

NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ SẤY PHÙ HỢP CHO RỄ ĐÌNH LĂNG TRÊN MÁY SẤY BƠM NHIỆT KẾT HỢP SÓNG SIÊU ÂM

DETERMINATION OF SUITABLE DRYING CONDITIONS FOR POLYSCIAS FRUTICOSA ROOTS USING AN ULTRASOUND-ASSISTED HEAT PUMP DRYER

Nguyễn Hay¹, Nguyễn Hữu Quyền^{2,*}, Lê Quang Huy²,
Đặng Thị Trúc Linh², Lê Thanh Đạt²

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.131>

TÓM TẮT

Rễ cây Đinh Lăng (*Polyscias fruticosa* (L.) Harms) là dược liệu quý chứa nhiều hoạt chất sinh học có lợi như saponin, vitamin và axit amin, được sử dụng rộng rãi trong y học cổ truyền để bồi bổ và chữa bệnh. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu xác định chế độ sấy phù hợp cho rễ Đinh Lăng thái lát bằng công nghệ sấy bơm nhiệt có hỗ trợ sóng siêu âm nhằm rút ngắn thời gian sấy, tiết kiệm năng lượng và bảo toàn chất lượng sản phẩm (hàm lượng saponin và màu sắc). Kết quả đã xây dựng được các hàm hồi quy biểu diễn mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và chỉ tiêu đầu ra. Chế độ sấy phù hợp được xác định là: nhiệt độ 44,7°C, công suất siêu âm 325,8W, tỷ lệ gián đoạn 0,18. Các chỉ tiêu đầu ra đạt được là hàm lượng saponin còn lại $S_p \approx 95\%$, độ lệch màu $\Delta E \approx 6,85$ và chi phí điện năng riêng $Ar \approx 1,3\text{kWh/kg}$. Ngoài ra, đã xây dựng được đường cong tiên đoán tốc độ giảm ẩm của rễ Đinh Lăng theo mô hình Wang & Singh và mô hình Henderson & Pabis với độ chính xác cao ($R^2 > 0,97$).

Từ khóa: Sấy bơm nhiệt, sóng siêu âm, rễ Đinh Lăng, saponin, tỷ lệ gián đoạn, biến đổi màu.

ABSTRACT

Polyscias fruticosa (L.) Harms roots are valuable medicinal materials rich in bioactive compounds, including saponins, vitamins, and amino acids, widely utilized in traditional medicine for enhancing health and treating diseases. This study aimed to determine optimal drying conditions for sliced *P. fruticosa* roots using ultrasound-assisted heat pump drying, focusing on reducing drying time, saving energy, and preserving product quality (saponin content and color). Regression models describing relationships between drying parameters and quality indicators were established. Optimal drying parameters were identified as a temperature of 44.7°C, ultrasound power of 325.8W, and intermittent emission ratio of 0.18. Under these conditions, high retention of saponin content ($S_p \approx 95\%$), minimal color change ($\Delta E \approx 6.85$), and low specific energy consumption ($Ar \approx 1.3\text{kWh/kg}$) were achieved. Additionally, drying kinetics were accurately predicted by the Wang & Singh and Henderson & Pabis models ($R^2 > 0.97$).

Keywords: Heat Pump; ultrasonic waves; *polyscias fruticosa* roots; saponin; intermittent emission ratio; color change.

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

²Trường Cao đẳng Kỹ thuật Cao Thắng

*Email: nhquyen@caothang.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/3/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/4/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/5/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đinh Lăng (*Polyscias fruticosa*) là loài cây dược liệu quen thuộc tại Việt Nam, có tác dụng bồi bổ cơ thể và trị

bệnh trong y học cổ truyền. Rễ Đinh Lăng chứa nhiều hợp chất quý, đặc biệt là nhóm saponin triterpenoid có hoạt tính sinh học cao, cùng các vitamin B₁, B₂, B₆, C và khoáng

20 axit amin thiết yếu cho cơ thể [1]. Các nghiên cứu dược lý cho thấy chiết xuất từ rễ Đinh Lăng có tác dụng tăng cường trí nhớ, lưu thông máu não và bồi bổ thần kinh [2]. Tuy nhiên, rễ Đinh Lăng tươi có độ ẩm cao nên dễ hư hỏng sau thu hoạch. Do đó, cần có phương pháp sấy thích hợp để bảo quản và sử dụng lâu dài loại dược liệu này, đồng thời phải đảm bảo hàm lượng hoạt chất được giữ tối đa.

Phương pháp sấy ảnh hưởng lớn đến chất lượng dược liệu. Sấy đối lưu nhiệt độ cao có thể làm thất thoát hoạt chất và biến đổi màu sắc sản phẩm [3]. Trong những năm gần đây, công nghệ sấy bơm nhiệt được quan tâm nhờ hiệu quả năng lượng cao và khả năng sấy ở nhiệt độ thấp đến trung bình, giúp bảo toàn chất lượng nông sản và dược liệu. Bên cạnh đó, việc kết hợp nguồn năng lượng bổ trợ như vi sóng, hồng ngoại hoặc siêu âm đang mở ra hướng cải tiến quá trình sấy. Đặc biệt, sóng siêu âm đã được chứng minh có khả năng làm tăng tốc độ truyền nhiệt và truyền khối trong quá trình sấy, qua đó rút ngắn thời gian sấy và cải thiện hiệu quả quá trình [4, 5]. Nhiều nghiên cứu trên thế giới cho thấy sấy có hỗ trợ siêu âm giúp giảm thời gian sấy và giữ được chất lượng sản phẩm tốt hơn so với sấy thông thường trên các loại nông sản như khoai tây [6], cà tím [7], táo [8], mầm xôi [9], tiêu xanh [10], đậu xanh [11], đậu Hà Lan [12], cà rốt [13], đậu Azuki [14],...

Tại Việt Nam, một số công trình cũng đã bước đầu ứng dụng công nghệ sấy bơm nhiệt kết hợp siêu âm cho dược liệu. Chẳng hạn, Nguyễn Xuân Quang và cộng sự [15] đã nghiên cứu sấy Đảng sâm (*Codonopsis javanica*) với hỗ trợ siêu âm, thu được kết quả khả quan về hệ số khuếch tán ẩm và độ biến đổi màu sắc thấp. Tuy nhiên, việc ứng dụng công nghệ sấy tiên tiến này cho rễ Đinh Lăng vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Gần đây, Lê Anh Đức và cộng sự [16] đã tiến hành xác định phương pháp và chế độ sấy phù hợp cho rễ Đinh Lăng thái lát, cho thấy phương pháp sấy bơm nhiệt có nhiều ưu điểm, nhất là khi kết hợp với một nguồn năng lượng hỗ trợ. Điều này gợi mở tiềm năng áp dụng sấy bơm nhiệt trong xử lý loại dược liệu này. Tuy vậy, để nâng cao hơn nữa hiệu quả sấy và chất lượng dược liệu, việc tích hợp thêm sóng siêu âm hỗ trợ cần được nghiên cứu.

Với mục tiêu rút ngắn thời gian sấy nhưng vẫn giữ được hàm lượng saponin và màu sắc của rễ Đinh Lăng sau sấy, chúng tôi tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính (nhiệt độ sấy, công suất siêu âm và tỷ lệ gián đoạn phát sóng) đến quá trình sấy Đinh Lăng bằng máy sấy bơm nhiệt có hỗ trợ siêu âm. Thông

qua đó, xác định được chế độ sấy phù hợp cho loại dược liệu này.

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

2.1. Vật liệu

Vật liệu là rễ Đinh Lăng tươi khoảng 5 năm tuổi, trước khi đưa vào sấy được bảo quản trong túi chân không kín ở điều kiện $8 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ từ 3 - 5 ngày sau đó được làm ẩm ở nhiệt độ môi trường rồi thái lát bằng máy thái lát với độ dày 6mm.

Khối lượng rễ Đinh Lăng mỗi lần sấy là 4kg/mẻ cho 3 khay sấy, có ẩm độ ban đầu được xác định bằng thực nghiệm: $\omega_1 \approx 68\%$ (cơ sở ướt).

Ẩm độ yêu cầu: $\omega_2 \approx 13\%$ (cơ sở ướt) (theo tiêu chuẩn Dược điển Việt Nam V [17])

Hình 1a mô tả rễ Đinh Lăng tươi thái lát và hình 1b mô tả rễ Đinh Lăng khô sau quá trình sấy.



a) Vật liệu tươi

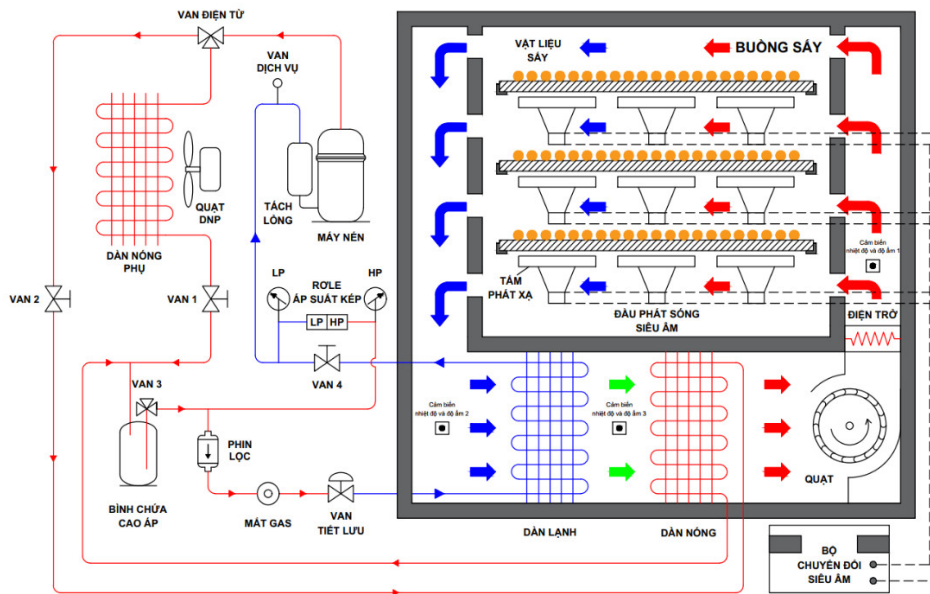


b) Vật liệu khô

Hình 1. Rễ Đinh Lăng thái lát trước và sau khi sấy

2.2. Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị sấy sử dụng trong nghiên cứu là máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm do Trường Đại học Nông Lâm TP.HCM và Công ty Thanh Quang chế tạo phát triển. Nguyên lý làm việc của máy sấy được trình bày ở hình 1.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm

Buồng sấy có kích thước DxRxC: 1000x440x750 (mm), có thể chứa 3 ÷ 5kg vật liệu mỗi mẻ sấy. Máy sấy được tích hợp hệ thống phát sóng siêu âm gắn dưới các khay sấy, bộ phát siêu âm công suất tối đa 600W, tần số 28kHz. Sóng siêu âm được truyền vào vật liệu thông qua các tấm phát xạ đặt dưới đáy lớp vật liệu sấy. Máy sấy bơm nhiệt vận hành ở chế độ tuần hoàn kín, cho phép duy trì nhiệt độ tác nhân sấy ổn định trong dải 35 ÷ 70°C với độ chính xác ±0,5°C. Hệ thống điều khiển cho phép điều chỉnh mức công suất siêu âm và thiết lập chế độ phát sóng liên tục hoặc gián đoạn theo chu kỳ thời gian. Hình 2 là máy sấy thực tế đã được lắp đặt và hoàn thiện.



Hình 3. Máy sấy thực tế

Các dụng cụ đo được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm:

+ Cân sấy ẩm hồng ngoại thương hiệu Kett (Model: FD-720, xuất xứ Nhật Bản): thang đo 3 ÷ 50g, độ chính xác ± 0,5%.

+ Cân điện tử WH-B20: giới hạn đo 10000g, với sai số cho phép ±1g.

+ Cảm biến loadcell thương hiệu CAS (Model: BCL-20L, xuất xứ Hàn Quốc): giới hạn đo 10kg, với sai số ±0,03%kgf.

+ Cảm biến nhiệt độ, độ ẩm TH10S-B-PE (xuất xứ: Trung Quốc): -40 ÷ 80°C, 0 ~ 100 %RH. Độ chính xác: ± 0,5°C và ±3%RH.

+ Cảm biến đo tốc độ gió ES-WS-01(xuất xứ: Trung Quốc): Dải đo 0 ÷ 30m/s, độ chính xác ± (0,2 + 2%FS) m/s

+ Bộ xử lý PLC thương hiệu Wecon (Model: LX3V-1212MT-A, xuất xứ Trung Quốc).

+ Đồng hồ đo điện năng PZEM-016 (xuất xứ: Trung Quốc): Dòng điện 0 ÷ 100A, sai số 0,01. Công suất: 0 ÷ 26000W. Năng lượng: 0~9999kWh.

+ Máy đo màu CHN SPEC (Model: CS-10, xuất xứ Trung Quốc): Dải đo: L*: 1-100.

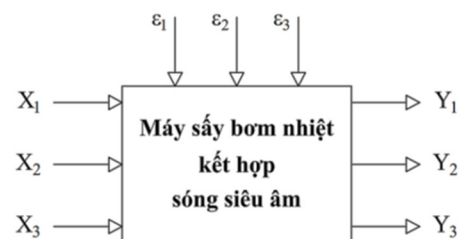
2.3. Phương pháp nghiên cứu

Kế thừa các kết quả của công trình nghiên cứu [18], sau khi chọn được thông số đầu vào và giá trị vùng nghiên cứu. Chúng tôi tiến hành thí nghiệm đa yếu tố theo quy hoạch thực nghiệm bậc hai Box-Behnken nhằm đánh giá ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố đầu vào đến các chỉ tiêu đầu ra. Số thí nghiệm được xác định theo công thức sau:

$$N = 2k.(k - 1) + n_0 = 2.3.(3-1) + 3 = 15 \quad (1)$$

Trong đó: k là số yếu tố đầu vào nghiên cứu (k = 3), n_0 là số thực nghiệm lặp tại điểm trung tâm ($n_0 = 3$).

Hình 4 là mô hình bài toán hộp đen mô tả quá trình nghiên cứu.



Hình 4. Mô hình bài toán hộp đen mô tả quá trình nghiên cứu

Các thông số đầu vào: là các yếu tố ảnh hưởng lên chỉ tiêu nghiên cứu.

X_1 : Nhiệt độ tác nhân sấy T ($^{\circ}\text{C}$);

X_2 : Công suất sóng siêu âm P (W);

X_3 : Tỷ lệ gián đoạn A .

Các chỉ tiêu đầu ra: đặc trưng cho chỉ tiêu kinh tế và kỹ thuật của máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm.

Y_1 : Chi phí điện năng riêng Ar (kWh/kg);

Y_2 : Hàm lượng saponin còn lại Sp (%);

Y_3 : Độ lệch màu dE .

Các yếu tố gây nhiễu: là các yếu tố mà mức độ ảnh hưởng của chúng quá ít hoặc không thể kiểm soát được.

ε_1 : Nhiệt độ môi trường;

ε_2 : Độ ẩm môi trường;

ε_3 : Điện áp cung cấp cho máy sấy.

Thí nghiệm tiến hành theo ma trận thí nghiệm bậc II được lập theo quy hoạch Box-Behnken. Số liệu được nhập, lưu trữ và xử lý bằng phần mềm Statgraphics 19 và sử dụng phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình nghiên cứu. Sau đó các thí nghiệm được tối ưu hóa với mục đích tiết kiệm năng lượng, hạn chế sự thay đổi màu sắc vật liệu và giữ lại càng nhiều hàm lượng saponin trong sản phẩm (hàm mục tiêu: $Ar \rightarrow \min$; $Sp \rightarrow \max$; $dE \rightarrow \min$). Từ đó 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

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

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

- Hàm lượng saponin còn lại Sp được tính theo công thức sau:

$$Sp = \frac{Sp_2}{Sp_1} \cdot 100(\%) \quad (2)$$

Trong đó: Sp_1 là hàm lượng Saponin ban đầu (g/100g chất khô), Sp_2 là hàm lượng Saponin sau khi sấy (g/100g chất khô).

Hàm lượng Saponin (g/100g chất khô): Được xác định hàm lượng tại Viện Nghiên cứu Công nghệ Sinh học & Môi trường của Trường Đại học Nông Lâm TP. HCM với phương pháp thử SAPONIN/01/2019.

- 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:

$$\omega_i = \frac{m_2 - m_k}{m_2} \cdot 100 (\%, \text{ cơ sở ướt}) \quad (3)$$

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:

$$m_k = m_1 \cdot (1 - \omega_1) \quad (4)$$

- Độ lệch màu dE được xác định theo công thức:

$$dE = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (5)$$

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.

- Chi phí điện năng riêng Ar (kWh/kg) được xác định qua công thức:

$$Ar = \frac{P \cdot \tau}{m_1} \quad (\text{kWh/kg}) \quad (6)$$

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 thời gian sấy, (giờ)

- Tỷ lệ gián đoạn A được tính theo công thức:

$$A = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (7)$$

Trong đó:

T_{ON} - Thời gian sấy có sự hỗ trợ sóng siêu âm;

T_{OFF} - Thời gian sấy không có sóng siêu âm;

$A = 0$: chạy liên tục;

$A = 0,2$: chạy 60s nghỉ 15s;

$A = 0,4$: chạy 60s nghỉ 40s

$A = 0,6$: chạy 60s nghỉ 90s;

$A = 0,8$: chạy 60s nghỉ 240s

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả quy hoạch thực nghiệm

Kế thừa các kết quả của công trình nghiên cứu [18], sau khi chọn được vùng thí nghiệm thích hợp, chúng tôi tiến hành thực nghiệm đa yếu tố theo ma trận thí nghiệm đã lập, các kết quả thực nghiệm thu được sau khi phân tích tính toán trình bày ở bảng 1.

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

STT	Thông số đầu vào			Thông số đầu ra		
	T ($^{\circ}\text{C}$)	P (W)	A	Ar (kWh/kg)	dE	Sp
1	45	320	0,2	1,25	6,82	96,7
2	50	320	0,4	1,23	8,92	62,9

3	45	320	0,2	1,27	6,75	96,8
4	40	220	0,2	1,63	7,16	86,8
5	40	320	0	1,58	5,85	82,1
6	40	420	0,2	1,52	7,75	89,5
7	45	420	0	1,39	9,68	88,1
8	45	220	0,4	1,45	9,14	75,8
9	50	220	0,2	1,18	12,2	77,9
10	45	320	0,2	1,25	6,65	93,7
11	50	420	0,2	1,12	11,35	72,6
12	45	220	0	1,41	8,85	88,4
13	45	420	0,4	1,33	8,47	75,5
14	40	320	0,4	1,72	6,35	85,4
15	50	320	0	1,17	10,2	75,8

3.2. Phân tích số liệu thực nghiệm

Kết quả thực nghiệm đa yếu tố được tóm tắt ở bảng 1. Có thể thấy các chỉ tiêu đầu ra biến động khá rộng trong phạm vi khảo sát. Chi phí điện năng riêng Ar dao động từ khoảng 1,12 đến 1,72kWh/kg; hàm lượng saponin còn lại Sp từ ~62,9% đến 96,8%; và độ lệch màu dE từ ~5,85 đến 12,20. Điều này cho thấy ảnh hưởng mạnh mẽ của điều kiện sấy đến chất lượng và hiệu quả sấy rế Đinh Lăng.

Phân tích hồi quy: Sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất, nhóm nghiên cứu đã xây dựng được các hàm hồi quy bậc hai mô tả mối quan hệ của từng chỉ tiêu đầu ra (Ar, Sp, dE) theo các biến T, P, A. Các hệ số phi tuyến và tương tác được đưa vào mô hình và tinh chỉnh dựa trên kết quả ANOVA (loại bỏ những hạn chế không có ý nghĩa thống kê). Các mô hình cuối cùng thu được như sau (với R² cho độ phù hợp tốt):

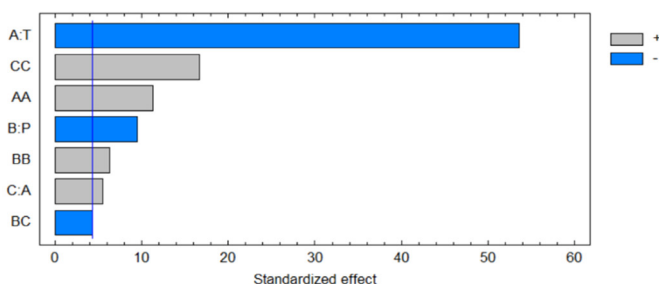
3.2.1. Hàm chi phí điện năng riêng Ar (kWh/kg)

Mối quan hệ chi phí điện năng riêng Ar với T, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi qui:

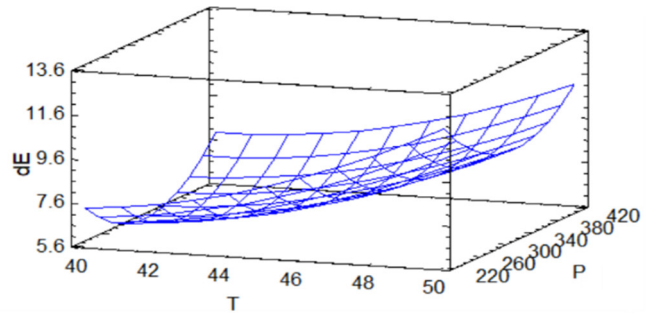
$$\begin{aligned} Ar = & 9,23685 - 0,28825T - 0,00256417P \\ & - 0,491667A + 0,00271667T^2 + 0,00000379167P^2 \\ & - 0,00125PA + 2,51042A^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Hàm điều kiện:

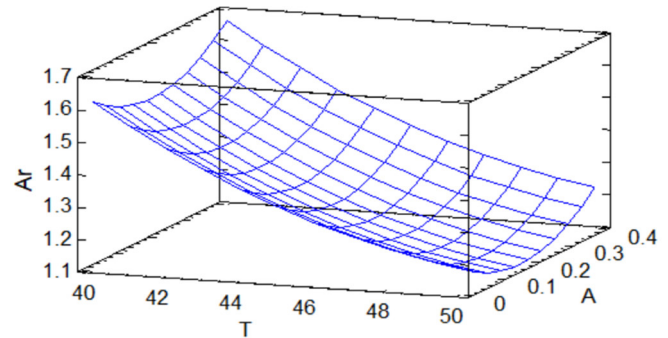
$$40 \leq T \leq 50; 220 \leq P \leq 420; 0 \leq A \leq 0,4 (R^2 = 0,981)$$



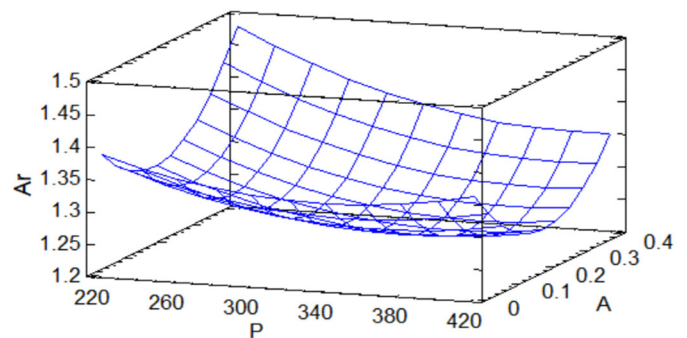
Hình 5. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến hàm chi phí điện năng riêng Ar



Hình 6. Ảnh hưởng T, P đến hàm chi phí điện năng riêng Ar



Hình 7. Ảnh hưởng T, A đến hàm chi phí điện năng riêng Ar



Hình 8. Ảnh hưởng P, A đến hàm chi phí điện năng riêng Ar

Dựa vào hàm hồi quy và đồ thị hình 5÷8, ta thấy:

Hàm chi phí điện năng riêng Ar bị ảnh hưởng trực tiếp bởi các yếu tố như nhiệt độ tác nhân sấy T, tỷ lệ gián đoạn A, công suất phát sóng P, và sự kết hợp giữa công suất phát sóng và tỷ lệ phát sóng gián đoạn. Trong khoảng nhiệt độ từ 40°C đến 50°C, khi nhiệt độ tác nhân sấy tăng lên, chi phí điện năng Ar sẽ giảm vì thời gian sấy được rút ngắn. Do đó, nhiệt độ sấy tỷ lệ nghịch với chi phí điện năng. Tương tự, khi xem xét hàm chi phí điện năng riêng Ar theo tỷ lệ gián đoạn A, ta thấy rằng khi A tăng, chi phí điện năng riêng giảm do thời gian sấy giảm và điện năng tiêu thụ cho bộ phát sóng siêu âm giảm theo.

Tuy nhiên, nếu tỷ lệ gián đoạn tiếp tục tăng quá mức, hiệu quả hỗ trợ của sóng siêu âm trong quá trình sấy sẽ giảm, làm thời gian sấy kéo dài và dẫn đến chi phí điện năng riêng Ar tăng lên. Khi công suất phát sóng P tăng, chi phí điện năng riêng Ar sẽ giảm do thời gian sấy được rút ngắn.

ngắn. Tuy nhiên, khi công suất vượt qua một ngưỡng nhất định, tiêu tốn điện năng cho bộ phát sóng sẽ tăng lên, trong khi sự hỗ trợ của sóng siêu âm trong quá trình sấy lại giảm, nên chi phí điện năng riêng Ar bắt đầu tăng trở lại.

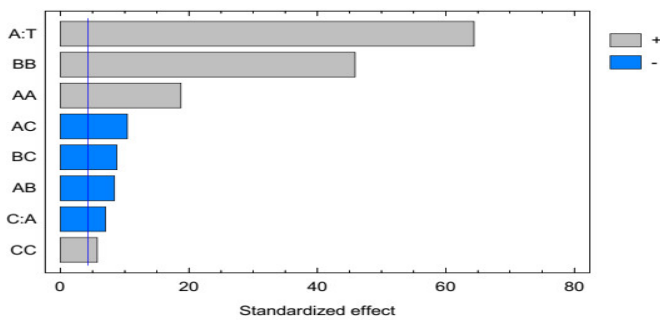
3.2.2. Hàm thay đổi màu sắc dE

Mối quan hệ sự thay đổi màu sắc dE với T, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi quy:

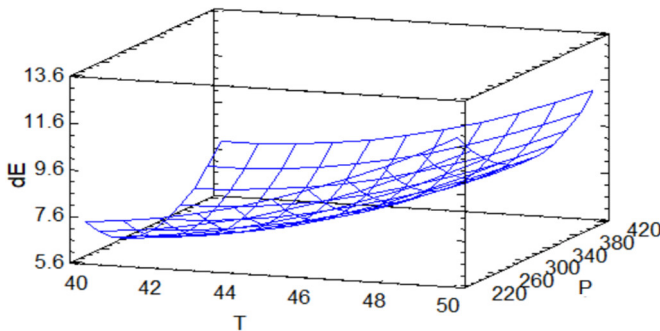
$$\begin{aligned} dE = & 62,6541 - 2,2976T - 0,09441P \\ & + 22,4125A + 0,0334T^2 - 0,00072TP \\ & - 0,445TA + 0,000204P^2 - 0,01875PA \\ & + 6,375A^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Hàm điều kiện:

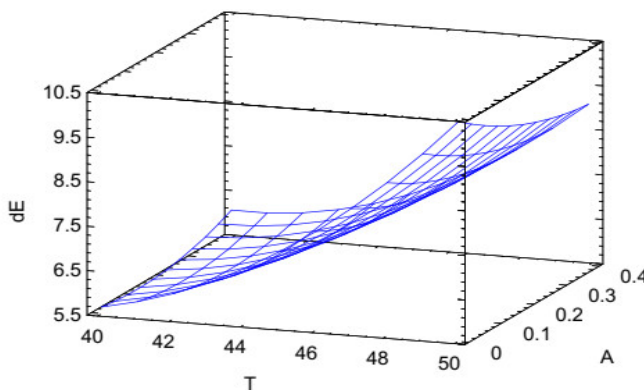
$$40 \leq T \leq 50; 220 \leq P \leq 420; 0 \leq A \leq 0,4 (R^2 = 0,9918)$$



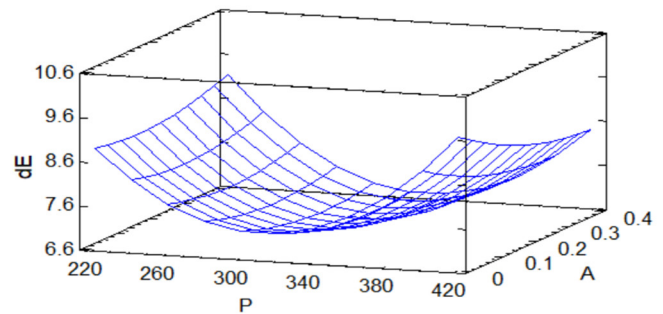
Hình 9. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến sự thay đổi màu sắc dE



Hình 10. Ảnh hưởng T, P đến sự thay đổi màu sắc dE



Hình 11. Ảnh hưởng T, A đến sự thay đổi màu sắc dE



Hình 12. Ảnh hưởng P, A đến sự thay đổi màu sắc dE

Dựa vào hàm hồi quy và đồ thị hình 9 ÷ 12, ta thấy:

Hàm thay đổi màu sắc dE bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ sấy T, tỷ lệ gián đoạn A, công suất phát sóng P, cũng như các mối quan hệ kết hợp giữa công suất và tỷ lệ gián đoạn, công suất và nhiệt độ, và nhiệt độ với tỷ lệ gián đoạn. Trong phạm vi khảo sát, nhiệt độ tác nhân sấy tác động mạnh nhất đến sự thay đổi màu sắc. Khi nhiệt độ T tăng lên, thời gian sấy giảm và sự thay đổi màu sắc cũng giảm theo. Tuy nhiên, khi nhiệt độ vượt qua một ngưỡng nhất định, màu sắc sản phẩm sẽ thay đổi rõ rệt.

Khi tỷ lệ gián đoạn tăng, sự thay đổi màu sắc sẽ giảm, tuy nhiên khi vượt qua ngưỡng nào đó, sự thay đổi màu sắc lại càng nhiều. Khi công suất phát sóng tăng, sự thay đổi màu sắc sẽ giảm, tuy nhiên khi vượt qua ngưỡng nào đó, sự thay đổi màu sắc lại càng nhiều.

3.2.3. Hàm hàm lượng saponin còn lại Sp (%)

Mối quan hệ giữa hàm lượng saponin còn lại Sp với T, P, A được biểu diễn bởi hàm hồi quy:

$$\begin{aligned} Sp = & -715,661 + 34,425T + 0,276267P \\ & + 255,167A - 0,388667T^2 - 4,05TA \\ & - 0,000431667P^2 - 236,667A^2 \end{aligned} \quad (10)$$

Hàm điều kiện:

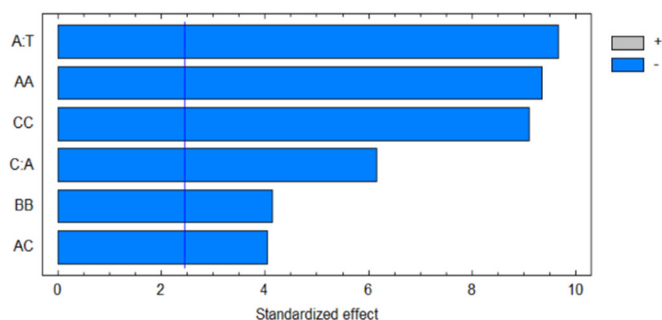
$$40 \leq T \leq 50; 220 \leq P \leq 420; 0 \leq A \leq 0,4 (R^2 = 0,954)$$

Dựa vào hàm hồi quy và đồ thị hình 13÷16, ta thấy:

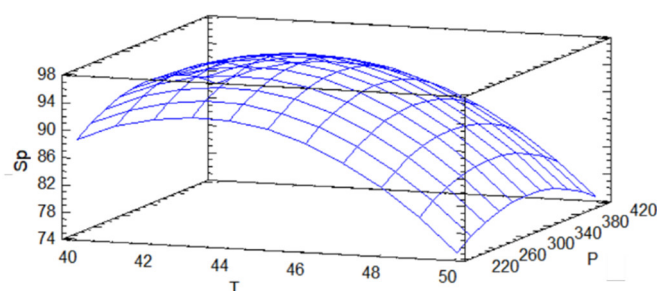
Hàm lượng saponin còn lại Sp bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ tác nhân sấy T, tỷ lệ gián đoạn A, công suất phát sóng P (bậc 1 và bậc 2), và chịu sự tác động từ các thông số kết hợp như nhiệt độ với tỷ lệ gián đoạn, công suất với tỷ lệ gián đoạn.

Trong vùng khảo nghiệm, tỷ lệ gián đoạn A có tác động mạnh nhất đến hàm lượng saponin còn lại Sp. Nhiệt độ tác nhân sấy T cũng có ảnh hưởng đáng kể, khi nhiệt độ T tăng, hàm lượng saponin Sp sẽ tăng nhờ việc rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên, khi nhiệt độ vượt qua một ngưỡng nhất định, hàm lượng saponin sẽ giảm do sự

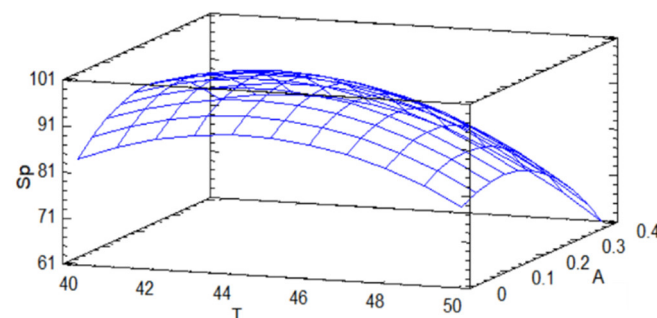
phân hủy của saponin dưới tác động nhiệt. Ảnh hưởng của công suất phát sóng khá phức tạp và phụ thuộc vào tỷ lệ gián đoạn. Mỗi quan hệ giữa công suất phát sóng và hàm lượng saponin có thể thay đổi theo từng tỷ lệ gián đoạn: khi $A = 0$, hàm lượng saponin có xu hướng giảm khi công suất tăng (mỗi quan hệ nghịch biến), trong khi với $A = 0,4$, hàm lượng saponin lại tăng khi công suất tăng (mỗi quan hệ đồng biến).



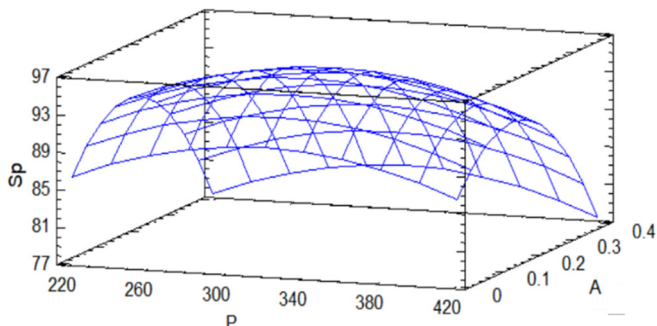
Hình 13. Ảnh hưởng các hệ số hồi quy đến hàm lượng Sp



Hình 14. Ảnh hưởng T, P đến hàm lượng Sp



Hình 15. Ảnh hưởng T, A đến hàm lượng Sp



Hình 16. Ảnh hưởng P, A đến hàm lượng Sp

3.3. Xác định chế độ sấy phù hợp

Bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu được giải bằng phương pháp hàm mong muốn (desirability) trên phần mềm Statgraphics, nhằm đồng thời tối ưu hóa các chỉ tiêu kinh tế – kỹ thuật của quá trình sấy. Cụ thể, hàm đa mục tiêu: $Ar \rightarrow \min$, $dE \rightarrow \min$, $Sp \rightarrow \max$ trong miền khảo sát $T = 40 - 50^\circ\text{C}$, $P = 220 - 420\text{W}$, $A = 0 - 0,4$. Kết quả xác định được chế độ sấy phù hợp như sau:

- Nhiệt độ tác nhân sấy $T (^\circ\text{C}) = 44,7$
- Công suất siêu âm $P (\text{W}) = 325,8$
- Tỷ lệ gián đoạn $A = 0,18$

Với chế độ sấy này, phần mềm dự báo các chỉ tiêu đầu ra tương ứng: $Ar = 1,27\text{kWh/kg}$, $Sp = 96,4\%$, $dE = 6,67$. Để kiểm chứng, chúng tôi đã tiến hành thí nghiệm sấy rễ Đinh Lăng tại chế độ sấy phù hợp tìm được. Kết quả thu được rất sát với giá trị dự đoán: $Ar = 1,31\text{kWh/kg}$, $Sp = 95,2\%$, $dE = 6,85$. Sai lệch tương đối giữa giá trị thực nghiệm và mô hình dưới 5%, cho thấy độ tin cậy cao của mô hình xây dựng. Như vậy, nhờ áp dụng phương pháp sấy kết hợp siêu âm, rễ Đinh Lăng có thể được sấy khô ở nhiệt độ tương đối thấp ($\approx 45^\circ\text{C}$) mà vẫn giữ được tới $\approx 95\%$ hàm lượng saponin, màu sắc chỉ biến đổi nhẹ ($dE \approx 6 - 7$, mức rất tốt), chi phí điện năng riêng $Ar \approx 1,3\text{kWh/kg}$, thấp hơn nhiều so với sấy đối lưu truyền thống.

Ngoài ra, dựa trên dữ liệu động học sấy thu thập được ở chế độ phù hợp, nhóm nghiên cứu đã thử nghiệm áp dụng mô hình Wang & Singh và Henderson & Pabis để tiên đoán quá trình giảm ẩm của rễ Đinh Lăng. Kết quả thu được phương trình mô tả sự thay đổi của độ ẩm tương đối (ω) theo thời gian sấy (τ) như sau:

• Mô hình Wang & Singh:

$$\omega = 0,1177 \cdot \tau^2 - 0,9309 \cdot \tau + 1,9365 \quad (R^2 = 0,981) \quad (11)$$

• Mô hình Henderson & Pabis:

$$\omega = 1,6148 \cdot \exp(-0,529 \cdot \tau) \quad (R^2 = 0,974) \quad (12)$$

Cả hai mô hình đều cho hệ số $R^2 > 0,97$, thể hiện phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm. Mô hình Wang & Singh cho độ chính xác nhìn hơn một chút ở vùng cuối quá trình sấy ($R^2 = 0,981$), trong khi mô hình Henderson & Pabis đơn giản hơn về mặt toán học và vẫn mô tả tốt xu hướng giảm ẩm. Việc xây dựng được các mô hình động học này giúp dự đoán thời gian sấy để đạt độ ẩm mong muốn, cũng như hỗ trợ thiết kế, điều khiển quá trình sấy trong thực tiễn.

4. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã tiến hành sấy rễ Đinh Lăng bằng công nghệ bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm và phân tích ảnh

hường của các thông số kỹ thuật chính đến hiệu quả và chất lượng sấy. 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:

$$+ Ar = 9,23685 - 0,28825T - 0,00256417P - 0,491667A \\ + 0,00271667T^2 + 0,00000379167P^2 \\ - 0,00125PA + 2,51042A^2$$

Hàm điều kiện: $40 \leq T \leq 50$; $220 \leq P \leq 420$; $0 \leq A \leq 0,4$ ($R^2 = 0,98$)

$$+ dE = 62,6541 - 2,2976T - 0,09441P + 22,4125A \\ + 0,03347T^2 - 0,00072TP - 0,445TA + 0,000204P^2 \\ - 0,01875PA + 6,375A^2$$

Hàm điều kiện: $40 \leq T \leq 50$; $220 \leq P \leq 420$; $0 \leq A \leq 0,4$ ($R^2 = 0,99$)

$$+ Sp = -715,661 + 34,425T + 0,276267P + 255,167A \\ - 0,388667T^2 - 4,05TA - 0,000431667P^2 \\ - 236,667A^2$$

Hàm điều kiện: $40 \leq T \leq 50$; $220 \leq P \leq 420$; $0 \leq A \leq 0,4$ ($R^2 = 0,95$)

Chế độ sấy phù hợp cho máy sấy theo nguyên lý bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm như sau: nhiệt độ tác nhân sấy $T = 44,7^\circ\text{C}$, công suất phát sóng $P = 325,8\text{W}$, tỷ lệ gián đoạn $A = 0,18$. Chỉ tiêu đạt được theo lý thuyết: $Ar = 1,27$ (kWh/kg), $Sp = 96,42$ (%), $dE = 6,67$. Chỉ tiêu đạt được bằng thực nghiệm: $Ar = 1,31$ (kWh/h), $Sp = 95,2$ (%), $dE = 6,85$.

Điều này tạo nền tảng cho việc thiết kế và cải tiến máy sấy bơm nhiệt kết hợp sóng siêu âm hiện đại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Ngô Ứng Long, *Cây Đinh Lăng*. NXB Nông nghiệp, Hà Nội, 1986.
- [2]. Nguyễn Thị Thu Hương, Lương Kim Bích, Nguyễn Thới Nhâm, "Tác dụng dược lý của cao toàn phần chiết xuất từ rễ và lá Đinh Lăng (*Polyscias fruticosa* Harms. Araliaceae)," *Công trình nghiên cứu khoa học 1987-2000*, Viện Dược liệu, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 241-244, 2001.
- [3]. Ning X., Feng Y., Gong Y., Chen Y., Qin J., Wang D., "Drying features of microwave and far-infrared combination drying on white ginseng slices," *Food Science and Biotechnology*, 28, 1065-1072, 2019.
- [4]. Colucci D., Fissore D., Rossello C., Carcel J.A., "On the effect of ultrasound-assisted atmospheric freeze-drying on the antioxidant properties of eggplant," *Food Research International*, 106, 580-588, 2018.
- [5]. D. Huang, K. Men, D. Li, T. Wen, Z. Gong, B. Sunden, Z. Wu, "Application of ultrasound technology in the drying of food products," *Ultrasonics Sonochemistry* 63, 2020.
- [6]. Ozuna C., et al., "Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound," *J Sci Food Agric.*, 91 (14): 2511-2517, 2011.

[7]. Puig A., et al., "Moisture loss kinetics and microstructural changes in eggplant (*Solanum melongena* L.) during conventional and ultrasonically assisted convective drying," *Food and Bioprocess Processing*, 90 (4): 624-632, 2012.

[8]. Kowalski S. J., D. Mierzwa, "US - Assisted Convective Drying of Biological Materials," *Drying Technology*, 33 (13): 1601-1613, 2015.

[9]. Kowalski S. J., et al., "High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34: 225-233, 2016.

[10]. Szadzińska J., et al., "The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper," *Ultrasonics Sonochemistry*, 34: 531-539, 2017.

[11]. Tekin Z., et al., "Dehydration of green beans using ultrasound-assisted vacuum drying as a novel technique: drying kinetics and quality parameters," *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, 2017.

[12]. Yang Z., et al., "Ultrasound-assisted heat pump drying of pea seed," *Drying Technology*, 36 (16): 1958-1969, 2018.

[13]. Kroehnke J., et al., "Ultrasound - and microwave - assisted convective drying of carrots - Process kinetics and product's quality analysis," *Ultrasonics Sonochemistry*, 48: 249 - 258, 2018.

[14]. Yang Z., et al., "Ultrasound-assisted heat pump intermittent drying of adzuki bean seeds: Drying characteristics and parameter optimization," *Journal of Food Process Engineering*, 43 (10): e13501, 2020.

[15]. Nguyễn Xuân Quang, *Nghiên cứu kỹ thuật sấy nông sản thực phẩm sử dụng sóng siêu âm*. Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học Nông Lâm TP. HCM, 2020.

[16]. Lê Anh Đức và cộng sự, "Nghiên cứu xác định phương pháp sấy và chế độ sấy rễ Đinh Lăng thái lát," *Tạp chí Khoa học Công nghệ*, 3, 59-65, 2021.

[17]. Bộ Y tế, *Dược điển Việt Nam V*. Hà Nội, 1310-1311, 2017.

[18]. Hay Nguyen, Quang-Huy Le, Thanh-Dat Le, Van-Kien Pham, "Experimental Research to Determine the Effect of Ultrasound in Drying Bo Chinh Ginseng by Ultrasound-Assisted Heat Pump Drying Method," *Appl. Sci.*, 12, 11525, 2022.

[19]. J. Szadzińska, D. Mierzwa, Pawlowski A., Musielak G., Pashminehazar R., Kharaghani A., "Ultrasound- and microwave-assisted intermittent drying of red beetroot," *Drying Technology*, 38(1-2), 93-107, 2020.

[20]. Schössler K., Jäger H., Knorr D., "Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper," *J. Food Eng.*, 108, 103-110, 2012.

AUTHORS INFORMATION

**Nguyen Hay¹, Nguyen Huu Quyen², Le Quang Huy²,
Dang Thi Truc Linh², Le Thanh Dat²**

¹Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Vietnam

²Cao Thang Technical College, Vietnam