nhiệt trong không gian 3 chiều của thiết bị thanh trùng. Sử dụng kỹ thuật mô hình hóa tìm tham số vật lý liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt giúp kiểm soát sự đồng nhất nhiệt độ sản phẩm trong không gian 3 chiều của thiết bị chế biến.

2 PHƯƠNG TIỆN VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

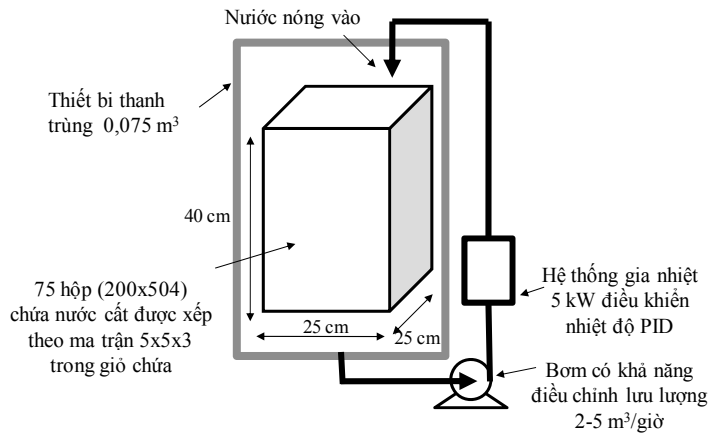
2.1 Phương tiện

75 lon (200x540) chứa nước tinh khiết (*được xem như ví dụ sản phẩm cần thanh trùng*) được cho vào giỏ có kích thước 25 cm x 25 cm x 40 cm. Sử dụng 36 cảm biến nhiệt độ loại T (Labfacility) độ chính xác 0,01°C, kết nối với bộ chuyển đổi tín hiệu Keithley 2700 (*có khả năng đo đặc 40 kênh*) để ghi nhận biến đổi nhiệt độ trong quá trình thí nghiệm với khoảng cách giữa 2 lần ghi là 10 s, các cảm biến được bố trí theo ma trận 3x3x2 như hình 1 (*18 cảm biến đo nhiệt độ trung tâm sản phẩm, 18 cảm biến đo nhiệt độ môi trường tại các vị trí tương ứng với cảm biến đo nhiệt độ trung tâm sản phẩm*). Hệ thống thanh trùng dùng trong thí nghiệm có đường kính 0,4 m, cao 0,6 m, dung tích 0,075 m³ như sơ đồ hình 2. Môi trường gia nhiệt (*nước nóng*) được bơm tuần hoàn trong hệ thống nhờ bơm ly tâm có khả năng điều chỉnh lưu lượng từ 2 đến 5 m³/giờ. Môi trường gia nhiệt được nâng nhiệt

thông qua hệ thống điện trở đun trực tiếp với công suất điện trở 5 kW. Nhiệt độ môi trường gia nhiệt được điều chỉnh thông qua hệ thống điều khiển nhiệt độ PID.



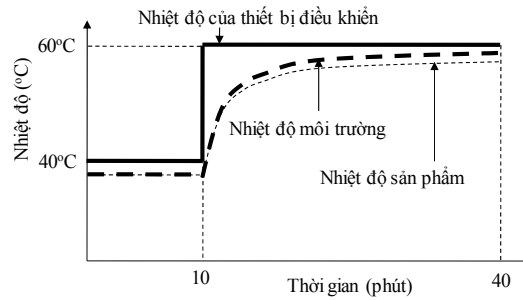
Hình 1: Bố trí cảm biến trong thiết bị thanh trùng



Hình 2: Sơ đồ hệ thống thí nghiệm

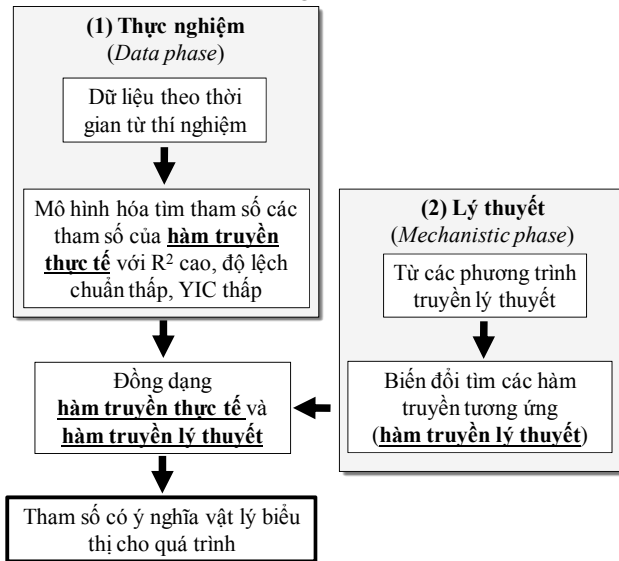
2.2 Phương pháp nghiên cứu

Để thu nhận dữ liệu biến thiên nhiệt độ theo thời gian (*dynamic*) cho quá trình mô hình hóa, thí nghiệm “bước” (*step*) được thực hiện với thay đổi nhiệt độ môi trường gia nhiệt từ 40°C tới 60°C trong khi lưu lượng được giữ ở mức không đổi 5 m³/giờ (Hình 2). Nhiệt độ tại 18 vị trí (*môi trường và sản phẩm*) được ghi nhận với khoảng cách giữa 2 lần ghi là 10 giây.



Hình 3: Diễn biến thí nghiệm bước

Sử dụng mô hình hộp đen có chứa tham số có ý nghĩa vật lý để mô hình hóa (*data based mechanistic modeling approach*). Quá trình mô hình hóa và tìm các thông số vật lý có ý nghĩa được thực hiện theo 2 giai đoạn được mô tả ở hình 4.



Hình 4: Mô hình hộp đen có chứa tham số có ý nghĩa vật lý

2.2.1 Hàm truyền (transfer function) thực tế từ dữ liệu thí nghiệm

Đầu tiên dữ liệu biến đổi nhiệt độ theo thời gian trong quá trình thí nghiệm (*time-series data*) được sử dụng cho việc mô hình hóa để tìm các tham số của các hàm truyền tương ứng. Phương trình tốt nhất sẽ được chọn trên cơ sở R^2 cao, độ lệch chuẩn (SE) thấp và hệ số YIC thấp. Nói cách khác trong giai đoạn này hàm truyền bất kỳ được lựa chọn trên cơ sở hộp đen (*các tham số trong hàm truyền không thể hiện bất kỳ ý nghĩa vật lý nào*).

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:

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

Với $A(s)$ và $B(s)$ là hàm bậc cao chứa $s = d/dt$

$$A(s) = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n$$

$$B(s) = b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m$$

$e(t)$: 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).

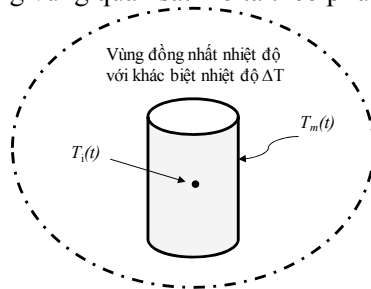
Mặc dù có nhiều phương pháp để tìm các tham số của hàm truyền. Thuật toán Simplified Refined Instrumental Variable (SRIV) được lựa chọn sử dụng cho tính toán các tham số của hàm truyền dạng liên tục với ưu điểm có thể tính toán hàm truyền liên tục từ các dữ liệu không liên tục, các tham số được lựa chọn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

Các hàm truyền được so sánh và lựa chọn thông qua hệ số tương quan R^2 và chỉ số YIC (Young Critical Identification). YIC là tham số được tính toán rất phức tạp. Tuy nhiên, YIC chứa các tham số biểu thị cho mức độ tương thích của phương trình như hệ số tương quan (R^2), độ lệch chuẩn (standard error) và yếu tố bậc của hàm truyền (Young, 1984). Hàm truyền được lựa chọn theo YIC càng thấp.

Việc tìm hàm truyền với các tham số trong các hàm truyền từ các dữ liệu thí nghiệm được gọi là hàm truyền thực tế.

2.2.2 Hàm truyền lý thuyết trong quá trình thanh trùng

Khi nghiên cứu trên sự đồng nhất nhiệt độ của không khí trong phòng không có vật thể. De Moor M & Beckmans D (1993), Beckmans *et al.* (1992) đã chứng minh rằng trong không gian không đồng nhất về nhiệt độ hoàn toàn có thể định nghĩa một vùng đồng nhất xung quanh cảm biến 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. Ứng dụng trong trường hợp thanh trùng, với giả sử đồng nhất nhiệt độ sản phẩm (nước trong hộp) với một mức nhiệt độ có thể chấp nhận, nhiệt dung riêng của sản phẩm ít biến đổi theo nhiệt độ. Phương trình truyền nhiệt từ một vùng đồng nhất nhiệt độ của môi trường vào trong một hộp được thể hiện ở hình 5 và cân bằng nhiệt lượng trong vùng quan sát mô tả theo phương trình (1):



Hình 5: Biểu diễn quá trình truyền nhiệt từ một vùng môi trường gia nhiệt đồng nhất tới nhiệt độ sản phẩm bên trong hộp

$$m.C_p \frac{dT_m(t)}{dt} = k_m.S_m(T_i(t - \tau) - T_m(t)) \tag{1}$$

Với: m : khối lượng của sản phẩm (kg); C_p : nhiệt dung riêng của sản phẩm (J/kg^oC); k_m : hệ số truyền nhiệt bề mặt (W/m²oC); S_m : diện tích bề mặt của vật liệu (hộp) (m²); $T_i(t)$: nhiệt độ môi trường theo thời gian (oC); $T_m(t)$: nhiệt độ sản phẩm theo thời gian (oC); τ : thời gian trễ (s).

Phương trình (1) có thể viết lại:

$$\frac{dT_m(t)}{dt} = \frac{k_m \cdot S_m}{m \cdot C_p} (T_i(t - \tau) - T_m(t)) \tag{2}$$

Ở trạng thái ổn định $\frac{dT_m}{dt} = 0$, tương ứng với các nhiệt độ của môi trường \bar{T}_i và nhiệt độ sản phẩm và \bar{T}_m .

Ta có:

$$0 = \frac{k_m \cdot S_m}{m \cdot C_p} (\bar{T}_i(t - \tau) - \bar{T}_m(t)) \tag{3}$$

Với thay đổi nhiệt độ môi trường và nhiệt độ sản phẩm so với nhiệt độ ở trạng thái ổn định $t_i(t) = T_i(t - \tau) - \bar{T}_i(t - \tau)$ và $t_m(t) = T_m(t) - \bar{T}_m$. Lấy Phương trình (3) trừ phương trình (2), ta có thể viết lại:

$$\frac{dt_m(t)}{dt} = \frac{k_m \cdot S_m}{m \cdot C_p} (t_i(t - \tau) - t_m(t)) \tag{4}$$

Với tốc độ gia nhiệt được định nghĩa

$$\alpha = \frac{k_m \cdot S_m}{m \cdot C_p} \tag{5}$$

Phương trình (4) cho ta:

$$\frac{dt_m(t)}{dt} = \alpha(t_i(t - \tau) - t_m(t)) \tag{6}$$

Sử dụng toán tử Laplace để biểu diễn quá trình. Phương trình (6) được viết lại:

$$t_m(t) = \frac{\alpha}{s + \alpha} t_i(t - \tau) \tag{7}$$

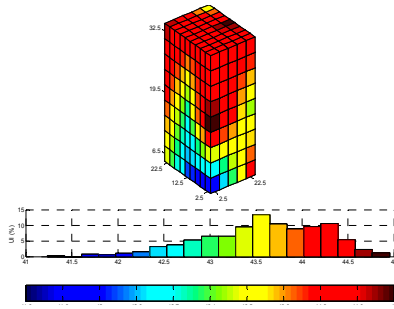
Với s là toán tử Laplace được định nghĩa $s = \frac{d}{dt}$

Hàm truyền (Phương trình (7)) thu nhận từ tính toán cân bằng nhiệt trong vùng đồng nhất với các giả sử tương ứng được gọi là hàm truyền lý thuyết.

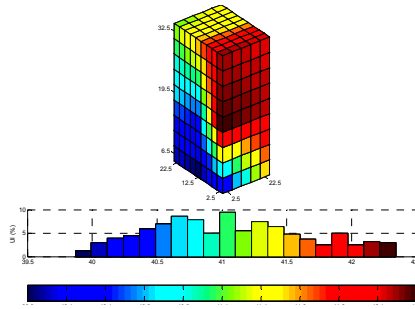
3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Đồng nhất nhiệt độ môi trường và sản phẩm trong quá trình gia nhiệt

Phân bố nhiệt độ trong không gian 3 chiều của môi trường và sản phẩm ở thời điểm xác định (*sau 15 phút gia nhiệt*) được thể hiện ở hình 6 và hình 7 được xem là một ví dụ cho thấy sự không đồng nhất của nhiệt độ của môi trường và sản phẩm trong quá trình gia nhiệt.



Hình 6: Biểu diễn nhiệt độ môi trường 15 phút gia nhiệt



Hình 7: Biểu diễn nhiệt độ sản phẩm sau 15 phút gia nhiệt

Chỉ số đồng nhất (I) được tính toán dựa trên tỉ lệ của vùng thể tích đồng nhất ($\sum_{i=1}^n Vol_i$) với một khác biệt nhiệt độ có thể chấp nhận (ΔT) dao động quanh giá trị nhiệt độ trung bình (T_{tb}) trên tổng thể tích quan sát (VOL), được tính theo công thức.

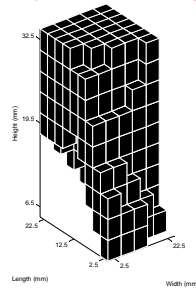
$$I = \frac{\sum_{i=1}^n Vol_i}{VOL} \tag{8}$$

Với $\sum_{i=1}^n Vol_i$: tổng thể tích vùng đồng nhất; VOL : tổng thể tích của hệ thống; I : chỉ số đồng nhất (%).

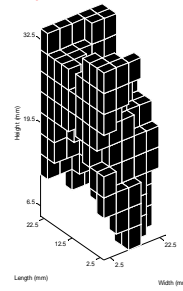
Dựa trên tính toán thể hiện ở phương trình (8) các vùng đồng nhất nhiệt độ của môi trường và sản phẩm trong quá trình gia nhiệt với khác biệt nhiệt độ có thể chấp nhận là 0,5°C tại thời điểm sau 15 phút gia nhiệt thể hiện ở hình 8 và hình 9. Chỉ số đồng nhất (I) được tính toán trong 2 trường hợp môi trường và sản phẩm có khác biệt là 38,8% và 27,8% tương ứng. Khi quan sát các vùng đồng nhất trong 2 trường hợp (Hình 8 và Hình 9) có thể thấy các vị trí đồng nhất nhiệt độ môi trường và sản phẩm cũng khác biệt.

Từ các nhận xét trên có thể kết luận đồng nhất nhiệt độ của môi trường và nhiệt độ sản phẩm có quan hệ nhưng không chặt chẽ. Phù hợp với lý thuyết truyền nhiệt do đối lưu. Nhiệt lượng truyền không những phụ thuộc vào nhiệt độ môi trường mà còn phụ thuộc vào hệ số truyền nhiệt bề mặt (*heat transfer coefficient*) trong đó các đặc tính của lưu chất và vận tốc lưu chất trong thiết bị thanh trùng đã góp phần làm thay đổi đồng nhất nhiệt độ của sản phẩm trong không gian 3 chiều của thiết bị thanh trùng. Nếu tìm được phân bố tham số nào đó có liên hệ mật thiết với hệ số truyền nhiệt bề mặt trong không gian 3 chiều của thiết bị thanh trùng sẽ giúp điều khiển sự đồng nhất của sản phẩm một cách hiệu quả.

Thời gian 20 min - Đồng nhất = 38.8889% - Nhiệt độ trung bình = 53.7511°C



Thời gian 20 min - Đồng nhất = 27.7778% - Nhiệt độ trung bình = 54.8156°C



Hình 8: Đồng nhất nhiệt độ môi trường sau 20 phút gia nhiệt, với khác biệt nhiệt độ 0,2°C **Hình 9: Đồng nhất nhiệt độ sản phẩm sau 20 phút gia nhiệt, với khác biệt nhiệt độ 0,2°C**

3.2 Mô hình hóa tìm tham số liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt

Dữ liệu thu nhận biến đổi nhiệt độ sản phẩm theo biến thiên nhiệt độ môi trường được sử dụng để mô hình hóa (tính toán cho phần thực nghiệm ở Hình 4). Hàm truyền bậc 1 bậc 2 được lựa chọn.

Kết quả tính toán tại vị trí (1) và (15) trong thiết bị thanh trùng được thể hiện ở bảng 1, các kết quả được xem như là một ví dụ của tính toán.

Bảng 1: Tính toán các tham số của hàm truyền tại vị trí (1) và (15) trong thiết bị thanh trùng

Vị trí	Bậc của hàm truyền	[m, n, τ]	Các tham số trong mô hình	SE	R ²	Hệ số YIC
1	Bậc 1	[0,1,10]	$a_1 = 0,071$ $b_0 = 0,071$	0,0434	0,9968	-13,65
	Bậc 2	[1,2,10]	$a_1 = 0,549$ $a_2 = 0,008$ $b_0 = 0,406$ $b_1 = 0,008$	0,0151	0,9989	-11,70
15	Bậc 1	[0,1,10]	$a_1 = 0,054$ $b_0 = 0,054$	0,0659	0,9951	-13,24
	Bậc 2	[1,2,10]	$a_1 = 0,221$ $a_2 = 0,003$ $b_0 = 0,159$ $b_1 = 0,003$	0,0213	0,9984	-2,87

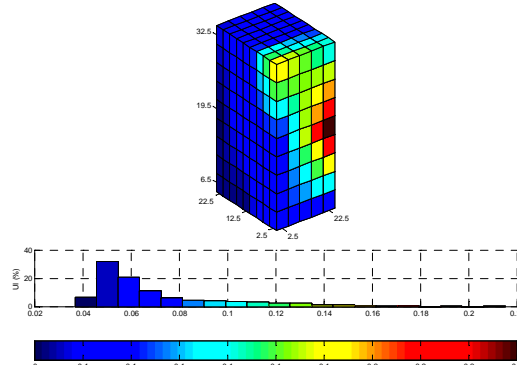
m: bậc tử số của hàm truyền; n: bậc mẫu số của hàm truyền; τ: thời gian trễ (s); SE: độ lệch chuẩn; R²: hệ số tương quan.

Nhìn vào kết quả ở bảng 1, hàm truyền bậc 1 và bậc 2 có thể biểu diễn quá trình truyền với hệ số tương quan R² cao. Hàm truyền bậc 2 có hệ số tương quan cao hơn so với bậc 1 tại các vị trí tương ứng. Tuy nhiên, hàm truyền bậc 1 có chỉ số YIC thấp hơn hàm truyền bậc 2 nên hàm truyền bậc 1 (hàm truyền thực tế) được lựa chọn biểu thị quá trình truyền nhiệt từ môi trường vào sản phẩm trong thiết bị thanh trùng. Hàm truyền thực tế được lựa chọn có dạng:

$$t_m(t) = \frac{b_0}{s + a_1} t_i(t - \tau) \tag{9}$$

Đồng dạng với hàm truyền lý thuyết (Phương trình (7)) và hàm truyền thực tế (Phương trình (9)), có thể rút ra $\alpha = b_0 = a_1$. Với tốc độ gia nhiệt $\alpha = \frac{k_m \cdot S_m}{m \cdot C_p}$ được

định nghĩa ở Phương trình (5) có chứa hệ số truyền nhiệt bề mặt (k_m). Do vậy, tham số α là tham số trong hàm truyền lý thuyết được rút ra từ việc mô hình hóa các dữ liệu thực nghiệm (*hộp đen*), có thể được sử dụng để tính toán tốc độ truyền nhiệt trong không gian 3 chiều của thanh tròn. Kết quả tính toán, biểu diễn phân bố hệ số α trong không gian 3 chiều của thiết bị thanh tròn được thể hiện ở hình 10.



Hình 10: Biểu diễn phân bố hệ số α trong thiết bị thanh tròn

Từ đây ta có thể quan sát sự phân bố hệ số có liên quan đến hệ số truyền nhiệt (*hệ số truyền nhiệt có liên quan đến vận tốc lưu chất*) và từ phân bố tìm được (Hình 10), ta có thể điều chỉnh thiết kế hoặc bố trí hệ thống điều khiển trực tuyến thông qua việc mô hình hóa trực tuyến (*online modeling*) nhằm làm gia tăng tính đồng nhất của sản phẩm trong một mẻ chế biến.

4 KẾT LUẬN VÀ ĐỀ NGHỊ

Nghiên cứu đã chứng minh sự đồng nhất nhiệt độ môi trường trong quá trình thanh tròn có liên quan không rõ rệt với sự đồng nhất nhiệt độ sản phẩm. Sự đồng nhất nhiệt độ sản phẩm trong quá trình gia nhiệt có liên quan trực tiếp đến hệ số truyền nhiệt bề mặt.

Hàm truyền bậc 1 được lựa chọn với hàm truyền thực tế, đồng dạng với hàm truyền lý thuyết tham số có ý nghĩa vật lý trong hàm truyền thực tế được tìm thấy có liên quan đến hệ số truyền nhiệt bề mặt, và là tham số có khả năng sử dụng để biểu thị cho phân bố vận tốc trong không gian 3 chiều của hệ thống thanh tròn.

Phân bố hệ số truyền nhiệt bề mặt trong không gian 3 chiều, là cơ sở để điều chỉnh thiết kế cũng như thiết kế hệ thống điều khiển trực tuyến sự đồng nhất nhiệt độ sản phẩm, nhằm tạo ra sản phẩm đồng nhất về chất lượng và đạt mức an toàn cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- 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 No. 93-4574, International Winter Meeting A.S.A.E., Chicago, IL.
- Houtzer R L, Hill R C (1977) Effect of temperature deviation on process sterilization value with continuous agitating retorts. *Journal of Food Science*, 42(3), 755-777.
- Lewis M J (2006) Thermal processing. In: Brennan J G. *Food Processing Handbook*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. ISBN: 978-3-527-30719-7.
- Thanh V T, Vranken E, Berckmans D (2008) Data based mechanistic modelling for control of three dimensional temperature distribution in a room filled with biological products. *Journal of Food Engineering*. 86 (3). 422-432.
- Vigneault C, Goyette B, De Castro L R (2006) Maximum slat width for cooling efficiency of horticultural produce in wooden crates. *Postharvest Biology and Technology* 40(3), 308-313.
- Young P C (1984). *Recursive estimation and time-series analysis*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Sun W D (2007) *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press, Taylor & Francis Group.