 DOI: 10.35382/TVUJS.14.5.2024.202

MÔ HÌNH TOÁN HỌC VÀ PHÂN TÍCH THỰC NGHIỆM SẤY NẤM ĐÔNG TRÙNG HẠ THẢO (*Cordyceps militaris*) LỚP MỎNG TRONG TỦ SẤY CHÂN KHÔNG

Nguyễn Đức Toàn[1*], Võ Minh Hoàng[2], Nguyễn Võ Phong Phú[3]

MATHEMATICAL MODELING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF Cordyceps militaris THIN LAYER DRYING IN VACUUM DRYER

Nguyen Duc Toan[1*], Vo Minh Hoang[2], Nguyen Vo Phong Phu[3]

Tóm tắt – *Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá động học sấy thoát ẩm và mô hình hóa toán học quá trình sấy khô đông trùng hạ thảo lớp mỏng thực hiện ở các nhiệt độ khác nhau trong tủ sấy chân không. Quá trình sấy khô đông trùng thực hiện ở các nhiệt độ: 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C với áp suất chân không 13 mbar đến khối lượng mẫu đạt trạng thái cân bằng. Các giá trị tỉ lệ độ ẩm (Moisture Ratio) thử nghiệm ở mỗi nhiệt độ được mô phỏng theo mô hình toán học Lewis, Henderson and Pabis, Page. Kết quả cho thấy mô hình Page có giá trị chi bình phương ($\chi 2$) trung bình, sai số bình phương trung bình (RMSE) nhỏ nhất và giá trị hệ số xác định (R^2) cao nhất (> 0,99). Vì vậy, mô hình Page mô tả tốt nhất đặc tính sấy chân không mẫu đông trùng hạ thảo trong khoảng nhiệt độ 50^{o}C÷70^{o}C.*

Từ khóa: đông trùng hạ thảo, mô hình toán học sấy, sấy chân không.

Abstract – *The objective of this study is to evaluate the drying kinetics and mathematical modeling of the drying process of thin layer Cordyceps militaris performed at different temperatures in a vacuum oven. The drying process is carried out at temperatures: 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C, with a vacuum pressure 13 mbar until the sample mass reaches equilibrium. The experimental moisture ratio (MR) values at each temperature were simulated according to the Lewis, Henderson and Pabis, and Page mathematical models. The results show that the Page model has the average chi-square ($\chi 2$) value, the smallest mean square error (RMSE), and the highest coefficient of determination (R^2) value (> 0.99). The Page model best describes the vacuum drying characteristics of Cordyceps militaris samples within the 50^{o}C÷70^{o}C temperature range.*

Keywords: Cordyceps militaris, drying mathematical model, vacuum dryer.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ở Trung Quốc, đông trùng hạ thảo được coi là thực phẩm chức năng và thuốc trong nhiều năm [1]. Đông trùng hạ thảo Cordycepts militaris bao gồm các hợp chất hoạt động đa dạng như adenine, polysacarit, cordycepin, adenosine, cordyheptapeptide... Cordycepin (3-deoxyadenosine) là một trong những thành phần chính trong đông trùng hạ thảo. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng cordycepin còn có thể cung cấp khả năng bảo vệ thần kinh cho hệ thần kinh trung ương bên cạnh tác dụng tốt trong các hoạt động chống khối u, tiểu đường, kháng viêm và oxy hóa ở người [2]. Tuy nhiên, đông trùng hạ thảo tươi rất dễ bị hư hỏng, chất lượng bị giảm [3].

Sấy khô là một phương pháp quan trọng trong việc bảo quản thực phẩm và nguyên liệu thực vật [4]. Giải pháp này cũng được ứng dụng trong bảo quản đông trùng hạ thảo hiệu quả. Nhiều phương pháp sấy đã được nghiên cứu áp dụng

[1,2,3]Trường Đại học Trà Vinh, Việt Nam

Ngày nhận bài: 04/4/2024; Ngày nhận bài chỉnh sửa: 22/5/2024; Ngày chấp nhận đăng: 23/5/2024

*Tác giả liên hệ: ndtoan@tvu.edu.vn

[1,2,3]Tra Vinh University, Vietnam

Received date: 04th April 2024; Revised date: 22nd May 2024; Accepted date: 23rd May 2024

*Corresponding author: ndtoan@tvu.edu.vn

cho đông trùng hạ thảo như phơi nắng [4], sấy hồng ngoại [3], sấy không khí nóng, sấy thăng hoa [5], sấy thăng hoa kết hợp hồng ngoại [6], sấy chân không [7]... Ngoài ảnh hưởng của các phương pháp sấy, yếu tố nhiệt độ và thời gian sấy đóng vai trò quyết định đến chất lượng của đông trùng hạ thảo khô. Do đó, động học quá trình sấy đông trùng hạ thảo ở các điều kiện sấy khác nhau cần phải được xem xét và tính toán cụ thể. Trong nghiên cứu ngày, kĩ thuật mô hình hóa với các mô hình toán học như Page, Lewis, Henderson and Pabis được sử dụng để đánh giá động học sấy đông trùng hạ thảo trong tủ sấy chân không. Việc lựa chọn mô hình toán học phù hợp với điều kiện sấy chân không đông trùng hạ thảo cho phép tính toán được thời gian sấy, từ đó kiểm soát tốt chất lượng sản phẩm đông trùng hạ thảo khô.

II. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Ảnh hưởng của sấy hồng ngoại đến động học sấy, các hợp chất có hoạt tính sinh học và hương vị của đông trùng hạ thảo đã được đánh giá bởi Wu et al. [3]. Kĩ thuật sấy đối lưu hồng ngoại được thực hiện ở nhiệt độ lần lượt 40^{o}C, 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C. Động học thoát ẩm cũng tăng nhanh khi tăng nhiệt độ sấy. Sấy khô ở 40^{o}C có lợi cho việc giữ lại màu và các hợp chất dễ bay hơi. Đối với hương vị không dễ bay hơi, nhiệt độ sấy tương đối cao có hiệu quả hơn trong việc giảm vị đắng và dư vị đắng. Điều kiện tốt nhất để giữ lại adenosine, cordycepin, phenolics tổng số và các chất dinh dưỡng (Cu, Fe, Zn và Mn) trong đông trùng hạ thảo là sấy khô ở tốc độ gió 1 m/s ở 60^{o}C [3].

Nghiên cứu của Thitiphan [5] so sánh hai phương pháp sấy đối lưu không khí nóng và sấy thăng hoa trên đông trùng hạ thảo. Sấy không khí nóng được thực hiện ở 55^{o}C trong 24 giờ và sấy thăng hoa trong chân không lượng khí hút khỏi thiết bị là 140 lít/phút trong 48 giờ. Kết quả cho thấy cả cordycepin và adenosine chiết xuất từ mẫu sấy thăng hoa đều có giá trị cao hơn so với chiết xuất từ mẫu sấy không khí nóng. Kết quả nghiên cứu dịch chiết xuất từ Cordyceps militaris cho thấy hoạt tính chống oxy hóa cũng như hàm lượng phenolic tổng số của dịch chiết từ phương pháp sấy thăng hoa có giá trị cao hơn so với dịch chiết từ phương pháp sấy khô bằng không khí nóng [5].

Tiền xử lí tăng cường tính ổn định vật lí và chống oxy hóa của đông trùng hạ thảo khô bằng các điều kiện sấy khác nhau đã được nghiên cứu bởi Dechapon et al. [7]. Kết quả cho thấy tiền xử lí bằng cách ngâm mẫu trong dung dịch acid citric 0,5%, đun sôi và hấp mất nhiều thời gian sấy hơn so với mẫu sấy khô và chưa qua xử lí để đạt được độ ẩm cuối cùng (khoảng 8% căn bản khô). Việc tăng nhiệt độ sấy trong tủ chân không có thể làm giảm thời gian sấy. Phương pháp làm khô mẫu trước khi sấy có giá trị L* cao nhất, giá trị a* và b* thấp nhất. Nhiệt độ sấy cao có xu hướng làm giảm giá trị L* trong khi giá trị a* và b* ngày càng tăng. Đặc tính chống oxy hóa, tiền xử lí bằng cách ngâm trong acid kết hợp sấy khô ở 70^{o}C bằng chân không cho thấy hàm lượng hợp chất phenolic, DPPH và hoạt tính bắt gốc tự do superoxide cao nhất. Tiền xử lí có thể bảo quản tốt các chất cordycepin và adenosine của đông trùng hạ thảo trong quá trình sấy khô [7].

Ảnh hưởng của phơi nắng, sấy thăng hoa, sấy không khí nóng (50^{o}C, 70^{o}C) và sấy vi sóng (420 W, 700 W) đến các đặc tính hóa lí và hoạt tính chống oxy hóa của Cordyces militaris đã được kiểm tra bởi Li et al. [4]. Kết quả cho thấy, sấy thăng hoa có sự khác biệt về màu sắc ít nhất so với nguyên liệu ban đầu và duy trì được nhiều cordycepin và polysaccharide hơn. Sấy vi sóng ở công suất 700 W giúp bảo quản lượng hợp chất phenolic và carotenoid lớn hơn. Do đó, hoạt tính loại bỏ gốc tự do DPPH và ABTS cao hơn cũng như khả năng chống oxy hóa khử sắt cao hơn. Sấy bằng vi sóng có thể là một phương pháp tiềm năng để thu được Cordyces militaris khô có hoạt tính chống oxy hóa cao [4]. Cơ sở lựa chọn nghiên cứu phỏng đoán thời gian sấy bằng mô hình toán học được thực hiện dựa trên những nghiên cứu biến đổi chất lượng sấy đông trùng hạ thảo trước đây. Các nghiên cứu đã thực hiện tập trung đánh giá tác động của phương pháp sấy, nhiệt độ hay thời gian sấy, chưa đề cập đến phương pháp xác định thời gian sấy khi mở rộng cỡ mẫu sấy hay quy mô sấy lớn hơn. Để áp dụng được kết quả sấy vào điều kiện thực tiễn đạt hiệu quả cao, thời gian sấy cần phải tính toán được mức phù hợp.

III. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

A. Nguyên liệu và thiết bị

Đông trùng hạ thảo tươi được cung cấp trực tiếp từ phòng nuôi cấy của Trường Đại học Trà Vinh. Các sợi nấm được chọn thu hoạch có kích thước tương đối đều nhau. Nhiệt độ bảo quản trước khi sấy của đông trùng hạ thảo ở 30±20C.

Thiết bị sấy chân không (Memmert VO101, Đức) có dung tích 101 lít, cho phép điều chỉnh áp suất chân không từ 5÷1100 mbar, mức rò rỉ áp suất chân không là 0,01 bar/giờ, nhiệt độ bề mặt khay sấy tối đa 200^{o}C, sai số nhiệt độ ±0,1^{o}C.

B. Tiến hành thí nghiệm

Các mẫu đông trùng được cân khối lượng 100 g đặt thành lớp mỏng trên khay sấy. Nhiệt độ sấy khảo sát là 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C ở áp suất 13 mbar. Tiến hành sấy đến khối lượng không đổi với khoảng thời gian ghi nhận thay đổi khối lượng là 30 phút. Độ ẩm cuối cùng của đông trùng hạ thảo đạt dưới 4% (căn bản khô). Độ ẩm thoát ra ở các nhiệt độ sấy được biểu diễn dưới dạng đường cong sấy và tính toán trên ba mô hình toán học Page, Lewis, Henderson and Pabis (Bảng 1).

C. Mô hình hóa quá trình sấy

Tỉ lệ độ ẩm (Moisture Ratio) từ các mô hình trong Bảng 1 được tính như sau:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e}$$

Tỉ lệ độ ẩm MR có thể được đơn giản hóa thành M_t/M_0, với Mt là độ ẩm tại thời gian khảo sát ($kg_{nước}/kg_{chất\ khô}$) và M_0 là độ ẩm ban đầu ($kg_{nước}/kg_{chất\ khô}$) [8].

Dữ liệu thực nghiệm của quá trình sấy khô được đánh giá bằng phân tích hồi quy và việc lựa chọn mô hình được tiến hành dựa trên hệ số xác định (R^2), chi bình phương trung bình ($\chi 2$), sai số bình phương trung bình (RMSE) bằng phần mềm Excel. Thí nghiệm được tiến hành ba lần lặp lại. Một mô hình được coi là phù hợp hơn khi giá trị R^2 cao và giá trị $\chi 2$, RMSE càng thấp [9].

$$R^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{MR_{pre,i} - \overline{MR}_{exp,i}}{\left(MR_{exp,i} - \overline{MR}_{exp,i}\right)^2}$$

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

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

Trong đó: $MR_{exp,i}$ là tỉ lệ độ ẩm thực nghiệm; $MR_{pre,i}$ là tỉ lệ độ ẩm dự đoán của mô hình; N là số dữ liệu quan sát; z là hằng số mô hình.

Bảng 1: Các mô hình toán học sử dụng mô hình hóa quá trình sấy chân không

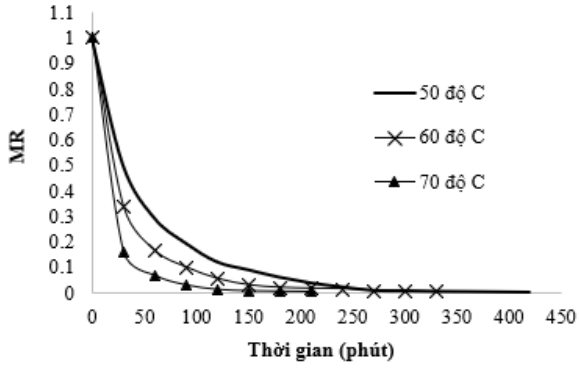
Thứ tự	Tên mô hình	Công thức tính	Các hệ số sau khi biến đổi mô hình dạng Y = AX + B
1	Lewis	$MR = \exp(-k.t)$	$Y = ln(MR); X = t;$ $A = -k; B = 0$
2	Page	$MR = exp(-k.t^n)$	$Y = ln(-ln(MR)); X = ln(t);$ $A = n; B = ln(k)$
3	Henderson and Pabis	$MR = a.exp(-k.t)$	$Y = ln(MR); X = t;$ $A = -k; B = ln(a)$

Ghi chú: Các tham số trong mô hình: t = thời gian sấy (phút); k = hằng số sấy; a, n = hệ số mô hình; MR = tỉ lệ độ ẩm [10]

IV. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

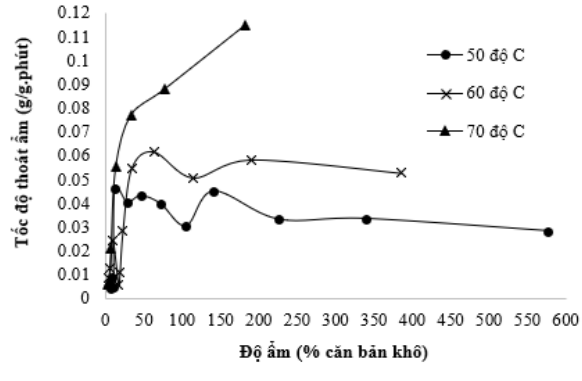
Hình 1 thể hiện sự biến đổi của tỉ lệ ẩm (MR) theo thời gian sấy ở nhiệt độ 50^{o}C, 60^{o}C, 70^{o}C với áp suất chân không 13 mbar. Tỉ lệ ẩm giảm liên tục theo thời gian sấy. Có thể quan sát thấy, thời gian sấy giảm đáng kể khi tăng nhiệt độ từ 50^{o}C lên 70^{o}C. Ở nhiệt độ sấy 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C, cân bằng tỉ lệ ẩm đạt lần lượt ở 420 phút, 330 phút và 210 phút. Thời gian sấy này nhanh hơn nghiên cứu của Chaiya et al. [7], khi sấy đông trùng hạ thảo không qua tiền xử lí, bằng tủ sấy chân không Memmert VO500 với 100 g đông trùng sấy ở 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C, áp suất chân không 60 mbar, thời gian đạt cân bằng tỉ lệ ẩm lần lượt là 600 phút, 480 phút và 420 phút [7].

Rõ ràng, nhiệt độ sấy đóng vai trò quan trọng trong toàn bộ quá trình sấy. Ở 70^{o}C, thời gian



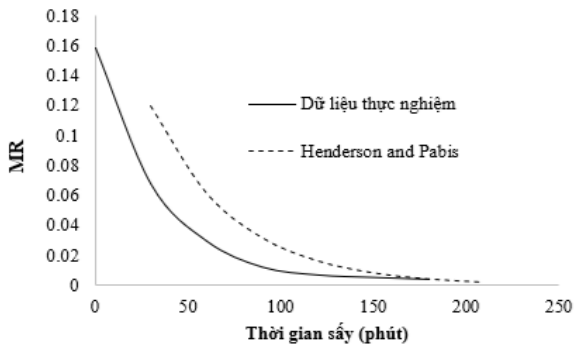
Hình 1: Thay đổi tỉ lệ ẩm theo thời gian sấy đông trùng hạ thảo ở các nhiệt độ

sấy rút ngắn xuống 50% so với sấy ở 50^{o}C. Việc tăng nhiệt độ sấy giúp tăng áp suất hơi nước ở bề mặt vật liệu, kết quả tương tự với nghiên cứu của Wu et al. [3]. Việc kết hợp áp suất chân không sẽ càng giúp cho ẩm trong đông trùng hạ thảo thoát ra nhanh hơn. Điều này cụ thể khi xem xét biểu đồ tốc độ sấy ở Hình 2. Tốc độ thoát ẩm càng cao khi tăng nhiệt độ sấy từ 50^{o}C đến 70^{o}C. Với phương pháp sấy chân không, nhiệt độ cao là lợi thế để rút ngắn thời gian sấy. Tuy nhiên, nhiệt độ cao cũng có tác động đến chất lượng của đông trùng hạ thảo sấy khô. Các nghiên cứu tác động nhiệt độ sấy đến hợp chất sinh học của đông trùng hạ thảo thường không quá 70^{o}C [7, 3].

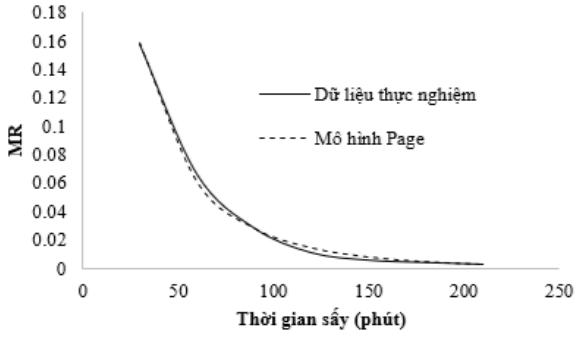


Hình 2: Tốc độ thoát ẩm đông trùng hạ thảo theo nhiệt độ sấy

Các đường cong sấy được mô phỏng theo ba mô hình toán học Page, Lewis, Henderson and Pabis được trình bày trong Bảng 2. Theo Bảng 2, ngoại trừ các mô hình Lewwis, Henderson and



Hình 3: Phỏng đoán tỉ lệ ẩm theo thời gian sấy của Henderson and Pabis ở 70^{o}C



Hình 4: Phỏng đoán tỉ lệ ẩm theo thời gian sấy của Page ở 70^{o}C

Pabis, hệ số xác định của mô hình Page luôn có $R^2 > 0{,}99$ ở các nhiệt độ sấy. Hệ số chi bình phương trung bình ($\chi 2$) và sai số bình phương trung bình (RMSE) ở các mô hình là yếu tố quan trọng trong việc chọn lựa mô hình. Mô hình Page ($\chi 2$) và (RMSE) có giá trị thấp nhất ở các nhiệt độ sấy. Riêng Henderson and Pabis có ($\chi 2$) và (RMSE) giá trị ở 70^{o}C thấp nhất là 0,0002 nhưng R^2 chỉ đạt 0,9628. Điều này không thỏa đáng với tiêu chí lựa chọn mô hình, phải đảm bảo đồng thời R^2 cao, ($\chi 2$) và (RMSE) thấp.

Khả năng phỏng đoán độ ẩm của đông trùng hạ thảo ở các thời gian sấy tại 70^{o}C, áp suất 13 mbar của mô hình Page và mô hình Henderson and Pabis được thể hiện ở Hình 3 và Hình 4, đường cong phỏng đoán của Page gần đạt mức chính xác so với đường cong của dữ liệu thực nghiệm. Tính chính xác phỏng đoán của mô hình Page cũng được chứng minh qua các nghiên cứu sấy nông sản trước đó [11, 12].

Bảng 2: Ước tính các tham số mô hình được áp dụng để biểu diễn dữ liệu thực nghiệm

Mô hình toán học	Nhiệt độ (°C)	Các tham số từ mô hình			R^2	RMSE	χ^2
		a	k	n			
Lewis	50	-	0,0132	-	0,9831	0,0746	0,0056
	60	-	0,0152	-	0,9776	0,1317	0,0174
	70	-	0,0245	-	0,9628	0,0197	0,0198
Page	50	-	0,0418	0,8190	0,9949	0,0056	0,0003
	60	-	0,1140	0,6721	0,9943	0,0043	0,0002
	70	-	0,2350	0,6048	0,9928	0,0006	0,0002
Henderson and Pabis	50	0,6196	0,0132	-	0,9831	0,0231	0,0005
	60	0,3641	0,0144	-	0,9776	0,0304	0,0009
	70	0,2305	0,0220	-	0,9628	0,0002	0,0002

V. KẾT LUẬN

Trong điều kiện sấy chân không đông trùng hạ thảo, tốc độ thoát ẩm tăng khi tăng nhiệt độ sấy. Mô hình Page phù hợp để phỏng đoán thời gian sấy lớp mỏng đông trùng hạ thảo ở nhiệt độ 50^{o}C, 60^{o}C và 70^{o}C.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chiang SS, Liang ZC, Wang YC, Liang CH. Effect of light-emitting diodes on the production of cordycepin, mannitol and adenosine in solid-state fermented rice by Cordyceps militaris. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2017;60: 51–56. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.03.007.

[2] Chen C, Liu XP, Jang W, Zeng B, Meng W, Huang LP, et al. Anti-effects of cordycepin to hypoxia-induced membrane depolarization on hippocampal CA1 pyramidal neuron. *European Journal of Pharmacology*. 2017;796: 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2016.12.021.

[3] Wu XF, Zhang M, Li Z. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of Cordyceps militaris. *LWT – Food Science and Technology*. 2019;111: 790–798. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.108.

[4] Li Y, Yang H, Wang J, Chen H. Assessment of drying methods on the physiochemical property and antioxidant activity of Cordyceps militaris. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2019;13(1): 513–520. https://doi.org/10.1007/s11694-018-9965-3.

[5] Chimsook T. Effect of freeze drying and hot air drying methods on quality of cordycepin production. *EDP Sciences*. 2018;192: 8–11. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819203001.

[6] Wu XF, Zhang M, Bhandari B. A novel infrared freeze drying (IRFD) technology to lower the energy consumption and keep the quality of Cordyceps militaris. *Elsevier Ltd*. 2019;54: 34–42. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.03.003.

[7] Chaiya D, Phungamngoen C, Eadmusik S, Sriwichai W, Subcharoen E. Pretreatment enhanced the physical and antioxidant stability of dried Cordyceps militaris by different drying conditions. *EDP Sciences*. 2021;302: 0–6. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130202005.

[8] LMidilli A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *International Journal of Energy Research*. 2001;25(8): 715–725. https://doi.org/10.1002/er.715.

[9] KBialik M, Gondek E, Wiktor A, Latocha P, Witrowa-Rajchert D. Mathematical Modeling of Actinidia arguta (Kiwiberry) Drying Kinetics. *Agricultural Engineering*. 2017;21(4): 5–13. https://doi.org/10.1515/agriceng-2017-0031.

[10] Midilli A, Kucuk H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. *Energy Conversion and Management*. 2003;44(7): 1111–1122. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00099-7.

[11] Ruhanian S, Movagharnejad K. Mathematical modeling and experimental analysis of potato thin-layer drying in an infrared-convective dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. 2016;9(1): 84–91. https://doi.org/10.1016/j.eaef.2015.09.004.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.