

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ SẤY HẠT MÈ (VÙNG) TRÊN MÁY SẤY TẦNG SÔI XUNG KHÍ DẠNG MỀ

PHẠM QUANG PHÚ, BÙI TRUNG THÀNH

*Khoa Công nghệ Nhiệt lạnh, Trường Đại học Công nghiệp thành phố Hồ Chí Minh;
phamquangphu@iuh.edu.vn, buitrungthanh@iuh.edu.vn*

Tóm tắt. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm nhằm xác định các thông số công nghệ của quá trình sấy hạt mè (vùng) theo phương pháp sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ. Các thí nghiệm được tiến hành dựa trên quy hoạch thực nghiệm trực giao bậc 2, kết hợp tối ưu hóa đa mục tiêu theo phương pháp đáp ứng bề mặt để xác định giá trị tối ưu của các thông số công nghệ (nhiệt độ tác nhân, vận tốc tác nhân, tốc độ xung khí) trong quá trình sấy hạt mè. Kết quả là, giá trị tối ưu của các thông số đã được xác định như sau: nhiệt độ tác nhân 63,13°C, vận tốc tác nhân 1,21 m/s, tốc độ xung khí 12 vòng/phút. Dựa trên các kết quả tối ưu này, độ ẩm sản phẩm sấy đạt 6,26%, chi phí điện năng cho 1kg ẩm bay hơi đạt 408 Wh/kg ẩm, chi phí nhiệt năng cho 1kg ẩm bay hơi đạt 4989 kJ/kg ẩm.

Từ khóa. Tầng sôi, xung khí, sấy mè, sấy tầng sôi, phương pháp tầng sôi xung khí, thực nghiệm đa yếu tố, tối ưu hóa đa mục tiêu

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MAIN PARAMETERS DETERMINATION FOR SESAME SEEDS ON THE BATCH PULSED FLUIDIZED BED DRYER

Abstract. The paper presents the results of experimental research to determine the technological parameters of sesame drying process in the batch pulsed fluidized bed dryer. The experiments were carried out according to the 2-level orthogonal experimental plan, combined with multiple response optimization according to Response Surface method (RSM) to determine the optimal parameters (gas temperature, gas velocity, pulsed speed) in the sesame drying process. As the result, the optimal parameters were determined such as: gas temperature was $Z_1^{opt} = 63,13^\circ\text{C}$, gas velocity was $Z_2^{opt} = 1,21 \text{ m/s}$, pulsed speed was $Z_3^{opt} = 12 \text{ RPM}$. Corresponding to these optimal parameters, the objective functions reached the minimum value, including the final moisture content $Y_1^{min} = 6,26\%$, the specific electrical energy $Y_2^{min} = 408 \text{ Wh/kg vapor}$ and the specific heat value consumption $Y_3^{min} = 4989 \text{ kJ/kg vapor}$.

Keywords. Fluidized bed, gas pulsed, sesame drying, fluidized bed drying, pulsed fluidized bed method, multiple factor experiment, Multiple Response Optimization

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mè (*Sesamum indicum L*), còn gọi là vùng, là một cây cho dầu được trồng phổ biến ở những nước gần đường xích đạo [8]. Hạt mè chứa từ 38% đến 50% dầu [8]. Theo FAO, các quốc gia hàng đầu về diện tích trồng mè trên thế giới là Ấn Độ, Myanmar, Sudan và Trung Quốc với hơn 70% tổng diện tích [4]. Ở Việt Nam, cây mè được trồng nhiều ở các tỉnh đồng bằng sông Cửu Long, miền Đông Nam Bộ và Trung Bộ [4].

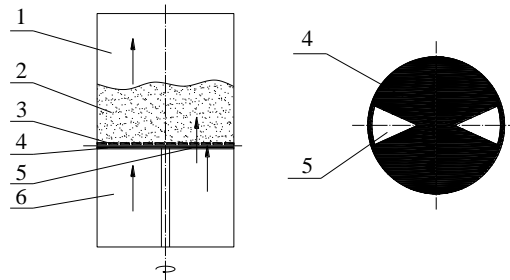
Cây mè sau khi thu hoạch được phơi khô để tách hạt, hạt mè sau khi thu được cũng cần được sấy để bảo quản lâu hơn. Hạt mè thuộc nhóm vật liệu rời khá đồng đều về kích thước, khối lượng riêng thấp nên rất phù hợp với các dạng máy sấy tầng sôi.

Máy sấy tầng sôi có nhiều ưu điểm vượt trội hơn so với các loại máy sấy vật liệu rời khác như tốc độ sấy cao do sự tương tác tốt giữa khí và hạt, tỷ lệ vỡ vụn thấp, kích thước hạt đồng đều hơn, độ ẩm sản phẩm đồng đều, vốn đầu tư và chi phí bảo dưỡng thấp hơn so với máy sấy thùng quay nên chúng được xếp vào nhóm máy sấy cao cấp. Tuy vậy, loại máy sấy này tồn tại hai nhược điểm lớn nhất: (1) Vận tốc để hóa sôi vật liệu lớn nên yêu cầu phải sử dụng quạt có áp suất cao, lưu lượng cao hơn do đó làm tăng chi phí đầu tư và tăng chi phí điện trong vận hành (Theo các tài liệu công bố thì khi sấy vật liệu hạt < 1mm -1,5 mm đối với máy sấy tĩnh thì vận tốc tác nhân sấy khoảng 0,1-0,2 m/s, máy sấy thùng quay 1-1,2 m/s, trong khi máy

sấy tầng sôi phải từ 1,5-2,5 m/s) [7]; (2) Yêu cầu kích thước hạt sấy nằm trong phạm vi giới hạn và có độ đồng đều cao, nếu không khả năng hóa sôi bị hạn chế. Đối với vật liệu có kích thước quá nhỏ thì khi sấy sẽ bị cuốn theo dòng khí đi ra ngoài hệ thống, còn đối với vật liệu có kích thước quá lớn thì khó có thể hóa sôi được.

Để giải quyết vấn đề chi phí năng lượng cho quạt sử dụng trong quá trình sấy, một số tác giả của thế giới đã nghiên cứu một phương pháp sấy tầng sôi mới đó là phương pháp tầng sôi kiểu xung khí (pulsed fluidized bed dryer). Các công bố cho thấy mô hình thí nghiệm cho kết quả khả quan về mặt tiết kiệm năng lượng [3-5, 9-17].

Công bố của M.C.B. Ambrosio [3] cho thấy phương pháp sấy bằng xung khí cho ưu điểm về mặt tiết kiệm năng lượng do giảm được lưu lượng khí cấp vào buồng sấy. Jezowska [5] đã chứng minh khi sấy vật liệu bằng máy sấy lớp hạt sôi kiểu xung khí cho phép tiết kiệm năng lượng hơn 50%. Theo Djurkov [14-16], phương pháp sấy tầng sôi xung khí có thể ứng dụng trong quá trình sấy các vật liệu cấu trúc dạng tinh thể, có đặc tính kết dính như đường mía, đường từ củ cải đường,... và các sản phẩm sinh học có độ ẩm cao (hạt mè ẩm, hạt hoa hướng dương, hạt cacao,...). Gawrzynski và các cộng sự [13,17] đã công bố rằng việc sấy các loại vật liệu bằng phương pháp sấy tầng sôi xung khí trên quy mô thí nghiệm cho kết quả tốt. Các quan sát được thực hiện cho thấy sự xung động của không khí nóng đã tạo ra lớp hạt sôi, tạo ra một sự hòa trộn mãnh liệt đối với vật liệu rắn và làm gia tăng diện tích bề mặt trao đổi nhiệt giữa tác nhân và vật liệu. Prachayawarakorn, Warunee Tia và cộng sự [12] đã tiến hành nghiên cứu phương pháp sấy đường trên máy sấy tầng sôi xung khí với thiết bị tạo xung kiểu van bướm và so sánh kết quả sấy trên máy sấy tầng sôi truyền thống. Kết quả là, máy sấy tầng sôi xung khí cho độ ẩm sản phẩm sấy đồng đều, tiêu hao năng lượng thấp hơn máy sấy tầng sôi truyền thống (6,5 MJ/kg nước bay hơi so với 7,8 MJ/kg hơi nước bay hơi).



1- Buồng sấy; 2- Lớp hạt sôi; 3- Ghi đỡ hạt; 4- Đĩa quay phân phối khí;
5- Cửa thoát khí; 6- Buồng chứa tác nhân sấy

Hình 1. Nguyên lý sấy cấp xung khí dạng mẻ[15]

Các kết quả tính toán, thiết kế các thiết bị chính của hệ thống có thể đạt được thông qua việc tính toán bài toán sấy lý thuyết và thực tế. Tuy nhiên, vấn đề đặt ra là với các thông số của tác nhân (nhiệt độ, vận tốc,...) bao nhiêu là hợp lý để quá trình sấy đạt được kết quả tốt nhất về độ ẩm sản phẩm, thời gian sấy, tiêu hao điện năng riêng,... Trong khuôn khổ bài báo này, các thí nghiệm sấy mè trên mô hình máy sấy tầng sôi xung khí kiểu mẻ được thực hiện nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ ẩm sản phẩm và chi phí sấy.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu sấy

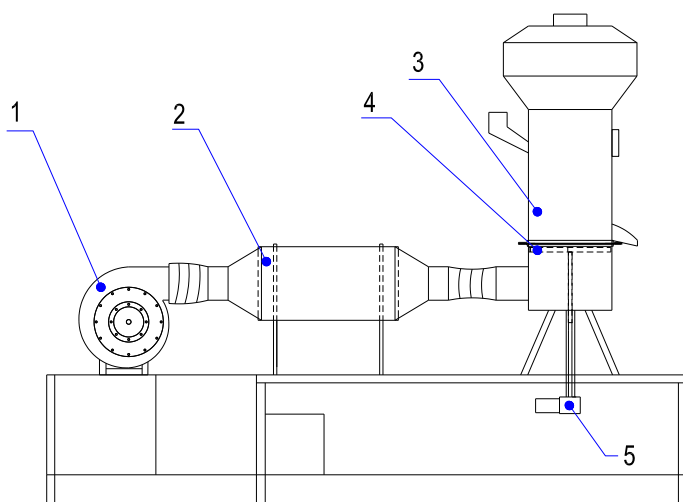
Hạt mè vàng được trồng ở tỉnh Bình Thuận, có độ ẩm trung bình sau thu hoạch 17%, với kích thước hạt đồng đều, không bị lép được sử dụng làm vật liệu sấy trong các thí nghiệm. Đường kính trung bình tương đương và khối lượng riêng của hạt mè đo được bằng thực nghiệm lần lượt là 1,52mm và 1219 kg/m³.

Thời gian sấy hạt mè theo tính toán lý thuyết là 30 phút được dùng làm cơ sở tiến hành thí nghiệm.

2.2. Phương tiện nghiên cứu

Quá trình thực nghiệm được tiến hành tại phòng thực hành kỹ thuật sấy X6.11, khoa công nghệ Nhiệt Lạnh trường ĐH Công Nghiệp Tp.HCM. Hạt mè được sấy trên mô hình máy sấy tầng sôi xung khí kiểu mẻ

có năng suất 5 kg/mê, vận tốc tác nhân sấy được điều chỉnh bằng biến tần lắp cho quạt và được đo bằng máy đo tốc độ gió SDL350 của hãng Extech Instruments, có sai số phép đo là $\pm 0,01$ m/s, nhiệt độ tác nhân sấy được điều khiển bằng bộ điều chỉnh nhiệt độ Autonics TZN4S-14R, tốc độ xung khí được điều khiển bằng biến tần lắp cho động cơ tạo xung, sử dụng thiết bị đo số vòng quay để kiểm tra và hiệu chỉnh. Độ ẩm vật liệu sấy được xác định bằng máy đo độ ẩm vật liệu mã hiệu AGS50 của hãng Axis, Balan, sai số đo là $\pm 0,01\%$, máy tự động gia nhiệt theo chế độ sấy cài đặt và dựa trên độ giảm ẩm trong quá trình sấy để xác định độ ẩm của vật liệu. Các thông số không khí bao gồm nhiệt độ bầu khô, nhiệt độ bầu ướt, nhiệt độ điểm sương, độ ẩm tương đối được đo bằng thiết bị Hygro – thermometer, mã hiệu EA20 của hãng Extech Instruments, sai số khi đo độ ẩm là $\pm 0,1\%$, sai số nhiệt độ là $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Thiết bị đo điện đa năng HIOKI 3286 – 20 được dùng để đo hiệu điện thế, cường độ dòng điện, công suất, hệ số công suất nhằm xác định tiêu hao năng lượng trong quá trình sấy.



1- Quạt cấp không khí; 2- Bộ gia nhiệt; 3- Buồng sấy máy sấy tầng sôi;
4- Bộ phân phối TNS; 5- Động cơ giảm tốc

Hình 2. Mô hình máy sấy tầng sôi xung khí dạng mề

Các thông số kỹ thuật của mô hình máy sấy tầng sôi xung khí kiểu mề:

- Năng suất đầu vào tối đa: 5 kg/mê
- Kích thước tổng thể: 1000mm x 800mm x 1700mm (D x R x C)
- Kích thước buồng sấy: đường kính 250mm cao 850mm, phần buồng lắng có đường kính 400mm.
- Thông số quạt cấp khí: công suất 1,5 Hp, lưu lượng 1800 CMH, cột áp 1500 Pa.
- Thông số buồng gia nhiệt: tổng công suất 12 kW gồm 6 thanh điện trở chữ U, có khả năng gia nhiệt đến 150°C .
- Đĩa quạt tạo xung có đường kính 246mm, tiết diện phần được khoét để phân phối khí bằng 1/3 tiết diện đĩa, động cơ quay đĩa xung có công suất 25W, số vòng quay có thể điều chỉnh từ 8-30 vòng/phút.

2.3. Xây dựng các thông số cho quá trình sấy

Nhằm xây dựng được một chế độ sấy phù hợp cho việc sấy hạt mè bằng phương pháp sấy tầng sôi xung khí, các thông số công nghệ của quá trình sấy cần được tối ưu hóa. Điều đó có nghĩa là ứng với những điều kiện nhất định của quá trình sấy, các thông số công nghệ còn lại phải được thiết lập, nhằm mục đích tạo cho quá trình sấy một hiệu quả cao nhất.

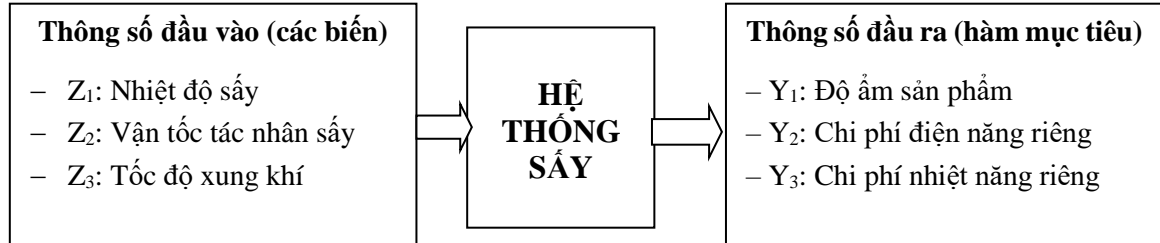
Bảng các thí nghiệm thăm dò, những thông số có ảnh hưởng lớn đến quá trình sấy đã được quan sát, bao gồm:

- Z_1 : Nhiệt độ sấy, t_g
- Z_2 : Vận tốc tác nhân sấy, V_g
- Z_3 : Tốc độ xung khí, n_x

Các yếu tố chất lượng và chi phí sấy được xem xét (yếu tố đầu ra) bao gồm:

- Y_1 : Độ ẩm sản phẩm, M_2
- Y_2 : Chi phí điện năng riêng, N_e
- Y_3 : Chi phí nhiệt năng riêng, q_s

Trong đó yếu tố chất lượng sấy là Y_1 ; yếu tố chi phí sấy là Y_2, Y_3



Hình 3. Minh họa mô hình hộp đen

Thông qua việc đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sấy và qua các thí nghiệm thăm dò kết hợp với tính chất nhiệt vật lý của vật liệu sấy, xác định miền nghiên cứu thực nghiệm như sau:

Sử dụng máy đo vận tốc để xác định vận tốc tác nhân của mô hình, qua các thí nghiệm thăm dò thì xác định được vận tốc tác nhân sấy tối thiểu tại vận tốc là 0,5m/s (nơi mà sự sôi diễn ra rất yếu) và vận tốc tối hạn là 2,5m/s (nơi mà sự sôi diễn ra mạnh nhất nhưng hạt chưa bị cuốn theo dòng khí).

Theo [1], với vật liệu sấy là mè thì nhiệt độ để sấy thích hợp là 60°C và việc thực nghiệm trên vật liệu nông sản nên nhiệt độ không được quá cao dẫn đến gây hư hỏng cho sản phẩm sấy, dựa vào hai giải thích trên nên miền thực nghiệm nhiệt độ được chọn từ 45 ÷ 65°C.

Khi tốc độ quay đĩa tạo xung khí (gọi tắt là tốc độ xung khí) giảm thấp hơn 10 vòng/phút thì tốc độ sấy giảm đi rõ rệt, nếu xét cùng thời gian sấy thì độ ẩm sản phẩm không đạt, bên cạnh đó nếu thực hiện ở tốc độ cao hơn 20 vòng/phút thì quá trình sấy tầng sôi không thể diễn ra được nên thực nghiệm chỉ đánh giá trong phạm vi tốc độ đĩa xung khí là từ 10 đến 20 vòng/phút.

Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao bậc 2 để xây dựng bảng ma trận thí nghiệm nhằm xác định giá trị tối ưu của các thông số công nghệ trong quá trình sấy. Dạng phương trình hồi quy như sau [2]:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 \quad (1)$$

Các biến X_1, X_2, X_3 được mã hóa từ các biến thực Z_1, Z_2, Z_3 :

$$X_i = \frac{Z_i - Z_i^0}{\Delta Z_i} \quad (2)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} Z_i^{\min} < Z_i^0 < Z_i^{\max}, \quad i=1, 2, 3 \\ Z_i^0 &= \frac{Z_i^{\max} + Z_i^{\min}}{2}; \Delta Z_i = \frac{Z_i^{\max} - Z_i^{\min}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Số thí nghiệm cần tiến hành:

$$N = n_k + n_* + n_0 = 2^k + 2k + n_0 = 17 \quad (4)$$

Với: $k = 3; n_k = 2^k = 8; n_* = 2.k = 2.3 = 6; n_0 = 3$

Giá trị của điểm sao:

$$\alpha = \sqrt{\sqrt{N.2^{(k-2)}} - 2^{(k-1)}} = \sqrt{\sqrt{17.2^{(3-2)}} - 2^{(3-1)}} = 1,353 \quad (5)$$

Miền thực nghiệm được xây dựng thông qua kế hoạch hóa trực giao bậc 2 như sau [2]:

Bảng 1. Miền thực nghiệm đa yếu tố

Yếu tố	Mức sao dưới $-\alpha (-1,353)$	Mức dưới (-1)	Mức cơ sở (0)	Mức trên (+1)	Mức sao trên $+\alpha (1,353)$	Khoảng biến thiên ΔZ_i
Z_1 (°C)	41,47	45	55	65	68,53	10
Z_2 (m/s)	0,82	1,0	1,5	2,0	2,18	0,5
Z_3 (vòng/phút)	8,2	10	15	20	21,8	5

Mục đích của nghiên cứu là xác định mối tương quan của các biến đến hàm mục tiêu của quá trình sấy hạt mè bằng phương pháp sấy tầng sôi xung khí dạng mề. Từ các số liệu đạt được, phân tích hồi quy đa yếu tố sẽ được tiến hành trên phần mềm Statgraphics Centurion XV để xem xét mối liên hệ giữa các yếu tố với nhau và tối ưu hóa các thông số công nghệ.

2.4. Phương pháp xác định các thông số đầu ra

Độ ẩm sản phẩm: (M_2 , %) được xác định bằng cân phân tích độ ẩm theo tiêu chuẩn TCVN 8949:2011:

$$M_2 = \frac{G_d - G_c}{G_d} 100\% \quad (6)$$

Trong đó: G_d – Khối lượng mẫu lấy từ sản phẩm sấy trước khi đo, g
 G_c – Khối lượng mẫu còn lại sau khi đo, g

Chi phí điện năng riêng: (N_e , kWh/kg ẩm) là lượng điện năng tiêu hao để làm bay hơi 1kg ẩm trong quá trình sấy, được xác định bằng công thức sau:

$$N_e = \frac{N}{W} = \frac{U.I.\cos\varphi.\tau}{G_1 - G_2} \quad (7)$$

Trong đó: G_1 – Năng suất đầu vào của máy sấy, kg
 G_2 – Khối lượng sản phẩm sau khi sấy, kg
 W – Lượng nước bay hơi trong quá trình sấy, kg
 U – Điện áp, V
 I – Cường độ dòng điện, A
 $\cos\varphi$ – Hệ số công suất
 N – Tổng điện năng tiêu hao trong thời gian sấy τ , kWh

Chi phí nhiệt năng riêng: (q_s , kJ/kg ẩm) là lượng nhiệt cần thiết để làm bay hơi 1 kg ẩm trong quá trình sấy, được xác định như sau:

$$q_s = \frac{Q}{W} = \frac{Q}{G_1 - G_2} \quad (8)$$

Với: Q – Tổng nhiệt lượng cung cấp cho quá trình sấy tại thiết bị gia nhiệt, kJ
 W – Lượng nước bay hơi trong quá trình sấy, kg

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các thí nghiệm đa yếu tố đã được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình sấy. Các thí nghiệm được tiến hành dựa trên ma trận thí nghiệm xây dựng theo quy hoạch thực nghiệm bậc 2. Kết quả thực nghiệm được trình bày dưới bảng sau:

Bảng 2. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm

Số thí nghiệm, N		Giá trị biến thực			Giá trị biến mã hóa			Giá trị hàm mục tiêu		
		Z ₁	Z ₂	Z ₃	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃
2 ^k	1	65	2	20	1	1	1	5,66	2465	9005
	2	45	2	20	-1	1	1	7,11	2817	4528
	3	65	1	20	1	-1	1	7,23	755	4930
	4	45	1	20	-1	-1	1	8,41	855	2691
	5	65	2	10	1	1	-1	5,14	2012	8653
	6	45	2	10	-1	1	-1	6,87	2264	4377
	7	65	1	10	1	-1	-1	6,77	327	4704
	8	45	1	10	-1	-1	-1	8,08	377	2566
2 ^k	9	68,47	1,5	15	1,353	0	0	5,27	964	7143
	10	41,53	1,5	15	-1,353	0	0	7,84	1232	2842
	11	55	2,18	15	0	1,353	0	5,96	2993	7345
	12	55	0,82	15	0	-1,353	0	8,32	428	2893
	13	55	1,5	21,8	0	0	1,353	7,35	1635	4829
	14	55	1,5	8,2	0	0	-1,353	6,72	830	4578
n ₀	15	55	1,5	15	0	0	0	6,15	941	4578
	16	55	1,5	15	0	0	0	6,18	956	4603
	17	55	1,5	15	0	0	0	6,23	960	4553

Phần mềm Statgraphics Centurion XV version 15.1.02 được sử dụng để tiến hành xử lý kết quả thí nghiệm, mức ý nghĩa của các hệ số được kiểm định theo chuẩn Student, phương trình hồi quy theo các giá trị thực nghiệm được kiểm định theo chuẩn Fisher. Từ đó, ba phương trình hồi quy Y₁, Y₂, Y₃ được thiết lập như sau:

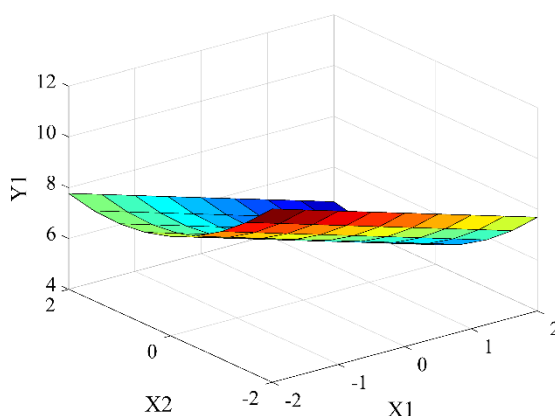
Độ ẩm sản phẩm cuối quá trình sấy:

Dựa trên kết quả thực nghiệm và phân tích hồi quy đa yếu tố, sau khi loại trừ các hệ số có mức ý nghĩa P > 0,05 (b₁₁, b₁₂, b₁₃, b₂₃), phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (X₁, X₂, X₃) đến độ ẩm sản phẩm (Y₁) được thiết lập như sau:

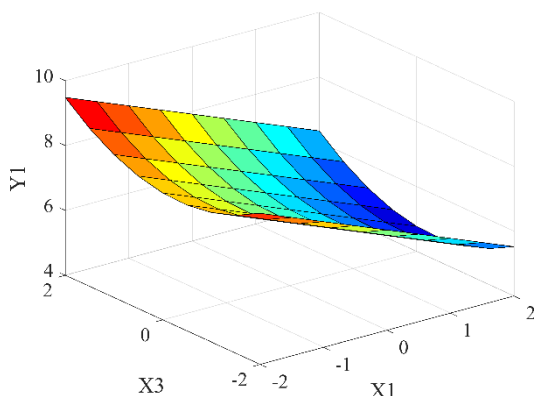
$$Y_1 = 6,345 - 0,784.X_1 - 0,763.X_2 + 0,206.X_3 + 0,347.X_2^2 + 0,290.X_3^2 \quad (9)$$

Phương trình có hệ số tương quan R = 0,963, các mức ý nghĩa P < 0,05 (0,0000; 0,0000; 0,0122; 0,0028; 0,0085) và kiểm định tiêu chuẩn Fisher (129,99; 123,15; 8,97; 14,64; 10,2) tương ứng với các yếu tố (X₁; X₂; X₃; X₂²; X₃²) đều đạt yêu cầu.

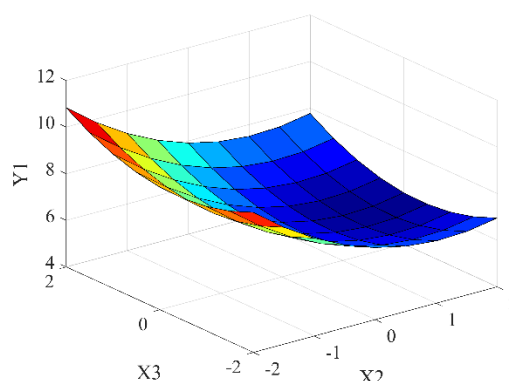
Đồ thị biểu diễn các mối tương quan giữa hàm mục tiêu với các thông số công nghệ được trình bày từ hình 4 đến hình 6:



Hình 4. Đồ thị tương quan giữa Y_1 và X_1, X_2



Hình 5. Đồ thị tương quan giữa Y_1 và X_1, X_3



Hình 6. Đồ thị tương quan giữa Y_1 và X_2, X_3

Phương trình hồi quy đối với hàm mục tiêu Y_1 cho thấy vận tốc tác nhân sấy và tốc độ xung khí có ảnh hưởng rất lớn đến độ ẩm sản phẩm. Đối với quá trình sấy hạt mè, ảnh hưởng của nhiệt độ đến độ ẩm sản phẩm trong phạm vi nghiên cứu là không lớn, chỉ cần điều chỉnh tối ưu để giảm chi phí nhiệt năng riêng.

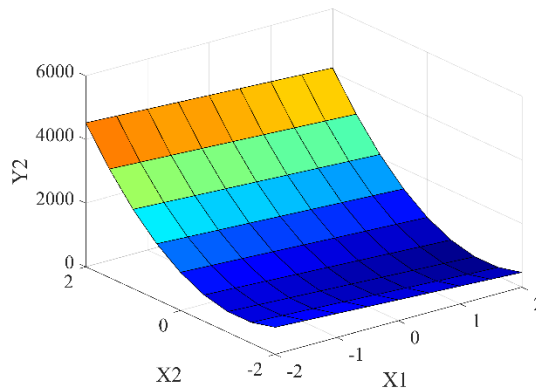
Chi phí điện năng riêng:

Dựa trên kết quả thực nghiệm và phân tích hồi quy đa yếu tố, sau khi loại trừ các hệ số có mức ý nghĩa $P > 0,05$ ($b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$), phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (X_1, X_2, X_3) đến chi phí điện năng cần thiết để làm bay hơi 1 kg ẩm (Y_2) được thiết lập như sau:

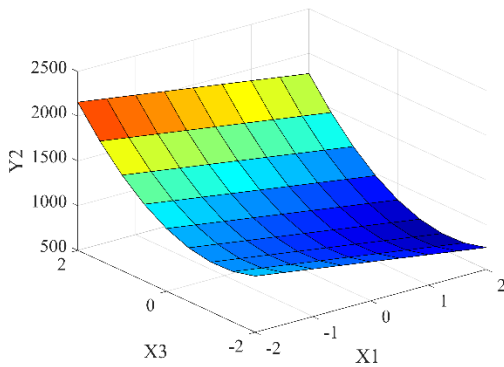
$$Y_2 = 1011,91 - 95,751.X_1 + 918,783.X_2 + 257,356.X_3 + 370,999.X_2^2 + 109,934.X_3^2 \quad (10)$$

Phương trình có hệ số tương quan $R = 0,994$, các mức ý nghĩa $P < 0,05$ (0,0019; 0,0000; 0,0000; 0,0000; 0,0046) và kiểm định tiêu chuẩn Fisher (16,55; 1523,82; 119,56; 142,85; 12,54) tương ứng với các yếu tố ($X_1; X_2; X_3; X_2^2; X_3^2$) đều đạt yêu cầu.

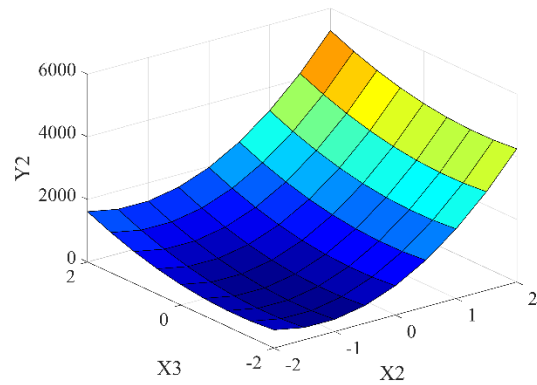
Đồ thị biểu diễn các mối tương quan giữa hàm mục tiêu với các thông số công nghệ được trình bày từ hình 7 đến hình 9:



Hình 7. Đồ thị tương quan giữa Y_2 và X_1, X_2



Hình 8. Đồ thị tương quan giữa Y_2 và X_1, X_3



Hình 9. Đồ thị tương quan giữa Y_2 và X_2, X_3

Chi phí điện năng riêng chịu ảnh hưởng lớn của vận tốc tác nhân sấy và tốc độ xung khí, do đây là hai thành phần tiêu hao điện năng chính của hệ thống. Tuy nhiên, việc giảm vận tốc và tốc độ xung để giảm tiêu hao điện năng sẽ ảnh hưởng rất lớn đến chế độ hóa sôi hạt, do vậy cần tối ưu hóa các thông số này để đạt mức chi phí điện năng thấp mà chất lượng sản phẩm tốt nhất.

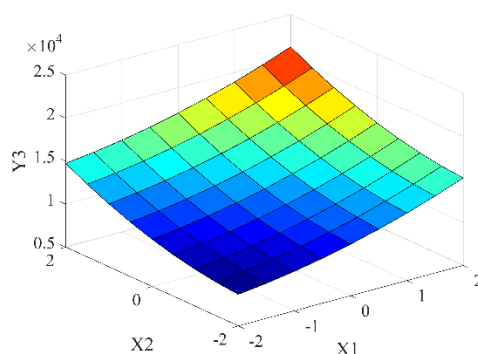
Chi phí nhiệt năng riêng:

Dựa trên kết quả thực nghiệm và phân tích hồi quy đa yếu tố, sau khi loại trừ các hệ số có mức ý nghĩa $P > 0,05$ (b_{13}, b_{23}, b_{33}) phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (X_1, X_2, X_3) đến chi phí nhiệt năng cần thiết để làm bay hơi 1 kg ẩm (Y_3) được thiết lập như sau:

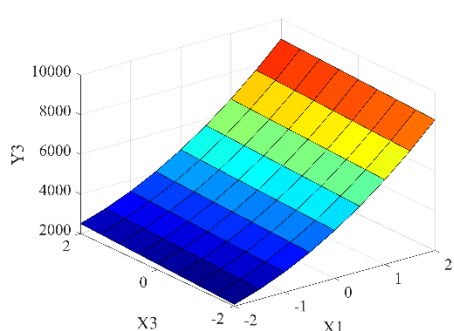
$$Y_3 = 4624,44 + 1624,93.X_1 + 1517,43.X_2 + 102,35.X_3 + 547,00.X_1.X_2 + 231,38.X_1^2 + 300,48.X_2^2 \quad (11)$$

Phương trình có hệ số tương quan $R = 0,994$, các mức ý nghĩa $P < 0,05$ (0,0000; 0,0000; 0,0165; 0,0000; 0,0006; 0,0001) và kiểm định tiêu chuẩn Fisher (2086,75; 1819,78; 8,28; 162,22; 24,33; 41,02) tương ứng với các yếu tố ($X_1; X_2; X_3; X_1X_2; X_1^2; X_2^2$) đều đạt yêu cầu.

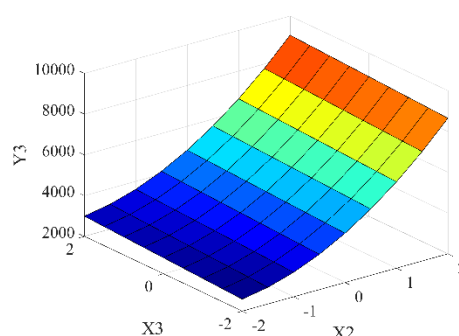
Đồ thị biểu diễn các mối tương quan giữa hàm mục tiêu với vận tốc tác nhân sấy được trình bày từ hình 10 đến hình 12.



Hình 10 Đồ thị tương quan giữa Y_3 và X_1, X_2



Hình 11 Đồ thị tương quan giữa Y_3 và X_1, X_3



Hình 12 Đồ thị tương quan giữa Y_3 và X_2, X_3

Khi tăng nhiệt độ sấy, hệ số trao đổi nhiệt đối lưu giữa tác nhân và vật liệu tăng, kết quả làm độ ẩm sản phẩm giảm nhanh chóng. Do chi phí điện năng phụ thuộc vào vận tốc tác nhân sấy và tốc độ xung khí nên tổng điện năng tiêu hao cho quá trình sấy không đổi, chi phí điện năng cho 1 kg ẩm phụ thuộc làm lượng ẩm bay hơi nên chi phí này sẽ giảm khi tăng nhiệt độ tác nhân. Tăng nhiệt độ tác nhân sấy đồng nghĩa với việc gia tăng tổng nhiệt lượng cung cấp cho quá trình sấy, do vậy chi phí nhiệt năng để làm bay hơi 1 kg ẩm tăng nhanh theo hàm bậc hai của nhiệt độ. Khi nhiệt độ sấy thấp hơn 50°C thì độ ẩm sản phẩm không đạt yêu cầu bảo quản ngược lại khi nhiệt độ sấy cao hơn 65°C thì chi phí năng lượng tăng lên đáng kể.

Vận tốc tác nhân càng lớn thì sự hóa sôi càng mãnh liệt làm cho độ ẩm sản phẩm giảm nhanh chóng. Tuy nhiên, vận tốc tăng quá cao thì nguy cơ gây vỡ hạt do va đập và các hạt bị cuốn theo dòng khí tăng lên sẽ gây thất thoát khối lượng sản phẩm sấy. Vận tốc sấy càng tăng, điện năng cung cấp cho quạt càng lớn dẫn đến chi phí điện năng riêng tăng lên đáng kể. Tổng nhiệt năng cung cấp cho máy sấy phụ thuộc vào nhiệt độ và lưu lượng tác nhân sấy, do vậy khi tăng vận tốc tác nhân sẽ làm tăng chi phí nhiệt năng riêng. Theo quan sát thực nghiệm, ở vận tốc dưới 1,0 m/s sự hóa sôi diễn ra không đồng đều dẫn đến độ ẩm sản phẩm không đều giữa các hạt. Ở vận tốc lớn hơn 1,5m/s, quá trình hóa sôi diễn ra mãnh liệt nhưng chi phí năng lượng tăng cao.

Nhờ việc cấp tác nhân sấy gián đoạn mà ẩm trong tâm hạt có thời gian “nghỉ” để bay hơi ra ngoài. Khi tăng tốc độ xung khí, thời gian gián đoạn giữa các lần cấp khí giảm dẫn đến độ giảm ẩm của vật liệu khi sấy thấp hơn. Ở các tốc độ cấp khí thấp, thời gian tiếp xúc giữa vật liệu và tác nhân sấy giảm, quá trình sôi ít hơn dẫn đến độ ẩm sản phẩm còn khá cao. Tăng tốc độ xung khí làm tăng điện năng cung cấp cho động cơ tạo xung do đó làm tăng chi phí điện năng riêng. Khi thay đổi tốc độ xung khí thì tổng nhiệt năng cung cấp cho máy sấy không thay đổi nhưng do lượng ẩm bay hơi phụ thuộc vào độ ẩm sản phẩm nên chi phí nhiệt năng riêng cũng thay đổi theo.

Tối ưu hóa các thông số công nghệ:

Mục đích của bài toán tối ưu hóa là nhằm xác định được giá trị của các thông số công nghệ sao cho các hàm mục tiêu có giá trị thấp nhất. Đối với bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong quá trình sấy hạt mè, giá trị tối ưu của các biến X_1, X_2, X_3 được tính toán sao cho giá trị các hàm mục tiêu Y_1, Y_2, Y_3 cùng bé nhất

trong phạm vi $-1,353 \leq X_1, X_2, X_3 \leq 1,353$. Phương pháp đáp ứng bề mặt (Response Surface Method-RSM) được sử dụng trong trường hợp này để xác định các thông số công nghệ tối ưu cho quá trình sấy.

Sử dụng chức năng Multiple Response Optimization trong phần mềm Statgraphics Centurion XV version 15.1.02 để thực hiện việc tính toán tối ưu hóa các thông số công nghệ trong quá trình sấy hạt mè. Kết quả đã xác định được giá trị các biến tối ưu như sau:

$X_1^{opt} = 0,813$; $X_2^{opt} = -0,586$; $X_3^{opt} = -0,601$ tương ứng với giá trị các hàm mục tiêu: $Y_1^{min} = 6,26\%$;
 $Y_2^{min} = 408 \text{Wh/kg}$; $Y_3^{min} = 4989 \text{kJ/kg}$

Chuyển đổi thành giá trị các biến thực:

$Z_1^{opt} = 63,13^\circ\text{C}$; $Z_2^{opt} = 1,21 \text{m/s}$; $Z_3^{opt} = 12 \text{vòng/phút}$

4. KẾT LUẬN

Dựa trên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số liệu đa yếu tố, các kết luận được rút ra như sau:

Máy sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ phù hợp để sấy các loại vật liệu rời, có kích thước nhỏ, phân tán hoặc đồng đều. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sấy mè trên máy sấy tầng sôi xung khí là nhiệt độ sấy, vận tốc tác nhân sấy và tốc độ xung khí.

Ba phương trình hồi quy bậc 2 đã được xây dựng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các hàm mục tiêu đầu ra gồm độ ẩm sản phẩm, chi phí điện năng riêng, chi phí nhiệt năng riêng. Qua đó xác định được các thông số tối ưu như sau:

- + Nhiệt độ sấy: $63,13^\circ\text{C}$
- + Vận tốc tác nhân sấy: $1,21 \text{ m/s}$
- + Tốc độ xung khí: 12 vòng/phút

Ở phạm vi này, độ ẩm sản phẩm đạt $6,26\%$, chi phí điện năng đạt 408 Wh/kg ẩm và chi phí nhiệt năng đạt 4989 kJ/kg ẩm. Với kết quả nghiên cứu này, có thể thấy máy sấy tầng sôi xung khí có chi phí năng lượng vào loại thấp so với các loại máy sấy tầng sôi khác.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả cảm ơn Trường đại học Công nghiệp Tp.HCM đã cấp kinh phí để thực hiện đề tài nghiên cứu này theo hợp đồng nghiên cứu khoa học số 68/HĐ-ĐHCN, mã số IUH.KNL 10/15.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Bùi Trung Thành, *Giáo trình lý thuyết và tính toán thiết kế hệ thống sấy*, NXB Đại học Công nghiệp Tp.HCM, 2014.
- [2]. Nguyễn Cảnh, *Quy hoạch thực nghiệm*, Trường Đại Học Bách Khoa TP.HCM, 2003.
- [3]. Ambrosio-Ugri, M. C. B., & Taranto, O. P., Drying in the rotating-pulsed fluidized bed, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(1), 95-100, 2007.
- [4]. FAOstat, <http://www.fao.org/statistics/en/>.
- [5]. Jezowska, Kinetics of drying in cyclically shifted spouted bed, *Drying Technology*, 11(2), 319-337, 1993.
- [6]. Marcello Nitz and Osvaldir P. Taranto, Drying of a porous material in a pulsed fluid bed dryer: the influences of temperature, frequency of pulsation and air flow rate, *Drying technology*, p 212-219, 2009.
- [7]. Mujumdar A. S., *Handbook of industrial drying*, 4th edition, CRC Press, 2014.
- [8]. Ram J. Singh, *Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement*, Vol 4, CRC Press, 2007.
- [9]. Reyes, A., Moyano, P., & Paz, J., Drying of potato slices in a pulsed fluidized bed, *Drying technology*, 25(4), 581-590, 2007.

- [10]. Reyes, A., & Quilaqueo, E., Fluid-Dynamic Characterization of a Pulsed Fluidized Bed. *In 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering and 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [11]. Rogula, G., Some research on aerodynamics of a new pulsed fluidized bed dryer. *Chemical and Process Engineering*, 30, 653-663, 2009.
- [12]. Somkiat Prachayawarakorn, Warunee Tia, Korakot Poopaiboon, Somchart Soponronnarit, Comparison of performace of pulsed and conventional fluidised bed dryer, *Journal of Stored Products Research*, Volume 41, Issue 5, Pages 479–497, 2005.
- [13]. T.Kudra, Z, Gawrzynski, R. Glaser, J. Stanislawski and M.Poirier, Drying of pulp and paper sludge in a pulsed fluid bed dryer, *Drying Techology*, p 917-933, 2002.
- [14]. Todor G. Djurkov, Modeling of bed pressure drops in rotation pulsed fluidized bed dryer, *In Proceedings of the 11th International Drying Symposium*, pp 160-167, 1998.
- [15]. Todor G. Djurkov, Rotation-Pulsed Fluidized Bed Apparatus For Sesame Roasting, *In 2nd Symposium of South-East European Countries (SEEC) on Fluidized Beds in Energy Production, Chemical*, 1999.
- [16]. Todor G. Djurkov, Rotation-Pulsed Fluid Bed Salt Dryer, *In 3rd Symposium of South-East European Countries on Fluidized Beds in Energy Production, Chemical and Process Engineering and Ecology*, pp. 25-29, 2001.
- [17]. Z. Gawrzynski, R.Glaser, T. Kudra, Drying of powdery materials in a pulsed fluid bed dryer, *Drying Technology*, p1523-1532, 1999.

Ngày nhận bài: 04/01/2017

Ngày chấp nhận đăng: 02/07/2017