

MÔ HÌNH MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH SẤY QUY CHUẨN GỖ KEO TAI TƯỢNG (*Acacia mangium* Willd.)

Hà Tiến Mạnh¹, Phạm Văn Chương², Bùi Duy Ngọc¹, Trần Đăng Sáng¹

¹ Viện Nghiên cứu Công nghiệp rừng

² Trường Đại học Lâm nghiệp

TÓM TẮT

Một mô hình toán học đủ mạnh đã được xây dựng để mô phỏng quá trình vận chuyển ẩm và vận chuyển nhiệt khí sấy quy chuẩn gỗ Keo tai tượng (*Acacia mangium* Willd.). Mô hình này sử dụng nền tảng lập trình của mô hình Transpore hai chiều với các dữ liệu thông số môi trường sấy nhập vào tương tự như mẻ sấy thực nghiệm để so sánh đánh giá hiệu lực dự đoán của mô hình. Các đặc tính của gỗ Keo tai tượng bao gồm khối lượng riêng, độ rỗng, điểm bão hòa thứ gỗ (FSP), hệ số thấm dẫn, hệ số khuếch tán là nhóm dữ liệu nhập vào thứ hai cho mô hình đã được xác định một cách bài bản và tỉ mỉ trong nghiên cứu khác làm tính chính xác khi dự đoán tổng thời gian sấy của mô hình là tương đối cao (sai số 9,7% khi so sánh với mẻ sấy thực nghiệm). Kết quả mô phỏng liên tục theo suốt thời gian sấy của mô hình được thể hiện trên 4 đồ thị gồm 2 đồ thị lưới 3D mô phỏng diễn biến ẩm và nhiệt tại tất cả các vị trí theo 2 mặt cắt ngang và dọc của thanh gỗ, 1 đồ thị 2D mô phỏng độ ẩm bề mặt và độ ẩm trung bình của thanh gỗ, 1 đồ thị 2D mô phỏng nhiệt độ bề mặt và trong tâm thanh gỗ. Kết quả so sánh 2 đường diễn biến giảm độ ẩm (MC) của mẻ sấy thử nghiệm và mô hình cho thấy sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) tổng thể cho cả quá trình sấy từ MC ban đầu đến MC cuối cùng được tính toán là tương đối lớn (20,82%). Giai đoạn sấy từ khi gỗ còn tươi về FSP, sự sai khác này là rất lớn, trong khi giai đoạn sấy tiếp theo, 2 đường đồ thị này là rất trùng khớp nhau. Với những kết quả bước đầu đạt được, mô hình này là một công cụ tốt giúp dự đoán và mô phỏng quá trình sấy trong nghiên cứu lựa chọn chế độ sấy cho các loại gỗ lá rộng.

Từ khóa: Keo tai tượng, mô hình toán học, mô phỏng quá trình sấy

The conventional drying model applied to *Acacia mangium* Willd. timber

A robust mathematical model was built to simulate the heat and mass transfer process during conventional drying of the *Acacia mangium* Willd. timber. This model used codes of the two-dimensions Transpore model with the same boundary condition data as the experimental drying batch to evaluate the predictive validity of the model. The properties of *Acacia mangium* Willd. wood which were methodically and meticulously measured in other studies including basic density, porosity, fibre saturation point (FSP), permeability and diffusion was the second input data for the model. This made the prediction of the total drying time with high accuracy (9.7% error when compared with the experimental drying batch). Simulation results during drying time of the model were shown on 4 graphs. In which, two 3D grid graphs simulated moisture and heat changes at all positions in the transverse and longitudinal sections, one 2D graph simulated the surface and averaged moisture, one 2D graph simulated the

Keywords: *Acacia mangium* Willd., mathematical model, simulation drying

surface and core temperature of the wood. The comparison between the simulated and experimental averaged MC curves showed that the root mean square error (RMSE) for the whole drying process from the initial to the final MC was relatively large (20.82%). This difference was very large at above FSP, while these two curve were very fit at below FSP. With the results obtained, this model was a good tool to help predict and simulate the drying process in the optimise drying schedules for hardwood.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự thành công của việc kiểm soát khuyết tật xảy ra trong suốt quá trình sấy gỗ được quyết định bởi khả năng duy trì sự cân bằng giữa tốc độ bay hơi ẩm từ bề mặt ra môi trường sấy và tốc độ vận chuyển ẩm từ tâm ra bề mặt gỗ. Sấy gỗ trong lò sấy là cách kiểm soát thành công nhất được ghi nhận (Redman *et al.*, 2017). Sử dụng lò sấy gỗ quy chuẩn để kiểm soát nhiệt độ, độ ẩm và tốc độ tuần hoàn gió là phương pháp sấy căn bản, hiệu quả và có tính kinh tế nhất đang được sử dụng phổ biến trong sấy gỗ hiện nay ở Việt Nam. Các chế độ sấy tối ưu cho từng đối tượng gỗ đã được đưa ra thông qua việc nghiên cứu quy hoạch các mẻ sấy thí nghiệm.

Mô hình toán học là một công cụ hiệu quả, sử dụng ngôn ngữ toán học để hiểu rõ hơn về cơ chế của quá trình sấy gỗ và để tối ưu hóa chế độ sấy sao cho thời gian sấy và khuyết tật là tối thiểu. Mô hình toán học giúp cho việc tối ưu hóa chế độ sấy trở nên đơn giản, nhanh chóng và hiệu quả khi so sánh với phương pháp thực nghiệm được thực hiện bởi rất nhiều mẻ sấy lặp lại, đòi hỏi thời gian và chi phí lớn.

Trước đây, công việc xây dựng mô hình toán học trong sấy gỗ đã được tiến hành đối với các loại gỗ lá kim nhiều hơn gỗ lá rộng do tầm quan trọng về mặt thương mại và tính đồng nhất tương đối giữa các loại gỗ (Salin, 1991; Perré, Turner, 1999; Pang, 2007). Mô hình xác định chính xác nhất cho đến nay bao gồm các mô tả nhiều cấp độ và nhiều đặc tính về các

hiện tượng sấy đối với gỗ lá kim. Một trong các mô hình đó gọi là Transpore hai chiều đã được Perré và Turner (1999) phát triển để dự đoán quá trình sấy gỗ lá kim, các vật liệu xốp khác như bê tông và các loại gỗ lá rộng. Redman và đồng tác giả (2017) đã sử dụng mô hình Transpore hai chiều để mô phỏng quá trình chuyển khối trong suốt quá trình sấy quy chuẩn và sấy chân không cho 4 loại gỗ lá rộng của Úc.

Keo tai tượng là cây gỗ rừng trồng chủ lực, cung cấp nguyên liệu cho ngành chế biến gỗ xẻ ở Việt Nam đã được lựa chọn để nghiên cứu. Đây là loại gỗ rừng trồng khó sấy và có nhiều khuyết tật sấy làm cản trở đến năng suất và lợi nhuận của quá trình chế biến. Với mục đích đưa ra một cách tiếp cận mới và hiệu quả bằng cách sử dụng mô hình toán học để tối ưu hóa chế độ sấy cho lò sấy hơi nước quy chuẩn đang phổ biến tại Việt Nam, nghiên cứu này đã được thực hiện trên cơ sở ứng dụng nền tảng lập trình phần mềm Matlab chạy mô hình Transpore hai chiều (Redman *et al.*, 2017) để mô phỏng quá trình sấy gỗ Keo tai tượng trong lò sấy quy chuẩn. Kết quả mô phỏng sẽ được đối chiếu với kết quả sấy thực nghiệm để đánh giá tính chính xác của mô hình dự đoán diễn biến quá trình sấy.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Nghiên cứu này kế thừa kết quả của mẻ sấy thực nghiệm với dốc sấy $U = 2 - 2,5$ trong

nguyên cứu của Hà Tiến Mạnh và đồng tác giả (2022) để đối chiếu với mô hình và kế thừa các đặc tính gỗ Keo tai tượng đã được xác định (Hà Tiến Mạnh *et al.*, 2021; H. T. Manh *et al.*, 2022) để làm dữ liệu đầu vào cho mô hình sấy.

Vật liệu trong các nghiên cứu về sấy thực nghiệm là gỗ Keo tai tượng 9 năm tuổi, được

khai thác tại thôn Thanh Cao, xã Ngọc Thanh, thành phố Phúc Yên, tỉnh Vĩnh Phúc, có kích thước dài × rộng × dày = 900 × 80 × 25 mm.

Các đặc tính gỗ Keo tai tượng đã được xác định để làm dữ liệu cho mô hình như bảng 1.

Bảng 1. Các đặc tính gỗ Keo tai tượng đã xác định

Đặc tính gỗ	Giá trị đã đo	Mã hóa trong Matlab
Độ ẩm ban đầu (%)	152,53	Xbar2ph
Điểm bão hòa thứ gỗ FSP (%)	25,28	FSP
Khối lượng riêng cơ bản (kg/m ³)	511	rho_wood
Tổng độ rỗng tế bào (%)	47,15	phit
Hệ số đẳng nhiệt trao đổi ẩm	1	C1iso/C2iso. Đây là giá trị giả định
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều dọc thớ (10 ⁻¹⁵ m ²)	2184,82	KgL
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều xuyên tâm (10 ⁻¹⁵ m ²)	31,18	KgR
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều tiếp tuyến (10 ⁻¹⁵ m ²)	29,71	KgT
Hệ số thấm dẫn lỏng theo chiều dọc thớ (10 ⁻¹⁵ m ²)	539,11	KwL
Hệ số thấm dẫn lỏng theo chiều xuyên tâm (10 ⁻¹⁵ m ²)	1,36	KwR
Hệ số thấm dẫn lỏng theo chiều tiếp tuyến (10 ⁻¹⁵ m ²)	0,40	KwT
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều dọc thớ (10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)	13,73	DbL
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều xuyên tâm (10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)	1,33	DbR
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều tiếp tuyến (10 ⁻¹⁰ m ² s ⁻¹)	0,52	DbT

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Mô hình Transpore hai chiều của Redman và đồng tác giả (2017) đã được ứng dụng để tiến hành nội dung nghiên cứu này.

Các dữ liệu nhập vào cho mô hình Transpore hai chiều bao gồm hai phần là đặc tính gỗ Keo tai tượng và thông số môi trường sấy. Các đặc tính gỗ ở bảng trên được sử dụng làm dữ liệu đầu vào của mô hình trong nghiên cứu này. Các thông số môi trường sấy là các dữ liệu thứ hai được đưa vào mô hình. Khi nghiên cứu về các chế độ sấy với các thông số sấy khác nhau thì chỉ cần chỉnh sửa các mã hóa (code) trong các tệp dữ liệu lập trình của mô hình.

Dưới đây là mô tả tóm tắt về phương pháp sử dụng mô hình Transpore hai chiều mà Redman và đồng tác giả (2017) đã thiết lập và được chỉnh sửa để mô phỏng quá trình sấy gỗ Keo tai tượng trong chuyên đề này.

Các phương trình bảo toàn được sử dụng làm các thuật toán trong mô hình:

Sự bảo toàn chất lỏng, hơi nước, chất khí và entanpi cho phép suy ra một tập hợp các phương trình điều khiển sự vận chuyển trong môi trường xốp và nó được đưa vào để lập trình cho mô hình.

- Phương trình bảo toàn chất lỏng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_w \rho_w + \varepsilon_g \rho + \bar{\rho}_b) + \nabla \cdot (\rho_w \bar{v}_w + \rho_v \bar{v} + \bar{\rho}_b \bar{v}_b) = \nabla \cdot (\rho_g \bar{D}_{\text{eff}} \nabla \omega_v) \quad (1)$$

- Phương trình bảo toàn năng lượng:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_w \rho_w h_w + \varepsilon_g (\rho_v h_v + \rho_a h_a) + \bar{\rho}_b \bar{h}_b + \rho_0 h_s - \varepsilon_g P_g) \\ + \nabla \cdot (\rho_w h_w \bar{v}_w + (\rho_v h_v + \rho_a h_a) \bar{v}_g + h_b \bar{\rho}_b \bar{v}_b) \\ = \nabla \cdot (\rho_g \bar{D}_{\text{eff}} (h_v \nabla \omega_v + h_a \nabla \omega_a) + \bar{K}_{\text{eff}} \nabla T) + \Phi \end{aligned} \quad (2)$$

- Phương trình bảo toàn chất khí:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_a) + \nabla \cdot (\rho_a \bar{v}_g) = \nabla \cdot (\rho_g \bar{D}_{\text{eff}} \nabla \omega_v) \quad (3)$$

- Vận tốc của pha lỏng và pha khí được đưa ra bởi Định luật Darcy:

$$\bar{v}_l = -\frac{\bar{K}_l k_l}{\mu_l} \nabla \varphi_l \quad \nabla \varphi_l = \nabla P_l - \rho_l g \nabla \chi \quad (4)$$

Trong đó: ε - tỷ số thể tích; ω - tỷ số khối lượng; ρ - khối lượng riêng (kg/m^3); v - vector tốc độ khối (m/s); ν - tỷ số Poisson; \bar{D} - ten xơ khuếch tán (m^2/s); \bar{K} - ten xơ thấm dẫn tuyệt đối (m^2); h - hệ số truyền nhiệt ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$); P - áp suất (Pa); T - nhiệt độ (K); ϕ - độ rỗng (m^3/m^3); \bar{k} - ten xơ thấm dẫn trong đối (m^2); μ - độ nhớt động lực học của khí ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); φ - điện áp pha; χ - vô hướng theo chiều sâu;

Và các chỉ số dưới trong công thức: w - pha lỏng; v - hơi nước; g - pha khí; l - chất lỏng, $l = w, g, b$ - nước liên kết; s - pha rắn; a - không khí; 0 - gỗ; eff - đặc tính của gỗ có ảnh hưởng.

Tất cả các điều kiện biên, điều kiện ban đầu (theo ngôn ngữ lập trình) cũng được Redman tính toán và đưa vào mô hình. Chi tiết các phương trình bảo toàn và các điều kiện sử dụng trong mô hình đã được Redman và đồng tác giả (2017) công bố.

Nước liên kết và nước tự do được phân biệt rõ ràng bởi công thức:

$$X = X_w + X_b \equiv \frac{\varepsilon_w \rho_w}{\rho_o} + \min(X_{\text{fsp}}, X) \quad (5)$$

Trong đó: X - độ ẩm gỗ (kg/kg); $\varepsilon_w = \phi S_w$,
 $\varepsilon_g = \phi(1 - S_w)$, $\varepsilon_w + \varepsilon_g = \phi$;
 S - bão hòa thể tích, $S_w = \frac{X_w}{X_{w \text{ max}}}$

Cả pha lỏng và hơi nước đều tồn tại suốt quá trình sấy. Áp lực pha lỏng luôn thấp hơn áp lực pha khí một khoảng đúng bằng áp lực thấm dẫn (P_c),

$$P_c = P_g - P_w$$

Trong đó: $P_g = P_a + P_v$

Độ ẩm của gỗ tại điểm FSP phụ thuộc vào nhiệt độ sấy T theo công thức sau:

$$X_{\text{FSPT}} = X_{\text{FSP}} - \frac{0,1 X_{\text{FSP}} T}{32,5} \quad (6)$$

Các điều kiện môi trường sấy được giả định bằng các công thức sau:

$$J_w \times \hat{n} = k_m c M_v \ln \left(\frac{1 - x_\infty}{1 - x_v} \right) \quad (7)$$

$$J_c \times \hat{n} = q(T - T_\infty) + h_v k_m c M_v \ln \left(\frac{1 - x_\infty}{1 - x_v} \right) \quad (8)$$

Trong đó: J_w, J_e là thông lượng của tổng độ ẩm và tổng entanpi ở bề mặt gỗ sấy; k_m là hệ số chuyển khối (m/s); c là nồng độ mol (mol/m^3); M_v là khối lượng mol của hơi nước (kg/mol); q là hệ số truyền nhiệt bên ngoài gỗ ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); h_v là hệ số truyền nhiệt của hơi nước ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$); x_∞, x_v là tỷ lệ mol của hơi

nước ở ngoài và trên bề mặt gỗ; T_∞ là nhiệt độ sấy bên ngoài bề mặt gỗ.

Các thông số sấy đưa vào mô hình:

Các thông số môi trường sấy, độ ẩm ban đầu và độ ẩm sau khi sấy chế độ sấy mềm, dốc sấy $U = 2 - 2,5$ ở bảng 2 dưới đây đã được sử dụng để sửa chữa các mã hóa lập trình.

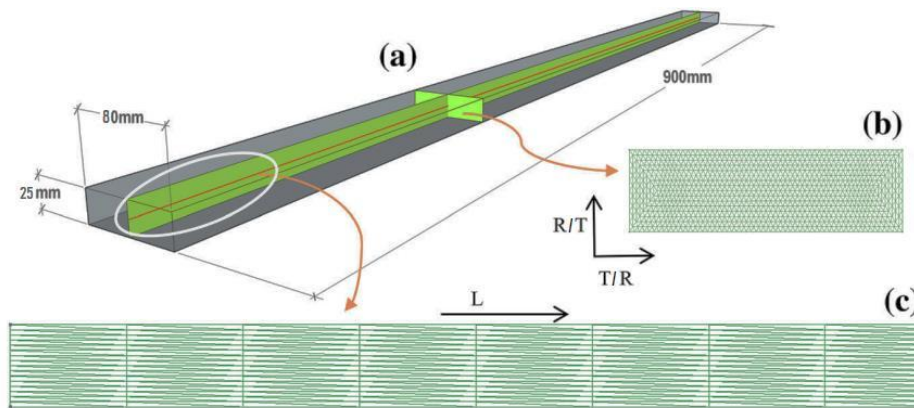
Bảng 2. Các thông số môi trường sấy đưa vào mô hình

MC _a (%)	T _k (°C)	T _u (°C)	RH (%)
> 60	40	39,4	98
60 - 40	40	39,2	92
40 - 30	40	36,5	80
30 - 20	60	48,8	54
20 - 15	60	40,5	30
15 - 12	60	40,5	30

Phương pháp giải các phương trình vi phân:

Quy trình số được sử dụng để giải quyết mô hình sấy trong nghiên cứu này. Các phương trình bảo toàn cần được giải trong các bước lặp phi tuyến cho mọi sự thay đổi môi trường sấy bên ngoài. Phương pháp thể tích hữu hạn được sử dụng để giải các phương trình vi phân và được thực hiện trên mỗi mắt lưới tam giác trong một miền hình chữ nhật. Các mắt lưới được tạo ra trên mặt cắt ngang và mặt cắt dọc của thanh gỗ.

Lưới được sử dụng cho các mô phỏng trên mặt cắt ngang: xuyên tâm (R) - tiếp tuyến (T) bao gồm 7.428 phần tử hình tam giác và trên mặt cắt dọc: xuyên tâm/tiếp tuyến - dọc thớ (L) bao gồm 6.404 phần tử hình tam giác. Các lưới được vẽ trên phần mềm Gmsh - 2.4.2 và được trích xuất dữ liệu sang phần mềm Matlab phiên bản R2015a để chạy mô hình. Sử dụng kích thước thanh gỗ thực tế làm kích thước của hình lưới. Kích thước rộng × dày × dài của thanh gỗ là 80 × 25 × 900 mm.



Hình 1. Sơ đồ thanh gỗ (a) được mô phỏng dưới dạng lưới của mặt cắt ngang (b) và mặt cắt dọc (c)

Phương pháp kiểm tra độ nhạy của mô hình:

Việc phân tích độ nhạy (sensitivity analysis) của mô hình với từng dữ liệu đầu vào là cần thiết khi xây dựng một mô hình toán học và đã được Redman và đồng tác giả (2017) thực hiện bằng kỹ thuật OAT (mỗi lần một nhân tố) cho mô hình sấy này. Nghiên cứu ở đây sẽ

kế thừa các kết quả đó. Kết quả cho thấy khối lượng riêng là yếu tố nhạy nhất tức là có tác động lớn nhất đến sai số của độ ẩm MC cuối cùng khi chạy mô hình với cùng một thời gian sấy. Các yếu tố có mức độ nhạy tiếp theo được trình bày theo thứ tự giảm dần trong bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Thứ tự giảm dần độ nhạy của các yếu tố tác động đến mô hình

Các yếu tố	Thứ tự giảm dần của độ nhạy
Khối lượng riêng cơ bản	1
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều xuyên tâm	2
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều xuyên tâm	3
Hệ số đẳng nhiệt trao đổi ẩm C_2	4
Điểm bão hòa hơi nước FSP	5
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều tiếp tuyến	6
Độ ẩm ban đầu	7
Hệ số đẳng nhiệt trao đổi ẩm C_1	8
Hệ số thấm dẫn khí theo chiều dọc thớ	9
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều tiếp tuyến	10
Hệ số khuếch tán ẩm theo chiều dọc thớ	11
Tổng độ rỗng tế bào	12

Phương pháp mô phỏng của mô hình:

Sự mô phỏng được thực hiện bằng bộ vi xử lý Intel Pentium sử dụng phần mềm Matlab phiên bản R2015a. Thời gian mỗi lần chạy mô phỏng của mô hình tùy thuộc vào mật cắt ngang hay dọc và ván xẻ xuyên tâm hay tiếp tuyến, trung bình khoảng 40 phút. Thời gian chạy mô hình có thể giảm xuống còn 4,5 phút nếu dùng Intel QuadCore i7860 và MATLAB phiên bản 2011a.

Độ chính xác của mô hình được xác định bằng cách tính toán sai số của MC đầu ra giữa kết quả thực nghiệm với mô hình. Tính toán sai số bằng cách sử dụng sai số bình phương trung bình gốc (RMSE). RMSE được tính toán bằng công thức sau (Redman *et al.*, 2017):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

Trong đó:

- \hat{y}_t - Giá trị đầu ra MC của mô hình ở thời điểm t
- y_t - Giá trị MC và nhiệt độ sấy của mẻ sấy thực nghiệm ở thời điểm t
- n - Số điểm dữ liệu rời rạc

Độ chính xác của mô hình mô phỏng thời gian sấy đến độ ẩm MC 12% được tính bằng công thức (A. L. Redman *et al.*, 2017):

$$E_{dt} = \frac{|t_e - t_s|}{t_e} \times 100 \quad (2)$$

Trong đó:

E_{dt} - Sai số thời gian sấy giữa dự đoán của mô hình và thực nghiệm (%)

t_e - Thời gian sấy thực nghiệm (giờ)

t_s - Thời gian sấy dự đoán của mô hình (giờ)

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

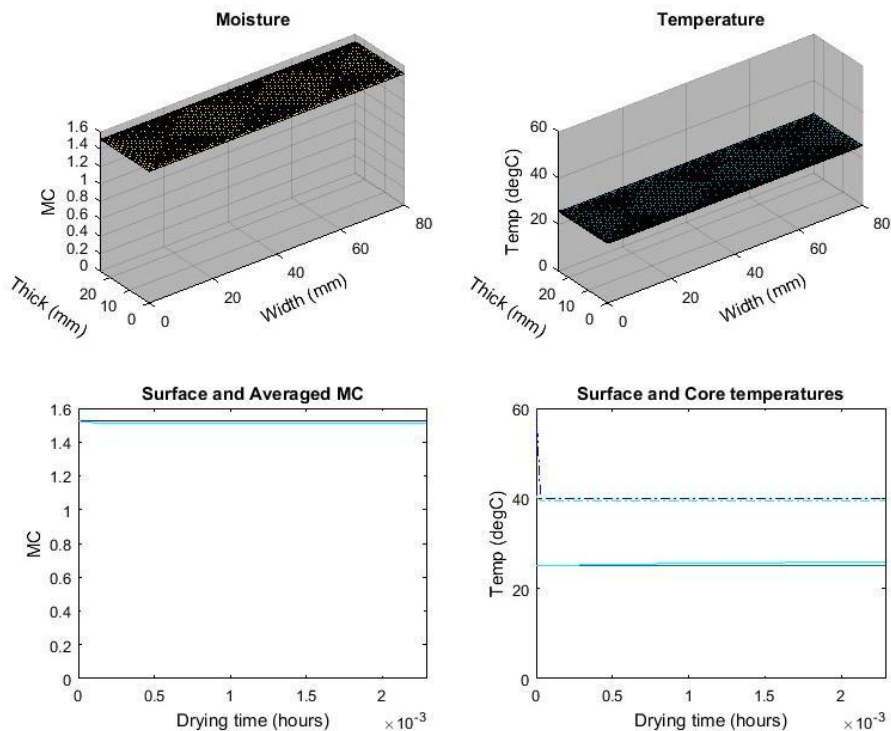
3.1. Sự mô phỏng quá trình sấy gỗ Keo tai tượng trong lò sấy quy chuẩn

Mô hình toán học Transpore hai chiều sau khi chạy trên phần mềm Matlab 2015a đã mô phỏng các trường diễn biến thay đổi hai chiều MC và nhiệt độ gỗ theo thời gian sấy trên các đồ thị độ ẩm và nhiệt độ. Các hình ảnh dưới đây được trích xuất từ quá trình chạy mô hình cho mô phỏng về trường MC và nhiệt độ sau 0, 63, 202 và 305 giờ sấy. Vì hệ số thấm dẫn của gỗ Keo tai tượng tương đối cao nên tốc độ sấy từ khi độ ẩm trung bình ban đầu 152,53% về FSP (25,28%) chỉ mất 202 giờ. Tiếp tục sấy dưới FSP về MC cuối 12%, động lực chủ yếu là sự khuếch tán, để độ ẩm gỗ giảm hơn 13%, thời gian mất khoảng 100 giờ. Đầu ra của mô hình đã mô phỏng được MC trung bình và MC bề mặt gỗ, nhiệt độ bề mặt và nhiệt độ trong tâm của gỗ là biểu hiện rõ ràng giúp ích rất nhiều cho các nghiên cứu khảo sát các chế độ

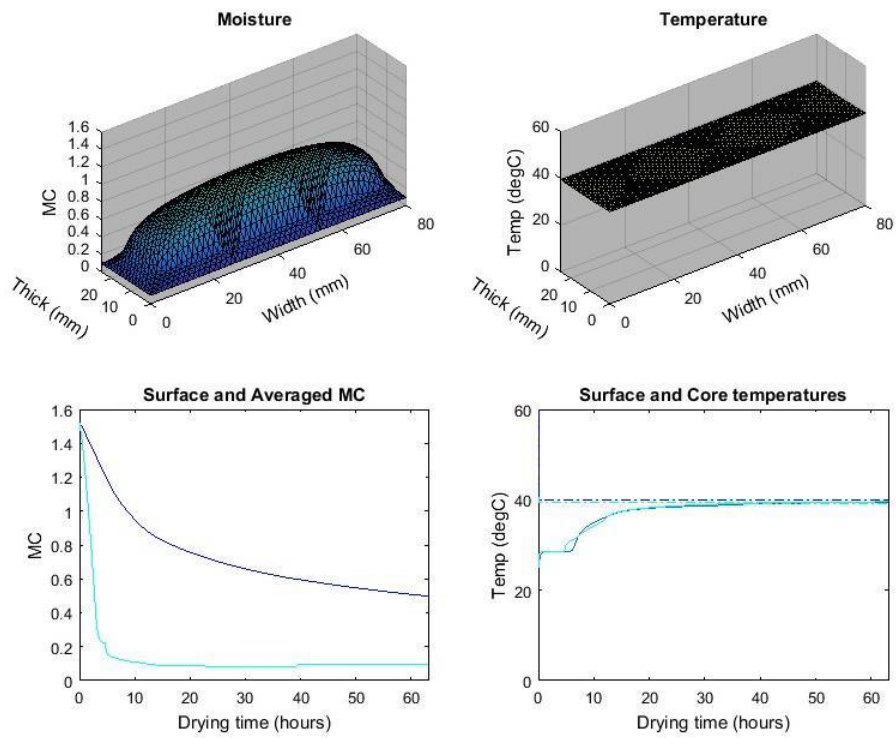
sấy gỗ mà không cần tiêu tốn nhiều công sức cho việc thực nghiệm.

Hình 2 mô phỏng thời điểm bắt đầu sấy khi độ ẩm trung bình của gỗ là 152,53%, nhiệt độ gỗ bằng với nhiệt độ môi trường sấy (26,21°C), chưa có sự chênh lệch độ ẩm và nhiệt độ giữa bề mặt và trong tâm gỗ. Cả 2 lưới của trường MC và nhiệt độ đều đang duỗi phẳng trên mặt cắt ngang và có màu sắc tương đồng tức là chưa có sự khác biệt về độ ẩm và nhiệt độ giữa các vị trí trên mặt cắt ngang tấm gỗ.

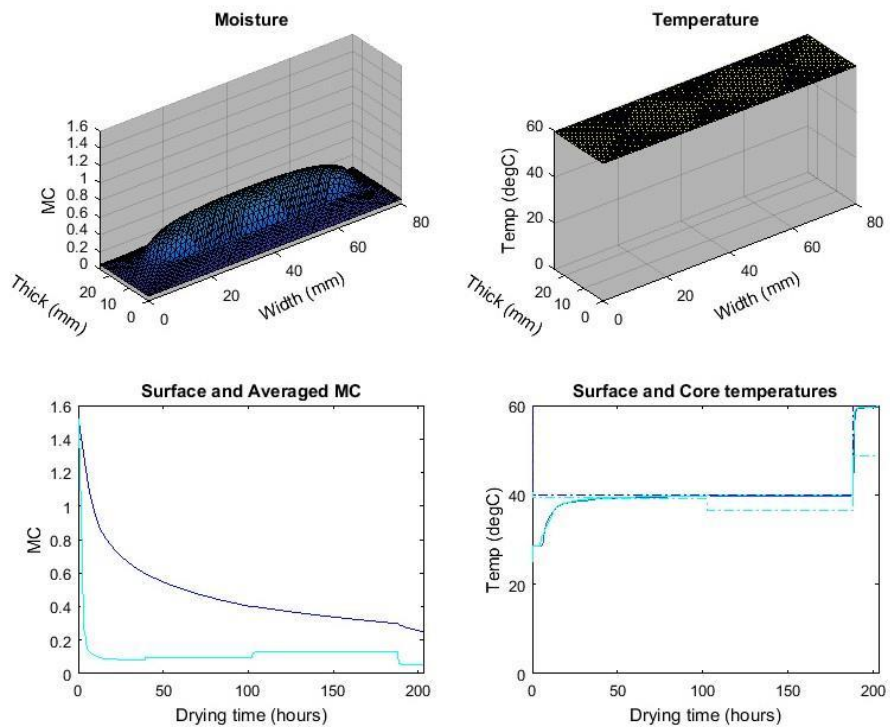
Hình 3 mô phỏng các dữ liệu độ ẩm và nhiệt độ khi sấy 63 giờ. Khi đó độ ẩm trung bình của gỗ đạt 50%, nhiệt độ bề mặt và trong tâm gỗ không có sự chênh lệch đạt xấp xỉ với mức cài đặt môi trường sấy giai đoạn đầu là 40 °C. Lưới của trường MC đã có sự thay đổi hình dạng chuyển sang mái vòm cho thấy sự chênh lệch MC rõ rệt trên mặt cắt ngang. Ở các vị trí trên bề mặt thanh gỗ có màu xanh dương thể hiện MC là thấp nhất, trong tâm có màu vàng thể hiện MC vẫn còn tương đối cao.



Hình 2. Các đồ thị trích xuất từ quá trình mô hình mô phỏng diễn biến MC và nhiệt độ trên mặt cắt ngang thanh gỗ ở thời điểm bắt đầu sấy



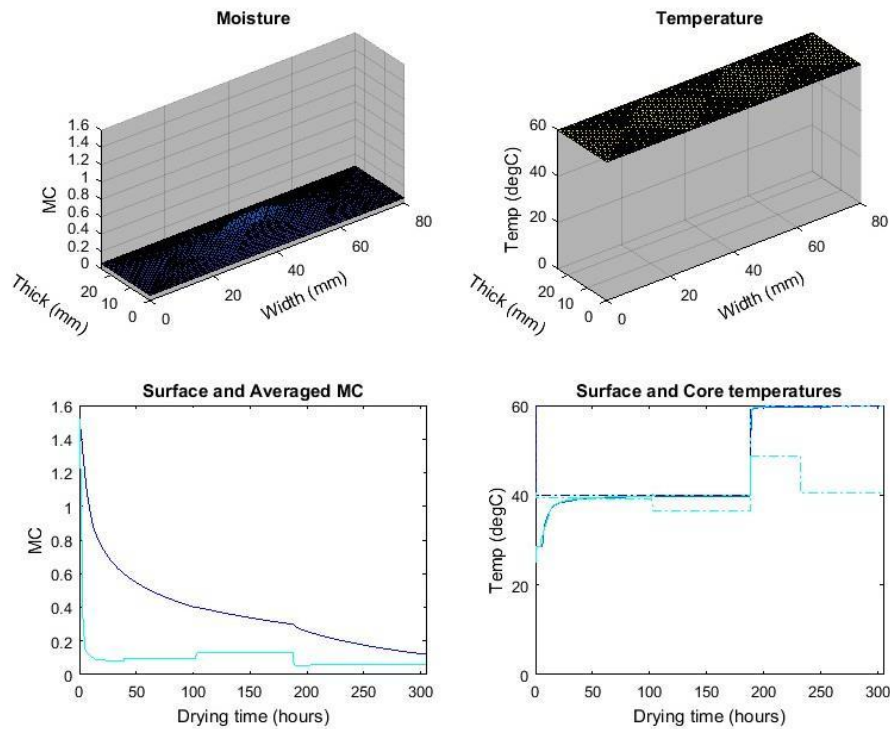
Hình 3. Các đồ thị trích xuất từ quá trình mô phỏng diễn biến MC và nhiệt độ trên mặt cắt ngang thanh gỗ ở thời điểm sau 63 giờ sấy



Hình 4. Các đồ thị trích xuất từ quá trình mô phỏng diễn biến MC và nhiệt độ trên mặt cắt ngang thanh gỗ ở thời điểm sau 202 giờ sấy

Hình 4 mô phỏng các dữ liệu độ ẩm và nhiệt độ ở thời điểm 202 giờ với độ ẩm trung bình của gỗ đạt điểm FSP (25,28%), nhiệt độ bề mặt và trong tâm gỗ không có sự chênh lệch đạt mức cài đặt môi trường sấy giai đoạn sau là 60°C. Lưới MC có hình mái vòm thu nhỏ dần lại cho thấy sự chênh lệch không còn lớn (MC trong tâm đạt dưới 40%, MC bề mặt đạt 7 - 8%) và màu sắc trong tâm đã không còn đen, vàng mà chỉ còn một phần màu xanh lá.

Đến hình 5 lưới MC gần như duỗi phẳng (chỉ còn một khoảng rất nhỏ nhô lên ở giữa) cho thấy xu hướng chênh lệch MC trên mặt cắt ngang có xu hướng giảm rõ rệt trong suốt quá trình sấy. Hình 5 mô phỏng thời điểm sấy cuối cùng (305 giờ), gỗ đạt độ ẩm trung bình 12%. Lưới nhiệt độ cũng không thể hiện sự chênh lệch trong tâm và bề mặt thanh gỗ và vẫn đang duy trì ở 60°C.



Hình 5. Các đồ thị trích xuất từ quá trình mô hình mô phỏng diễn biến MC và nhiệt độ trên mặt cắt ngang thanh gỗ ở thời điểm sau 305 giờ sấy

Ghi chú: các ký hiệu trên các hình 2, 3, 4, 5 gồm Moisture là độ ẩm tại các vị trí trên mặt cắt ngang; Temperature là nhiệt độ tại các vị trí trên mặt cắt ngang; Tên trục đồ thị: MC - độ ẩm ($\times 100\%$), Thick - chiều dày gỗ, Width - chiều rộng gỗ, Temp - nhiệt độ (độ C), Drying time - thời gian sấy (giờ); Surface MC là độ ẩm bề mặt gỗ - đường liền xanh nhạt; Averaged MC là độ ẩm trung bình gỗ - đường liền xanh dương; Surface temperature là nhiệt độ bề mặt - đường liền xanh nhạt; core

temperature là nhiệt độ trong tâm - đường liền xanh đậm; Nhiệt độ khô cài đặt - nét đứt xanh đậm; Nhiệt độ ướt cài đặt - nét đứt xanh nhạt; màu sắc lưới MC thể hiện giá trị giảm dần của độ ẩm theo thứ tự màu đen, vàng, xanh lá và xanh dương.

3.2. Kết quả đánh giá mô hình

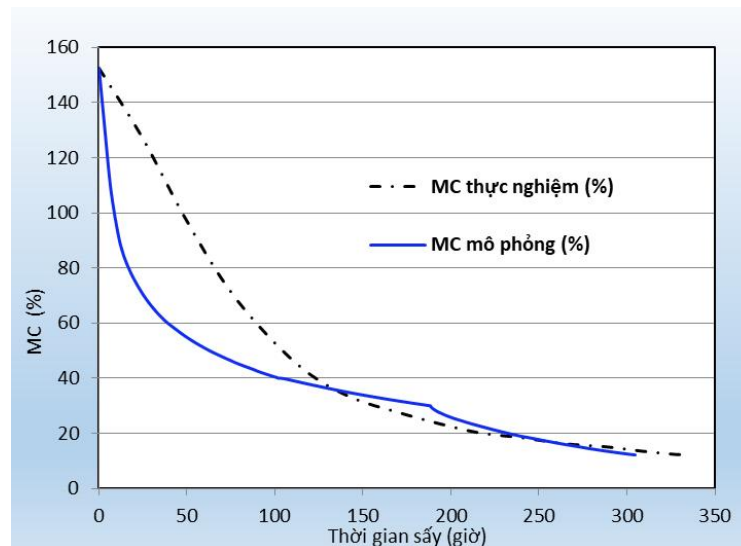
Khi so sánh với kết quả sấy thực nghiệm, thời gian sấy mô phỏng trên cả mặt cắt ngang và mặt cắt dọc đều nhanh hơn. Hình 6 thể hiện

hai đường đồ thị thời gian sấy khi mô phỏng lý thuyết trên mặt cắt ngang và khi sấy thực nghiệm. Đồ thị này minh họa cho độ chính xác của mô hình so với thực nghiệm.

Ở giai đoạn sấy từ khi độ ẩm còn tươi về FSP, hai đường đồ thị này có sự lệch nhau khá lớn, sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) là 25,95% độ ẩm. Nguyên nhân có thể do ở giai đoạn này tốc độ thoát ẩm quá nhanh làm cho việc kiểm tra độ ẩm mẫu trong mẻ sấy thực nghiệm có thể gặp sai số lớn. Bên cạnh đó, việc đo hệ số thấm dẫn lỏng và khí của gỗ có thể cần được kiểm tra mở rộng thêm để nâng cao độ chính xác hơn cho mô hình mô phỏng giai đoạn này với động lực thoát ẩm chủ yếu là thấm dẫn.

Ngược lại, ở giai đoạn dưới điểm FSP, hai đường đồ thị này rất trùng khớp nhau cho thấy độ chính xác của mô hình là rất cao, RMSE chỉ 1,48% độ ẩm. Tổng thể cả quá trình sấy từ MC ban đầu đến MC cuối cùng có RMSE được tính toán là 20,82% độ ẩm. Sai số này sẽ được khuyến nghị để giảm xuống bằng cách tiếp tục nghiên cứu thêm cả về các dữ liệu đầu vào của mô hình, cả về quá trình thực nghiệm.

Kết quả tính toán E_{dt} là 9,37% cho thấy sai số giữa dự đoán của mô hình với thực tế thực nghiệm về tổng thời gian sấy là thấp. Mặc dù chỉ số RMSE chưa tốt nhưng chỉ số E_{dt} này cho thấy sức mạnh phỏng đoán đầu ra cho thời gian sấy của mô hình đáng được ghi nhận và ứng dụng rộng rãi.



Hình 6. So sánh diễn biến giảm MC giữa mô hình lý thuyết và thực nghiệm

IV. KẾT LUẬN

- Nghiên cứu này đã xây dựng được mô hình toán học mô phỏng quá trình vận chuyển ẩm và trao đổi nhiệt khi sấy gỗ Keo tai tượng trong lò sấy quy chuẩn. Với đa dạng đặc tính của nguyên liệu đã đo được một cách tỉ mỉ, chính xác ở nghiên cứu trước đây làm cơ sở đầu vào nên đầu ra của mô hình cho kết quả dự đoán tổng thời gian sấy tương đối chính xác so với thực nghiệm (sai số 9,7%).

- Chỉ trong thời gian ngắn, khoảng 40 phút để chạy mô hình và có thể rút ngắn hơn với những loại máy tính có cấu hình và bộ vi xử lý cao thì các dữ liệu mô phỏng bằng hình ảnh với nhiều thông tin như độ ẩm bề mặt và trung bình của gỗ; nhiệt độ môi trường sấy cài đặt, nhiệt độ bề mặt và trong tâm gỗ kèm theo hình khối không gian ba chiều với các mắt lưới giả định cho các vị trí trong mặt cắt gỗ đã đưa ra những quan sát cụ thể để dự đoán quá trình sấy. Sự mô phỏng này đã rút ngắn rất nhiều

thời gian và chi phí so với việc nghiên cứu thực nghiệm trước đây. Kết quả chính xác của mô hình bước đầu đặt niềm tin lớn cho một phương pháp nghiên cứu mới về sấy gỗ.

- Sự kế thừa nền tảng lập trình mô hình có sẵn cho các loại gỗ khác mang lại kết quả chính xác cho nghiên cứu này là cơ sở khoa học vững chắc có thể ứng dụng cho các nghiên cứu tiếp theo về sấy nhiều loại gỗ ở Việt Nam.

- Việc lấy mẫu gỗ sấy trong khi thực nghiệm mẻ sấy quy chuẩn với số lượng mẫu chỉ là 2

thanh có thể là lý do dẫn đến giai đoạn sấy ban đầu từ gỗ tươi đến FSP có sự chênh lệch tương đối lớn về diễn biến giảm ẩm giữa mô hình lý thuyết và thực nghiệm. Cần tiến hành mở rộng nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá và hiệu chỉnh lại mô hình lý thuyết.

- Cần nghiên cứu thực nghiệm tiếp theo để tiến hành việc đo nhiệt độ ở các vị trí trong thanh gỗ làm cơ sở để phân tích đánh giá và so sánh với quá trình mô phỏng trao đổi nhiệt của mô hình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Hà Tiến Mạnh, Phạm Văn Chương, Bùi Duy Ngọc, Đỗ Văn Bản, Nguyễn Đức Thành, Bùi Hữu Thương, 2021. Một số đặc điểm cấu tạo của gỗ Keo tai tượng (*Acacia mangium* Willd.) ảnh hưởng đến quá trình sấy. Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp. 2, 100 - 112.
2. Mạnh, H. T., Redman, A. L., Van, C. P., Ngọc, B. D., 2022. Mass transfer properties of *Acacia mangium* plantation wood. Maderas-Cienc Tecnol. 24(2), 1 - 12.
3. Pang, S., 2007. Mathematical Modeling of Kiln Drying of Softwood Timber: Model Development, Validation, and Practical Application. Dry. Technol. 25(3), 421 - 431.
4. Perré, P., Turner, I. W., 1999. Transpore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualising the drying of porous media. Dry. Technol. 17(7 - 8), 1273 - 1289.
5. Redman, A. L., Baillères, H., Perré, P., Carr, E. J., Turner, I. W., 2017. A relevant and robust vacuum-drying model applied to hardwoods. Wood Sci. Technol. 51, 701 - 719.
6. Salin, J. G., 1991. Modeling of wood drying: A bibliography. Dry. Technol. 9(3), 775 - 793.

Email tác giả chính: hatienmanhfsiv@gmail.com

Ngày nhận bài: 23/02/2023

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 02/03/2023

Ngày duyệt đăng: 10/03/2023