ẢNH HƯỞNG CỦA PHƯƠNG PHÁP SẤY ĐẾN TỐC ĐỘ GIẢM HÀM LƯỢNG ẨM VÀ HOẠT TÍNH CHỐNG OXY HÓA TRONG HOA ĐẬU BIẾC (*Clitoria ternatea* L.)

Dương Thị Phượng Liên[1, *], Nguyễn Thị Ngọc Phụng[1], Nguyễn Trung Hậu[2], Dương Hiếu Đẩu[3]

[1] Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ

[2] Sở Khoa học và Công nghệ thành phố Cần Thơ

[3] Trường Khoa học Tự nhiên, Đại học Cần Thơ

[*]Email: dtplien@ctu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng của phương pháp sấy đến động học giảm ẩm và hoạt tính chống oxy hóa của hoa đậu biếc (*Clitoria ternatea* L.). Hoa đậu biếc được sấy bằng phương pháp sấy đông khô (FD), sấy bằng không khí nóng đối lưu (OD) ở 40, 50, 60°C, sấy bằng vi sóng (MWD) với công suất 230 W, 540 W và 700 W. Tốc độ giảm ẩm khi sấy bằng phương pháp OD và MWD được phân tích toán học và dữ liệu được phân tích thống kê để tìm ra mô hình phù hợp nhất. Hoa đậu biếc sấy được phân tích hàm lượng anthocyanin (TA), polyphenol tổng (TPC), flavonoid tổng (TFC) và hoạt tính chống oxy hóa (AA) thể hiện qua khả năng loại gốc tự do 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH). Kết quả cho thấy, mô hình của Page hợp nhất mô tả quá trình giảm ẩm của hoa đậu biếc bằng cả phương pháp OD và MWD. Năng lượng hoạt hóa (Ea) của quá trình sấy bằng OD và MWD tương ứng là 34,96 kJ/mol và 20,24 W/g. Phương pháp sấy FD được chứng minh là phương pháp tốt nhất cho hoa đậu biếc vì có TA, TPC, TFC và AA cao, tương ứng với 0,36±0,01%, 42,00±0,85 mg GAE/g, 11,11±0,65 mg QE/g và 56,13±0,76%. Phương pháp sấy OD ở 50°C mang lại hiệu quả hơn vì hoa sấy có TA, TPC, TFC và AA lần lượt là 0,32±0,02%, 42,09±0,62 mg GAE/g, 10,37±0,31 mg QE/g và 55,92±0,45%, trong đó TPC, TFC và AA cao tương đương như phương pháp sấy FD nhưng có chi phí thấp. Kết quả nghiên cứu là nền tảng phát triển trà hoa đậu biếc có hoạt tính chống oxy hóa cao.

Từ khóa: *Hoa đậu biếc, hoạt tính chống oxy hóa, năng lượng hoạt hóa, sấy, tốc độ giảm ẩm.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đậu biếc (*Clitoria ternatea* L.) là loại cây thân thảo thuộc họ Đậu (Fabaceae), có nguồn gốc từ Đông Nam Á, hiện được phân bố rộng rãi khắp khu vực nhiệt đới và có khả năng thích nghi đáng kể với các điều kiện nhiệt độ và độ ẩm khác nhau [1, 2]. Hoa đậu biếc có màu xanh lam đẹp nên được trồng trang trí phổ biến trong vườn nhà tại nhiều vùng ở Việt Nam. Ngoài ra, với màu sắc đặc trưng, hoa đậu biếc đã thu hút nhiều sự quan tâm trong các nghiên cứu ứng dụng vào thực phẩm như một chất màu tự nhiên có khả năng thay thế chất tạo màu tổng hợp. Nhiều nghiên cứu cũng đã xác nhận về hoạt tính chống oxy hóa và kháng khuẩn cũng như các tác dụng có lợi cho sức khỏe như hỗ trợ điều trị viêm khớp, bệnh ngoài da, các vấn đề về gan và ruột [3].

Hoa đậu biếc cũng như các loài hoa ăn được khác rất dễ hư hỏng do hàm lượng nước cao và dễ bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường thúc đẩy sự phát triển của vi sinh vật [4]. Trong quá trình bảo quản sau thu hoạch, việc xử lý không đúng cách có thể dẫn đến hiện tượng sẫm màu mô, mất nước, cánh hoa đổi màu và rụng nhanh chóng. Tuy nhiên, ngay cả khi sử dụng công nghệ sau thu hoạch tốt nhất, độ tươi của hoa chỉ có thể được duy trì trong vài ngày [5]. Việc sấy hoa để kéo dài thời hạn sử dụng rất quan trọng trong việc sử dụng hợp chất màu và các thành phần chức năng của hoa. Nhiều phương pháp sấy khác nhau như: Phơi nắng, sấy khô bằng không khí nóng đối lưu (OD), sấy bằng vi sóng (MWD) và sấy thăng hoa (FD) có thể được sử dụng cho các mục đích khác nhau và cũng ảnh hưởng khác nhau đến chất lượng của hoa khô [6].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hoa đậu biếc nhưng không có thông tin về sự thay đổi các hợp chất hoạt tính sinh học trong quá trình sấy

hoa đậu biếc bằng các phương pháp sấy khác nhau cùng với mô hình giảm ẩm của hoa khi sấy. Vì vậy, nghiên cứu này được tiến hành để dự đoán mô hình giảm ẩm trong quá trình sấy hoa đậu biếc bằng phương pháp OD và MWD, đồng thời tìm ra phương pháp sấy hiệu quả để duy trì hoạt tính chống oxy hóa cũng như giá trị cảm quan của hoa.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Địa điểm và nguyên liệu nghiên cứu

Hoa đậu biếc nở vào buổi sáng sớm nên thu hoạch hoa mới nở (cánh xòe to) vào khoảng 6-7 giờ các buổi sáng từ các vườn trồng ở thành phố Cần Thơ và nhanh chóng vận chuyển hoa tươi trong các túi PE đến Phòng thí nghiệm Công nghệ Thực phẩm, Viện Công nghệ Sinh học và Thực phẩm, Đại học Cần Thơ.

2.2. Xử lý nguyên liệu và bố trí thí nghiệm

Hoa được cắt tỉa bỏ cành giữ nguyên cánh hoa, rửa hoa bằng nước sạch trong chậu rửa và để ráo trên giấy hút ẩm và xác định hàm lượng ẩm ban đầu. Phương pháp sấy được áp dụng cho hoa bao gồm: Sấy FD, sấy OD ở 40, 50, 60°C và sấy MWD (sử dụng lò vi sóng Toshiba SHD-MWP-MM20P dung tích 20 lít) với 3 mức công suất 230 W, 540 W và 700 W. Đối với phương pháp sấy OD và MWD, mẫu hoa (20 g) được trải 1 lớp trên đĩa petri (đã được sấy khô và cân trước khối lượng), hàm lượng ẩm của hoa được xác định sau các khoảng thời gian nhất định thông qua sự giảm khối lượng mẫu và quá trình sấy kết thúc khi hàm lượng ẩm của hoa đạt ≤10%.

2.3. Xác định mô hình sấy và tốc độ giảm ẩm

Nhiều nghiên cứu đã phát triển các mô hình thực nghiệm khác nhau để mô tả mối quan hệ giữa "tỷ số độ ẩm" (MR) và thời gian sấy đối với thực phẩm và nông sản. MR được xác định theo công thức (1). Sự thay đổi của MR theo thời gian được biểu diễn theo các mô hình khác nhau và được thể hiện ở bảng 1.

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_i - M_e} \quad (1)$$

Trong đó: M_t là độ ẩm mẫu tại thời gian t; M_i là độ ẩm ban đầu; M_e là độ ẩm cân bằng.

Bảng 1. Mô hình toán học biểu diễn sự giảm ẩm trong quá trình sấy thực phẩm và nông sản

Thứ tự	Tên mô hình	Mô hình toán học	Tài liệu tham khảo
1	Lewis (Newton)	MR = exp (-kt)	[7]
2	Page	MR = exp (-kt^n)	[7]
3	Modified Page	MR = exp (-(kt)^n)	[7]
4	Henderson and Pabis	MR = a × exp (-kt)	[7]
5	Logarithmic	MR = a × exp (-kt) + b	[7]
6	Midilli và cs	MR = a × exp (-kt^n) + bt	[8]

Ghi chú: k: Hằng số tốc độ giảm ẩm (min^{-1}); t: Thời gian sấy (phút); a, b, n: Hằng số.

Để quan sát ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến các hằng số tốc độ giảm ẩm k, phương trình dạng Arrhenius (2) và (3) đã được áp dụng.

$$K = k_o \times \exp(-E_a/RT) \quad (2)$$

$$K = k_o \times \exp(-E_a \times m/P) \quad (3)$$

Đối với phương trình (2), E_a là năng lượng hoạt hóa (kJ/mol). Năng lượng hoạt hóa thể hiện sự nhạy cảm với nhiệt độ sấy (T) và có thể được xác định bằng biểu diễn đồ thị giữa ln(k) với T^{-1} (K). Phương trình (3) được sửa đổi từ phương trình Arrhenius. Giả sử rằng, nhiệt độ không khí được thay thế bằng tỷ lệ giữa khối lượng mẫu (g) và công suất (W) đối với phương pháp sấy MWD (m/P) trong phương trình biểu diễn mối quan hệ với hằng số tốc độ giảm ẩm (k, phút^{-1}). Do đó, năng lượng hoạt hóa E_a (W/g) có thể được xác định bằng biểu diễn đồ thị giữa ln(k) so với m/P [9, 10].

2.4. Phương pháp xác định các chỉ tiêu

Xác định độ ẩm (%): Phương pháp sấy đến khối lượng không đổi [11].

Phương pháp trích ly mẫu: Thực hiện theo Shiau và cs (2024) [12]. Mẫu (2 g) hoa khô nghiền mịn được hòa tan và chiết xuất với 100 ml nước cất ở 90°C trong bể điều nhiệt trong thời gian 30 phút. Sau khi chiết xuất, dung dịch được lọc ngay lập tức và làm nguội để phân tích TPC, TFC và khả năng loại gốc tự do DPPH. Quá trình phân tích được lặp lại 3 lần.

Xác định TPC: Thực hiện theo phương pháp của Wu và cs (2011) [13] với một số sửa đổi nhỏ.

TPC được xác định bằng phương pháp đo màu bằng máy quang phổ ở bước sóng 760 nm với axit gallic làm chất chuẩn và kết quả được biểu thị bằng mg đương lượng axit gallic trên mỗi gam hoa đậu biếc tính theo khối lượng khô (mgGAE/g).

Xác định TFC: Xác định theo phương pháp mô tả bởi Yamini và cs (2019) [14] với một số sửa đổi nhỏ. Đường cong chuẩn được lập bằng cách sử dụng quercetin và kết quả được biểu thị bằng miligam đương lượng quercetin trên gam hoa đậu biếc tính theo khối lượng khô (mQE/g).

Xác định AA: Bằng hoạt tính loại bỏ gốc tự do thông qua sự mất màu của dung dịch DPPH màu tím trong methanol. Phần trăm loại gốc tự do DPPH được đánh giá từ sự khác biệt về mức giảm độ hấp thụ màu của gốc tự do DPPH được phát hiện ở bước sóng 517 nm của máy đo quang phổ giữa mẫu trắng và mẫu thử [15].

Xác định TA: Phân tích bằng phương pháp pH vi sai [16]. Mẫu được pha loãng trong hai dung dịch đệm: Đệm kali clorua 0,025 M (pH 1,0) và đệm natri axetat 0,4 M (pH 4,5). Tất cả các phép đo độ hấp thu bằng máy đo quang phổ ở bước sóng 520 nm và 700 nm.

Xác định lượng anthocyanin a theo công thức (4):

$$a = \frac{A \times M \times K \times V}{\varepsilon \times l} \quad (g) \qquad (4)$$

TA được tính theo công thức (5):

$$TA\ (\%) = a \times 100\% / [m \times (100\text{-}w) \times 10^{-2}] \qquad (5)$$

Trong đó: a là lượng anthocyanin (g), A = (A520 nm, pH=1,0 - A700 nm, pH=1,0) - (A520 nm, pH=4,5 - A700 nm, pH=4,5), với: A520 nm, A700 nm: Độ hấp thụ tại bước sóng 520 và 700 nm, ở pH=1,0 và pH=4,5; M là khối lượng phân tử của anthocyanin, được biểu diễn qua cyanidin 3-glucozide (449,2 g/mol); K là hệ số pha loãng; V là thể tích dịch chiết (mL); ε là hệ số hấp thụ mol của cyanidin-3-glucoside (ε = 25.740 $mol^{-1}.cm^{-1}$ tại λ = 520nm); l là chiều dày cuvet (1 cm); m là khối lượng mẫu (g); w là độ ẩm mẫu (%).

2.5. Phương pháp xử lý số liệu

Phân tích hồi quy phi tuyến tính được thực hiện bằng phần mềm Microsoft Excel 2024. Các tham số thống kê được sử dụng để xác định mô hình tốt nhất bao gồm: Hệ số xác định (R^2), chi-bình phương (χ^2) và sai số trung bình bình phương (RMSE). R^2 càng cao cùng với giá trị χ^2 và RMSE càng thấp thì phương trình hồi quy càng phù hợp [17]. χ^2 và RMSE được xác định theo phương trình (6) và (7). Các tiêu chí này được tính toán theo công thức bằng phần mềm Microsoft Excel 2024.

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N-z} \qquad (6)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i-1}^{N}(MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2\right]^{1/2} \qquad (7)$$

Trong đó: $MR_{exp,i}$ và $MR_{pre,i}$ lần lượt là các tỷ lệ độ ẩm thử nghiệm và dự đoán theo phương trình; N là số lượng mẫu và z là số hằng số trong phương trình.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình động học giảm ẩm của quá trình sấy hoa đậu biếc

3.1.1. Tính toán hằng số tốc độ giảm ẩm

Kết quả phân tích hồi quy phi tuyến tính và hằng số của 6 mô hình từ quá trình sấy hoa đậu biếc bằng các phương pháp sấy OD và MWD được trình bày trong bảng 2 và 3. Dữ liệu trong bảng 2 và 3 được xem xét để đánh giá khả năng tương thích của các mô hình sấy. Đối với phương pháp sấy OD, theo Li và cs (2019) [18], nhiệt độ là yếu tố chính trong động học sấy. Bảng 2 cho thấy, hằng số tốc độ giảm ẩm (k) tăng khi nhiệt độ sấy tăng đối với tất cả các mô hình. Đối với phương pháp sấy MWD, rất khó để đo nhiệt độ trực tiếp trong hệ thống, do đó công suất cung cấp là yếu tố chính thay thế cho nhiệt độ sấy [9]. Do đó, đối với tất cả các mô hình, bảng 3 cũng cho thấy hằng số tốc độ giảm ẩm (k) tăng khi công suất MW tăng.

Trong cả hai trường hợp sấy bằng phương pháp OD và MWD, ngoại trừ trường hợp sấy MWD ở mức công suất 540 W, mô hình Lewis có hệ số xác định R^2 = 0,9894, các mô hình khác đều cho thấy sự phù hợp rất tốt trong việc mô tả sự thay đổi của MR theo nhiệt độ sấy hoặc công suất MW do giá trị R^2 đều lớn hơn 0,99. Bên cạnh đó, các giá trị chi bình phương (χ^2) và RMSE rất nhỏ (gần bằng 0). Song, giá trị R^2 của mô hình Page, Modified Page và Midili và cs cao hơn so với các mô hình khác và gần như bằng nhau. Ngoài ra, các giá trị χ^2 và RMSE của 3 mô hình này gần

như bằng nhau và đạt giá trị thấp nhất. So sánh công thức của mô hình Page, Modified Page và Midili và cs trong bảng 1 có thể thấy, công thức Page đơn giản hơn so với Modified Page và Midili và cs nên dễ áp dụng hơn, do đó mô hình Page được chọn là mô hình phù hợp nhất thể hiện quá trình giảm ẩm của hoa đậu biếc sấy bằng phương pháp OD và MWD.

Bảng 2. Hằng số tốc độ giảm ẩm và hệ số của các mô hình sấy theo nhiệt độ sấy đối với phương pháp OD

Thứ tự	Mô hình	Nhiệt độ (^oC)	Các hằng số	R^2	χ^2	RMSE
1	Lewis	40	k = 0,0074	0,9962	0,000298	0,01691
		50	k = 0,0122	0,9964	0,000371	0,01888
		60	k = 0,0162	0,9972	0,000298	0,01692
2	*Page*	40	*k = 0,0038; n = 1,128*	0,9995	0,000045	0,00641
		50	*k = 0,0190; n = 0,900*	0,9988	0,000131	0,01888
		60	*k = 0,0235; n = 0,905*	0,9994	0,000070	0,00799
3	*Modified Page*	40	*k = 0,0072; n = 1,128*	0,9995	0,000045	0,00641
		50	*k = 0,0122; n = 0,900*	0,9988	0,000131	0,01098
		60	*k = 0,0158; n = 0,905*	0,9994	0,000070	0,00802
4	*Henderson và Pabis*	40	*k = 0,0076; a = 1,032*	0,9972	0,000236	0,01474
		50	*k = 0,0117; a = 0,968*	0,9973	0,000285	0,01619
		60	*k = 0,0154; a = 0,970*	0,9982	0,000200	0,01356
5	*Logarithmic*	40	*k = 0,0075; a = 1,034; b = -0,0060*	0,9978	0,000184	0,01302
		50	*k = 0,0120; a = 0,965; b = 0,0062*	0,9975	0,000267	0,15664
		60	*k = 0,0158; a = 0,965; b = 0,0085*	0,9984	0,000179	0,01282
6	*Midilli và cs*	40	*k = 0,0038; n = 1,128; a = 0,996; b = 0,0000033*	0,9995	0,000044	0,00624
		50	*k = 0,0204; n = 0,884; a = 1,004; b = -0,0000036*	0,9988	0,000135	0,01088
		60	*k = 0,0251; n = 0,889; a = 1,003; b = -0,0000110*	0,9994	0,000068	0,00773

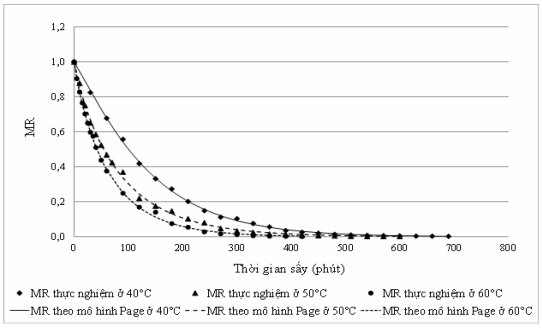
Ghi chú: k: Hằng số tốc độ giảm ẩm (phút^{-1}); t: Thời gian sấy (phút); a, b, n: Hằng số.

Bảng 3. Hằng số tốc độ giảm ẩm và hệ số của các mô hình sấy theo giá trị công suất đối với phương pháp sấy bằng MWD

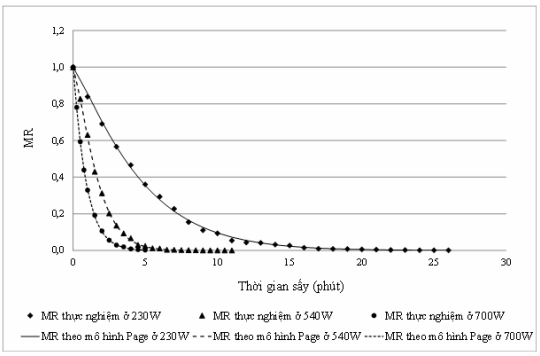
Thứ tự	Mô hình	Công suất (W)	Các hằng số	R^2	χ^2	RMSE
1	Lewis	230	k = 0,2135	0,9936	0,000571	0,02342
		540	k = 0,5927	0,9894	0,000870	0,02889
		700	k =1,0925	0,9994	0,000036	0,00588
2	*Page*	230	*k = 0,1554; n = 1,179*	0,9991	0,000088	0,00900
		540	*k = 0,4781; n = 1,298*	0,9997	0,000028	0,00509
		700	*k = 1,0952; n = 1,055*	0,9999	0,000007	0,00254
3	*Modified Page*	230	*k = 0,2063; n = 1,179*	0,9991	0,000088	0,00900
		540	*k = 0,5665; n = 1,298*	0,9997	0,000028	0,00509
		700	*k = 1,0900; n = 1,055*	0,9999	0,000007	0,00254
4	*Henderson và Pabis*	230	*k = 0,2215; n = 1,041*	0,9950	0,000465	0,02069
		540	*k = 0,6241; n = 1,060*	0,9916	0,000673	0,02487
		700	*k = 1,1080; n = 1,012*	0,9995	0,000028	0,00507
5	*Logarithmic*	230	*k = 0,2096; a = 1,050; b = -0,0177*	0,9964	0,007726	0,01758
		540	*k = 0,5983; a = 1,069; b = -0,0143*	0,9929	0,000570	0,02291
		700	*k = 1,0892; a = 1,016; b = -0,0060*	0,9996	0,000022	0,00448

6	*Midilli và cs*	230	*k = 0,1489; n = 1,197; a = 0,989; b = -1,6755*	0,9991	0,000085	0,00864
		540	*k = 0,4810; n = 1,295; a = 1,003; b = 0,00009*	0,9997	0,000029	0,00502
		700	*k = 1,0980; n = 1,052; a = 1,002; b = 0,00009*	0,9999	0,000007	0,00251

Ghi chú: k: Hằng số tốc độ giảm ẩm (phút^{-1}); t: Thời gian sấy (phút); a, b, n: Hằng số.



Hình 1. Biến đổi MR trong quá trình sấy OD và biến đổi theo mô hình Page của hoa đậu biếc



Hình 2. Biến đổi MR trong quá trình sấy MWD và biến đổi theo mô hình Page của hoa đậu biếc

Kết quả nghiên cứu của Carvalho và cs (2022) [19] cho thấy, Midilli và cs, Page và Modified Page là những mô hình mô tả tốt nhất quá trình sấy hạnh nhân. Nghiên cứu của Khanlari và cs (2014) [7] xác định, mô hình Page và Modified Page thích hợp nhất để sấy bột cà chua trong điều kiện môi trường khí quyển được điều chỉnh. Nhiều nghiên cứu trước đây đã chọn mô hình của Page là mô hình tốt nhất trong các nghiên cứu. Cụ thể như, nghiên cứu về mô hình động học sấy OD cà rốt [20], kiwi [21]. Bên cạnh đó cũng có các kết quả nghiên cứu lựa chọn mô hình Page khi sấy MWD gừng [22] và cà rốt [23]. Mô hình Page cũng đã được đề xuất để mô tả các kỹ thuật sấy khác, như nghiên cứu về mô hình máy sấy năng lượng mặt trời đối với xoài [24], nghiên cứu về sấy tầng sôi đối với đậu và khoai tây [25], sấy hồng ngoại của hạt húng quế [26], mô hình Midilli và cs, Page được chọn khi sấy hồng ngoại bã cà phê [27].

Sự thay đổi MR theo thời gian sấy OD và MWD của hoa đậu biếc mô phỏng theo mô hình Page được thể hiện trong hình 1 và 2. Đối với sấy OD, nhiệt độ sấy càng cao thì thời gian sấy càng ngắn. Thời gian sấy cần thiết cho hoa đậu biếc là 690, 600, 420 phút, tương ứng với nhiệt độ sấy 40, 50, 60°C. Đối với sấy MWD, thời gian sấy hoa đậu biếc khi cung cấp công suất MW là 230, 540, 700 W lần lượt là 26, 11, 5 phút.

3.1.2. Tính toán năng lượng hoạt hóa

Năng lượng hoạt hóa Ea có thể thu được từ độ dốc của đường thẳng trong phương trình Arrhenius (2) và (3) và được thể hiện trong bảng 4.

Bảng 4. Năng lượng hoạt hóa của quá trình khử nước hoa đậu biếc

Phương pháp sấy	Đơn vị	Năng lượng hoạt hóa	R^2
OD	kJ/mol	34,96	0,985
MWD	W/g	20,29	0,941

Năng lượng hoạt hóa cho quá trình khử nước của hoa đậu biếc được tính toán tương ứng là 34,96 kJ/mol và 20,29 W/g đối với sấy OD và MWD. Giá trị R^2 từ phương trình hồi quy (2) và (3) khá cao, lần lượt là 0,985 và 0,941. Một số nghiên cứu đã cho kết quả chênh lệch không nhiều, cụ thể như: Năng lượng hoạt hóa Ea của lá nguyệt quế sấy lớp mỏng ở nhiệt độ 50-70°C được xác định là 40,10 kJ/mol [28], Ea của các lát bí ngô (*Cucurbita maxima*) sấy đối lưu ở 50-70°C xấp xỉ 35,6 kJ/mol [29]. Ea của quả lựu ngọt và lựu chua khi sấy MWD với công suất 100-300 W là 16,675 W/g và 24,222 W/g [30], Ea của khoai mỡ khi sấy MWD mức công suất 180-900 W là 24,7 W/g [31], Ea của táo Gala hình trụ với đường kính và độ dày khác nhau với công suất vi sóng 360-775 W trong khoảng từ 19,2-27,1 W/g [32]. Có sự chênh lệch nhỏ về giá trị Ea giữa các nghiên cứu là do sự khác nhau về đặc tính nguyên liệu cũng như chiều dày lớp nguyên liệu khi sấy lớp mỏng.

3.2. Ảnh hưởng của các phương pháp sấy đến TA, TPC, TFC và AA của hoa đậu biếc

TA, TPC, TFC và AA của hoa đậu biếc được sấy bằng các phương pháp khác nhau được thể hiện ở bảng 5.

Bảng 5. Ảnh hưởng của phương pháp sấy đến các hợp chất có hoạt tính chống oxy hóa và hoạt tính chống oxy hóa của hoa đậu biếc

Phương pháp sấy	TA (%)	TPC (mg GAE/g)	TFC (mg QE/g)	AA (% loại gốc DPPH)
OD 40°C	0,30±0,01 ^{c}	30,27±0,30 ^{c}	6,58±0,34 ^{d}	48,29±1,16 ^{c}
OD 50°C	0,33±0,02 ^{b}	42,09±0,62 ^{a}	10,37±0,31 ^{ab}	55,92±0,45 ^{a}
OD 60°C	0,27±0,02 ^{cd}	33,35±0,30 ^{b}	10,21±0,66 ^{bc}	51,12±0,94 ^{b}
MWD 230 W	0,27±0,01 ^{cd}	31,02±1,09 ^{c}	9,48±0,24 ^{c}	48,66±0,57 ^{c}
MWD 540 W	0,28±0,02 ^{d}	41,16±0,30 ^{a}	10,80±0,57 ^{ab}	55,69±0,44 ^{a}
MWD 700 W	0,20±0,01 ^{e}	41,03±0,59 ^{a}	10,87±0,37 ^{ab}	55,43±0,71 ^{a}
FD	0,36±0,01 ^{a}	42,00±0,85 ^{a}	11,11±0,65 ^{a}	56,13±0,76 ^{a}

Ghi chú: Kết quả được thể hiện qua trung bình và độ lệch chuẩn, các chữ cái khác nhau phía trên các số trong cùng một cột thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa thống kê (p<0,05).

TA của hoa đậu biếc sấy bằng nhiều phương pháp khác nhau dao động trong khoảng 0,20-0,36%, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Prameswari và cs (2025) [33], theo đó TA trong 3 giống hoa đậu biếc trong khoảng 0,12-0,57% và thấp hơn không nhiều so với kết quả nghiên cứu của Ikhwanurridlo và cs (2025) [34] là 0,39%. TA của hoa đậu biếc không chỉ phụ thuộc vào phương pháp sấy mà còn phụ thuộc vào nhiệt độ và mức công suất sử dụng khi sấy. Sấy FD hoa có TA cao nhất, sấy OD có xu hướng duy trì TA tốt hơn so với sấy bằng MWD và tùy vào nhiệt độ cũng như mức công suất sử dụng. Sấy OD, TA duy trì tốt khi sấy ở 50°C cao hơn khác biệt so với sấy ở 40 và 60°C. Kết quả nghiên cứu của Gricenko và cs (2026) [35] cho thấy, khi sấy OD nho chuỗi ngọc đen, việt quất và quả mâm xôi, TA duy trì tốt nhất ở 45°C, cao hơn so với sấy ở 30 và 60°C, tuy nhiên đối với một số loại khác như dâu tây và quả kim ngân hoa thì TA giảm dần theo nhiệt độ sấy tăng từ 30-60°C, vì vậy sự khác biệt TA giữa các loài quả cho thấy tầm quan trọng của thành phần chất nền trong việc ổn định hoặc bảo vệ anthocyanin. Tuy nhiên, tất cả các trường hợp TA đều giảm rõ rệt khi sấy ở nhiệt độ cao hơn. Sấy MWD với công suất cao (700 W), tương ứng với nhiệt độ rất cao làm TA tổn thất rất nhiều. Sấy với mức năng lượng thấp hơn (230 và 540 W) mặc dù nhiệt độ khá cao so với sấy OD nhưng do thời gian ngắn nên TA duy trì tương đương với sấy OD ở 60°C.

TPC của các mẫu hoa đậu biếc dao động trong khoảng 30,27-42,09 mg GAE/g, phù hợp với kết quả nghiên cứu của Prameswari và cs (2025) [33], theo đó TPC của 3 giống hoa đậu biếc dao động từ 33,38-40,82 mg GAE/g. Mẫu sấy FD có TPC là 42,00±0,85 mgGAE/g, cao tương đương với mẫu sấy OD ở 50°C và sấy MWD với mức công suất 540 và 700 W (Bảng 5). Nghiên cứu của Gricenko và cs (2026) [35] đã kết luận, sấy OD ở nhiệt độ vừa phải không nhất thiết dẫn đến tổn thất polyphenol và trong một số trường hợp, tương đương với sấy FD. Sấy OD, nhiệt độ sấy ảnh hưởng rõ rệt đến TPC. Sấy ở 50°C, TPC trong mẫu cao khác biệt so với sấy ở 40 và 60°C. Mẫu sấy ở 60°C TPC giảm khác biệt so với mẫu sấy ở 50°C. Điều này có thể là do nhiệt độ cao hơn dẫn đến sự phân hủy các hợp chất nhạy cảm với nhiệt như các hợp chất hoạt tính sinh học [36]. Kết quả này phù hợp với hoa sen sấy [37]. Quy luật này tương tự như kết quả nghiên cứu của Gricenko và cs (2026) [35] khi sấy quả mâm xôi, nho chuỗi ngọc đỏ. Tuy nhiên, đối với một số loại quả khác như việt quất và nho chuỗi ngọc đen thì TPC lại cao hơn khi sấy ở 60°C so với sấy ở 30 và 45°C, vì vậy tất cả các phương pháp sấy đều cho thấy sự biến động TPC cao, tùy thuộc vào loại và thành phần ma trận trong nguyên liệu. Các loại nguyên liệu có cấu trúc tế bào chắc chắn hơn hoặc các loại quả có TPC tự nhiên cao hơn có thể chịu được quá trình chế biến tốt hơn so với các loại nguyên liệu dễ hỏng hơn. Sấy MWD, TPC chịu ảnh hưởng của mức công suất MW. Thông thường, sấy MWD nhiệt độ cao hơn nhiều so với sấy OD nên thời gian rút ngắn. Mức công suất 540 và 700 W mặc

dù nhiệt độ cao nhưng thời gian sấy rút ngắn đáng kể nên TPC cao hơn so với sấy sử dụng công suất 230 W có thời gian sấy dài hơn. Quy luật này cũng phù hợp với quá trình sấy hoa sen [37].

Bảng 5 cho thấy, TFC thay đổi trong khoảng 6,58-11,11 mgQE/g và phụ thuộc rõ rệt vào nhiệt độ sấy OD cũng như công suất sấy MWD. Kết quả này cao hơn so với kết quả nghiên cứu của Prameswari và cs (2025) [33] là 4,76 mg QE/g. Sấy OD ở 50-60°C cho hoa có TFC cao hơn so với sấy ở 40°C. Tương tự, sấy MWD với công suất 540 và 700 W cho hoa có TFC cao hơn khác biệt so với sấy với công suất 230 W. Kết quả này có thể liên quan đến thời gian sấy và lượng nhiệt làm nóng mẫu. Quá trình sấy MWD của hoa sen cũng cho quy luật tương tự [37], song TPC của chuối khô tăng lên khi công suất sấy MWD tăng [38].

AA của hoa đậu biếc dao động trong khoảng 48,29-56,13%. AA của mẫu sấy FD, sấy OD ở 50°C và sấy MWD với công suất 540 và 700 W khác biệt không có ý nghĩa thống kê và cao hơn so với các nghiệm thức còn lại. Quy luật biến đổi này tương tự như quy luật biến đổi của TPC, do AA phụ thuộc phần lớn vào các hợp chất phenolic.

4. KẾT LUẬN

Tất cả các mô hình được nghiên cứu đều mô tả tốt động học sấy bằng OD và MWD của hoa đậu biếc. Mô hình của Pages, Modified Pages và Midilli và cs cho kết quả phù hợp nhất với cả hai phương pháp sấy, song mô hình Pages đơn giản hơn và dễ ứng dụng hơn trong tính toán mô phỏng quá trình. Trong số các kỹ thuật sấy được thử nghiệm, phương pháp FD cho chất lượng tốt nhất nhưng thời gian sấy dài và chi phí cao. Sấy MWD với công suất 540 W rút ngắn khá nhiều thời gian sấy song khó áp dụng với quy mô lớn. Vì vậy, sấy OD ở 50°C được khuyến nghị để sấy hoa đậu biếc do thiết bị sấy khá phổ biến, chi phí thấp và có thể áp dụng ở quy mô lớn, đồng thời hoa đậu biếc sấy có TA và AA cao sử dụng hiệu quả làm trà hoa đậu biếc hoặc bổ sung vào các sản phẩm thực phẩm khác.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Lý Hồng Hương Hạ, Nguyễn Thế Nhựt, Nguyễn Thị Hồng Yến, Trần Hà Quốc Huy, Nguyễn Thành Đạt, Nguyễn Phương Thanh Nhã & Trần Trung Trĩnh (2023). Đặc điểm thực vật học cây Đậu biếc (*Clitoria ternatea* L. (*Fabaceae*)). *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng*, *22*, 137-144.

[2]. Maia, N. M. A., Andressa, I., Cunha, J. S., Costa, N. d. A., de Oliveira, E. B., Leite Júnior, B. R. d. C. & Vieira, É. N. R. (2025). *Clitoria ternatea*: Perspectives on its application in foods and potential health benefits. *Plants*, *14*(21), 1-19.

[3]. Jeyaraj, E. J., Lim, Y. Y. & Choo, W. S. (2021). Extraction methods of butterfly pea (*Clitoria ternatea*) flower and biological activities of its phytochemicals, *58*(6), 2054-2067.

[4]. Demasi, S., Mellano, M. G., Falla, N. M., Caser, M. & Scariot, V. (2021). Sensory profile, shelf life, and dynamics of bioactive compounds during cold storage of 17 edible flowers. *Horticulturae*, *7*(7), 1-26.

[5]. Rani, P. R. & Reddy, M. V. (2015). Dehydration techniques for flowers. *International Journal of Applied research*, *1*, 306-311.

[6]. M. Youssef, K. & Mokhtar, S. (2014). Effect of drying methods on the antioxidant capacity, color and phytochemicals of *Portulaca oleracea* L. leaves. *Journal of Nutrition and Food Sciences*, *4*(6), 1-6.

[7]. Khanlari, Y., Aroujalian, A., Fazel, S. & Fathizadeh, M. (2014). An experimental work and mathematical modeling on kinetic drying of tomato pulp under different modified atmosphere conditions. *International Journal of Food Properties*, *17*(1), 1-12.

[8]. Midilli, A., Kucuk, H. & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, *20*(7), 1503-1513.

[9]. Darvishi, H., Asl, A. R., Asghari, A., Azadbakht, M., Najafi, G. & Khodaei, J. (2014). Study of the drying kinetics of pepper. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *13*(2), 130-138.

[10]. Özbek, B. & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, *83*(4), 541-549.

[11]. Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 10788:2015. Malt - Xác định độ ẩm - Phương pháp khối lượng.

[12]. Shiau, S.-Y., Wang, Y., Yu, Y., Cai, S. & Liu, Q. (2024). Phytochemical, antioxidant activity, and thermal stability of *Clitoria ternatea* flower extracts. *Czech Journal of Food Sciences*, *42*(4), 284-294.

[13]. Wu, Y.-B., Zheng, L.-J., Yi, J., Wu, J.-G., Tan, C., Chen, T.-Q., Wu, J.-Z. & Wong, K. H. (2011). A comparative study on antioxidant activity of ten different parts of *Nelumbo nucifera* Gaertn. *African Journal of Pharmacy and Pharmacology*, *5*, 2454-2461.

[14]. Yamini, R., Kannan, M., Thamaraisevi, S., Uma, D. & Santhi, R. (2019). Phytochemical screening and nutritional analysis of *Nelumbo nucifera* (Pink lotus) flower petals and seeds. *International Journal of Chemical Studies*, *7*, 3540-3545.

[15]. Liu, J., Wang, C., Wang, Z., Zhang, C., Lu, S. & Liu, J. (2011). The antioxidant and free-radical scavenging activities of extract and fractions from corn silk (*Zea mays* L.) and related flavone glycosides. *Food Chemistry*, *126*(1), 261-269.

[16]. Gabriela, S., Simona, L., Sava, C. & Zăgan, S. (2010). Spectrophotometric study on stability of anthocyanins extracts from black grapes skins. *Ovidius University Annals of Chemistry*, *21*, 101-104.

[17]. Falade, K. & Ogunwolu, S. (2014). Modeling of drying patterns of fresh and osmotically pretreated cooking banana and plantain slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, *38*(1), 373-388.

[18]. Li, B., Lin, J., Zheng, Z., Duan, H., Li, D. & Wu, M. (2019). Effects of different drying methods on drying kinetics and physicochemical properties of *Chrysanthemum morifolium Ramat*. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *12*(3), 187-193.

[19]. Carvalho, M., Correa, P., Silva, G., Lopes, L. & Sousa, A. (2022). Kinetic and mathematical modeling of the drying process of macaúba almonds. *Revista Caatinga*, *35*, 199-205.

[20]. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., Arabhosseini, A. & Nazghelichi, T. (2011). Modelling the carrot thin-layer drying in a semi-industrial continuous band dryer. *Czech Journal of Food Sciences*, *29*(5), 528-538.

[21]. Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C. & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, *66*(3), 323-328.

[22]. Wang, Y., Li, B., Xi, Y., Zheng, L. & Zi, W. (2026). Kinetic characteristics and energy efficiency analysis of microwave-dried fresh ginger: Impacts of key process parameters. *LWT*, *240*, 1-14.

[23]. Sutar, P. P. & Prasad, S. (2007). Modeling microwave vacuum drying kinetics and moisture diffusivity of carrot slices. *Drying Technology*, *25*(10), 1695-1702.

[24]. Wang, W., Li, M., Hassanien, R. H. E., Wang, Y. & Yang, L. (2018). Thermal performance of indirect forced convection solar dryer and kinetics analysis of mango. *Applied Thermal Engineering*, *134*, 310-321.

[25]. Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G. & Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, *58*(3), 277-283.

[26]. Amini, G., Salehi, F. & Rasouli, M. (2022). Color changes and drying kinetics modeling of basil seed mucilage during infrared drying process. *Information processing in agriculture*, *9*(3), 397-405.

[27]. Wang, S.-C., Tsai, M.-J., Tung, C.-H. & Wu, P.-H. (2026). Evaluation of infrared drying parameters for spent coffee grounds: Effects on drying kinetics, quality, and energy consumption. *Beverages*, *12*(5), 1-15.

[28]. Çakmak, H., Kumcuoğlu, S. & Tavman, S. (2013). Thin layer drying of bay leaves (*Laurus nobilis* L.) in conventional and microwave oven. *Academic Food Journal*, *11*, 20-26.

[29]. Perez, N. & Schmalko, M. (2008). Convective drying of pumpkin: Influence of pretreatment and drying temperature. *Journal of Food Process Engineering*, *32*, 88-103.

[30]. Minaee, S., Motevali, A., Ahmadi, E. & Azizi, M. (2012). Mathematical models of drying pomegranate arils in vacuum and microwave dryers. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *14*, 311-325.

[31]. Harish, A., Rashmi, M., Murthy, K., Mathew, B. & Ananda, S. (2014). Mathematical modeling of thin layer microwave drying kinetics of elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*). *International Food Research Journal*, *21*, 1045-1051.

[32]. Kriaa, K. & Nassar, A. F. (2020). Study of gala apples (*Malus pumila*) thin-layer microwave drying: Drying kinetics, diffusivity, structure and color. *Food Science and Technology (Campinas)*, *41*, 1-11.

[33]. Prameswari, W., Yulian, Y., Oktoviani, O., Sari, D. & Situmeang, K. (2025). Total phenolic content, flavonoid content, and agromorphological diversity of butterfly pea accessions in Bengkulu, Indonesia. *International Journal of Agricultural Technology*, *21*, 1935-1946.

[34]. Ikhwanurridlo, A., Aji, I., Nindita, Y., Karlowee, V., Mahati, E., Pralampita, P. & Susilaningsih, N. (2025). Comparative analysis of anthocyanin and flavonoid content in *Clitoria ternatea* L. using an ultrasonic-assisted extraction approach. *Plant Trends*, *3*, 114-121.

[35]. Gricenko, T., Zommere, A., Kviesis, J. & Klavins, L. (2026). Effect of drying temperature on berry press residue anthocyanin stability and profile. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, 1733151: 1-14.

[36]. Dadi, D., Emire, S., And, A. & Teka, F. (2018). Influences of different drying methods and extraction solvents on total phenolic and flavonoids, and antioxidant capacity of *Moringa stenopetala* leaves. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *7*, 962-967.

[37]. Lien, D. T. P., Lieu, V. T. T., Tram, P. T. B. & Toan, H. T. (2020). Influence of different drying techniques on drying characteristics and quality aspects of pink lotus (*Nelumbo nucifera*) flowers. *Journal of Advanced Research in Food Science and Nutrition*, *3*, 16-23.

[38]. Youssef M, Abdel Khafar E & Elbaz M (2018). Evaluation the bioactive compounds extracted from dried banana (*Musa* sp.) peels which obtained by different drying methods. *Current Science International*, *7*(2), 135-148.

THE EFFECT OF DRYING METHOD ON MOISTURE CONTENT REDUCTION RATE AND ANTIOXIDANT ACTIVITY IN BUTTERFLY PEA FLOWERS (*Clitoria ternatea* L.)

Duong Thi Phuong Lien[1], Nguyen Thi Ngoc Phung[1],

Nguyen Trung Hau[2], Duong Hieu Dau[3]

[1]*Institute of Food and Biotechnology, Can Tho University*

[2]*Can Tho Department of Science and Technology*

[3]*College of Natural Sciences, Can Tho University*

Abstract

This study investigated the effect of drying methods on the moisture reduction kinetics and antioxidant activity of butterfly pea flowers (*Clitoria ternatea* L.). Butterfly pea flowers were dried using freeze-drying (FD), hot air convection drying (OD) at 40, 50, 60°C and microwave drying (MWD) with power of 230, 540, 700 W. The moisture reduction rates using OD and MWD were mathematically analyzed and the data were statistically analyzed to find the most suitable model. The dried butterfly pea flowers were analyzed for total anthocyanin (TA), total polyphenol content (TPC), total flavonoid content (TFC) and antioxidant activity (AA) as expressed by the scavenging of free radical 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH). The results showed that Page's integrated model describes the moisture reduction process of butterfly pea flowers using both OD and MWD methods. The activation energy (Ea) of the OD and MWD drying processes were 34.96 kJ/mol and 20.24 W/g, respectively. FD was proved to be the best method for butterfly pea flowers due to high TA, TPC, TFC contents and AA, they are 0.36±0.01%, 42.00±0.85 mg GAE/g, 11.11±0.65 mg QE/g and 56.13±0.76%, respectively. Drying by OD at 50°C is more efficient because the dried flowers have TA, TPC, TFC and AA values of 0.32±0.02%, 42.09±0.62 mg GAE/g, 10.37±0.31 mg QE/g and 55.92±0.45%, respectively, with TPC, TFC and AA values comparable to FD but at a lower cost. The research results provide a foundation for developing butterfly pea flower tea with high antioxidant activity.

Keywords: *Antioxidant activity, activation energy, butterfly pea flower, drying, moisture reduction rate.*

Ngày nhận bài: 22/7/2026

Ngày chuyển phản biện: 5/8/2026

Ngày thông qua phản biện: 9/9/2026

Ngày duyệt đăng: 1/10/2026