



Nghiên cứu động học quá trình sấy tiền xử lý siêu âm Cà rốt cắt lát

Nguyễn Văn Thuận^{1*}, Trần Gia Mỹ¹,

Lương Ngọc Hùng¹, Đinh Việt Hùng¹, Đặng Bá Cường¹

¹ Khoa Nhiệt – Điện lạnh, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

*Email: thuannv@eaut.edu.vn

TÓM TẮT

Cà rốt - loại rau củ phổ biến, giàu dinh dưỡng là một trong những đối tượng bảo quản sau thu hoạch thu hút sự quan tâm đặc biệt của nhiều nhà khoa học trên thế giới. Trong công trình này, nghiên cứu thực nghiệm động học quá trình sấy tiền xử lý siêu âm sản phẩm cà rốt cắt lát đã được thực hiện nhằm đánh giá khả năng ứng dụng của công nghệ này trong việc nâng cao hiệu quả sản xuất thực tiễn với mục tiêu rút ngắn thời gian sấy khô, từ đó giảm thiểu chi phí tiêu hao năng lượng. Kết quả nghiên cứu thu được cho thấy công nghệ tiền xử lý siêu âm có tác động tích cực tới động học quá trình sấy khô lát cà rốt. Thời gian sấy đến khi $MR < 0,1$ với các mẫu đã trải qua 45 phút xử lý siêu âm có thể rút ngắn so với mẫu không qua xử lý từ 10 phút, 20 phút và 50 phút lần lượt tương ứng ở nhiệt độ sấy là 50°C , 40°C , 30°C . Bên cạnh đó, các mô hình thực nghiệm mô tả quá trình sấy ở nhiệt độ sấy khác nhau đã được xây dựng thành công dựa trên mô hình Page và hoàn toàn có thể được ứng dụng trong tính toán, thiết kế hệ thống sấy cà rốt trong thực tiễn.

Từ khóa: Động học quá trình sấy, mô hình thực nghiệm, sấy siêu âm, sấy tiền xử lý siêu âm.

ABSTRACT

An experimental investigation into the drying kinetics of sliced carrots following an ultrasound pre-treatment was conducted to assess the technology's potential to enhance production efficiency by decreasing drying time and so minimizing energy consumption. The results demonstrate the impact of ultrasound pre-treatment in significantly accelerating the drying process of sliced carrots. For samples subjected to a 45-minute ultrasonic treatment, the time necessary to achieve a moisture ratio below 0.1 was reduced by 10, 20, and 50 minutes at drying temperatures of 50°C , 40°C , and 30°C , respectively, in comparison to untreated samples. Besides, experimental models. A key contribution of this study is the successful development of empirical models to describe the drying process at various temperatures based on the thin layer drying model of Page. These models show a goodness of Fit to the experimental data across all tested temperatures, providing a robust tool for the calculation and design of practical carrot drying systems.

Keywords: Drying process kinetics, experimental model, ultrasonic drying, ultrasonic pre-drying.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cà rốt được biết đến là một trong những mặt hàng nông sản giàu giá trị dinh dưỡng, phổ biến tại Việt Nam và trên thế giới. Chúng chứa hàm lượng đáng kể beta-carotene, chất xơ và các hợp chất chống oxy hóa như polyphenol, mang lại nhiều lợi ích sức khỏe, bao gồm cải thiện



thị lực, hỗ trợ phòng ngừa bệnh tim mạch và giảm nguy cơ ung thư đại tràng thông qua việc tăng cường sức khỏe hệ tiêu hóa. Đặc biệt, beta-carotene - một tiền chất của vitamin A, đã được chứng minh đóng vai trò quan trọng trong việc giảm nguy cơ mắc bệnh tiểu đường loại 2 [1]. Tuy nhiên, với thời gian bảo quản hạn chế, chỉ khoảng 3÷4 tuần ở điều kiện nhiệt độ từ 0°C đến 2°C, cà rốt tươi đối mặt với những thách thức lớn trong việc bảo quản, lưu trữ và vận chuyển, đặc biệt tại các khu vực nhiệt đới [2]. Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của tiền xử lý bằng sóng siêu âm đến động học quá trình sấy lát cà rốt, nhằm cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế hệ thống sấy thực tế, từ đó phát triển các giải pháp công nghệ sau thu hoạch để kéo dài thời gian bảo quản và tối ưu hóa giá trị kinh tế của loại nông sản dễ hư hỏng này.

Sấy khô là một trong những quá trình phổ biến đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp như hóa chất, khai khoáng, thực phẩm và dược phẩm. Hoạt động này chiếm từ 7% đến 25% tổng tiêu thụ năng lượng trong công nghiệp [3-4]. Với chi phí năng lượng ngày càng tăng cùng với các quy định về môi trường ngày càng nghiêm ngặt, việc nghiên cứu và phát triển các công nghệ sấy tiết kiệm năng lượng không chỉ đóng vai trò thiết yếu đối với các doanh nghiệp sản xuất mà còn đóng vai trò quan trọng trong các chính sách phát triển năng lượng toàn cầu, nhằm giảm phát thải CO₂, giảm thiểu hiệu ứng nhà kính nhằm ứng phó với các hiện tượng biến đổi khí hậu. Trong các phương pháp sấy hiện nay, phương pháp sấy đối lưu bằng không khí nóng được ứng dụng phổ biến nhờ chi phí đầu tư thấp; tuy nhiên, việc sấy ở nhiệt độ cao thường làm suy giảm chất lượng thành phẩm, đặc biệt với các sản phẩm thực phẩm, làm suy giảm màu sắc, hàm lượng các chất dinh dưỡng và các thuộc tính cảm quan. Để duy trì tiêu chuẩn chất lượng, các công nghệ sấy tiên tiến như sấy lạnh, sấy thăng hoa và sấy trong môi trường khí điều biến đã được áp dụng khi sấy trái cây. Mặc dù sản phẩm đầu ra đáp ứng tốt chỉ tiêu về chất lượng, tuy nhiên các phương pháp sấy này đòi hỏi chi phí đầu tư và vận hành cao, và thường chỉ được sử dụng cho các sản phẩm chuyên biệt.

Trong sản phẩm nông sản, các màng tế bào đóng vai trò phân tách giữa các tế bào bên trong và môi trường bên ngoài, qua đó giúp bảo vệ tế bào bởi tác nhân có hại [5-7]. Tuy nhiên các màng tế bào nguyên vẹn này lại trở thành rào cản cản trở sự khuếch tán ẩm ra môi trường xung quanh, gây ra những ảnh hưởng tiêu cực đến động học quá trình sấy. Để cải thiện tốc độ sấy và đảm bảo chất lượng, phương pháp can thiệp vào màng tế bào bằng năng lượng siêu âm đã thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học. Cơ sở khoa học của phương pháp này được biết đến với tên gọi là "hiệu ứng bọt biển", dựa trên hiện tượng nén và giãn nhanh và liên tục tương tự một miếng bọt biển trong môi trường pha lỏng [8-9]. Hiệu ứng này tạo ra các lực có khả năng vận chuyển độ ẩm từ bên trong cấu trúc tế bào ra bề mặt và ngược lại [10-11]. Tác động của sóng siêu âm lên vật liệu sấy thúc đẩy sự hình thành các kênh vi mô giữa các cụm tế bào trong cấu trúc sản phẩm, cho phép chất lỏng trong tế bào thẩm thấu ra môi trường xung quanh. Công nghệ này không chỉ cải thiện động học sấy mà còn có tiềm năng nâng cao chất lượng của sản phẩm sấy, trở thành trọng tâm trong các nỗ lực nghiên cứu toàn cầu về công nghệ sấy tiên tiến. Phương pháp tiền xử lý bằng sóng siêu âm đã được chứng minh có hiệu quả trong việc cải thiện đáng kể động học quá trình sấy ứng dụng trên nhiều loại sản phẩm khác nhau như: rong biển, mộc qua, cistanche, dứa, việt quất, cà chua... [12-17]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng hiệu quả thực tế của kỹ thuật này thay đổi tùy thuộc vào nhiều biến quá trình bao gồm đặc

tính của vật liệu sấy, chế độ sấy và năng lượng do sóng siêu âm cung cấp. Do đó, việc tiến hành các đánh giá thực nghiệm hiệu quả của phương pháp sấy tiên xử lý trên từng sản phẩm cụ thể trước khi triển khai áp dụng thực tiễn là điều vô cùng cần thiết.

Trong nghiên cứu này, một hệ thống thí nghiệm đã được phát triển để thực hiện quá trình sấy các lát cà rốt được tiên xử lý bằng sóng siêu âm. Động học quá trình sấy được phân tích thông qua việc theo dõi sự thay đổi khối lượng của mẫu. Bên cạnh đó, một mô hình thực nghiệm mô tả động học quá trình sấy dựa trên định luật Fick sẽ được xây dựng dựa trên các dữ liệu thực nghiệm đo được.

2. PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM VÀ XỬ LÝ DỮ LIỆU

2.1. Phương Pháp Thí Nghiệm

Hệ thống thí nghiệm được đặt tại phòng thí nghiệm khoa Năng lượng Nhiệt, trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội, bao gồm 3 chi tiết chính: Thiết bị tiên xử lý siêu âm, tủ sấy GMP 500 và cân điện tử Sartorius QUINTIX224-1S.

- **Tủ sấy GMP-500:** Tủ sấy GMP-500 là một buồng sấy đối lưu sử dụng không khí nóng làm tác nhân sấy. Không khí được làm nóng bằng các dây điện trở trước khi được quạt thổi tuần hoàn bên trong buồng sấy.
- **Thiết bị tiên xử lý bằng siêu âm:** Đây là một thiết bị phát sóng siêu âm với công suất đầu ra 35W và hoạt động ở tần số 42 kHz, bao gồm: 01 mạch điều khiển công suất bộ khuếch đại sóng siêu âm; 01 đầu khuếch đại sóng siêu âm; một bể chứa chất lỏng (thường chứa nước), nơi mẫu sấy được xử lý.
- **Cân điện tử QUINTIX224-1S:** Cân điện tử QUINTIX224-1S do Sartorius sản xuất là một cân phân tích được thiết kế cho các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác cao trong môi trường phòng thí nghiệm. Thiết bị này cho phép đo khối lượng với độ chính xác lên đến $\pm 0,2$ mg và hỗ trợ tải trọng tối đa 220 g, đáp ứng nhiều yêu cầu nghiên cứu và thí nghiệm khác nhau.



Tủ sấy GMP500



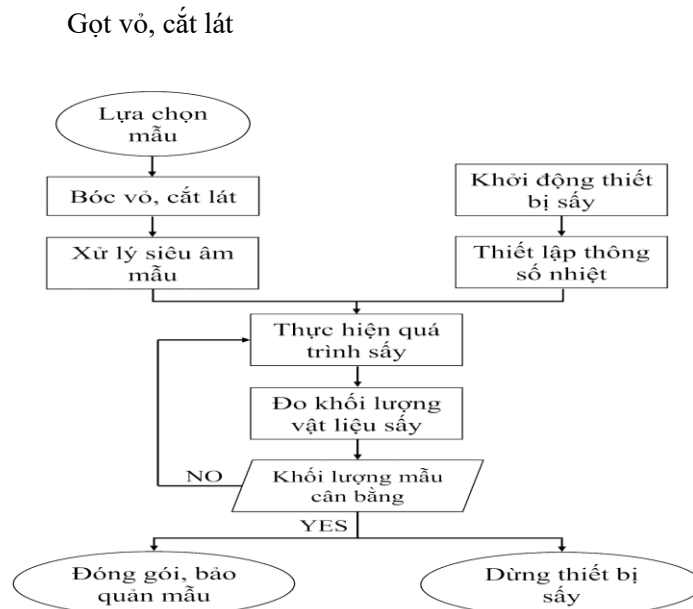
Thiết bị xử lý siêu âm



Cân điện tử
QUINTIX224-1S

Hình 1. Hệ thống thí nghiệm

Mỗi thí nghiệm sấy được thực hiện ít nhất 3 lần để giảm thiểu ảnh hưởng của sai số trong quá trình đo. Ngoài ra, độ ẩm tương đối của cà rốt được xác định bằng tủ sấy GMP 500. Mẫu tươi được sấy ở nhiệt độ 120°C trong 2 giờ, thành phần khô còn lại được đem phân tích để xác định thông số độ ẩm. Đây là giá trị quan trọng được sử dụng cho các tính toán tiếp theo trong nghiên cứu. Các thí nghiệm sấy được tiến hành trên các mẫu có độ dày 3 mm, ở các nhiệt độ sấy được thiết lập là 30°C, 40°C và 50°C. Thực hiện quá trình sấy với trường hợp mẫu không trải qua quá trình xử lý siêu âm và mẫu đã trải qua 45 phút xử lý siêu âm. Tốc độ của không khí lưu chuyển trong buồng sấy được giữ ổn định ở mức 0,5 m/s. Quy trình thí nghiệm cụ thể được thể hiện trong hình 2. Mẫu thí nghiệm sau khi xử lý siêu âm được để ráo nước sau đó được đưa vào tủ sấy, thực hiện quá trình sấy khô. Tiến hành đo khối lượng mẫu mỗi 10 phút bằng cân điện tử QUINTIX224 – 1S và theo dõi sự biến đổi khối lượng mẫu trên đồ thị trong Excel. Khi khối lượng mẫu đạt đến trạng thái cân bằng, tiến hành lấy mẫu ra khỏi tủ sấy, thực hiện thao tác đóng gói bảo quản, ngắt các thiết bị thí nghiệm, kết thúc quá trình sấy.



Hình 2. Quy trình thí nghiệm

2.2. Xử Lý Dữ Liệu Thực Nghiệm

Trong nghiên cứu này, giá trị độ ẩm không thứ nguyên MR được sử dụng thay thế cho giá trị độ ẩm tuyệt đối X nhằm đảm bảo tính nhất quán giữa các chế độ thí nghiệm. Giá trị này được xác định bằng công thức [18]:

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} \quad (1)$$

Trong đó:

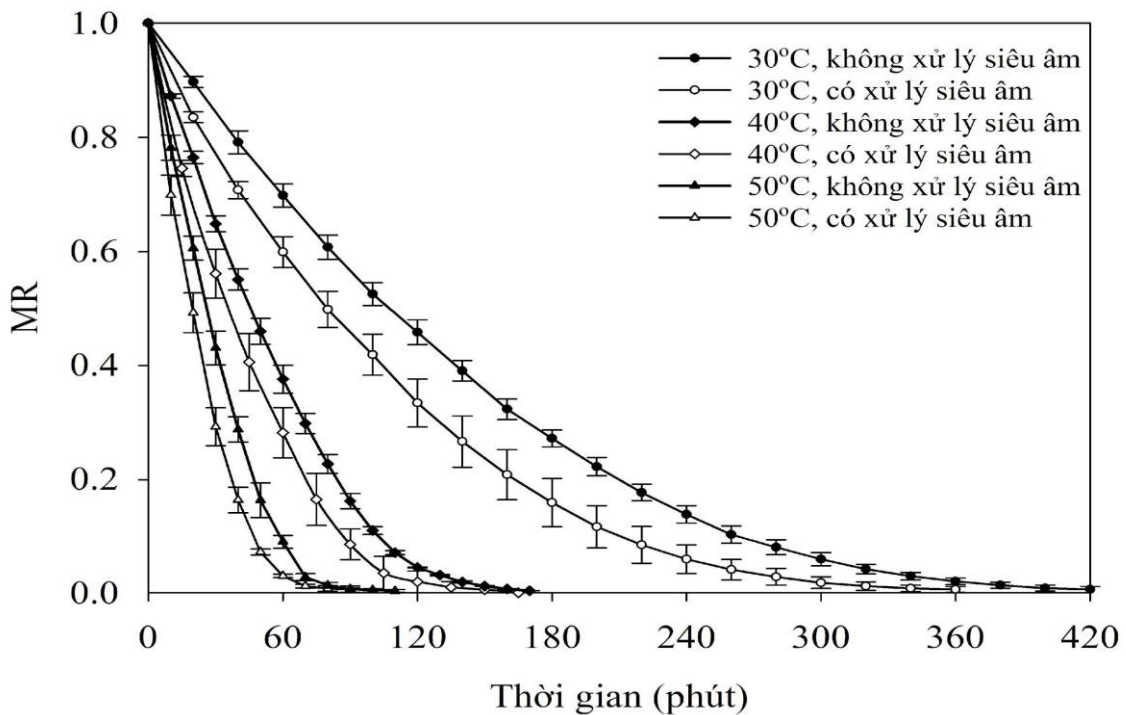
- X: Độ ẩm tuyệt đối tại thời điểm τ , [kg ẩm/kg khô]
- X_0 : Độ ẩm tuyệt đối tại thời điểm ban đầu, [kg ẩm/kg khô]
- X_e : Độ ẩm tuyệt đối tại thời điểm cân bằng, [kg ẩm/kg khô]

Giá trị MR đạt lớn nhất ($MR = 1$) tại thời điểm ban đầu và nhỏ nhất ($MR = 0$) tại thời điểm vật đạt tới trạng thái cân bằng ẩm, tức là $X = X_e$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Động Học Quá Trình Sấy

Dựa vào các kết quả thực nghiệm, đồ thị đường cong sấy biểu diễn sự thay đổi của độ ẩm không thứ nguyên MR theo thời gian ở các chế độ sấy khác nhau đã được xây dựng (hình 3).



Hình 3: Sự biến đổi của MR theo thời gian trong quá trình sấy

Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng, biên dạng của các đường cong sấy có xu hướng tương đồng và hoàn toàn phù hợp với lý thuyết động học quá trình sấy. Các đường cong sấy có độ dốc lớn tại giai đoạn đầu và thoải dần khi tiến về cuối quá trình. Điều này đồng nghĩa trong giai đoạn đầu của quá trình sấy, tốc độ thoát hơi ẩm đạt giá trị cao nhất, giá trị này giảm dần đến giá trị $MR = 0$ khi vật liệu sấy tiến tới trạng thái cân bằng ẩm, tức là $X = X_e$. Kết quả nghiên cứu chỉ rõ ảnh hưởng của nhiệt độ sấy tới tốc độ sấy khô sản phẩm. Khi thực hiện quá trình sấy ở nhiệt độ càng cao, đường cong sấy có xu hướng càng dốc, tốc độ sấy diễn ra càng mạnh, vật



liệu sấy càng nhanh tiến tới trạng thái cân bằng ẩm, qua đó rút ngắn thời gian sấy khô cũng như giảm thiểu chi phí năng lượng. Cụ thể, khi tăng nhiệt độ tác nhân sấy từ 30°C lên 50°C, thời gian sấy để MR đạt giá trị dưới 0,1 tại nhiệt độ 30°C, 40°C, 50°C lần lượt là 260 phút, 105 phút và 60 phút; trong trường hợp mẫu không trải qua quá trình xử lý siêu âm; thời gian sấy tương ứng này lần lượt là 210 phút, 85 phút và 50 phút. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng, nhiệt độ tác nhân sấy tăng quá cao sẽ làm suy giảm chất lượng thành phẩm sau quá trình sấy, do đó việc lựa chọn nhiệt độ tác nhân sấy phù hợp là điều thiết yếu khi thiết kế hệ thống sấy.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy, đường cong sấy các mẫu đã qua quá trình xử lý siêu âm có xu hướng dốc hơn các mẫu không qua xử lý tại cùng điều kiện nhiệt độ sấy. Điều này cho thấy được tác động tích cực của công nghệ tiền xử lý siêu âm tới quá trình sấy khô. Quá trình sấy các mẫu đã qua xử lý có hệ số khuếch tán ẩm cao hơn mẫu không qua xử lý, qua đó tăng cường tốc độ sấy, rút ngắn thời gian sấy khô. So với mẫu không qua xử lý siêu âm, thời gian sấy để MR đạt giá trị dưới 0,1 có thể rút ngắn từ 50 phút, 20 phút và 10 phút lần lượt tương ứng tại nhiệt độ sấy là 30°C, 40°C và 50°C. Thời gian sấy càng lớn, công nghệ tiền xử lý siêu âm càng cho thấy mức độ hiệu quả. Điều này gây ra bởi cơ chế “hiệu ứng bọt biển”, hình thành các vi kênh trong cấu trúc tế bào, từ đó tăng cường hệ số khuếch tán ẩm từ bên trong ra bề mặt. Kết quả tính toán có sự tương đồng với các nghiên cứu trước đó trên thế giới. Nghiên cứu của Fernandes và cộng sự chỉ ra rằng việc áp dụng công nghệ tiền xử lý siêu âm giúp giảm 11% tổng thời gian sấy khô chuỗi [19]. Phát hiện tương tự cũng đã được trình bày trong báo cáo của Romero và cộng sự ứng dụng khí sấy tảo [20]. Fabiano cũng cho rằng mẫu được xử lý bằng sóng siêu âm sẽ giúp rút ngắn đáng kể thời gian sấy khô sản phẩm [21].

Kết quả nghiên cứu cho thấy công nghệ tiền xử lý siêu âm hoàn toàn phù hợp đối với sản phẩm cà rốt cắt lát nhằm rút ngắn thời gian sấy khô, qua đó giảm thiểu tiêu hao năng lượng trong quá trình sấy. Công nghệ này đặc biệt hiệu quả khi được ứng dụng kết hợp với các phương pháp sấy có thời gian kéo dài như phương pháp sấy lạnh, sấy thăng hoa hoặc sấy chân không nhằm rút thời gian sấy khô cũng như giảm thiểu chi phí năng lượng trong quá trình sấy, qua đó giảm thiểu phát thải CO₂ ra môi trường, góp phần đưa Việt Nam tiến nhanh hơn tới mục tiêu Net Zero 2050.

3.2. Xây Dựng Mô Hình Thực Nghiệm

Các thí nghiệm được tiến hành trong các điều kiện cụ thể, việc phát triển một mô hình toán học nhằm khái quát hóa dữ liệu thực nghiệm để đánh giá các hệ thống sấy trong thực tế là điều cần thiết. Trong nghiên cứu này mô hình Page được ứng dụng để mô tả sự thay đổi của độ ẩm không thứ nguyên MR trong suốt quá trình sấy, mối quan hệ giữa MR và thời gian sấy τ được có dạng là [22]:

$$MR = \exp(-k\tau^n) \quad (2)$$

Trong đó k và n là các tham số thực nghiệm của mô hình. Các tham số này được xác định bằng cách so sánh giá trị của phương trình hồi quy với dữ liệu thực nghiệm thông qua phương pháp bình phương tối thiểu. Giá trị R² (R-square) thu được từ quá trình tính toán hồi quy được sử dụng làm tiêu chí chính để đánh giá sự phù hợp của các mô hình. Công thức tính R² xuất phát từ ý tưởng xem toàn bộ biến thiên đo được của biến phụ thuộc chia thành 2 phần: Phần



biến thiên do hồi quy và phần biến thiên do phần dư. Nếu phần biến thiên do phần dư càng nhỏ, nghĩa là khoảng cách từ các điểm đo được đến đường ước lượng hồi quy càng nhỏ thì phần biến thiên do hồi quy sẽ càng cao, khi đó giá trị R^2 sẽ càng lớn, đồng nghĩa độ phù hợp của mô hình càng cao. Giá trị này đạt giá trị lớn nhất là 1 và nhỏ nhất là 0 và được xác định thông qua phương trình sau:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3)$$

Trong đó:

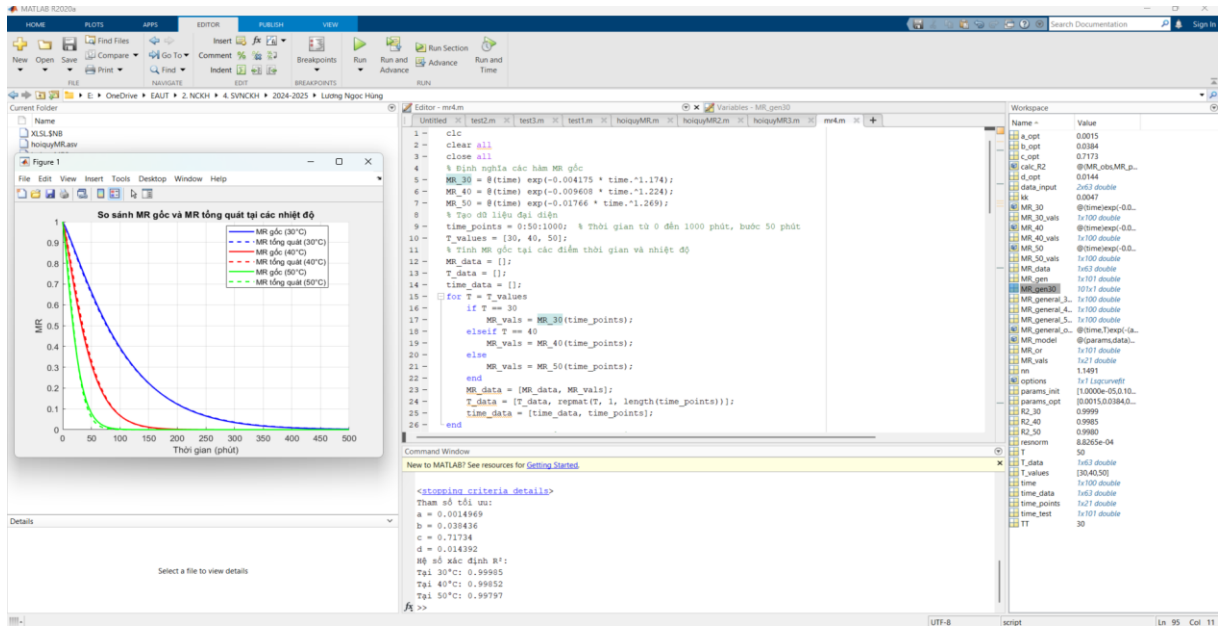
- SSR (Sum of Squares due to Regression): Tổng bình phương sai lệch giữa các giá trị nhận được từ hàm hồi quy và giá trị trung bình.
- SST (Sum of Squares Total): Tổng bình phương sai lệch giữa giá trị đo được và giá trị trung bình
- SSE (Sum of Square due to Error): Tổng bình phương sai lệch giữa giá trị đo được và giá trị nhận được từ hàm hồi quy

Bảng 1. Các tham số của mô hình thực nghiệm

Chế độ xử lý siêu âm	Nhiệt độ [°C]	$k \times 10^3$	n	R^2
Mẫu không được xử lý	30°C	1,828	1,274	0,9977
	40°C	4,068	1,357	0,9961
	50°C	8,307	1,372	0,9970
Mẫu được xử lý	30°C	4,175	1,174	0,9966
	40°C	9,608	1,224	0,9960
	50°C	17,660	1,269	0,9977

Các mô hình thực nghiệm mô tả 06 chế độ sấy khác nhau được lập trình, tính toán trên phần mềm Matlab R2020a, các kết quả tính toán được trình bày trong bảng 1. Nghiên cứu thu được các 06 mô hình thực nghiệm mô tả 06 chế độ sấy có độ phù hợp rất cao với các giá trị R^2 đều tiệm cận 1. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng cho thấy rằng, khi tăng nhiệt độ sấy từ 30°C lên 50°C, tham số k tăng theo hàm exp và n tăng tuyến tính. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết về động học quá trình sấy. Để và mở rộng phạm vi ứng dụng của các mô hình thực nghiệm tại nhiệt độ sấy khác nhau, nhóm nghiên cứu tiến hành xây dựng mô hình tổng quát mô tả đường cong sấy $MR(t,\tau)$ có dạng như sau:

$$MR = \exp \left[-a \exp(bt) \times \tau^{ct+d} \right] \quad (4)$$

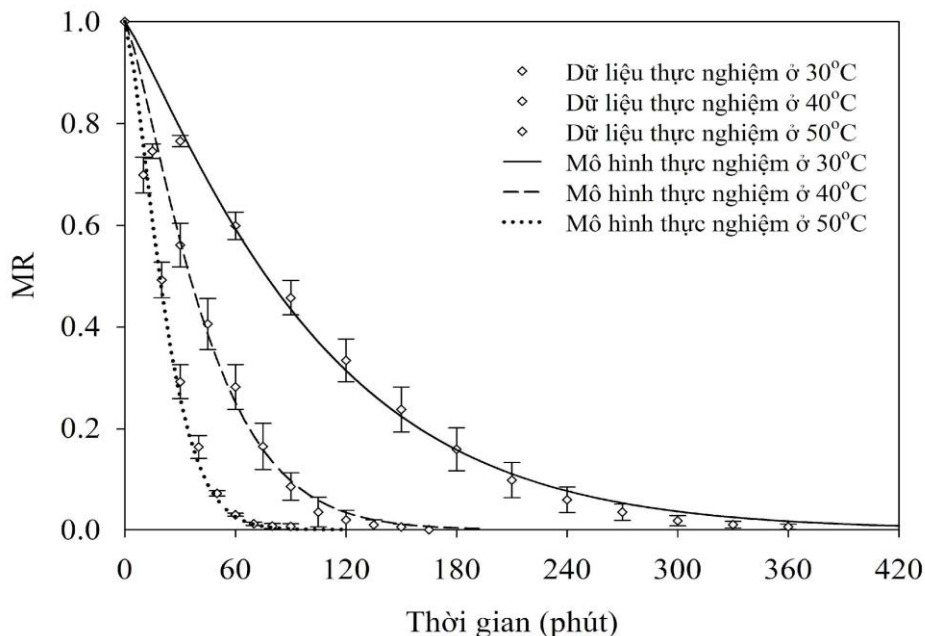


Hình 4. Giao diện phần mềm Matlab

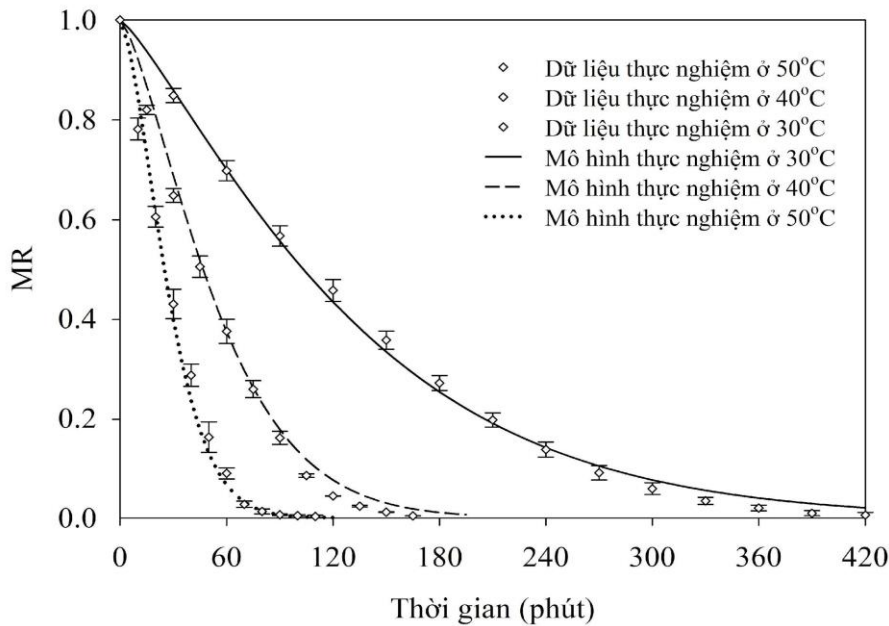
Trong đó: a, b, c và d là các tham số của mô hình, t và τ lần lượt là nhiệt độ sấy và thời gian sấy. Việc xác định các tham số của mô hình được xác định dựa trên phương pháp xấp xỉ bình phương tối thiểu và được lập trình, tính toán trên phần mềm Matlab R2020a (hình 4). Kết quả tính toán thu được 02 mô hình mô tả động học quá trình sấy trong trường hợp mẫu đã qua xử lý siêu âm (PT. 5) và mẫu không được xử lý siêu âm (PT. 6):

$$MR = \exp \left[-14,97 \times 10^{-4} \exp(0,038t) \times \tau^{0,717t+0,014} \right] \quad (5)$$

$$MR = \exp \left[-8,134 \times 10^{-4} \exp(0,035t) \times \tau^{0,741t+0,016} \right] \quad (6)$$



Hình 5. So sánh mô hình thực nghiệm và dữ liệu thí nghiệm với mẫu đã trải qua quá trình xử lý siêu âm



Hình 6. So sánh mô hình thực nghiệm và dữ liệu thí nghiệm với mẫu không trải qua quá trình xử lý siêu âm

Nghiên cứu thực hiện đánh giá sự phù hợp của mô hình thực nghiệm với dữ liệu thí nghiệm (hình 5-6). Kết quả cho thấy đường cong sấy của mô hình thực nghiệm hầu hết nằm trong khoảng sai số thực nghiệm, qua đó khẳng định 2 mô hình thực nghiệm mô tả đường cong sấy có độ phù hợp cao và hoàn toàn có thể được ứng dụng trong tính toán, thiết kế một hệ thống sấy trong thực tế.

4. KẾT LUẬN

Nhằm tăng cường tốc độ sấy, rút ngắn thời gian sấy và giảm tiêu thụ năng lượng, nhóm nghiên cứu đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm quá trình sấy tiền xử lý siêu âm ứng dụng trên sản phẩm cà rốt cắt lát. Nghiên cứu chỉ ra rằng, nhiệt độ sấy là yếu tố then chốt ảnh hưởng tới tốc độ sấy, nhiệt độ sấy càng cao, tốc độ sấy càng nhanh và ngược lại. Ngoài ra, nghiên cứu cũng chứng minh công nghệ tiền xử lý siêu âm có tác động tích cực tới động học quá trình sấy lát cà rốt. Thời gian sấy khô có thể rút ngắn từ 50 phút, 20 phút và 10 phút lần lượt tương ứng với nhiệt độ sấy là 30°C, 40°C, 50°C. Ảnh hưởng của công nghệ tiền xử lý siêu âm càng trở nên hiệu quả hơn khi sấy ở nhiệt độ thấp, qua đó mở ra tiềm năng kết hợp công nghệ tiền xử lý siêu âm với các phương pháp sấy có thời gian kéo dài. Ngoài ra nghiên cứu cũng đã xây dựng thành công 02 mô hình thực nghiệm mô tả quá trình sấy ở các điều kiện khác nhau, qua đó mở rộng khả năng ứng dụng trong tính toán, thiết kế hệ thống sấy cà rốt. Các kết quả nghiên cứu là cơ sở dữ liệu quan trọng góp phần nâng cao hiệu quả của quá trình sấy cà rốt và các loại vật liệu sấy khác nhau, hướng tới hoạt động sản xuất bền vững.



TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Salmeron, J., Hu, F. B., Manson, J. E., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., Rimm, E. B., & Willett, W. C. (2001). Dietary fat intake and risk of type 2 diabetes in women. *The American journal of clinical nutrition*, Số 6, tr. 1019-1026.
- [2] Kader, A. A. (2002). *Postharvest technology of horticultural crops*. University of California Agriculture and Natural Resources.
- [3] Urbano, D. G., Aquino, A., & Scrucca, F. (2023). Energy performance, environmental impacts and costs of a drying system: life cycle analysis of conventional and heat recovery scenarios. *Energies*, số 3 tr. 1523.
- [4] Hafezi, N., Sheikhdavoodi, M. J., Sajadiye, S. M., & Ferdavani, M. E. K. (2014). Evaluation of energy consumption of potato slices drying using vacuum-infrared method. *International journal of advanced biological and biomedical research*, số 10, tr. 2651-2658.
- [5] Niu, Y., & Xiang, Y. (2018). An overview of biomembrane functions in plant responses to high-temperature stress. *Frontiers in plant science*, số 9, tr. 915.
- [6] Dhaliwal, L. K., & Angeles-Shim, R. B. (2022). Cell membrane features as potential breeding targets to improve cold germination ability of seeds. *Plants*, số 23, tr. 3400.
- [7] Lu, Y., Zhang, Y., Lian, N., & Li, X. (2023). Membrane dynamics regulated by cytoskeleton in plant immunity. *International Journal of Molecular Sciences*, số 7, tr. 6059.
- [8] Carcel, J. A., Castillo, D., Simal, S., & Mulet, A. (2019). Influence of temperature and ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of red pepper. *Drying Technology*, 37(4), tr. 486-493.
- [9] Ghanbarian, D., Toriki-Harchegani, M., Sadeghi, M., & Pirbalouti, A. G. (2020). Ultrasonically improved convective drying of peppermint leaves: Influence on the process time and energetic indices. *Renewable Energy*, Số 153, tr. 67-73.
- [10] Tüfekçi, S., & Özkal, S. G. (2017). Enhancement of drying and rehydration characteristics of okra by ultrasound pre-treatment application. *Heat and Mass Transfer*, Số 53, tr. 2279-2286.
- [11] Liu, Y., Zeng, Y., Wang, Q., Sun, C., & Xi, H. (2019). Drying characteristics, microstructure, glass transition temperature, and quality of ultrasound-strengthened hot air drying on pear slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, Số 3, tr. 13899.
- [12] Kadam, S. U., Tiwari, B. K., & O'Donnell, C. P. (2015). Effect of ultrasound pre-treatment on the drying kinetics of brown seaweed *Ascophyllum nodosum*. *Ultrasonics sonochemistry*, Số 23, tr. 302-307.
- [13] Sohrabpour, S., Yadegari, M., & Kenari, R. E. (2021). Effect of ultrasound and acid pretreatments during dehydration on quality properties of quince.



- [14] Jiang, C., Wan, F., Zang, Z., Zhang, Q., Ma, G., & Huang, X. (2022). Effect of an ultrasound pre-treatment on the characteristics and quality of far-infrared vacuum drying with cistanche slices. *Foods*, Số 6, tr. 866.
- [15] Fernandes, F. A., Linhares Jr, F. E., & Rodrigues, S. (2008). Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. *Ultrasonics sonochemistry*, Số 6, tr. 1049-1054.
- [16] Stojanovic, J., & Silva, J. L. (2007). Influence of osmotic concentration, continuous high frequency ultrasound and dehydration on antioxidants, colour and chemical properties of rabbiteye blueberries. *Food chemistry*, Số 3, tr. 898-906.
- [17] Ahrné, L., Prothon, F., & Funebo, T. (2003). Comparison of drying kinetics and texture effects of two calcium pretreatments before microwave-assisted dehydration of apple and potato. *International Journal of Food Science and Technology*, Số 4, tr. 411-420.
- [18] Seremet, L., Botez, E., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., & Mocanu, G. D. (2016). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food chemistry*, Số 195, tr. 104-109.
- [19]

Fernandes, Fabiano AN, Francisca IP Oliveira, and Sueli Rodrigues (2008). "Use of ultrasound for dehydration of papayas." *Food and Bioprocess Technology*, Số 1, tr. 339-345.

- [20] Romero, J. C., & Yépez, V. B. (2014). Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). *Ultrasonics sonochemistry*, Số 22, tr. 205-210.
- [21] Fernandes, F. A., & Rodrigues, S. (2007). Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. *Journal of Food Engineering*, Số 2, tr. 261-267.

Madan, A., Pare, A., & Gowda, N. N. (2014). Mathematical modelling of thin-layer drying process of bamboo (*Bambusa bambos*) shoots at varying temperature. *Res. Rev. J. Bot*, Số 3, tr. 1-9.