

MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI NHIỆT LIÊN HỢP GIỮA THỰC PHẨM VÀ MÔI TRƯỜNG KẾT ĐÔNG

SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESSING IN CONJUGATE FOOD FREEZING/AIR CONVECTION

TS. NGUYỄN VIỆT DŨNG*, ThS. LÊ KIỀU HIỆP, ThS. TRẦN THỊ THU HẠNG, ThS. VÕ ĐÌNH HIỆP
ĐHBK Hà Nội

Bài báo trình bày việc đồng thời mô phỏng quá trình lưu động của môi trường kết đông và quá trình trao đổi nhiệt giữa môi trường kết đông và thực phẩm bên trong tủ cấp đông gió dựa bằng phương pháp CFD. Dựa trên khái niệm hệ số nhiệt dung riêng hiệu dụng, mô hình bài toán dẫn nhiệt có nguồn trong bên trong khối thực phẩm, do hiện tượng chuyển pha lỏng rắn của thành phần nước, sẽ được chuyển về mô hình bài toán dẫn nhiệt phi tuyến trong đó tính chất nhiệt vật lý thay đổi theo nhiệt độ. Quá trình lưu động của môi trường cấp đông và quá trình trao đổi nhiệt tại bề mặt khối thực phẩm được giải dựa trên mô hình dòng rối k-ε. Hai mô hình toán học này được giải kết hợp dựa trên phần mềm mô phỏng Fluent 12.0. Việc so sánh trường nhiệt độ bên trong thực phẩm theo kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm đã minh chứng cho tính chính xác của mô hình.

GIẢI THÍCH CÁC KÝ HIỆU

t: Nhiệt độ, °C;
t_i: Nhiệt độ bắt đầu kết đông của thực phẩm, °C;
T₀: Nhiệt độ đông đặc của nước (273 K);
W_∞: Thành phần khối lượng nước ban đầu,
kg nước/kg thực phẩm,
W_f: thành phần khối lượng của chất béo,
W_s: thành phần khối lượng của chất tro,
T_f: nhiệt độ điểm đông của thực phẩm, °C,
ω: Thành phần khối lượng nước đã trong tổng thành phần nước phụ thuộc vào thời gian,
L₀: Nhiệt ẩn chuyển pha của nước, J/kg;
R: Hằng số phổ biến của khí, J/kgK,
c: Nhiệt dung riêng, J/kgK;
ρ: Khối lượng riêng, kg/m³;
λ: hệ số dẫn nhiệt trong lòng thực phẩm, W/mK;
v: Tốc độ gió, m/s,

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nâng cao chất lượng quả trình bảo quản sau thu hoạch là một trong những định hướng quan trọng của nước ta nhằm hiện đại hóa nền nông nghiệp. Bên cạnh công nghệ sấy, hấp, bảo quản yếm khí,... công nghệ làm lạnh đông cũng đã và đang được ứng dụng rộng rãi ở nước ta. Việc nghiên cứu quá trình trao đổi nhiệt trong quá trình kết đông thực phẩm sẽ cho phép nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm tiêu hao năng lượng và là cơ sở đầu vào tin cậy cho việc tính toán, thiết kế tủ cấp đông.

Việc sử dụng khái niệm hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng cho phép chuyển bài toán dẫn nhiệt có nguồn trong, bên trong thực phẩm kết đông, xuất

hiện do quá trình chuyển pha lỏng – rắn của thành phần nước, về bài toán dẫn nhiệt phi tuyến có tính chất nhiệt vật lý phụ thuộc vào nhiệt độ [1,2,7]. Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu α thường được tính trung bình cho toàn bộ bề mặt của khối thực phẩm theo các công thức thực nghiệm và được xem là hằng số trong suốt quá trình kết đông. Đây là một trong những yếu tố gây ra sự sai lệch lớn giữa kết quả tính toán và kết quả thực nghiệm do các công thức thực nghiệm này có thể cho kết quả sai lệch tới 10%. Để giải quyết vấn đề này, nhóm nghiên cứu đã áp dụng lý thuyết dòng rối và phần mềm Fluent 12.0 để xác định đặc tính của dòng chảy. Từ đó xác định được dòng nhiệt chuyển qua bề mặt của thực phẩm.

Mô phỏng quá trình dẫn nhiệt bên trong thực phẩm kết đông và quá trình trao đổi nhiệt với môi trường là những nội dung chính mà bài báo sẽ đề cập

II. MÔ HÌNH TOÁN HỌC

2.1. Quá trình dẫn nhiệt bên trong thực phẩm

Stefan (1889) đã nêu nên phương trình vi phân dẫn nhiệt mô tả quá trình làm lạnh kết đông thực phẩm với cho phân tử bất kỳ, ở thời điểm τ như sau:

$$c(\tau)\rho(\tau)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(\tau)\nabla^2 T + q(\tau) \quad (1)$$

Trong đó:

$q(\tau)$ - nguồn nhiệt trong của phân tử, thời điểm τ .

Khi nhiệt độ lớn hơn nhiệt độ kết đông, nguồn nhiệt trong $q(\tau) = 0$. Khi nhiệt độ ở dưới nhiệt độ

kết đông của thực phẩm, bên trong thực phẩm xảy ra quá trình chuyển pha từ lỏng sang rắn của nước trong thực phẩm. Nhiệt ẩn tỏa ra trong quá trình đóng băng được xem là nguồn nhiệt trong $q(\vec{r}, \tau)$ được xác định theo phương trình 2, [1]

$$q(\vec{r}, \tau) = W_{\infty} \cdot \rho(T) \cdot L(T) \frac{d\omega}{dT} \frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} \quad (2)$$

Thay phương trình (2) vào phương trình (1), ta được

$$\left[C(T) - W_{\infty} \cdot L(T) \frac{d\omega}{dT} \right] \rho(T) \frac{\partial T(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = \lambda(T) \operatorname{div}(\operatorname{grad} T(\vec{r}, \tau)) \quad (3)$$

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

Trong khuôn khổ bài báo này điều kiện biên loại 3 cổ điển, xác định hệ số trao đổi nhiệt đối lưu bề mặt trung bình của thực phẩm theo công thức thực nghiệm không đổi theo thời gian sẽ được thay thế bằng công cụ mô phỏng CFD, có khả năng mô phỏng hệ số α như hàm của thời gian và tọa độ.

Để giải hệ phương trình (3) các tính chất nhiệt vật lý của thực phẩm được mô phỏng dựa theo quan điểm Trumak-Onhishenco [1]

2.2. Quá trình lưu động của môi trường kết đông, quá trình trao đổi nhiệt đối lưu giữa thực phẩm và môi trường

Mô hình chuyển động của dòng chất không khí bên trong không gian kết đông được giả thiết tuân theo mô hình dòng rối $k - \varepsilon$. Theo đó, tốc độ của dòng tại một vị trí bao gồm 2 thành phần: thành phần vận tốc trung bình và thành phần rối. Hai đại lượng động năng rối k và tốc độ tiêu tán động năng rối được đưa vào để khép kín mô hình toán học của quá trình lưu động.

Đối với những vùng gần bề mặt khối thực phẩm hay vách của không gian thí nghiệm, quy luật phân bố của trường vận tốc và nhiệt độ của không khí được giả thiết tuân theo quy luật phân bố Launder và Spalding được trình bày trong tài liệu [6,7]

III. MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH DẪN NHIỆT 3 CHIỀU BÊN TRONG THỰC PHẨM DẠNG KHỐI HỘP

3.1. Lựa chọn đối tượng nghiên cứu

Đối tượng thực phẩm được lựa chọn nghiên cứu là thịt bò nạc dạng khối hộp có kích thước 17,3 cm x 11,5 cm x 2,5 cm. Thành phần khối lượng và tính chất của thịt bò tươi được cho trong tài liệu [7].

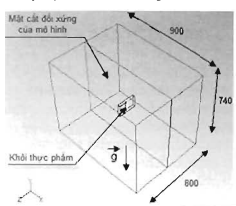
$W_{\infty}=0,7083, W_f=0,0489, W_s=0,0107, W_p=0,2203, t_f=-1,7^{\circ}\text{C}$

3.2. Sử dụng phần mềm Fluent 12.0 mô phỏng quá trình dẫn nhiệt bên trong thực phẩm

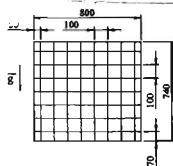
Phần mềm Fluent là phần mềm chuyên dụng có khả năng mô phỏng quá trình truyền nhiệt, chuyển động của chất rắn và chất lỏng. Với việc sử dụng phương pháp số phân tử hữu hạn, phần mềm cho phép tính toán nhanh chóng và chính xác các quá trình dẫn nhiệt tuyến tính cũng như phi tuyến.

Tính chất nhiệt vật lý của đối tượng được nạp vào chương trình thông qua ngôn ngữ lập trình C và trình UDF của phần mềm [4]. Kết quả tính toán được xuất ra dưới dạng đồ thị và file dữ liệu.

3.3. Nghiên cứu thực nghiệm quá trình dẫn nhiệt bên trong thực phẩm kết đông



Hình 1. Kích thước không gian thí nghiệm (đơn vị: mm)



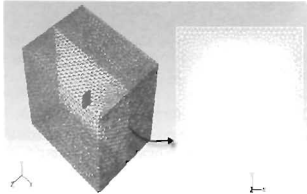
Hình 2. Các vị trí đo nhiệt độ và tốc độ gió tại cửa cấp không khí lạnh

Để kiểm chứng độ chính xác của mô hình và lời giải dựa trên phần mềm Fluent, nhóm nghiên cứu đã tiến hành thí nghiệm nhằm xác định biến thiên trường nhiệt độ trong thực phẩm kết đông. Nhiệt độ môi trường kết đông là -35°C , vận tốc gió 2,5 m/s (nhiệt độ và vận tốc gió là trung bình cộng tất cả các điểm đo trên tiết diện cấp gió vào). Đây là các điều kiện có thể được sử dụng trong công nghiệp thực phẩm. Thiết bị sử dụng trong thí nghiệm bao gồm một tủ kết đông gió có tủ điều

hiển đi kèm, một thiết bị đo nhiệt độ tự ghi Datalogger sử dụng đầu đo cấp nhiệt loại T. Thiết bị đo nhiệt độ gồm 8 kênh, kết quả đo được hiển thị và lưu trữ trên máy tính. Ta tiến hành đo nhiệt độ môi trường và tâm của khối thực phẩm

IV. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

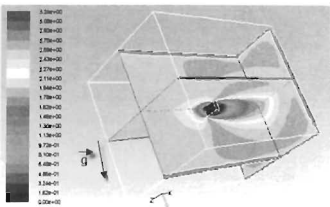
Mô hình không gian kết đồng và khối thực phẩm được xây dựng dựa trên modul Geometry của bộ phần mềm Ansys 12.0. Khối thực phẩm được chia thành 80500 phần tử hình hộp, mỗi trường kết đồng được chia thành 467786 phần tử dạng tứ diện như trên hình 3.



Hình 3 Bề mặt mô hình và mặt cắt đối xứng sau khi được chia lưới

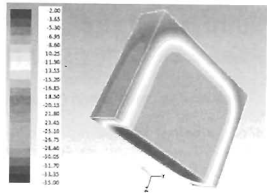
Kích thước các phần tử môi trường kết đồng được chia không đều, ở gần khối thực phẩm lưới được chia dày đặc để đảm bảo độ chính xác của phép tính

Ứng với các điều kiện môi trường kết đồng thực nghiệm, trường vận tốc, trường nhiệt độ tại mặt cắt đi qua tâm của sản phẩm tại một số thời điểm được thể hiện trên hình 4, 5, 6

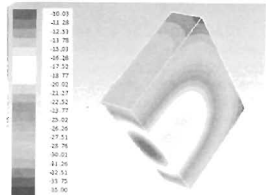


Hình 4 Phân bố trường vận tốc tại 2 mặt cắt dọc trục và của thời của môi trường kết đồng

Kết quả tính toán và kết quả đo thực nghiệm nhiệt độ tâm của tâm thịt được thể hiện trên hình 7. Quan sát kết quả thu được, ta nhận thấy kết quả tính toán lý thuyết đã phản ánh đúng xu hướng biến thiên của trường nhiệt độ bên trong tâm thực phẩm



Hình 5. Phân bố trường nhiệt độ trên bề mặt và mặt cắt qua tâm sau 30 phút

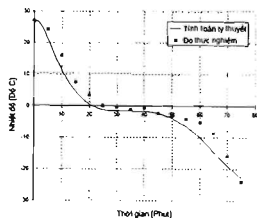


Hình 6. Phân bố trường nhiệt độ trên bề mặt và mặt cắt qua tâm sau 60 phút

Sai số của trường nhiệt độ tại tâm và bề mặt là nhỏ hơn 5K tại mọi thời điểm. Trường nhiệt độ tại tâm có xu hướng chia thời gian kết đồng làm 3 vùng rõ rệt: vùng làm lạnh sơ bộ, vùng chuyển pha và vùng quá lạnh. Vùng chuyển pha chiếm khoảng 50% tổng thời gian kết đồng.

V. KẾT LUẬN

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



Hình 7 Biến thiên nhiệt độ tại tâm theo thời gian

Dựa trên khái niệm hệ số nhiệt dung riêng hiệu

(Xem tiếp trang 11)

IV. KẾT LUẬN

Trong khuôn khổ nghiên cứu thực nghiệm hiện tại, tốc độ tuần hoàn hạt của lớp sôi tuần hoàn tăng cùng với tốc độ gió sơ cấp, và khối lượng lớp hạt khác, tốc độ tuần hoàn hạt sẽ tăng khi đường kính hạt giảm. Từ các kết quả thí nghiệm, một biểu thức toán học đã được thiết lập để xác định tốc độ tuần hoàn hạt nếu biết tốc độ gió sơ cấp, tốc độ gió tuần hoàn hạt, đường kính hạt và khối lượng lớp hạt. Kết quả tính tương đối phù hợp với các số liệu thí nghiệm.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả trân trọng cảm ơn Viện tiền tiến KH&CN (Viện AIST) và Chương trình Giáo sư UNESCO của Đại học Bách Khoa Hà Nội đã hỗ trợ tài chính trong việc cải tạo mô hình CFB hiện có tại Viện KH&CN Nhiệt-Lạnh, ĐHBKHN.

ABSTRACT

This paper deals with an experimental study on hydrodynamics of 200 μm , 300 μm and 400 μm silica sand in a circulating fluidized bed (CFB) set-up having its riser diameter and height of 0.108 meter and 7 meters, respectively. By increasing the primary air velocity from 5.16 to 6.67 m/s and with three values of total solid inventory (i.e 20 kg, 25 kg and 30kg), solid circulation rate of solid particles was experimentally estimated to be in the order of from 3.59 to 42.67 kg/m²s. A mathematical correlation was then developed that helps predict solid circulation rate as a function of primary air velocity, aeration air velocity, particle size and total solid inventory of the CFB.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Kunii, D and O Levenspiel Fluidization Engineering, Butterworth-Heinemann, 1991
- [2]. Basu, P and S. A. Fraser Circulating Fluidized Bed Boiler - Design and Operations, Butterworth-Heinemann, 1991
- [3]. Hoàng-Lương Phạm A Study of Fluidized and Circulating Fluidized Bed Technology M Eng Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand, August 1992.
- [4]. Hoàng-Lương Phạm Contribution à l'Etude de la Modélisation Hydrodynamique de Chaudières Industrielles en Lit Fluidisé - Application au Procédé Multi-Jets Ignifluide, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, Septembre 1996.
- [5]. Nguyễn Minh Tiến và Phạm Hoàng Lương Mô hình xác định tốc độ tuần hoàn hạt trong buồng đốt lớp sôi tuần hoàn, Tạp chí Năng lượng nhiệt, 97-1/2011, trang 8-11.
- [6]. Institute for Factory Operation and Automation (IFF, Germany) Documents of CFBC 100 kW in the School of Heat Engineering & Refrigeration, Ha Noi University of Science & Technology, 2005
- [7]. Nguyễn Minh Tiến. Nghiên cứu khí động học và trao đổi nhiệt trong buồng đốt lớp sôi tuần hoàn. Báo cáo khoa học tại Hội đồng chuyên ngành Công nghệ Nhiệt. Viện KH&CN Nhiệt-Lạnh, ngày 11 tháng 1 năm 2013.

Phản biện: PGS. TS. Lê Công Đạt

MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TRAO ĐỔI NHIỆT LIÊN HỢP ...

(Tiếp theo trang 7)

dụng, mô hình toán học. Sử dụng phần mềm mô phỏng Fluent 12.0 và ngôn ngữ lập trình C, nhóm tác giả đã mô phỏng quá trình dẫn nhiệt bên trong thực phẩm kết đông và quá trình trao đổi nhiệt giữa thực phẩm và môi trường. Việc so sánh kết quả tính toán lý thuyết và kết quả đo thực nghiệm trên đối tượng thực phẩm là thịt bò với sai số không vượt quá 10% đã chứng minh độ khả năng sử dụng mô phỏng CFD vào việc nghiên cứu quá trình cấp đông thực phẩm trong điều kiện Việt Nam

ABSTRACT

This paper presents the simulation of heat transfer processing in conjugate food freezing/air force convection inside a freezing device by CFD method. Base on concept of effective specific heat, modeling of heat conduction with heat generation inside foodstuff, which generates by phase change from liquid to solid of water content, will be transferred to modeling of heat conduction with thermal properties depend on temperature. Application of turbulent flow model k- ϵ , the mechanical air flow and the convection between air flow and foodstuff on the surface will be solved. These processings will be coupling simulated by simulation software Fluent 12.0. The comparing between the calculated result in temperature field inside foodstuff by this modeling and the experimental result showed the accuracy of this modeling.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Chumak I G., Onishchenko V P., Golovsky S E., Zhetiba Y A (1995) The method of prediction for characteristics of cooling and freezing processes of foodstuffs. Proc. of In Conference Commissions C2, D1, D2/3 of IIR, June 1994, Istanbul (Turkey) - Paris, IIR - P. 361-366
- [2]. Q Tuan Pham Modelling heat and mass transfer in frozen foods a review International Journal of [3] Refrigeration Volume 29, Issue 6, September 2006, Pages 876-888
- [3]. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbook-Refrigeration (SI) 2006
- [4]. ANSYS, Inc: Ansys 12.0 User's guide, April, 2009
- [5]. ANSYS, Inc: Ansys 12.0 UDF Manual, April, 2009
- [6]. ANSYS, Inc: Ansys 12.0 Theory guide, April, 2009
- [7]. J M. McDonough INTRODUCTORY LECTURES on TURBULENCE Physics, Mathematics and Modeling. Departments of Mechanical Engineering and Mathematics University of Kentucky, <http://www.engr.uky.edu>, 2007
- [8]. Lê Kiều Hiệp, Trần Thị Thu Hằng Mô phỏng quá trình dẫn nhiệt 3 chiều trong thực phẩm kết đông gió Tạp chí Năng lượng nhiệt, Số 104-3/2012, trang 18

Phản biện: PGS. TS Nguyễn Đức Lợi