

NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH SẤY THÓC TÍNH LỚP DÀY

STUDY THE SIMULATION OF THICK LAYER STATIC PADDY DRYING PROCESS

Đỗ Thái Sơn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu mô phỏng quá trình sấy thóc tính lớp dày trong thiết bị sấy vi ngang bằng mô hình đạo hàm riêng. Giải mô hình bằng phương pháp sai phân và so sánh với kết quả thực nghiệm của đề án CARD để hiệu chỉnh mô hình mô phỏng và sử dụng mô hình đã hiệu chỉnh có độ chính xác cao đánh giá ảnh hưởng của chế độ sấy là chiều dày lớp hạt, thời gian đảo gió, nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ tác nhân sấy nhằm xác định chế độ sấy thóc tối ưu phục vụ cho việc thiết kế và vận hành hiệu quả thiết bị sấy thông dụng này của Việt Nam.

Từ khóa: Mô hình mô phỏng, sấy thóc tính lớp dày, công thức lớp mỏng, chế độ sấy, thiết bị sấy vi ngang.

ABSTRACT

The article presents the research to simulate the static paddy drying process in a flat bed dryer by a Partial Differential Equation model and solves the model by the difference method and compares with the experimental results of project CARD to correct the simulation model and then to evaluate the effects of drying conditions as the grain thickness, air reversal time, temperature, humidity and drying agent speed to determine the optimal paddy drying regime for the design and efficient operation of this common dryer in Vietnam.

Keywords: Simulation model, drying thick layer paddy, thin layer formula, drying regime, flat bed dryer.

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

Email: sonnhiet@gmail.com

Ngày nhận bài: 25/5/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 30/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 18/8/2020

1. GIỚI THIỆU

Thiết bị sấy vi ngang được sử dụng rộng rãi ở đồng bằng sông Cửu Long để sấy thóc sau thu hoạch vì chi phí đầu tư và vận hành thấp, phù hợp với điều kiện Việt Nam. Nghiên cứu động học quá trình sấy bằng mô hình mô phỏng giúp việc thiết kế và vận hành hiệu quả thiết bị sấy này.

Mô hình sấy hạt tính lớp dày đã được các nhà khoa học thế giới nghiên cứu và được mô phỏng như là sự tích hợp của quá trình sấy các lớp mỏng xếp chồng nhau theo chiều chuyển động của khí sấy và được phân thành: mô hình Đạo hàm riêng (Partial Differential Equation, PDE), mô hình Logarit và mô hình Độ ẩm cân bằng; trong đó mô hình PDE cho kết quả mô phỏng chính xác nhất nhưng tính toán phức tạp nhất. Các mô hình PDE khác nhau chủ yếu là ở công thức sấy hạt lớp mỏng được sử dụng trong mô hình.

Sấy hạt lớp dày khác với sấy lớp mỏng/hạt trần ở chỗ có sự hồi ẩm của lớp hạt phía trên và sự xếp chồng lên nhau của hạt, dẫn đến kết quả dự đoán (thời gian sấy) bằng mô hình luôn khác với kết quả thực nghiệm và sự khác biệt nhiều/ít tùy thuộc công thức sấy lớp mỏng được dùng [7, 8, 9, 10]. Các nghiên cứu trong nước gồm nghiên cứu thực nghiệm CARD [1] và những nghiên cứu ứng dụng mô hình đạo hàm riêng PDE đánh giá ảnh hưởng đơn lẻ của các điều kiện sấy thóc trong thiết bị sấy vi ngang [2, 3, 4, 5]

Để mô phỏng chính xác quá trình sấy thóc trong thiết bị sấy vi ngang cần nghiên cứu tổng hợp các bước của quá trình mô phỏng, bao gồm:

1) *Lựa chọn mô hình mô hình sấy lớp dày* và dạng công thức sấy thóc lớp mỏng được tích hợp trong mô hình để mô phỏng quá trình sấy đạt độ chính xác cao;

2) *Giải mô hình mô phỏng* với một số công thức lớp mỏng đã được công bố ở điều kiện khảo sát của dự án CARD [1] để *lựa chọn công thức lớp mỏng* có dạng đường cong sấy các lớp thóc mỏng phù hợp;

3) *Hiệu chỉnh công thức lớp mỏng* ở điều kiện sấy CARD và so sánh với kết quả thực nghiệm CARD đánh giá độ chính xác mô phỏng quá trình sấy thóc tính lớp dày;

4) *Sử dụng mô hình PDE đã hiệu chỉnh để nghiên cứu đánh giá năm thông số chế độ sấy thóc tính lớp dày* là chiều dày lớp hạt, thời điểm đảo gió, nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ khí sấy, từ đó rút ra các điều kiện sấy thóc tối ưu, và

5) *Kiểm định chế độ sấy thóc tối ưu* vừa được xác định.

2. GIẢI QUYẾT VẤN ĐỀ

2.1. Lựa chọn mô hình mô hình sấy lớp dày

Trong các mô hình mô phỏng quá trình sấy này thì mô hình PDE cho kết quả mô phỏng đường cong sấy và nhiệt độ vật liệu sấy chính xác nhất [8] nên được lựa chọn. Mô hình PDE được xây dựng với các giả thiết sau [7]:

- Gradient nhiệt độ trong hạt là không đáng kể.
- Dẫn nhiệt, dẫn ẩm từ hạt này đến hạt khác được bỏ qua.
- Thiết bị sấy được cách nhiệt hoàn hảo và bỏ qua lượng nhiệt tích tụ trong lớp cách nhiệt.
- Biến thiên nhiệt độ và độ ẩm của khí sấy theo thời gian là không đáng kể so với theo chiều dày lớp hạt

$$\left(\frac{\partial T_a}{\partial \tau} \ll \frac{\partial T_a}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial \tau} \ll \frac{\partial H}{\partial x} \right).$$

- Độ chính xác của công thức độ ẩm cân bằng coi như đã biết.

Mô hình đạo hàm riêng PDE được xây dựng từ ba phương trình cân bằng entanpy của khí sấy, entanpy của hạt, ẩm dung của khí sấy cho lớp mỏng khảo sát dx, công thức sấy lớp mỏng (4) được sử dụng là công thức dạng Page, có dạng sau [11]:

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = -\frac{h_a}{v_a \rho_a (c_a + c_v H)} (T_a - T_g) - \frac{\varepsilon}{v_a} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = \frac{h_a}{(1-\varepsilon)(\rho_p c_p + \rho_p c_w M)} (T_a - T_g) - \frac{[h_v + c_v (T_a - T_g)] \rho_a v_a}{(1-\varepsilon)(\rho_p c_p + \rho_p c_w M)} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\varepsilon}{v_a} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\rho_p (1-\varepsilon)}{\rho_a v_a} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (3)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_i - M_e} = \exp(-X.t^\gamma) \quad (4)$$

Với các thông số nhiệt vật lý của thóc được xác định như sau [10]:

t	Thời gian sấy, h	x	Chiều dày lớp hạt, m
T _a	Nhiệt độ không khí, khí sấy, °C	T _{abs}	Nhiệt độ tuyệt đối, K
v _a	Tốc độ của không khí, khí sấy, m/s	H	Độ ẩm của không khí, kg/kgkk
T _{gr}	Nhiệt độ của thóc, °C	M _{in}	Độ ẩm đầu của thóc, decimal d.b.

RH Độ ẩm tương đối của không khí, decimal, (5)
 $RH = 101,3H / (0,26189.p_{vs} + H.p_{vs})$

p_{vs} Áp suất hơi bão hòa, kPa, (6)
 $p_{vs} = 0,1.exp(27,0214 - 6887/T_{abs} - 5,31 \ln(T_{abs}/273,16))$

c_a Nhiệt dung riêng không khí, J/kgK, (7)
 $c_a = 1009,26 - 0,0040403T_a + 6,1759.10^{-4}T_a^2 - 4,097.10^{-7}T_a^3$

c_v Nhiệt dung riêng hơi nước, J/kgK, (8)
 $c_v = 1,883.10^3 - 1,6737.10^{-1}T_a + 8,4386.10^{-4}T_a^2 - 2,6966.10^{-7}T_a^3$

ρ_a Khối lượng riêng của không khí, kg/m³, (9)
 $\rho_a = 101,325 / (0,287.T_{abs})$

μ_a Độ nhớt của không khí, kg/ms, μ_a = 1,691.10⁻⁵ + 4,984.10⁻⁸T_a - 3,187.10⁻¹¹T_a² + 1,319.10⁻¹⁴T_a³ (10)

h_v Nhiệt ẩn hóa hơi, J/kg, (11)
 $h_v = 2,503.10^6 - 2,386.10^3(T_{abs} - 273,16)$; với 273,16 < T_{abs} < 533,16

c_p Nhiệt dung riêng của thóc ướt, J/kgK, (12)
 $c_p = c_d + c_w.M = 1109 + 4168.M$

ρ_p Khối lượng riêng của đồng thóc, kg/m³, (13)
 $\rho_p = 508,5 + 202,72.M$

ε Độ rỗng của đồng thóc, decimal, (14)
 $\varepsilon = 0,6455 - 0,2303.M$

h_a Hệ số truyền nhiệt thể tích, J/m³K.s, (15)
 $h_a = 0,2755.c_a.G.(2r_o.G/\mu_a)^{-0,34}.a_s.\varepsilon$

r_o Đường kính tương đương của hạt thóc, lấy bằng 0,00457m [8]

a_s Diện tích bề mặt của một m³ thóc, lấy bằng 1200 ± 140 m²/m³

G Lưu lượng không khí trên một đơn vị diện tích, kg/m².s

M_e Độ ẩm cân bằng của thóc, decimal d.b, tính theo công thức Henderson (1952) [8]:

$$M_{eq} = \left(\frac{1}{100}\right) \left[\frac{\ln(1-RH)}{C(1,8.T_a + 491,7)} \right]^{1/N} \quad (16)$$

với C và N là các hằng số phụ thuộc vật liệu, với thóc: C = -7,87.10⁻⁶ và N = 2,088

Và điều kiện biên được lấy theo điều kiện khảo sát của dự án CARD [1] (bảng 1) để có thể so sánh kết quả mô phỏng với kết quả thực nghiệm và đề xuất điều chỉnh mô hình.

Bảng 1. Các thông số chế độ sấy khảo sát của CARD [1]

TT		Mê 4	Mê 5	Mê 7	Mê 8
1	Điều kiện sấy	43°C, có đảo gió	43°C, có đảo gió	50+43°C, có đảo gió	50+43°C, ko đảo gió
2	Khối lượng thóc trước sấy, kg	606	803	851	586
3	Khối lượng thóc sau sấy, kg	434	556	620	486
4	Độ ẩm đo sau sấy % (w.b/d.b.)	13,65/15,81	13,53/15,65	12,49/14,27	12,64/14,47
5	Độ ẩm tính trước sấy (% , d.b.)	61,704	67,03	56,84	38,022
6	Chiều dày lớp thóc, m	0,246	0,397	0,405	0,249
7	Lưu lượng khí sấy, m ³ /s	0,80	0,82	0,82	0,82
8	Thời điểm đảo gió, sau giờ	7,00	9,00	9,00	-
9	Khối lượng riêng thóc ướt, kg/m ³	616	530	525	588

2.2. Chọn công thức lớp mỏng

Mô hình sấy hạt nông sản lớp mỏng nói chung, thóc nói riêng, được chia thành ba dạng:

- Các mô hình lý thuyết khuếch tán,
- Các mô hình bán thực nghiệm,
- Các mô hình thực nghiệm.

Các mô hình khuếch tán được sử dụng dựa trên giả thiết quá trình truyền ẩm trong hạt thóc là quá trình khuếch tán ẩm lỏng (Cihan và Ece, 2001; Kahveci và các đồng sự, 2003; Cihan và các đồng sự, 2007, 2008 [9]). Tuy nhiên, các mô hình dạng này thường phức tạp và không phù hợp với nghiên cứu vận hành. Các mô hình thực nghiệm hoặc bán thực nghiệm dựa trên việc đơn giản hóa

lời giải tổng quát định luật 2 của Fick để mô phỏng quá trình sấy hạt theo lớp mỏng [7]. Các mô hình loại này có ưu điểm cơ bản là dễ áp dụng, như mô hình của Agrawal và Singh (1977), Wang và Singh (1978), Basunia và Abe (1998), Chen và Wu (2001), Hacıhafızoglu và các đồng sự (2008) [9]. Vì sự mở rộng phạm vi áp dụng của các công thức thực nghiệm bị hạn chế nên nghiên cứu này sử dụng ba công thức sấy thóc lớp mỏng dạng Page [7] rồi giải mô hình PDE để lựa chọn công thức lớp mỏng phù hợp.

Công thức lớp mỏng (4) của Agrawal và Singh [7] có các hệ số X và Y như sau:

$$X = 0,02958 - 0,44565 RH + 0,01215.T_a \quad (17a)$$

$$Y = 0,13365 + 1,93653.RH - 1,77431.RH^2 + 0,009468.T_a$$

Các hệ số X và Y trong công thức (4) của Wang và Singh [7] như sau:

$$X = 0,01579 + 0,0000176 T_a + 0,078867.RH \quad (17b)$$

$$Y = 0,6545 + 0,002425.T_a + 0,078867.RH$$

Các hệ số X và Y trong công thức (4) của Basunia và Abe [7] như sau:

$$X = 0,0139402 + 0,00002044.T_a + 0,0158462.RH \quad (17c)$$

$$Y = 0,558983 + 0,001772.T_a + 0,196982.RH$$

Với thời gian sấy được tính bằng giờ cho công thức Agrawal và Singh và bằng phút cho công thức Wang và Singh, và công thức Basunia và Abe.

2.3. Giải hệ phương trình pde (1) ÷ (4) bằng phương pháp sai phân theo chiều dày lớp hạt (x) và thời gian sấy (t) kết hợp với các công thức nhiệt vật lý (5-16) với các điều kiện đầu và điều kiện biên [1] để chọn công thức lớp mỏng có thể mô phỏng quy luật sấy các lớp thóc trong sấy thóc tính lớp dày.

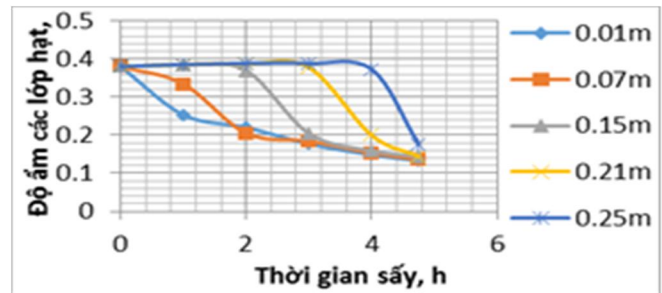
Hệ phương trình sai phân có dạng:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial T_a}{\partial x} \Big|_i^{t+\Delta t} &= - \frac{h_a}{v_a \rho_a (c_a + c_v H_i^{t+\Delta t})} (T_a \Big|_i^{t+\Delta t} - T_g \Big|_i^{t+\Delta t}) \\ \frac{\partial T_g}{\partial t} \Big|_i^t &= \frac{h_a}{(1-\varepsilon)(\rho_p c_p + \rho_p c_w M_i^t)} (T_a \Big|_i^t - T_g \Big|_i^t) \\ &+ \frac{[h_v + c_v (T_a \Big|_i^t - T_g \Big|_i^t)]}{(c_p + c_w M_i^t)} \frac{\partial M}{\partial t} \Big|_i^t \\ \frac{\partial H}{\partial x} \Big|_i^{t+\Delta t} &= - \frac{\rho_p (1-\varepsilon)}{\rho_a v_a} \frac{\partial M}{\partial t} \Big|_i^{t+\Delta t} \\ \frac{\partial M}{\partial t} \Big|_i^t &= (M_i - M_e \Big|_i^t) \cdot (-X \Big|_i^t \cdot Y \Big|_i^t \cdot t^{Y \Big|_i^t - 1}) \cdot \exp(-X \Big|_i^t \cdot t^{Y \Big|_i^t}) \end{aligned} \right.$$

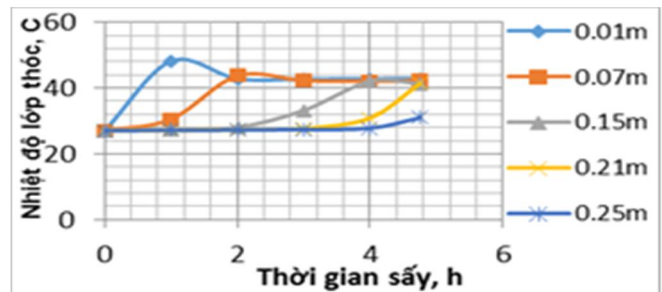
Sử dụng điều kiện sấy của mẻ 8 [1], giải hệ phương trình sai phân với bước thời gian $\Delta t = 15$ phút và bước chiều dày $\Delta x = 0,02m$ lần lượt với công thức (17a), (17b) và (17c) xác định được thời gian sấy là: 4,75h với (17a), 2,25h với (17b) và 8,85h với (17c) so với kết quả thực nghiệm CARD là 7,20h cho thấy không có công thức lớp mỏng để mô phỏng

chính xác quá trình sấy thóc tính lớp dày. Công thức Agrawal và Singh được chọn vì nó cho dạng đường cong sấy của các lớp thóc phù hợp quy luật hơn cả [2, 11].

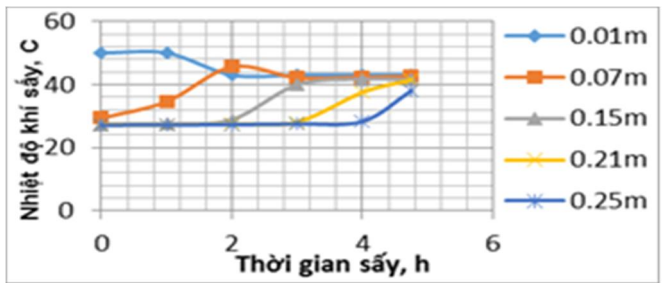
Giải hệ phương trình sai phân với công thức (17a) với điều kiện sấy mẻ 8 xác định được các nghiệm $M(x,t)$, $T_g(x,t)$, $T_a(x,t)$, $H(x,t)$ thể hiện trên các hình 1, 2, 3, 4. Từ trường độ ẩm $M(x, t)$ dễ dàng xác định độ ẩm trung bình và thời gian sấy/mẻ ($t_s = 4,75h$) cũng như chênh lệch độ ẩm lớn nhất giữa các lớp thóc cuối mẻ sấy ($\Delta M_{max} = 4,32\%$, thể hiện chất lượng quá trình sấy). Từ trường nhiệt độ $T_g(x,t)$ xác định được nhiệt độ lớn nhất của thóc $T_{gmax} = 48,91^\circ C$ để so sánh với nhiệt độ chuyển thái giòn - dẻo gây nứt gãy gạo của thóc và nhiệt độ khí sấy T_a đi ra lớp hạt trên cùng (0,25m) dùng để xác định tổn thất nhiệt do khí sấy mang đi.



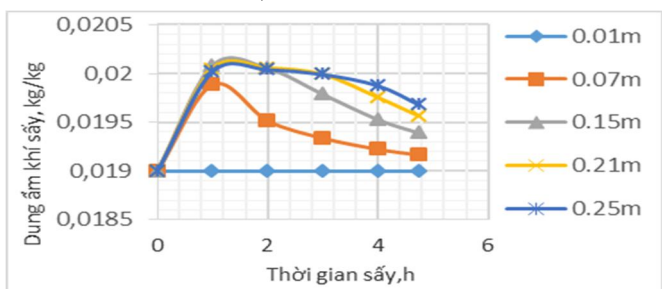
Hình 1. Độ ẩm các lớp thóc



Hình 2. Nhiệt độ các lớp thóc



Hình 3. Nhiệt độ của khí sấy



Hình 4. Dung ẩm của khí sấy

2.4. Hiệu chỉnh công thức lớp mỏng (17a)

Sự chống chọi của hạt trong lớp dày đã làm giảm diện tích tiếp xúc bề mặt hạt với khí sấy, sự tiếp xúc thực tế xảy ra trong lỗ rỗng ϵ nên nghiên cứu [2] đã hiệu chỉnh bề mặt riêng a_s thành $\epsilon.a_s$ để điều chỉnh hệ số tỏa nhiệt thể tích h_a (công thức 19), và hiệu chỉnh cường độ bay hơi qua hệ số X trong công thức (17a) thành $\epsilon.X$ (công thức 18).

$$X_\epsilon = (0,2985 - 0,44565.RH + 0,01215.T_a).\epsilon \tag{18}$$

$$h_{a\epsilon} = 0,2755.c_a.G.(2r_o.G/\mu_a)^{-0,34}.\epsilon \tag{19}$$

Kết quả xác định thời gian sấy cho bốn mẻ sấy với công thức Agrawal và Singh (4a) chưa và đã hiệu chỉnh X và h_a (công thức 18, 19) ở các điều kiện sấy CARD (bảng 1) cho bốn mẻ sấy được tổng hợp trong bảng 2. So với kết quả thực nghiệm CARD mô hình PDE với công thức 17a chưa hiệu chỉnh cho kết quả dự đoán thời gian sấy giảm từ 30,6 ÷ 41,9%, còn với mô hình đã hiệu chỉnh thì thời gian sấy PDE dự đoán sai khác rất nhỏ (0,43 ÷ 6,25%), dù với điều kiện thời tiết nóng ẩm (tháng 7) hay lạnh khô (tháng 12). Kết quả này cho thấy công thức hiệu chỉnh (18), (19) là hợp lý và chính xác và mô hình PDE đã hiệu chỉnh có độ chính xác cao có thể sử dụng để nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các điều kiện sấy.

Bảng 2. Tổng hợp thời gian sấy thực nghiệm và kết quả hiệu chỉnh mô hình PDE

TT	Kết quả	Mẻ 4		Mẻ 5		Mẻ 7		Mẻ 8	
		t _{sấy} h	Sai số	t _{sấy} h	Sai số	t _{sấy} h	Sai số	t _{sấy} h	Sai số
1	Thực nghiệm CARD	10,67	-	11,5	-	11,0	-	7,20	-
2	Mô hình chưa h/chỉnh	6,20	-41,9%	7,7	-33,0%	7,63	-30,6%	4,75	-34,6%
3	Mô hình đã h/chỉnh ⁷	10,75	0,75%	12,25	6,25%	11,25	2,27%	7,25	0,69%
4	Mô hình đã h/chỉnh ¹²	10,53	1,28%	11,55	0,43%	10,75	-4,55%	7,0	-2,8%

3. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CÁC ĐIỀU KIỆN SẤY

Có năm thông số chính ảnh hưởng đến sấy tinh lớp dày. Việc đánh giá được thực hiện dựa vào trường độ ẩm $M(x,t)$ để xác định thời gian sấy/mẻ, chênh lệch độ ẩm cực đại ΔM_{max} và nhiệt độ lớn nhất của hạt T_{gmax} để đánh giá chất lượng quá trình sấy.

3.1. Chiều dày lớp hạt

Chiều dày lớp hạt là thông số trực tiếp ảnh hưởng đến năng suất sấy. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp hạt đến thời gian sấy và chênh lệch độ ẩm ΔM_{max} ở điều kiện sấy CARD được tổng kết trong bảng 3.

Bảng 3. Kết quả giải mô hình PDE khi tăng chiều dày lớp hạt

Mẻ	Loại thóc	Chiều dày hạt	Đảo gió	Thời gian sấy	Chênh lệch ẩm Max
4	Thóc ướt, độ ẩm đầu 61,7% d.b.	0,25m	sau 7h	10,75h	6,36%
		0,50m	sau 7h	16,33h	2,92%
		0,50m	không	-	-

5	Thóc rất ướt, nhiều hạt xanh, độ ẩm đầu 67%	0,38m	sau 9h	12,25h	8,96%
		0,60m	sau 9h	17,33h	3,64%
		0,60m	không	12,83h	38,97%
7	Thóc ướt, độ ẩm đầu 56,8% d.b.	0,405m	sau 9h	11,25h	7,76%
		0,60m	sau 9h	16,33h	6,05%
		0,60m	không	12h	23,95%
8	Thóc tốt, ít tạp chất, độ ẩm đầu 38% d.b.	0,25m	không	7,25h	2,09%
		0,50m	không	9,25h	15,01%
		0,50m	sau 7h	12,33h	3,67%

Sấy thóc tốt (mẻ 8), khi tăng chiều dày thóc từ 0,25m lên 0,5m (tăng 100%) thì thời gian sấy không đảo gió là 9,25h (tăng 27,6%), chênh lệch độ ẩm ΔM_{max} tăng mạnh (15%), còn nếu có đảo gió thời gian sấy là 12,33h (tăng 70%) nhưng chênh lệch độ ẩm ΔM_{max} tăng không đáng kể (3,67% so với 2,09%), cho thấy tăng chiều dày kết hợp với đảo gió sẽ tăng được công suất sấy mà vẫn bảo đảm chất lượng quá trình sấy.

Sấy thóc rất ướt (mẻ 5) dày 0,38m, có đảo gió, khi tăng chiều dày lớp thóc sấy 0,6m (tăng 58%) thì thời gian sấy cũng tăng 41,5% nhưng chênh lệch độ ẩm giữa các lớp thóc lại giảm ($\Delta M_{max} = 3,67%$ so với 8,96%). Nếu không đảo gió thì thời gian sấy chỉ tăng nhẹ (tăng 4,7%) nhưng chênh lệch độ ẩm ΔM_{max} của thóc sấy rất lớn (38,97% so với 8,96%) và lớp thóc dưới đáy thiết bị thì bị quá sấy (11,41%) còn thóc ở lớp trên thì vẫn rất ướt (50,38%).

Tăng chiều dày lớp hạt lên nữa thì thời gian sấy tăng tương ứng; cụ thể với mẻ 7 nếu tăng chiều dày lớp thóc từ 40,6cm lên 60cm (tăng 47,8%), đảo gió sau 9h thì thời gian sấy tăng 47,7% tức là tăng chiều dày đến 60cm sẽ không lợi về thời gian sấy (đều tăng 47,7%) với chênh lệch độ ẩm $\Delta M_{max} = 6,05%$ (giảm một chút so với 7,76%);

Vi vậy khi tăng chiều dày lớp thóc sấy (50 - 60cm) để tăng năng suất sấy thì phải đảo gió mới đảm bảo chất lượng thóc sấy.

3.2. Thời điểm đảo gió là thông số quan trọng nhất ảnh hưởng đến chất lượng quá trình sấy thóc tinh lớp dày (thể hiện qua ΔM_{max}). Kết quả mô phỏng PDE với thời điểm đảo gió theo điều kiện sấy thực nghiệm CARD được tổng kết trong bảng 4.

Bảng 4. Chênh lệch độ ẩm và thời gian sấy PDE và kết quả thực nghiệm CARD

Kết quả CARD và mô phỏng PDE	Mẻ 4, đảo gió 7h		Mẻ 5, đảo gió 9h		Mẻ 7, đảo gió 9h		Mẻ 8, không đảo gió	
	Kết quả	Sai khác	Kết quả	Sai khác	Kết quả	Sai khác	Kết quả	Sai khác
Thực nghiệm CARD								
Thời gian sấy mẻ, h	10,67	-	11,5	-	11,0	-	7,20	-
Độ ẩm cuối, % d.b.	15,81	-	15,65	-	14,27	-	14,47	-

Mô hình PDE								
Thời gian sấy mẻ, h	10,75	0,75%	12,25	6,25%	11,25	2,27%	7,25	0,69%
Độ ẩm cuối, % d.b.	15,83	0,13%	15,68	0,19%	14,35	0,56%	14,58	0,76%
Chênh lệch ΔM_{max}	6,36%	-	8,96%	-	7,76%	-	2,09%	-

Nghiên cứu thời điểm đảo gió khác nhau khi tăng chiều dày lớp hạt lên 50 ÷ 60cm được tổng kết trong bảng 5 từ đó xác định thời điểm đảo gió tối ưu

Bảng 5. Kết quả giải mô hình PDE khi thời điểm đảo gió thay đổi

Thời điểm đảo gió	5h	6h	7h	8h	9h	10h	Không đảo	
Mẻ 4 mới D=50cm	ΔM_{max}	-	6,01%	3,25%	1,58%	3,54%	6,97%	-
	Tgian sấy	-	16 h	16,33 h	16,5 h	16,5 h	16,25h	-
Mẻ 5 mới D=60cm	ΔM_{max}	11,05%	7,55%	4,49%	2,79%	3,64%	6,01%	-
	Tgian sấy	16,1 h	16,5 h	17 h	17,25h	17,25 h	17,25 h	-
Mẻ 7 mới D=60cm	ΔM_{max}	-	9,37%	6,77%	5,05%	6,05%	8,64%	-
	Tgian sấy	-	16 h	16,25 h	16,25 h	16,25 h	16h	-
Mẻ 8 mới D=50cm	ΔM_{max}	3,59%	2,29%	3,67%	7,37%	-	-	15,01%
	Tgian sấy	12,5 h	12,5 h	12,5 h	11,75 h	-	-	9,25 h

Như vậy, nhờ kết quả chênh lệch độ ẩm các lớp thóc cuối mẻ sấy ΔM_{max} của mô phỏng PDE với các mẻ sấy năng suất cao có chiều dày lớp hạt từ 50cm đến 60cm, thời điểm đảo gió tối ưu được xác định là ở khoảng giữa thời gian sấy/mẻ.

3.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ khí sấy

Nhiệt độ khí sấy có ảnh hưởng mạnh đến thời gian sấy và chất lượng thóc sấy, tăng nhiệt độ khí sấy làm giảm thời gian sấy nhưng làm nhiệt độ hạt T_{gmax} cao hơn nhiệt độ chuyển thái giòn dẻo của thóc (T_{ct} ở lân cận 43°C [6]) sẽ làm thóc bị nứt gãy mạnh. Kết quả mô phỏng PDE theo điều kiện sấy CARD xác định được trường nhiệt độ hạt $T_g(x,t)$ và T_{gmax} được thể hiện trong bảng 6.

Bảng 6. Kết quả xác định T_{gmax} theo mô phỏng pde với điều kiện sấy CARD

Mẻ sấy và Kết quả	Mẻ 4	Mẻ 5	Mẻ 7	Mẻ 8
Nhiệt độ khí sấy, °C	43	43	50 (1h) /43	50 (1h)/43
Thời gian sấy CARD, h	10,67	11,5	11,0	7,20
Thời gian sấy pde, h	10,75	12,25	11,25	7,25
ΔM_{max} d.b.	6,36%	8,96%	7,76%	2,09%
T_{gmax} °C	42,69	42,84	42,96	45,31

Trong thí nghiệm CARD đã tăng nhiệt độ khí sấy ở mẻ 7 và 8 lên 50°C trong giờ đầu tiên, ở mẻ 7 thóc có độ ẩm ban

đầu cao (56,8%) thì nhiệt độ cao nhất của thóc $T_{gmax} = 42,96^\circ\text{C}$ vẫn nhỏ hơn nhiệt độ chuyển thái, nhưng ở mẻ sấy 8 thóc tốt có độ ẩm ban đầu thấp (38%) thì $T_{gmax} = 45,3^\circ\text{C}$ đã vượt qua nhiệt độ chuyển thái. Như vậy, mô phỏng PDE giúp xác định được T_{gmax} và đã chỉ ra giải pháp tăng nhiệt độ khí sấy là nên hay không nên. Đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ khí sấy với mẻ sấy 5 mới có lớp hạt dày 60cm, đảo gió tối ưu sau 8h cho kết quả trong bảng 7.

Bảng 7. Ảnh hưởng của nhiệt độ khí sấy với mẻ sấy 5 mới

Điều kiện sấy	Thóc dày D = 60cm, Đảo gió sau 8h, Độ ẩm đầu $M_{in} = 67\%$		
Nhiệt độ khí sấy, °C	43	50 (1,5h) & 43	47 (2h) & 43
Thời gian sấy, h	17,25	16,75 (-3,9%)	16,92 (-1,9%)
ΔM_{max} %	2,79	3,01	3,3
T_{gmax} °C	42,84	44,41	43,58

Như vậy với sấy thóc tính lớp dày chỉ nên sử dụng khí sấy có nhiệt độ ở lân cận nhiệt độ chuyển thái 43°C, giải pháp tăng nhiệt độ khí sấy để giảm thời gian sấy là không hiệu quả vì thời gian sấy chỉ giảm ít (từ 1,9% đến 3,9%) nhưng lại làm phức tạp vận hành và làm tăng nứt gãy gạo vì nhiệt độ T_{gmax} (44,4 °C; 43,6 °C) vượt qua nhiệt độ chuyển thái của thóc [6].

3.4. Ảnh hưởng của độ ẩm khí sấy

Độ ẩm của khí sấy (là khối hòa trộn với không khí ngoài môi trường) do dung ẩm của không khí quyết định vì không khí là thành phần chủ yếu của khí sấy. Điều kiện thời tiết ẩm/khô ảnh hưởng đến dung ẩm của khí sấy nên ảnh hưởng đến thời gian sấy, thời tiết khô làm thời gian sấy giảm và ngược lại sấy trong mùa mưa thời gian sấy sẽ bị kéo dài.

Bảng 8. Ảnh hưởng của dung ẩm khí sấy

Mẻ sấy & Thời gian sấy, h	Mẻ 4		Mẻ 5		Mẻ 7		Mẻ 8	
	$t_{sấy}$, h	Sai số	$t_{sấy}$, h	Sai số	$t_{sấy}$, h	Sai số	$t_{sấy}$, h	Sai số
Thực nghiệm CARD	10,67	-	11,5	-	11,0	-	7,20	-
Mô hình PDE tháng 7	10,75	0,75%	12,25	6,25%	11,25	2,27%	7,25	0,69%
Mô hình PDE tháng 12	10,53	-1,28%	11,55	0,43%	10,75	-4,55%	7,0	-2,8%
Sai khác $t_{sấy}$ do dung ẩm	0,22	2,06%	0,70	6,09%	0,50	4,55%	0,25	3,47%

Kết quả xác định thời gian sấy của mô hình PDE ở thời tiết mùa mưa tháng 7 (có dung ẩm H = 20g/kgkk) và mùa khô tháng 12 (có dung ẩm H = 16g/kgkk) được tổng hợp trong bảng 8. Chênh lệch thời gian sấy do độ ẩm khí sấy ẩm/khô lớn nhất là 0,7 giờ (của mẻ 5) và nhỏ nhất là 0,22 giờ (của mẻ 4) so với thời gian sấy thực nghiệm

3.5. Ảnh hưởng của tốc độ khí sấy

Tốc độ khí sấy ảnh hưởng đến thời gian sấy và chất lượng qua trình sấy. Trong sấy thóc tính lớp dày khí sấy thổi xuyên qua các lỗ rỗng giữa các hạt, với lưu lượng khí sấy không đổi hạt càng khô lỗ rỗng giữa chúng càng tăng và tốc độ khí sấy thổi qua lớp hạt càng giảm.

Sử dụng mô phỏng PDE khảo sát ảnh hưởng của tốc độ/lưu lượng khí sấy cho mẻ sấy 5 theo điều kiện sấy thực nghiệm CARD (thóc sấy dày 40cm, độ ẩm đầu vào 67%, đảo gió sau 9h, khí hậu khô) được tổng kết trong bảng 9.

Bảng 9. Ảnh hưởng của tốc độ/ lưu lượng khí sấy mẻ sấy 5

Lưu lượng, m ³ /s		0,902 (+10%)	0,82 (100%)	0,738 (-10%)	0,615 (-25%)
Đảo gió 9h	t _{sấy} , h	10,5 (-9,1%)	11,55 (100%)	12,91 (+11,77%)	14,83 (+28,4%)
	ΔM _{max} , %	9,41	13,10	12,99	10,42
Tối ưu 7h	t _{sấy} , h	12,33	13,0	13,67	14,83
	ΔM _{max} , %	10,43	9,32	7,80	4,77

Rõ ràng tốc độ khí sấy có ảnh hưởng rõ rệt đến thời gian sấy, tốc độ khí sấy càng cao thì thời gian sấy càng giảm và ngược lại. Ở điều kiện sấy CARD của mẻ 5 thì khi tốc độ tăng/giảm bao nhiêu % thì thời gian sấy cũng giảm/tăng tương ứng. Kết quả tổng kết trong bảng 9 chỉ ra rằng đảo gió ở điều kiện tối ưu (sau 7 giờ) thì chỉ cần sấy với lưu lượng 0,615m³/s (giảm 25% so với CARD) sẽ được chất lượng thóc sấy đồng đều nhất, dù thời gian sấy bị kéo dài tương ứng (thêm 28,4%,) lên đến 14,83h.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu mô phỏng quá trình sấy thóc tinh lớp dày đã lựa chọn và giải mô hình PDE bằng phương pháp sai phân hữu hạn theo điều kiện sấy thực của dự án CARD, đã phân tích lựa chọn công thức lớp mỏng Agrawal và Singh tích hợp trong mô hình PDE và hiệu chỉnh hệ số truyền nhiệt thể tích và tốc độ sấy theo độ rỗng ε cho kết quả dự đoán thời gian sấy PDE với độ chính xác cao, sai số thời gian sấy lớn nhất chỉ là 6,25% so với kết quả CARD.

Sử dụng mô hình PDE đã hiệu chỉnh đánh giá ảnh hưởng của điều kiện sấy khác nhau đến thời gian sấy, chất lượng thóc sấy của quá trình sấy thóc tinh lớp dày. Tăng chiều dày lớp hạt lên 50cm, tối đa là 60cm, có đảo gió là có lợi về năng suất, thời gian sấy lẫn chất lượng thóc sấy. Mô phỏng PDE đã xác định được thời điểm đảo gió tối ưu là ở giữa thời gian sấy/mẻ cho các mẻ sấy năng suất cao có chiều dày lớp hạt từ 50cm đến 60cm. Các thông số nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ khí sấy có ảnh hưởng khác nhau trong mô hình sấy này. Nhiệt độ khí sấy thích hợp chỉ nên ở lân cận 43°C để tránh gây nứt hạt. Ảnh hưởng của độ ẩm khí sấy trong sấy tinh lớp dày là không lớn, chênh lệch thời gian sấy do độ ẩm khí sấy khô/ẩm lớn nhất là 0,7h. Tốc độ/lưu lượng khí sấy có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình sấy này, tốc độ khí sấy càng cao thì thời gian sấy tương ứng càng giảm và ngược lại.

Mô hình PDE đã hiệu chỉnh có độ chính xác cao được dùng để xác định các điều kiện sấy tối ưu cho quá trình sấy thóc trong thiết bị sấy vi ngang và cần thực nghiệm các điều kiện sấy tối ưu do mô phỏng PDE xác định để hoàn chỉnh nghiên cứu.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông Vận tải trong đề tài mã số T2016 - CK - 49

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phan Hiếu Hiền, và cs., 2007. Báo cáo Đề án CARD – MS6 Phần 3 Sấy vi ngang. Trường Đại học Nông lâm Tp Hồ Chí Minh.
- [2]. Đỗ Thái Sơn, 2016. Hiệu chỉnh công thức sấy thóc lớp mỏng trong mô hình sấy thóc tinh lớp dày. Tạp chí Năng lượng Nhiệt, N° 127 - 01/2016
- [3]. Đỗ Thái Sơn, 2016. Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp hạt đến động học quá trình sấy thóc tinh lớp dày. Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, N° 51 - 04/2016
- [4]. Đỗ Thái Sơn, 2018. Nghiên cứu ảnh hưởng của thời điểm đảo gió đến quá trình sấy thóc trong thiết bị sấy vi ngang. Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, N° 63 - 04/2018
- [5]. Đỗ Thái Sơn, 2019. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số tác nhân sấy đến quá trình sấy thóc trong thiết bị sấy vi ngang. Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, N° 69 - 04/2019
- [6]. Cnossen A.G., et al., 2001. An application of glass transition temperature to explain rice kernel fissure occurrence during the drying process. Drying Technology, 19:8, 1661-1682.
- [7]. Jayas D.S., Cenkowski S., Pabis S. and Muir W.E., 1991. Review of thin-layer drying and wetting equations. Drying Technology, 9:3, 551-588.
- [8]. Cenkowski S., Jayas D.S. and Pabis S., 1993. Deep-bed grain drying - A review of particular theories. Drying Technology, 11:7, 1553-1582.
- [9]. Hacıhafızoglu O., Cihan A., Kahveci K., 2008. Mathematical modeling of drying of thin layer rough rice. Food and Bioproducts Processing 86.
- [10]. Reddy B.S., Chakraverty A., 2004. Physical Properties of Raw and Parboiled Paddy. Biosystems Engineering 88(4).
- [11]. Srivastava V.K., John J., 2002. Deep bed grain drying modeling. Energy Conversion and Management 43,.

AUTHOR INFORMATION

Do Thai Son

Faculty of Mechanical, University of Transport and Communication