

Nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng co ngót vật liệu sấy đến thời gian sấy cà rốt dạng thái lát

Trương Minh Thắng^{1*}, Nguyễn Đức Lợi²

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài 13.2.2015, ngày chuyển phản biện 28.2.2015, ngày nhận phản biện 30.3.2015, ngày chấp nhận đăng 3.4.2015

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu sự ảnh hưởng của hiện tượng co ngót vật liệu sấy (VLS) đến thời gian sấy (TGS) cà rốt. Kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền chất trong quá trình sấy bằng phương pháp sai phân hữu hạn cũng như phương pháp tương tự để xác định TGS khi xét đến hiện tượng co ngót đều cho sai số nhỏ hơn rất nhiều so với thực nghiệm ở trường hợp bỏ qua hiện tượng này.

Từ khóa: co ngót vật liệu sấy, thời gian sấy, truyền nhiệt truyền chất.

Chỉ số phân loại 2.10

RESEARCH INTO THE EFFECTS OF SHRINKAGE PHENOMENON ON DRYING TIME OF CARROT SLICES

Summary

The shrinkage of carrot slices in drying process has been studied and presented in this paper. It is shown that the results of resolving the drying time function estimated by finite-difference method and similarity method during the process of heat and mass transfer in case of considering shrinkage phenomenon have much smaller errors than that in case of ignoring the shrinkage.

Keywords: drying time, heat and mass transfer, shrinkage.

Classification number 2.10

Đặt vấn đề

Sấy là một trong những biện pháp chế biến và bảo quản sản phẩm được con người sử dụng từ rất lâu. Quá trình sấy là quá trình mà trong đó cùng với sự thay đổi nhiệt độ thì các liên kết ẩm của vật liệu bị phá vỡ và lượng ẩm này sau đó dịch chuyển ra ngoài môi trường thông qua bề mặt vật liệu. Khi đó, khoảng không gian mà lượng ẩm này chiếm chỗ sẽ bị thay đổi, đó là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng co ngót của vật liệu trong quá trình sấy. Trong kỹ thuật sấy, TGS là một trong những thông số công nghệ cần phải xác định một cách chính xác. Đó là dữ liệu cần thiết cho quá trình thiết kế, vận hành tối ưu nhằm tiết kiệm năng lượng mà chất lượng sản phẩm sấy vẫn được đảm bảo. TGS thường được xác định bằng các phương pháp như: nửa lý thuyết nửa thực nghiệm, thực nghiệm, giải tích [1]. Trong các phương pháp trên, hầu hết các tác giả đều bỏ qua ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS nên kết quả tính toán so với thực nghiệm có sự chênh lệch tương đối lớn.

Do vậy, để khắc phục hạn chế trên, các tác giả đã tiến hành nghiên cứu bổ sung ảnh hưởng của sự co ngót VLS trong tính toán xác định TGS. Đây là phương pháp lý thuyết có thể áp dụng được cho các vật liệu và đối tượng khác. Trong phạm vi bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả tính toán xác định TGS được dựa trên hai phương pháp chính, đó là phương pháp giải mô hình toán của quá trình sấy bằng phương pháp sai phân hữu hạn và phương pháp tương tự. Hai phương pháp này được kiểm chứng bằng cách sử dụng các thông số tính toán tương tự như điều kiện thực nghiệm. Do hạn chế của thực nghiệm nên chúng tôi chỉ sử dụng một loại VLS là cà rốt dạng thái lát.

Nội dung nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS

*Tác giả chính: Tel: 0936169626; Email: tmthangdhgt@gmail.com

đến quá trình sấy mà ở đây là TGS được sử dụng là nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm kiểm chứng. Nghiên cứu lý thuyết để xác định TGS của VLS thông qua giải hệ phương trình vi phân truyền nhiệt truyền chất (TNTC) và xác định TGS dựa trên lý thuyết tương tự giữa TNTC khi có xét đến ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS. Thực nghiệm được tiến hành với mục đích thu thập số liệu và kiểm chứng sự phù hợp của kết quả lý thuyết với thực nghiệm.

Đối tượng nghiên cứu ở đây là sự ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS đến quá trình sấy mà cụ thể trong bài báo này là sự tác động của sự co ngót đến TGS.

Mô hình của quá trình sấy vật liệu dạng tấm phẳng

Trong quá trình sấy, hiện tượng TNTC xảy ra đồng thời và thường được biểu diễn dưới dạng hệ phương trình vi phân TNTC liên hợp [2]. Với các giả thiết: dịch chuyển ẩm bên trong chủ yếu là dạng hơi; có xét đến hiện tượng co ngót VLS nhưng coi hình dáng của VLS không đổi; xét đến ảnh hưởng của khuếch tán ẩm đến dẫn nhiệt nhưng bỏ qua ảnh hưởng của dẫn nhiệt đến khuếch tán ẩm; VLS là đồng chất, không có phản ứng hóa học và không có nguồn sinh nhiệt, nguồn sinh vật chất bên trong; các tính chất nhiệt vật lý của VLS phụ thuộc vào nhiệt độ hoặc độ chứa ẩm hoặc phụ thuộc cả hai; hệ số khuếch tán ẩm hiệu quả ít phụ thuộc vào độ chứa ẩm nhưng phụ thuộc nhiệt độ của VLS; nhiệt độ và độ chứa ẩm ban đầu của VLS là đồng nhất. Đối với bài toán 1 chiều và có xét đến ảnh hưởng của hiện tượng co ngót thông qua hệ số tốc độ ngót trung bình ω_x , hệ phương trình TNTC ở đây có dạng [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{r \cdot \rho_k}{\rho \cdot C_p} \cdot \frac{\partial M}{\partial \tau} \\ \frac{\partial M}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial M}{\partial x} = D(T) \cdot \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \end{cases} \quad (1)$$

Điều kiện đơn trị của hệ phương trình (1) bao gồm:

- Điều kiện ban đầu: $t(x, 0) = t_0$; $M(x, 0) = M_0$ (2)

- Điều kiện đối xứng: $\left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$; $\left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$ (3)

- Điều kiện biên:

$$\alpha(t_a - t) \Big|_{x=x_s} - \beta_M \rho_k r (M - M_e) \Big|_{x=x_s} = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=x_s} - C_p \omega_x \rho t \Big|_{x=x_s} \quad (4)$$

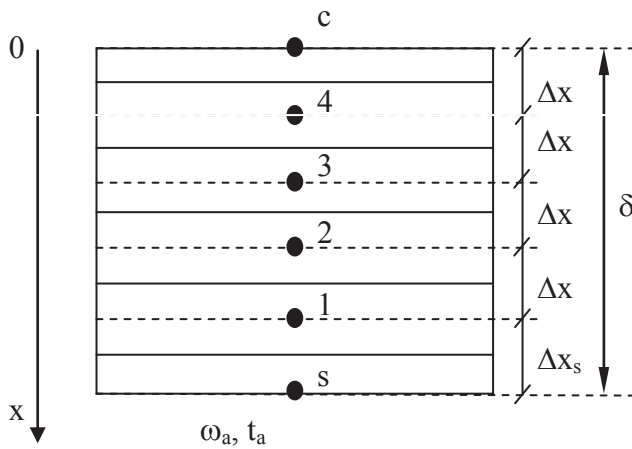
$$-D \cdot \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=x_s} + \omega_x M \Big|_{x=x_s} = \beta_M (M - M_e) \Big|_{x=x_s} \quad (5)$$

Trong (1), (2), (3), (4), (5): C_p là nhiệt dung riêng của VLS (J/kg×K); D là hệ số khuếch tán ẩm của VLS (m²/s); M là độ chứa ẩm ở thời điểm bất kỳ của VLS (kg ẩm/kg vật liệu khô, viết tắt là kg/kg); M_0 , M_e là độ chứa ẩm ban đầu và ở trạng thái cân bằng của VLS (kg/kg); r là nhiệt ẩm hóa hơi của nước - lượng nhiệt cần thiết để 1 kg nước ở trạng thái lỏng biến hoàn toàn thành hơi (kJ/kg); t là nhiệt độ ở thời điểm bất kỳ của VLS (°C); t_0 là nhiệt độ ban đầu của VLS (°C); t_a là nhiệt độ của không khí sấy (°C); α là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu trung bình tại bề mặt VLS (W/m²×K); β_M là hệ số trao đổi ẩm đối lưu trung bình tại bề mặt VLS (m/s); λ là hệ số dẫn nhiệt của VLS (W/m×K); τ là thời gian sấy (s); ω_x là tốc độ co ngót trung bình của VLS (m/s); ρ_k , ρ là khối lượng riêng của vật liệu khô tuyệt đối và của vật liệu ẩm (kg/m³).

Giải hệ (1) cùng với các điều kiện đơn trị (2, 3, 4, 5) sẽ cho kết quả về động học quá trình sấy như thay đổi độ chứa ẩm của VLS, thay đổi nhiệt độ của VLS, tốc độ sấy... Kết thúc quá trình sấy cũng là lúc độ chứa ẩm của VLS đạt đến trạng thái yêu cầu đặt ra theo chế độ bảo quản ứng với mỗi loại VLS khác nhau. Khoảng thời gian từ lúc bắt đầu đến khi kết thúc quá trình sấy cũng chính là TGS cần xác định. Sau đây chúng tôi xin giới thiệu phương pháp sai phân hữu hạn để giải hệ phương trình (1).

Phương pháp sai phân hữu hạn giải hệ

Mô hình vật lý của hệ (1) được trình bày trên hình 1 và giả thiết như sau: tác nhân sấy (TNS) có nhiệt độ t_a , tốc độ ω_a và độ ẩm tương đối ϕ_a thực hiện quá trình trao đổi nhiệt ẩm tại bề mặt VLS. VLS có chiều dày 2δ được đặt trong buồng sấy sao cho sự trao đổi nhiệt ẩm đồng đều ở cả 2 mặt. Hiện tượng dẫn nhiệt được thực hiện khi VLS hấp thụ nhiệt từ TNS qua bề mặt làm cho nhiệt độ của VLS tăng dần lên, độ ẩm của VLS bắt đầu giảm do sự dịch chuyển dần từ trong lòng ra bề mặt và được TNS mang ra ngoài. Quá trình này được đánh giá thông qua hệ số trao đổi ẩm trung bình tại bề mặt β_M .



Hình 1: mô hình và bước chia sai phân một nửa bề dày tấm VLS

Khi quá trình sấy bắt đầu, tức là khi hiện tượng trao đổi nhiệt ẩm xảy ra thì sự dịch chuyển của bề mặt VLS dần vào phía tâm cũng bắt đầu diễn ra (chiều dày của VLS giảm dần từ δ_0 đến δ_e). Cuối quá trình sấy, chiều dày của VLS sẽ bằng chiều dày của VLS ở điều kiện cân bằng δ_e . Do quá trình này có tính chất đối xứng nên chỉ cần tính toán cho một nửa chiều dày tấm phẳng δ và được biểu diễn trên hình 1. Việc xác định đúng sự biến thiên theo phương co ngót của tốc độ co ngót ω_x là rất khó khăn nên theo Karim [4], giả sử sự co ngót là tuyến tính theo phương x và giả sử tốc độ co ngót trung bình trong toàn bộ quá trình sấy tại một vị trí x bất kỳ là:

$$\omega_{tb}^x = \omega_s \frac{x}{\delta} \quad (6)$$

Trong đó: ω_s (m/s) là tốc độ co ngót tại bề mặt của VLS (tốc độ dịch chuyển bề mặt s).

Tốc độ co ngót trung bình ω_{tb} (m/s) của VLS trong toàn bộ quá trình sấy bằng:

$$\frac{\delta_0 - \delta_e}{\tau_\Sigma} = \omega_{tb} \quad (7)$$

Ở đây: δ_0 , δ_e lần lượt là chiều dày VLS ở thời điểm ban đầu và thời điểm cuối của quá trình sấy (m), τ_Σ là tổng thời gian sấy (s). Các giá trị này được xác định từ thực nghiệm.

Chia đều một nửa chiều dày δ của VLS thành 5 khoảng Δx như trên hình 1 và tốc độ co ngót trung bình trong quá trình sấy tại các vị trí từ bề mặt s đến vị trí tâm c được tính như sau:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{(\Delta x_1)_0 - (\Delta x_1)_e}{\sum \Delta \tau} = \omega_{tb}; \omega_2 = \frac{(\Delta x_2)_0 - (\Delta x_2)_e}{\sum \Delta \tau} = \frac{4}{5} \omega_{tb}; \omega_3 = \frac{(\Delta x_3)_0 - (\Delta x_3)_e}{\sum \Delta \tau} = \frac{3}{5} \omega_{tb} \\ \omega_4 &= \frac{(\Delta x_4)_0 - (\Delta x_4)_e}{\sum \Delta \tau} = \frac{2}{5} \omega_{tb}; \omega_5 = \frac{(\Delta x_5)_0 - (\Delta x_5)_e}{\sum \Delta \tau} = \frac{1}{5} \omega_{tb} \end{aligned} \quad (8)$$

Từ (6), (7), (8) ta được:

$$\frac{\sum_{i=s}^4 (\Delta x_i)_0 - \sum_{i=s}^4 (\Delta x_i)_e}{\sum \Delta \tau} = \sum_{i=s}^4 \omega_i = 3\omega_{tb} = 3\omega_s \quad (9)$$

Trong đó: $\Delta \tau$ (s) là bước thời gian tính toán ($\tau_\Sigma = \sum \Delta \tau$); tốc độ co ngót trung bình ω_{tb} (m/s) được xác định từ thực nghiệm. Bằng phương pháp sai phân hữu hạn và cân bằng nhiệt ẩm, chúng tôi viết được hệ phương trình sai phân dạng hàm ẩn có 12 phương trình bậc nhất mô tả quan hệ giữa sự thay đổi nhiệt độ và độ chứa ẩm của một nửa kích thước VLS trong quá trình sấy. Hệ số tỏa nhiệt α và tỏa chất β_M đối lưu trung bình được xác định dựa trên các phương trình tiêu chuẩn do Secgayep đề xuất khi nghiên cứu quá trình TNTC sự bay hơi ẩm từ bề mặt vật xốp vào không khí, tương tự như quá trình sấy ở đây:

$$Nu = 0,061 Re^{0,77} Pr^{0,33} Gu^{0,09} \quad (10)$$

$$Sh = 0,096 Re^{0,75} Sc^{0,33} Gu^{0,144} \quad (11)$$

Ở đây: Nu, Re, Pr, Gu, Sh, Sc lần lượt là các tiêu chuẩn Nusselt, Reynold, Prandtl, Gutman, Sherwood và Schmidt.

Như vậy, sau khi thay đầy đủ các dữ liệu cần thiết, xây dựng chương trình tính toán chúng tôi thu được nghiệm của hệ (1) và xác định được TGS.

Phương pháp tương tự xác định TGS

Trong thực tế, nếu cần xác định TGS thì phương pháp giải hệ phương trình vi phân được trình bày ở trên tương đối phức tạp. Vì thế, chúng tôi xin giới thiệu phương pháp khác đơn giản hơn, đó là phương pháp dựa vào sự tương tự giữa truyền nhiệt và truyền chất [5, 6] để xác định TGS. Ở đây, chúng tôi cũng đánh giá sự ảnh hưởng của hiện tượng co ngót đến việc xác định TGS theo phương pháp này để khẳng định sự cần thiết của việc xét đến sự co ngót VLS trong khi tính toán quá trình sấy. Nội dung của phương pháp này như sau:

- Xác định tính tương tự về mặt toán học của bài toán dẫn nhiệt với bài toán khuếch tán ẩm tương ứng

trong chế độ sấy cần xác định TGS.

- Tìm quan hệ $Q_{(0,\tau)}/Q_{(0,\infty)}$ của bài toán đốt nóng hay làm nguội của bài toán dẫn nhiệt tương tự được xác định trong bước 1. Với $Q_{(0,\tau)}$, $Q_{(0,\infty)}$ lần lượt là nhiệt lượng mà vật nhận được hoặc mất đi trong khoảng thời gian $(0, \tau)$ và $(0, \infty)$.

- Đồng nhất quan hệ sau:

$$Q_{(0,\tau)}/Q_{(0,\infty)} = G_{M(0,\tau)}/G_{M(0,\infty)} \quad (12)$$

Trong đó, $Q_{(0,\tau)}/Q_{(0,\infty)}$ được xác định từ nghiệm của phương trình dẫn nhiệt với điều kiện biên loại 3 đối xứng [2], và $G_{M(0,\tau)}$, $G_{M(0,\infty)}$ lần lượt là lượng ẩm mà vật mất đi trong khoảng thời gian $(0, \tau)$ và $(0, \infty)$.

- Xác định tiêu chuẩn Fourier của quá trình truyền chất (thời gian không thứ nguyên) Fo_M từ quan hệ (12) và từ đó tìm được thời gian sấy τ .

Tuy nhiên, khi xét đến hiện tượng co ngót của VLS, phương pháp này cần phải được hiệu chỉnh và bổ sung ảnh hưởng đó vào tính toán. Cách hiệu chỉnh này đã được trình bày trong [7]. Ở đây, chúng tôi tóm lược lại một số nội dung cơ bản của biện pháp hiệu chỉnh như sau: ảnh hưởng của kích thước và hệ số khuếch tán của VLS khi tính đến hiện tượng co ngót thể hiện trong Fo_M , đại lượng tìm được nhờ phương pháp tương tự:

$$Fo_M = \frac{D\tau}{\delta^2} \quad (13)$$

Như vậy, cần phải xác định kích thước cuối δ_{end} ứng với giá trị độ ẩm cuối quá trình sấy M_{end} , ở giá trị này thì cần phải tìm được hệ số khuếch tán D_{end} . Từ đó mới có thể tìm được giá trị Fo_M chính xác ở cuối quá trình sấy. Tuy nhiên, để xác định chính xác TGS ta phải có các giá trị D từ thực nghiệm ứng với quá trình tính toán. Các giá trị δ_{end} , D_{end} theo M_{end} được tính như sau:

Xác định kích thước đầu δ_0 và kích thước kết thúc quá trình sấy δ_e (ứng với trạng thái cân bằng của VLS với TNS). Các giá trị này cũng tương ứng với độ chứa ẩm ban đầu M_0 và độ chứa ẩm cân bằng M_e của VLS.

Tại các thời điểm lấy mẫu M ($M_e < M < M_0$) sẽ có tương ứng một kích thước δ ($\delta_e < \delta < \delta_0$), giả thiết hiện tượng co ngót xảy ra theo thời gian thông qua quan hệ sau, có “n” số lần lấy mẫu nên kích thước δ_i ở thời điểm thứ i là:

$$\delta_i = \delta_0 - i \cdot \frac{\delta_0 - \delta_e}{n} \quad (14)$$

Từ đây sẽ có được “n” giá trị của δ tương ứng với “n” giá trị của M . Xây dựng quan hệ giữa δ và M :

$$\delta = f(M) \quad (15)$$

Việc tiếp theo là cần xác định giá trị của D theo số liệu thực nghiệm quá trình sấy. Nghiệm của quá trình trao đổi ẩm đối với tấm phẳng trong trường hợp không có co ngót và D không đổi có dạng:

$$\ln MR = \ln \frac{M}{M_0} = \ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \frac{D\pi^2}{4\delta^2} \tau \quad (16)$$

Dựa vào số liệu thực nghiệm, quan hệ giữa $\ln(M/M_0)$ và thời gian τ sẽ có dạng đường thẳng và độ dốc k của đường thẳng này chính là $(D\pi^2/\delta^2)$.

$$k = \frac{D\pi^2}{4\delta^2} \quad (17)$$

Từ (17) cho thấy, với trường hợp $\delta = \text{const}$ hay không có co ngót có thể xác định được giá trị D theo k . Tuy nhiên, nếu trong trường hợp co ngót xảy ra thì giá trị này lại giảm dần theo δ và sẽ đạt nhỏ nhất ở δ_e . Vì vậy, để giải quyết vấn đề này có thể tính D_i ở thời điểm i theo biểu thức sau:

$$D_i = \frac{D_0 - D_e}{\delta_0 - \delta_e} (\delta_i - \delta_e) + D_e = D_0 - \frac{D_0 - D_e}{\delta_0 - \delta_e} (\delta_0 - \delta_i) \quad (18)$$

Ở đây, D_0 và D_e là giá trị của hệ số khuếch tán tính theo (17) nhưng ở δ_0 và δ_e .

Với cách lập luận như trên, ta sẽ tính được hệ số khuếch tán ẩm D , kích thước δ ở bất kỳ thời điểm nào trong quá trình sấy, nói cách khác là độ ẩm cuối M_{end} của quá trình sấy có thể tính được và TGS cũng sẽ xác định được theo Fo_M .

Kết quả và thảo luận

Do phạm vi bài báo, nhóm tác giả không trình bày chi tiết quá trình thực nghiệm mà chỉ giới thiệu kết quả của quá trình này với vật liệu đại diện là cà rốt dạng thái lát, các thông số của quá trình thực nghiệm được sử dụng để tính toán và so sánh với kết quả lý thuyết. Mô hình thực nghiệm cũng như cách thức tiến hành thực nghiệm sấy cà rốt đã được trình bày trong [8]. Các thông số nhiệt vật lý của VLS là cà rốt thay đổi theo nhiệt độ được tính theo [9]. Chúng bao gồm: 1) VLS: chiều dày $2\delta_0 = 10$ mm; đường kính $L = 50$ mm; độ chứa ẩm ban đầu trung bình VLS $M_0 = 6,33$ kg/kg (độ ẩm tương đối của VLS $w_0 = 86,4\%$); độ chứa ẩm

cuối trung bình VLS $M_{\text{end}} = 0,136 \text{ kg/kg}$ ($w_{\text{end}} = 12\%$); độ chứa ẩm cân bằng VLS $M_e = 0,1 \text{ kg/kg}$ ($w_e = 9,1\%$); nhiệt độ ban đầu của VLS $t_0 = 28^\circ\text{C}$; chiều dày kết thúc quá trình sấy (trạng thái cân bằng) $2\delta_e = 4 \text{ mm}$; tốc độ co ngót VLS $\omega_{\text{tb}} = 9,091 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Tổng thời gian sấy là 550 phút để đạt đến trạng thái cân bằng $M_e = 0,1 \text{ kg/kg}$ ($w_e = 9,1\%$) và mất 535 phút để độ ẩm cả rốt sấy đạt $M_{\text{end}} = 0,136 \text{ kg/kg}$ ($w_{\text{end}} = 12\%$). 2) TNS: nhiệt độ $t_a = 43,9^\circ\text{C}$; tốc độ $\omega_a = 1,5 \text{ m/s}$ và độ ẩm $\varphi_a = 46,5\%$.

Dựa vào các thông số trên, chúng tôi giải hệ phương trình TNTC (1) bằng phương pháp sai phân hữu hạn, tiến hành tính toán trên máy tính bằng phần mềm Microsoft Excel ứng với trường hợp không co ngót $\omega_{\text{tb}} = 0 \text{ m/s}$ và trường hợp có co ngót $\omega_{\text{tb}} = 9,091 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Từ đó, có thể rút ra các nhận xét về động học quá trình sấy cũng như tìm được TGS. Các nhận xét về động học quá trình sấy được trình bày trong [3], trong nội dung bài báo này, chúng tôi chỉ tập trung đánh giá sự khác nhau của kết quả tính TGS của VLS trong trường hợp có hoặc không xét đến hiện tượng co ngót khi so với thực nghiệm (bảng 1).

Bảng 1: kết quả thực nghiệm và tính toán độ ẩm tương đối trung bình VLS

TGS τ , phút	CN w, %	KCN w, %	TN w, %	TGS τ , phút	CN w, %	KCN w, %	TN w, %	TGS τ , phút	CN w, %	KCN w, %	TN w, %
0	86,4	86,4	86,4	300	43,8	50,2	53,4	540	14,0	23,9	10,8
25	83,2	83,2	85,0	325	39,3	46,8	48,3	545	13,7	23,5	9,9
50	80,7	80,7	83,5	350	35,1	43,6	42,7	550	13,4	23,2	9,1
75	78,1	78,2	81,5	375	31,1	40,4	37,4	575	12,0	21,5	-
100	75,3	75,6	79,3	400	27,4	37,4	32,5	600	-	19,9	-
125	72,2	72,8	76,8	425	24,1	34,5	27,8	625	-	18,6	-
150	68,9	69,9	74,2	450	21,2	31,9	22,9	650	-	17,4	-
175	65,2	66,8	71,1	475	18,7	29,4	18,8	675	-	16,3	-
200	61,3	63,6	68,5	500	16,6	27,1	15,3	700	-	15,3	-
225	57,1	60,3	65,7	525	14,8	25,0	13,3	725	-	14,5	-
250	52,7	57,0	62,1	530	14,5	24,7	12,5	750	-	13,3	-
275	48,2	53,6	57,9	535	14,3	24,3	12,2	775	-	12,0	-

(Ghi chú: CN - co ngót; KCN - không co ngót; TN - thực nghiệm)

Từ bảng 1 ta thấy, kết quả thực nghiệm biểu thị VLS có độ ẩm tương đối trung bình là 12% ở phút 535; trong khi tính toán có co ngót cho giá trị 12% ở phút 575 và không co ngót cho giá trị 12% sau 775 phút. Sai lệch về TGS dựa trên kết quả thực nghiệm và tính toán lần lượt là 7,5% khi xét đến co ngót và 44,9% khi bỏ qua co ngót. Như vậy, nếu bỏ qua hiện tượng co ngót sẽ cho kết quả về TGS không phù hợp và cần phải tính

đến ảnh hưởng co ngót trong nghiên cứu TNTC như quá trình sấy cả rốt ở đây.

Bên cạnh đó, phương pháp tương tự xác định TGS đã được trình bày và ứng dụng thành công trong một số công trình nghiên cứu gần đây [5, 6] nhưng để khẳng định sự cần thiết phải xét đến ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS, chúng tôi tiến hành xác định TGS theo phương pháp này ở trường hợp có và không có hiện tượng co ngót VLS theo nội dung đã trình bày ở trên. Kết quả biểu diễn sự thay đổi độ chứa ẩm trung bình VLS theo thời gian, kết quả tính toán các giá trị δ và $\ln MR$ theo (15) và (16) được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2: kết quả thực nghiệm sự thay đổi độ chứa ẩm trung bình VLS

TGS, phút	M, kg/kg	$\ln MR$	δ , m	TGS, phút	M, kg/kg	$\ln MR$	δ , m
0	6,330	0	0,0050	300	1,146	-1,70909	0,0034
25	5,667	-0,1107	0,0049	325	0,934	-1,91333	0,0032
50	5,061	-0,22381	0,0047	350	0,745	-2,1394	0,0031
75	4,405	-0,36247	0,0046	375	0,597	-2,36039	0,0030
100	3,831	-0,5022	0,0045	400	0,481	-2,57619	0,0028
125	3,310	-0,64825	0,0043	425	0,385	-2,7997	0,0027
150	2,876	-0,78891	0,0042	450	0,297	-3,05927	0,0025
175	2,460	-0,94505	0,0040	475	0,232	-3,30836	0,0024
200	2,175	-1,06845	0,0039	500	0,181	-3,55656	0,0023
225	1,915	-1,19535	0,0038	525	0,153	-3,71999	0,0021
250	1,639	-1,35151	0,0036	550	0,100	-4,14679	0,0020
275	1,375	-1,52663	0,0035	-	-	-	-

Chiều dày trung bình của lát cà rốt ở trạng thái cân bằng trong thực nghiệm (tương ứng độ chứa ẩm $M_e = 0,1 \text{ kg/kg}$ là $2\delta_e = 4 \text{ mm}$). Quan hệ hồi quy $\delta = f(M)$ và $\ln MR$ tìm được từ chương trình Excel và có biểu thức lần lượt là:

$$\delta = 0,0033 \cdot M^{0,2212} \quad (19)$$

và:

$$\ln MR = -1,2232 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 0,21 \quad (20)$$

Từ biểu thức (20) rút ra độ dốc k trong trường hợp này là $1,2232 \cdot 10^{-4}$, 1/s. Thay k và δ_0 , δ_e vào (1) thu được D_0 và D_e bằng:

$$D_0 = \frac{k \cdot 4 \cdot \delta^2}{\pi^2} = \frac{1,2232 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 0,005^2}{3,1415^2} = 1,23936 \cdot 10^{-9} \quad (21)$$

$$D_e = \frac{k \cdot 4 \cdot \delta^2}{\pi^2} = \frac{1,2232 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 0,002^2}{3,1415^2} = 1,98298 \cdot 10^{-10} \quad (22)$$

Như vậy, chúng ta đã xác định được các giá trị của hệ số khuếch tán ở trạng thái đầu D_0 , trạng thái cân bằng D_e theo thực nghiệm cũng như quan hệ của kích thước cà rốt sấy theo độ chứa ẩm. Từ lập luận đã nêu,

giá trị hệ số D_{end} ở độ chứa ẩm cuối của cà rốt $M_{\text{end}} = 0,136$ kg ẩm/kg vật liệu khô, hay độ ẩm tương đối $w_{\text{end}} = 12\%$ là:

$$D_{\text{end}} = \frac{1,23936.10^{-9} - 1,98298.10^{-10}}{0,005 - 0,002} (2,178.10^{-3} - 0,002) + 1,98298.10^{-10} \quad (23)$$

$$\Rightarrow D_{\text{end}} = 2,60698.10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

Trong đó, chiều dày ở trạng thái cuối δ_{end} được tính từ (19), ở đây coi như trong khoảng thời gian cuối của quá trình sấy từ phút thứ 525 đến phút thứ 535 sự thay đổi kích thước của chiều dày δ là không đáng kể và bằng:

$$\delta_{\text{end}} = 0,0033.(0,153)^{0,2212} = 0,002178, \text{ m}$$

Trong trường hợp khảo sát quá trình sấy cà rốt ở đây, có thể coi như trường hợp dẫn nhiệt đối xứng qua vách phẳng điều kiện biên loại 3. Như vậy, theo lý thuyết tương tự có thể sử dụng quan hệ (12) với nghiệm của bài toán dẫn nhiệt qua vách phẳng điều kiện biên loại 3 [2]:

$$\frac{Q_{(0,t)}}{Q_{(0,\infty)}} = \frac{G_{M(0,t)}}{G_{M(0,\infty)}} 1 - 2Bi_M^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-\mu_n^2 Fo_M)}{\mu_n^2 [\mu_n^2 + Bi_M(Bi_M + 1)]} \quad (24)$$

Các đại lượng như hệ số tỏa nhiệt và tỏa chất đối lưu trung bình được xác định từ (10) và (11), các hệ số khác tính tương tự như trên. Kết quả thu được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3: kết quả tính toán các đại lượng

TT	Đại lượng	Ký hiệu	Biểu thức tính	Kết quả
1	Hệ số nhớt động lực TNS	μ , kg/(m.xs)	$1,767676.10^{-13}.t^{3,5} + 5,411255.10^{-11}.t^2 + 4,983297.10^{-8}.t + 17,196428.10^{-6}$	$1,88.10^{-5}$
2	Khối lượng riêng TNS	ρ , kg/m ³	$-3,510101.10^{-8}.t^3 + 1,583983.10^{-5}.t^2 - 4,699520.10^{-3}.t + 1,292136$	1,15
3	Hệ số nhớt động học TNS	ν , m ² /s	$\frac{\mu}{\rho}$	$1,64.10^{-5}$
4	Hệ số khuếch tán ẩm trong không khí	D_a , m ² /s	$D_a = 1,87.10^{-10} . (273+t)^{2,072}$	$2,66.10^{-5}$
5	Tiêu chuẩn Reynold	Re	$Re = \frac{\omega L}{\nu}$	4052,867
6	Tiêu chuẩn Schmidt	Sc	$Sc = \frac{\nu}{D_a}$	0,6165
7	Hệ số trao đổi chất	β_M	$\beta_M = 0,096 Re^{0,75} Sc^{0,33} Gu^{0,144} \frac{D_a}{L}$	0,0162
8	Tiêu chuẩn Bio truyền chất	Bi_M	$Bi_M = \frac{\beta_M \delta}{D_0}$	130712,63

Vì giá trị của tiêu chuẩn Bi_M khá lớn nên (24) trở thành:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2n-1)^2} \exp \left[- \left(\frac{2n-1}{2} \right)^2 \pi^2 Fo_M \right] \quad (25)$$

Từ (25) với các giá trị đã biết, ta có thể xác định được TGS. Kết quả được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4: kết quả tính toán và so sánh TGS

Đại lượng	Ký hiệu	Trạng thái cân bằng	Trạng thái ban đầu	Trạng thái tính toán
Chiều dày	δ , m	0,002	0,005	0,002178
Hệ số khuếch tán	D , m ² /s	$1,98298.10^{-10}$	$1,23936.10^{-9}$	$2,60698.10^{-10}$
TGS	τ , phút	662,7	662,7	598,8
Sai số so với thực nghiệm	%	23,9	23,9	11,9

Bảng 4 cho thấy, nếu không kể đến ảnh hưởng của sự co ngót VLS khi sử dụng phương pháp tương tự xác định TGS sẽ có sai số so với thực nghiệm ($M = 0,136$ kg/kg ở 535 phút) là 23,9%. Nếu kể đến ảnh hưởng của sự co ngót VLS như chúng tôi đã trình bày thì sai số đã giảm xuống một nửa và bằng 11,9%. Điều đó chứng tỏ, khi tính toán TGS cần phải xét đến sự co ngót VLS.

Để thấy rõ sự ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS đến TGS, chúng tôi tiến hành so sánh kết quả xác định TGS theo phương pháp giải hệ phương trình TNTC (1) và theo phương pháp tương tự với thực nghiệm. Kết quả so sánh được trình bày trong bảng 5.

Bảng 5: kết quả xác định TGS

Đại lượng	Thực nghiệm	Phương pháp tương tự		Phương pháp giải hệ phương trình TNTC	
		KCN	CN	KCN	CN
Độ ẩm tương đối VLS ở cuối quá trình sấy, %	12	12	12	12	12
Thời gian sấy, phút	535	662,7	598,8	775	575
Sai số so với thực nghiệm, %	0	23,9	11,9	44,9	7,5

(Ghi chú: CN - co ngót; KCN - không co ngót; TN - thực nghiệm)

Từ bảng so sánh kết quả trên, chúng tôi nhận thấy, nếu không xét đến sự co ngót VLS thì phương pháp tương tự xác định TGS có sai số so với thực nghiệm là 23,9%, trong khi phương pháp giải hệ phương trình TNTC là 44,9%. Mặt khác, nếu xét ảnh hưởng của sự co ngót VLS đến quá trình sấy thì độ chính xác so với thực nghiệm đã tăng lên đáng kể ở cả 2 phương pháp. Cụ thể, ở phương pháp tương tự sai số so với thực nghiệm giảm còn 11,9% (giảm khoảng 2 lần), trong khi phương pháp giải hệ phương trình TNTC là 7,5% (giảm hơn 6 lần). Như vậy, khi xét đến hiện tượng co

ngọt VLS, kết quả xác định TGS ở cả phương pháp tương tự và phương pháp giải hệ phương trình TNTC đều có sai số nhỏ hơn 12%, cho thấy sự cần thiết của việc xét đến ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS khi tính toán quá trình sấy. Mặt khác, phương pháp tương tự xác định TGS cho kết quả nhanh hơn và đơn giản hơn phương pháp giải hệ phương trình TNTC với sai số so với thực nghiệm chấp nhận được.

Kết luận

Khi nghiên cứu tính toán TGS của VLS trong quá trình sấy, nếu bỏ qua ảnh hưởng của hiện tượng co ngót của VLS có độ ẩm ban đầu tương đối lớn như cà rốt sẽ dẫn đến sai số so với thực nghiệm. Nguyên nhân là quá trình thoát ẩm trong VLS đồng thời cũng sẽ xảy ra hiện tượng co ngót, thay đổi về kích thước của VLS. Điều này ít được nhắc đến trong các mô hình toán học mô tả quá trình TNTC trong quá trình sấy cũng như trong các phương pháp xác định TGS khác. Thông qua 2 phương pháp tính toán TGS ở trên, chúng tôi đã chứng minh được sự cần thiết của việc xét đến ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS khi xác định TGS và trình bày cách bổ sung ảnh hưởng này vào quá trình tính toán một cách hợp lý.

Tuy nhiên, để khẳng định tính đúng đắn của việc xét đến sự ảnh hưởng của hiện tượng co ngót VLS đến quá trình sấy, vẫn cần phải có những nghiên cứu để xác

định tốc độ co ngót trung bình của các loại VLS khác nhau, sự co ngót theo nhiều hướng khác nhau thay vì chỉ xét ở một hướng như trên.

Tài liệu tham khảo

- [1] Trần Văn Phú (2000), *Thiết kế hệ thống sấy*, Nhà xuất bản Giáo dục.
- [2] Đặng Quốc Phú, Trần Thế Sơn, Trần Văn Phú (2000), *Truyền nhiệt*, Nhà xuất bản Giáo dục.
- [3] Trương Minh Thắng, Nguyễn Mạnh Hùng (2013), “Nghiên cứu động học quá trình sấy bơm nhiệt trên cơ sở mô hình TNTC liên hợp có kể đến co ngót”, *Tạp chí Khoa học giao thông vận tải*, số 41, tr.36-41.
- [4] M.A Karim, M.N.A Hawlader (2005), “Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, pp.4914-4925.
- [5] Nguyễn Đức Lợi, Trương Minh Thắng (2011), “Xác định bằng giải tích TGS nho theo phương pháp tương tự”, *Tạp chí Năng lượng nhiệt*, số 100, tr.14-16.
- [6] Trương Minh Thắng (2013), “Ứng dụng phương pháp tương tự xác định thời gian sấy sợi cà rốt”, *Tạp chí Năng lượng nhiệt*, số 112, tr.25-27.
- [7] Trương Minh Thắng, Nguyễn Mạnh Hùng (2013), “Hiệu chỉnh phương pháp tương tự xác định thời gian sấy khi xét đến ảnh hưởng của co ngót vật liệu”, *Tạp chí Khoa học giao thông vận tải*, số 10, tr.340-345.
- [8] Trương Minh Thắng, Nguyễn Mạnh Hùng (2012), “Nghiên cứu xây dựng mô hình hệ thống sấy lạnh dùng bơm nhiệt hoạt động theo chu trình bậc thang và phương pháp sấy mới tiết kiệm năng lượng”, *Tạp chí Khoa học giao thông vận tải*, số 40, tr.11-17.
- [9] Srikiatden J, Roberts J.S (2007), “Predicting moisture profiles in potato and carrot during convective hot air drying using isothermally measured effective diffusivity”, *Journal of food engineering*, 84, pp.516-525.