NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ SẤY THÍCH HỢP CHO NẤM LINH CHI SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ SẤY BƠM NHIỆT CÓ HỖ TRỢ SIÊU ÂM

Lương Thị Thu Huyền[1], Lê Quang Huy[1,*],
Nguyễn Chí Thiện[1], Nguyễn Hay[2], Nguyễn Thế Bảo[3]
[1] *Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng*
[2] *Trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh*
[3] *Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh*
** Email: lequanghuy@caothang.edu.vn*

TÓM TẮT

Nấm Linh chi (*Ganoderma lucidum*) là một nguồn tài nguyên quý giá với nhiều lợi ích cho sức khỏe con người. Trong nấm Linh chi chứa các hoạt chất sinh học quý như: Polysaccharides, Triterpenoids, Peptit và các chất chống oxy hóa, trong đó thành phần Polysaccharides được xem là hoạt chất chính tạo nên giá trị của nấm. Kết quả nghiên cứu đã xây dựng được các hàm hồi quy: $Ar = 19{,}0812 - 0{,}3985.t - 0{,}070625.P + 0{,}0027.t^2 + 0{,}000916667.t.P + 0{,}0000944444.P^2$, $dE = 206{,}187 - 7{,}00175.t - 0{,}124167.P - 49{,}9938.A + 0{,}0718.t^2 + 0{,}000902778.P^2 + 73{,}625.A^2$, $\%PA = -333{,}654 + 16{,}7157.t + 0{,}323173.P - 0{,}168985.t^2 - 0{,}00145791.P^2$ và xác định được các thông số ở chế độ tối ưu: t = 49,9°C, P = 103,6 W, A = 0,33 với Ar = 4,35 kWh/kg, %PA = 97,5%, dE = 23,93.

Từ khóa: *Bơm nhiệt, sóng siêu âm, nấm Linh chi, Polysaccharides, tỷ lệ gián đoạn.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Nấm Linh chi (*Ganoderma lucidum*) được biết đến như một loại dược liệu quý với nhiều công dụng có lợi cho sức khỏe, bao gồm: Chống oxi hóa, tăng cường hệ miễn dịch và hỗ trợ điều trị một số bệnh lý. Để bảo đảm các hoạt chất có lợi của nấm Linh chi không bị mất đi trong quá trình chế biến, việc bảo quản và xử lý nấm sau khi thu hoạch là vô cùng quan trọng. Các phương pháp bảo quản phổ biến hiện nay là phơi nắng hoặc sấy khô, giúp lưu giữ lại hàm lượng dinh dưỡng và kéo dài thời hạn sử dụng.

Tuy nhiên, phương pháp sấy khô truyền thống có những nhược điểm như: Làm tổn thất hàm lượng vitamin và dưỡng chất, thay đổi màu sắc và cấu trúc của nấm. Chính vì những lý do trên, việc nghiên cứu và phát triển các phương pháp sấy mới hiệu quả hơn là cần thiết. Công nghệ bơm nhiệt có sóng siêu âm hỗ trợ quá trình sấy được coi là một giải pháp tiềm năng, giúp tối ưu hóa quá trình sấy bằng cách giảm thiểu tổn thất nhiệt, tiết kiệm năng lượng và duy trì chất lượng sản phẩm tốt hơn.

2. VẬT LIỆU, THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

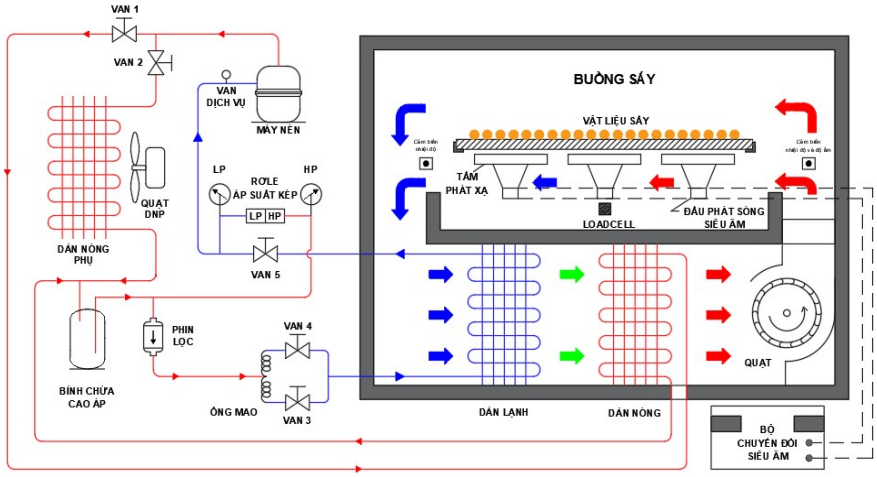
Nấm Linh chi tươi được trồng tại thị xã Tân Uyên, tỉnh Bình Dương và được bảo quản ở nhiệt độ 8 ± 0,5°C. Độ dày của lát nấm được thái bằng máy cắt thương hiệu Ritter với độ dày 6 mm.

Ẩm độ ban đầu của nấm tươi được xác định bằng thực nghiệm có kết quả như sau: $\omega_1 \approx 69{,}4\%$. Ẩm độ yêu cầu: $\omega_2 \approx 13\%$.

2.2. Thiết bị

Thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm được sử dụng trong thí nghiệm là sản phẩm tự thiết kế, chế tạo. Sơ đồ nguyên lí được thể hiện ở hình 1.

Cấu tạo máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm có 4 hệ thống chính như sau: Hệ thống bơm nhiệt bao gồm máy nén có công suất động cơ ¾ HP thương hiệu Kulthorn, thiết bị bay hơi, thiết bị ngưng tụ chính, thiết bị ngưng tụ phụ, van tiết lưu,…



Hình 1. Sơ đồ nguyên lí hệ thống sấy

Hệ thống sấy hồi lưu toàn phần bao gồm: Động cơ quạt, buồng sấy.

Hệ thống siêu âm bao gồm: Bộ phát sóng siêu âm tần số 28 KHz, công suất 180 W, đầu phát sóng siêu âm, tấm tán xạ [1 - 3].

Hình 2. Thiết bị sấy thực nghiệm

Hệ thống điều khiển bao gồm:

+ Đồng hồ đo nhiệt độ (Model: DS - 1): Thang đo từ -50°C đến 70°C, sai số ±1°C.

+ Đồng hồ đo nhiệt độ - độ ẩm (Model: Fox-300A): Thang đo nhiệt độ từ -55,0°C đến 99,9°C, độ ẩm từ 0 - 100% RH, sai số ±1%.

+ Đồng hồ đo tốc độ gió (Model: AM-4203): Thang đo từ 0,4 - 25 m/s, sai số ± 2%.

+ Đồng hồ đo điện năng (Model: PZEM-061): Thang đo từ 0 - 10.000 kWh.

+ Loadcell cảm biến khối lượng (Model: BCL-20L): Thang đo 0 - 10 kg, sai số ± 0,03%.

Dụng cụ đo đạc:

+ Cân sấy ẩm hồng ngoại (Model: FD-720) xuất xứ Nhật Bản: Thang đo 3 - 120 g, sai số ± 0,05%.

+ Cân điện tử (Model: WH-B20): Thang đo từ 0 - 10 kg, sai số ± 0,1 g.

Trong buồng sấy, tác nhân sấy chuyển động song song với với bề mặt khay chứa vật liệu sấy, trao đổi nhiệt ẩm với vật liệu sấy qua cả bề mặt trên và dưới của vật liệu. Đầu phát siêu âm đặt phía dưới khay có nhiệm vụ truyền dao động thay đổi cấu trúc của vật liệu.

Sự kết hợp này sẽ làm nước trong vật liệu sấy bốc hơi ra bề mặt vật liệu sấy và môi trường nhanh hơn và đều trên toàn bộ vật liệu sấy.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

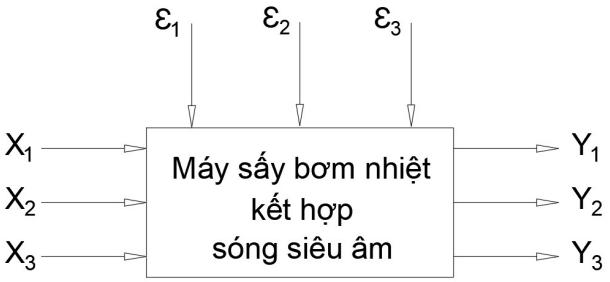
2.3.1. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm đơn yếu tố

Áp dụng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm đơn yếu tố để nghiên cứu ảnh hưởng riêng của 3 yếu tố: Nhiệt độ tác nhân sấy (°C) ký hiệu là t; công suất sóng siêu âm (W) ký hiệu là P; tỷ lệ phát sóng siêu âm ký hiệu là A đến chi phí điện năng riêng (kWh/kg) ký hiệu là Ar; sự thay đổi màu sắc ký hiệu là dE; hàm lượng phần trăm Polysaccharides ký hiệu là %PA.

2.3.2. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

Áp dụng quy hoạch thực nghiệm để nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của 3 yếu tố: t, P , A đến Ar, dE, %PA.

Để xác định mối quan hệ t, P , A đến Ar, dE, %PA, tiến hành giải quyết bài toán sau:



Hình 3. Mô hình bài toán mô tả quá trình nghiên cứu

Kế thừa kết quả nghiên cứu của Lương Thị Thu Huyền và cs (2023) [4], Hayati và cs (2016) [5], Prasetyo và cs (2020) [6], Phạm Văn Kiên (2019) [7] về một số yếu tố như sau: t, P, A ảnh hưởng đến các chỉ tiêu kinh tế và kỹ thuật để tiến hành chọn:

- Các thông số đầu vào gồm: X_1 là t (°C); X_2 là P (W); X_3 là A.
- Các thông số đầu ra gồm: Y_1 là Ar (kWh/kg); Y_2 là dE; Y_3 là %PA.

2.3.3. Phương pháp nghiên cứu tổng quát

Sử dụng phương pháp tối ưu hóa tổng quát nhằm xác định giá trị tối ưu tổng hợp của các yếu tố đầu vào cho mọi thông số đầu ra, làm cơ sở để cải tiến quy trình công nghệ và thiết kế thiết bị sấy nhằm triển khai ứng dụng rộng rãi trong sản xuất thực tiễn. Bài toán tối ưu hóa được xây dựng trên cơ sở các hàm toán là các phương trình hồi quy, xác định được bằng phương pháp thực nghiệm hồi quy có dạng đa thức bậc II. Sử dụng phần mềm Statgraphics 19 để giải bài toán tối ưu trên các hàm mục tiêu có điều kiện phù hợp đặc trưng của nấm Linh chi.

Hàm mục tiêu: Ar → min; %PA → max; dE → min.

2.4. Phương pháp xác định một số thông số công nghệ của quá trình sấy

2.4.1. Phương pháp đo đạc

- Nhiệt độ sấy, thời gian sấy, khối lượng và độ dày nấm Linh chi, công suất sóng siêu âm, điện năng tiêu thụ được xác định bằng đo đạc trực tiếp bằng các dụng cụ đo.

- %PA được tính theo công thức sau:

$$\%PA = \frac{PA_2}{PA_1} \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

Trong đó: PA_1 là hàm lượng Polysaccharides ban đầu (g/100 g chất khô), PA_2 là hàm lượng Polysaccharides sau khi sấy (g/100 g chất khô).

Hàm lượng Polysaccharides (g/100 g chất khô): Được xác định bằng phương pháp NREL.

- Độ ẩm vật liệu sấy tại từng thời điểm quá trình sấy được xác định sau khi đã biết khối lượng chất khô theo công thức sau:

$$\omega_i = \frac{m_2 - m_k}{m_2} . 100\ (\%, kga/kgVLA) \qquad (2)$$

Trong đó: m_1 là khối lượng vật liệu sấy ban đầu, (kg); m_2 là khối lượng vật liệu sấy tại thời điểm τ, (kg); ω_i là độ ẩm tương đối của nấm trước tại từng thời điểm sấy, (%); m_k là khối lượng chất khô có trong vật liệu, khối lượng này xem như không thay đổi trong suốt quá trình sấy, được tính theo công thức:

$$m_k = m_1.(1 - \omega_1),\ kg \qquad (3)$$

- dE được xác định theo công thức:

$$dE = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \qquad (4)$$

Trong đó: L_{ref}^*, a_{ref}^*, b_{ref}^* là các giá trị chuẩn, sử dụng các giá trị ban đầu của vật liệu tươi làm giá trị chuẩn. L*, a*, b* được sử dụng để mô tả sự thay đổi màu sắc trong quá trình sấy, các giá trị L*, a*, b* được đo bởi máy đo màu CHN SPEC CS-10.

- Ar được xác định qua công thức:

$$Ar = \frac{P.\tau}{m_1},\ kWh/kg \qquad (5)$$

Trong đó: P là công suất tiêu thụ trong quá trình sấy, (kW); m_1 là khối lượng vật liệu trước khi sấy, (kg); τ là là thời gian sấy, (giờ)

- A được tính theo công thức:

$$A = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \qquad (6)$$

Trong đó: T_{ON} là thời gian phát sóng siêu âm; T_{OFF} là thời gian dừng phát sóng siêu âm.

A = 0: Phát liên tục.

A = 0,2: Phát 60 giây nghỉ 15 giây.

A = 0,4: Phát 60 giây nghỉ 40 giây.

A = 0,6: Phát 60 giây nghỉ 90 giây.

A = 0,8: Phát 60 giây nghỉ 240 giây.

2.4.2. Phương pháp thực nghiệm

Thực nghiệm được lập theo ma trận thực nghiệm bậc II Box Benlken, với số thí nghiệm được xác định theo công thức sau: $N = 2k(k - 1) + n_o = 2.3(3 - 1) + 3 = 15$ (7)

Trong đó: k là số yếu tố đầu vào nghiên cứu, n_o là số thực nghiệm lặp mức cơ sở.

Kế thừa kết quả nghiên cứu của Lương Thị Thu Huyền và cs (2023) [4] về một số yếu tố như sau:

+ X_1 = 45 - 55°C. Khoảng biến thiên: ΔX_1 = 5°C; mức cơ sở: X_1^0 = 50°C; mức trên: X_1^+ = 55°C; mức dưới: X_1^- = 45°C.

+ X_2 = 60 - 120 W. Khoảng biến thiên: ΔX_2 = 30 W; mức cơ sở: X_2^0 = 90 W; mức trên: X_2^+ = 120 W; mức dưới: X_2^- = 60 W.

+ X_3 = 0,2 - 0,6. Khoảng biến thiên: ΔX_3 = 0,2; mức cơ sở: X_3^0 = 0,4; mức trên: X_3^+ = 0,6; mức dưới: X_3^- = 0,2.

Bảng 1. Ma trận thực nghiệm và kết quả thực nghiệm

STT	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	t (°C)	P (W)	A	Ar (kWh/kg)	dE	%PA
1	50	90	0,4	4,4	23,4	96,6
2	45	120	0,4	5,13	24,08	90,3
3	45	60	0,4	4,37	26,07	88,42
4	55	60	0,4	4,48	25,87	94,26
5	55	90	0,6	4,27	28,49	92,38
6	55	90	0,2	4,72	25,65	93,81
7	50	60	0,2	4,31	26,94	91,94
8	50	90	0,4	4,43	23,8	96,68
9	55	120	0,4	4,79	29,61	93,55
10	45	90	0,2	4,33	30,84	91,87
11	50	60	0,6	4,84	24,21	94,13
12	45	90	0,6	4,35	27,15	98,51
13	50	120	0,6	4,83	27,85	93,95
14	50	120	0,2	4,2	29,9	96,23
15	50	90	0,4	4,37	23,36	97,28

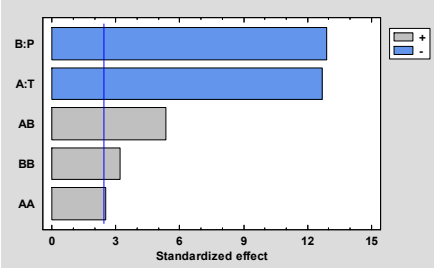
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình hồi quy chi phí điện năng riêng

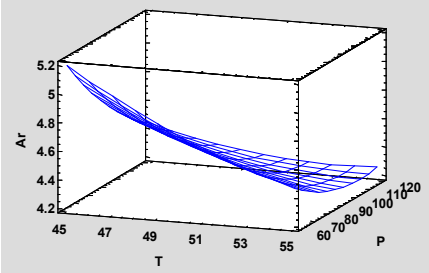
Mối quan hệ Ar với t, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi quy:

$$Ar = 19{,}0812 - 0{,}3985.t - 0{,}070625.P + 0{,}0027.t^2 + 0{,}000916667.t.P + 0{,}0000944444.P^2 \quad (8)$$

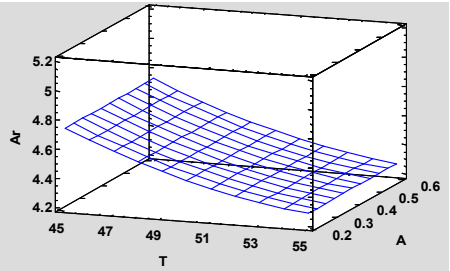
Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ ($R^2 = 0{,}9516$).



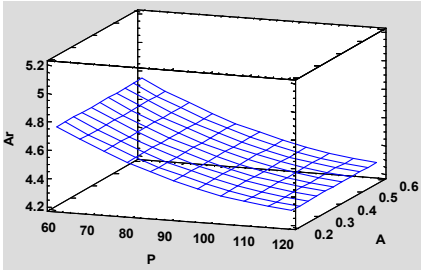
Hình 4. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến Ar



Hình 5. Ảnh hưởng t, P đến Ar



Hình 6. Ảnh hưởng t, A đến Ar



Hình 7. Ảnh hưởng P, A đến Ar

Từ hàm hồi quy (8) và đồ thị hình 4 - 7 cho thấy: Ar theo t là một hàm bậc 2 nghịch biến trong khoảng $45 < t < 55$ chứng tỏ khi nhiệt độ tác nhân sấy càng lớn thì Ar cho quá trình sấy càng giảm vì rút ngắn thời gian sấy. Đây là mối quan hệ tỉ lệ nghịch. Mối quan hệ này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Hay (2023) [8].

Nhiệt độ tác nhân sấy (°C) ký hiệu là t; công suất sóng siêu âm (W) ký hiệu là P; tỷ lệ phát sóng siêu âm ký hiệu là A đến chi phí điện năng riêng (kWh/kg) ký hiệu là Ar; sự thay đổi màu sắc ký hiệu là dE; hàm lượng phần trăm Polysaccharides ký hiệu là %PA.

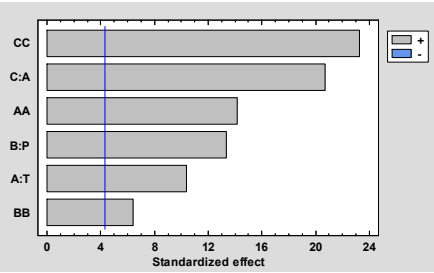
Tương tự, xét Ar theo P cũng cho thấy, là một hàm bậc 2, nghịch biến trong khoảng $60 < P < 120$ W, chứng tỏ khi P càng lớn thì Ar càng giảm vì rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên, khi cường độ siêu âm vượt mức giới hạn nào đó, thì tiêu hao điện năng sẽ không giảm nữa mà ngược lại sẽ ngày càng tăng, đây là mối quan hệ tỉ lệ thuận. Mối quan hệ này phù hợp với các phân tích đã nêu cho thấy, P trong khoảng 30 – 120 W thì Ar giảm và P trong khoảng 120 – 150 W thì Ar tăng.

3.2. Hàm sự thay đổi màu sắc

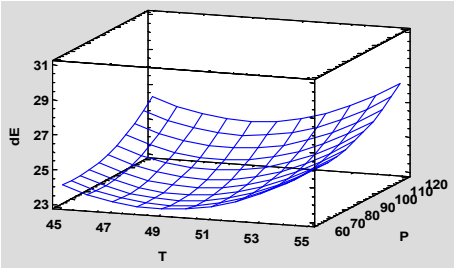
Mối quan hệ dE với t, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi quy:

$$dE = 206{,}187 - 7{,}00175.t - 0{,}124167.P - 49{,}9938.A + 0{,}0718.t^2 + 0{,}000902778.P^2 + 73{,}625.A^2 \quad (9)$$

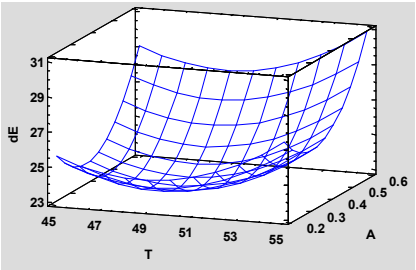
Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ ($R^2 = 0{,}9847$).



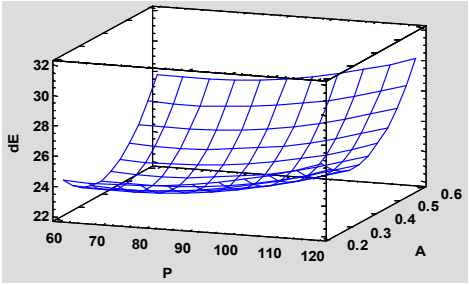
Hình 8. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến dE



Hình 9. Ảnh hưởng t, P đến dE



Hình 10. Ảnh hưởng t, A đến dE



Hình 11. Ảnh hưởng P, A đến dE

Từ hàm hồi quy (9) và đồ thị ở hình 8-11 cho thấy, dE chịu ảnh hưởng bậc 2 bởi t, A, P. Cụ thể: dE có điểm cực tiểu theo nhiệt độ nằm trong khoảng 45 - 55°C. Do đó khi nhiệt độ tăng thì thời gian sấy giảm, màu sắc ít bị ảnh hưởng, tuy nhiên, khi nhiệt độ tăng đến một giới hạn nào đó thì màu sắc bị thay đổi đáng kể. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Hay (2023) [8].

Tương tự, với P cho thấy, dE cũng có điểm cực tiểu trong khoảng 60 – 120 W. Do đó, khi P tăng đến điểm cực tiểu thì màu sắc ảnh hưởng không đáng kể, tuy nhiên khi P tăng dần đến 120 W thì màu sắc bị ảnh hưởng đáng kể vì ảnh hưởng mạnh của sóng siêu âm.

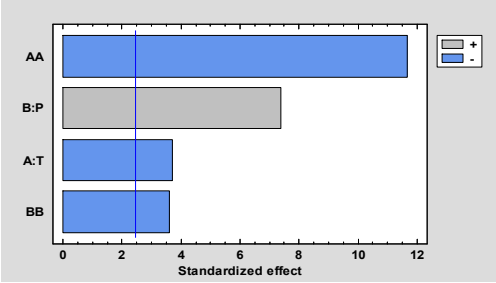
Tương tự, với A có điểm cực tiểu trong khoảng đi từ 0,2 - 0,6. Do đó, khi A tăng đến điểm cực tiểu thì màu sắc ảnh hưởng không đáng kể, tuy nhiên A tăng dần đến 0,6 thì thời gian sấy tăng dẫn đến vật liệu sấy tiếp xúc lâu với t làm màu sắc vật liệu sấy thay đổi đáng kể.

3.3. Hàm phần trăm Polysaccharides

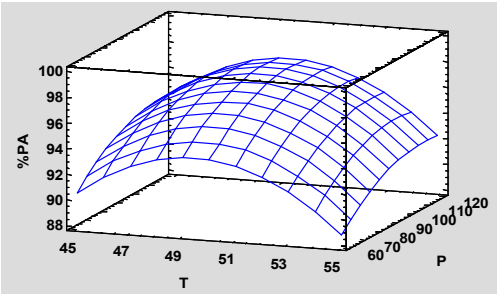
Mối quan hệ %PA với t, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi quy:

$$\%PA = -333{,}654 + 16{,}7157.t + 0{,}323173.P - 0{,}168985.t^2 - 0{,}00145791.P^2 \quad (10)$$

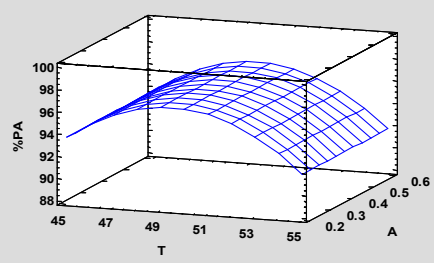
Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ (R2 = 0,9698).



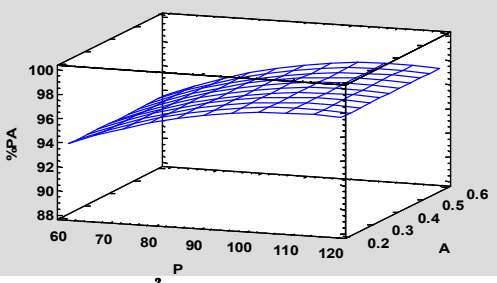
Hình 12. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến %PA



Hình 13. Ảnh hưởng t, P đến %PA



Hình 14. Ảnh hưởng t, A đến %PA



Hình 15. Ảnh hưởng P, A đến %PA

Từ hàm hồi quy (10) và đồ thị ở hình 12 - 15 cho thấy, %PA chịu ảnh hưởng bậc 2 bởi t và P. Cụ thể: %PA có điểm cực đại theo nhiệt độ nằm trong khoảng 45 - 55°C. Do đó, khi nhiệt độ tăng thì thời gian sấy giảm và %PA ảnh hưởng không đáng kể, tuy nhiên khi nhiệt độ tăng dần đến 55°C thì %PA bị ảnh hưởng mạnh. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Hayati và cs (2016) [5], Phạm Văn Kiên (2019) [7].

Tương tự, %PA có điểm cực đại theo công suất siêu âm trong khoảng 60 - 120 W. Do đó, khi công suất siêu âm tăng thì thời gian sấy giảm và %PA ảnh hưởng không đáng kể, tuy nhiên khi công suất siêu âm tăng dần đến 120 W thì %PA bị ảnh

hưởng mạnh. Điều này phù hợp với kết quả nghiên cứu của Nguyễn Hay (2023) [8].

3.4. Tối ưu hóa Ar, %PA, dE

Các bài toán tối ưu được giải trên máy tính bằng phần mềm Statgraphics 19. Kết quả giải bài toán tối ưu đa yếu tố như sau:

- Hàm đa mục tiêu: Ar → min; %PA → max; dE → min.

- Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0,2 \le A \le 0,6$

- Các thông số tối ưu: t = 49,9°C, P = 103,6 W, A = 0,33.

- Các chỉ tiêu tối ưu: Ar = 4,35 kWh/kg, %PA = 97,5%, dE = 23,93.

Để đánh giá mức độ tin cậy của mô hình và xây dựng phương trình tiên đoán giảm ẩm hay đường cong sấy ở chế độ thích hợp, đã tiến hành sấy thực nghiệm với cùng một chế độ tìm được ở trên, giá trị thu được ở bảng 2, 3 và đường cong sấy thể hiện ở hình 16.

Bảng 2. Thông số quá trình sấy thực nghiệm ở chế độ tối ưu

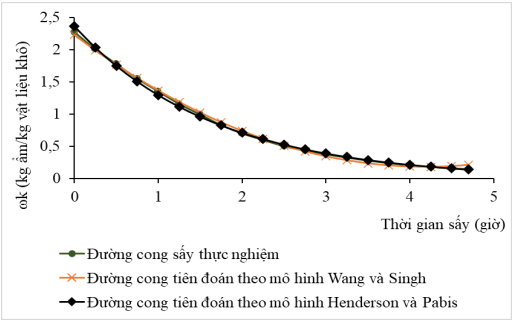
Thời gian sấy	Khối lượng nấm Linh chi (g)	Ẩm độ vật liệu sấy (kga/kg vật liệu ẩm)	Ẩm độ cơ sở khô (kga/kg vật liệu khô)
0	500	69,4	2,27
0,25	460	66,7	2,01
0,50	425	64,0	1,78
0,75	390	60,8	1,55
1,00	360	57,5	1,35
1,25	330	53,6	1,16
1,50	305	49,8	0,99
1,75	280	45,4	0,83
2,00	260	41,2	0,70
2,25	245	37,6	0,60
2,50	230	33,5	0,50
2,75	220	30,5	0,44
3,00	211	27,5	0,38
3,25	203	24,6	0,33
3,50	196	21,9	0,28
3,75	190	19,5	0,24
4,00	185	17,3	0,21

4,25	181	15,5	0,18
4,50	178	14,0	0,16
4,70	176	13,1	0,15

Bảng 3. Bảng thông số đầu ra ở chế độ tối ưu

Thông số đầu ra	Ar (kWh/kg)	dE	%PA
Giá trị thực nghiệm	4,16	26,1	94,79

Từ kết quả thực nghiệm ở chế độ sấy tối ưu cho thấy, sai số của giá trị thông số đầu ra Ar (kWh/h), dE, %PA (%) so với giá trị dự đoán lần lượt là 0,19 kWh/kg; 2,17; 2,71%. Sai số này có thể do các nguyên nhân sau: Môi trường và điều kiện thí nghiệm, thiết bị thí nghiệm, quá trình đo đạc.



Hình 16. Đường cong sấy mô hình Wang và Singh; Henderson và Pabis

Từ kết quả thực nghiệm ở chế độ sấy tối ưu, đã xây dựng được đường cong sấy theo thực tế và phương trình dự đoán giảm ẩm ω (kgVLA/kgVLK) theo thời gian τ (giờ) dựa trên các mô hình Wang và Singh; Henderson và Pabis trong quá trình sấy nấm Linh chi [9].

- Mô hình Wang và Singh:

$\omega_k = 0{,}1172\tau^2 - 0{,}9797\tau + 2{,}2284$; $R^2 = 0{,}9976$

- Mô hình Henderson và Pabis:

$\omega_k = 2{,}3617\exp(-0{,}601.\tau)$; $R^2 = 0{,}9977$

4. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp thực nghiệm đa yếu tố trên máy sấy đã xây dựng được hàm hồi quy biểu diễn quan hệ giữa chỉ tiêu đầu ra và thông số đầu vào như sau:

+ $Ar = 19{,}0812 - 0{,}3985.t - 0{,}070625.P + 0{,}0027.t^2 + 0{,}000916667.t.P + 0{,}0000944444.P^2$

Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ ($R^2 = 0{,}9516$).

+ $dE = 206{,}187 - 7{,}00175.t - 0{,}124167.P - 49{,}9938.A + 0{,}0718.t^2 + 0{,}000902778.P^2 + 73{,}625.A^2$

Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ ($R^2 = 0{,}9847$).

+ $\%PA = -333{,}654 + 16{,}7157.t + 0{,}323173.P - 0{,}168985.t^2 - 0{,}00145791.P^2$

Hàm điều kiện: $45 \le t \le 55$; $60 \le P \le 120$; $0{,}2 \le A \le 0{,}6$ ($R^2 = 0{,}9698$).

- Các thông số tối ưu: t = 49,9°C, P = 103,6 W, A = 0,33.

- Các chỉ tiêu tối ưu: Ar = 4,35 kWh/kg, %PA = 97,5%, dE = 23,93.

Điều này tạo nền tảng cho việc thiết kế và cải tiến máy sấy nấm Linh chi hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lê Quang Huy, Nguyễn Hay, Nguyễn Hữu Quyền, Ngô Thị Minh Hiếu, Lê Thanh Đạt (2021). Nghiên cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng công suất sóng siêu âm trong thiết bị sấy sâm bố chính bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Năng lượng Nhiệt*, số 156, 22 - 27.

2. Nguyễn Hay, Lê Quang Huy, Lê Thanh Đạt và Ngô Thị Minh Hiếu (2021). Nghiên cứu thực nghiệm xác định chế độ sấy thích hợp trong thiết bị sấy sâm Bố Chính bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, số 423, 92 - 99.

3. Nguyễn Hay, Lê Quang Huy, Lê Thanh Đạt, Lê Đình Trung và Trần Thị Ngọc Diệp (2023). Thực nghiệm xác định hệ số khuếch tán ẩm của sâm bố chính trong thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*, số 1, 33 - 37.

4. Lương Thị Thu Huyền, Lê Quang Huy, Trần Thị Ngọc Diệp và Nguyễn Thế Bảo (2023). Nghiên

cứu thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng sóng siêu âm trong thiết bị sấy nấm Linh chi bằng phương pháp bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm. *Tạp chí Khoa học Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội*, số 6C, 78 - 84.

5. Septi Nur Hayati, Vita Taufika Rosyida, Wuri Apriyana, Cici Darsih, Crescentiana Dewi Poeloengasih, Hernawan (2016). Effects of different drying techniques on the watersoluble Polysaccharides content and antioxidant activities of Ganoderma lucidum Karst. *AIP Conference Proceedings*, 1, 1 - 5.

6. Dwi Joko Prasetyo, Tri Hadi Jatmiko, Crescentiana Dewi, Muhammad Kí Kismurtono (2020). Drying Characteristics and Water - soluble Polysaccharides Evaluation of Kidney Shape Ganoderma lucidum Drying in Air Circulation System. *Tạp chí Earth and Environmental Science*, 101, 12 - 18.

7. Phạm Văn Kiên (2019). Nghiên cứu kỹ thuật sấy nấm Linh chi tại Việt Nam. Luận án Tiến sĩ ngành Kỹ thuật Cơ khí, Trường Đại học Nông Lâm, thành phố Hồ Chí Minh.

8. Nguyễn Hay (2023). Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ thống sấy bơm nhiệt kết hợp với sóng siêu âm dùng cho sấy dược liệu quy mô pilot. Báo cáo kết quả Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Bộ, Trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh.

9. C. M. van't Land (2011). *Drying in the Process Industry*. Wiley.

THE EXPERIMENTAL STUDY TO DETERMINE THE OPTIMAL DRYING CONDITIONS FOR GANODERMA LUCIDUM USING HEAT PUMP DRYING TECHNOLOGY WITH ULTRASONIC ASSISTANCE

Luong Thi Thu Huyen[1], Le Quang Huy[1], Nguyen Chi Thien[1], Nguyen Hay[2], Nguyen The Bao[3]

[1]*Cao Thang Technical College*

[2]*Ho Chi Minh city University of Agriculture and Forestry*

[3]*University of Technology, Vietnam National University, Ho Chi Minh city*

Summary

Reishi Mushroom (*Ganoderma lucidum*) is a valuable resource with numerous health benefits for humans. Reishi mushrooms contain precious bioactive compounds, including Polysaccharides, triterpenoids, peptides and other antioxidants, with Polysaccharides being the primary component that contributes to the value of the mushroom. The research results have developed regression equations: $Ar = 19.0812 - 0.3985.t - 0.070625.P + 0.0027.t^2 + 0.000916667.t.P + 0.0000944444.P^2$, $dE = 206.187 - 7.00175.t - 0.124167.P - 49.9938.A + 0.0718.t^2 + 0.000902778.P^2 + 73.625.A^2$, $\%PA = -333.654 + 16.7157.T + 0.323173.P - 0.168985.T^2 - 0.00145791.P^2$ and determined the optimal parameter settings: t = 49.9°C, P =103.6 W, A = 0.33 with Ar = 4.35 kWh/kg, %PA = 97.5% and dE = 23.93.

Keywords: *Heat pump, ultrasonic waves, Ganoderma mushrooms, Polysaccharides, ultrasonic transmission interruption rate.*

Ngày nhận bài: 5/7/2024

Ngày gửi phản biện: 25/7/2024

Ngày thông qua phản biện: 5/8/2024

Ngày duyệt đăng: 9/10/2024