

## Ảnh hưởng của điều kiện xử lý nhiệt đến một số tính chất cơ lý của gỗ Quế (*Cinnamomum cassia* Blume)

Nguyễn Xuân Tuan<sup>1</sup>, Tăng Thị Kim Hồng<sup>1\*</sup>, Nguyễn Đức Thành<sup>2</sup>, Nguyễn Nhật Quang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh

<sup>2</sup>Viện Nghiên cứu Công nghiệp rừng, Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam

### Effects of thermal treatment conditions on selected physical and mechanical properties of cinnamon wood (*Cinnamomum cassia* Blume)

Nguyen Xuan Tuan<sup>1</sup>, Tang Thi Kim Hong<sup>1\*</sup>, Nguyen Duc Thanh<sup>2</sup>, Nguyen Nhat Quang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nong Lam University – Ho Chi Minh City

<sup>2</sup>Research Institute of Forest Industry, Vietnamese Academy of Forest Sciences

\*Corresponding author: tangkimhong@hcmuaf.edu.vn

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.15.5.2026.132-140>

#### TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của điều kiện xử lý nhiệt khô đến một số tính chất cơ lý của gỗ Quế (*Cinnamomum cassia* Blume), bao gồm độ ẩm thăng bằng (EMC), hiệu suất chống hút nước (WRE), hiệu suất chống trương nở (ASE), độ cứng Brinell (BH), độ bền uốn tĩnh (MOR) và mô-đun đàn hồi (MOE). Thí nghiệm được bố trí theo phương pháp đáp ứng bề mặt kết hợp thiết kế cấu trúc có tâm, với nhiệt độ xử lý 150–200°C và thời gian 10–20 giờ. Kết quả cho thấy xử lý nhiệt làm giảm đáng kể EMC và cải thiện độ ổn định kích thước của gỗ, trong khi các tính chất cơ học chịu uốn có xu hướng suy giảm khi điều kiện xử lý trở nên khắc nghiệt hơn. Độ cứng Brinell tăng ở các mức xử lý trung gian nhưng giảm khi áp dụng nhiệt độ và thời gian xử lý cao. Thông qua phân tích hồi quy kết hợp tối ưu hóa đa mục tiêu, điều kiện xử lý phù hợp được xác định tại 167°C trong 22 giờ, với các giá trị dự đoán: EMC = 8,71%, WRE = 28,0%, ASE = 36,1%, BH = 11,72 N/mm<sup>2</sup>, MOR = 77,18 MPa và MOE = 8,41 GPa, cho thấy sự cân bằng giữa khả năng ổn định kích thước và duy trì tính chất cơ học. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn chế độ xử lý nhiệt khô thích hợp, góp phần nâng cao giá trị sử dụng và mở rộng khả năng ứng dụng gỗ Quế trong sản xuất vật liệu và các sản phẩm gỗ có yêu cầu ổn định kích thước cao.

#### ABSTRACT

This study evaluated the effects of dry thermal treatment conditions on selected physical and mechanical properties of cinnamon wood (*Cinnamomum cassia* Blume), including equilibrium moisture content (EMC), water-repellent efficiency (WRE), anti-swelling efficiency (ASE), Brinell hardness (BH), modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE). The experiment was designed using response surface methodology combined with a central composite design, with treatment temperatures ranging from 150 to 200°C and treatment durations from 10 to 20 hours. The results showed that thermal treatment significantly reduced EMC and improved the dimensional stability of the wood, while bending-related mechanical properties tended to decrease under more severe treatment conditions. Brinell hardness increased under moderate treatment levels but declined at higher temperatures and longer durations. Based on regression analysis and multi-response optimization, the appropriate treatment condition was identified at 167°C for 22 h, with predicted values of EMC = 8.71%, WRE = 28.0%, ASE = 36.1%, BH = 11.72 N/mm<sup>2</sup>, MOR = 77.18 MPa, and MOE = 8.41 GPa, indicating a balance between improved dimensional stability and retained mechanical performance. The findings provide a scientific basis for selecting suitable dry thermal treatment conditions, thereby enhancing the utilization value of cinnamon wood and expanding its potential applications in the production of materials and wood products requiring high dimensional stability.

#### Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 01/02/2026

Ngày phản biện: 23/03/2026

Ngày quyết định đăng: 04/05/2026

#### Từ khóa:

Biến tính nhiệt khô, đặc tính cơ lý, gỗ Quế (*Cinnamomum cassia* Blume), phương pháp đáp ứng bề mặt.

#### Keywords:

Cinnamon wood (*Cinnamomum cassia* Blume), dry thermal treatment, physical and mechanical properties, response surface methodology.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến tính nhiệt hiện được xem là một trong những giải pháp hiệu quả nhằm nâng cao chất lượng gỗ rừng trồng nhờ ưu điểm không sử dụng hóa chất độc hại, thân thiện với môi trường và phù hợp với xu hướng phát triển vật liệu xanh. Nhiều nghiên cứu cho thấy xử lý nhiệt có thể làm giảm độ hút ẩm, cải thiện độ ổn định kích thước và nâng cao độ bền sinh học của gỗ, qua đó mở rộng khả năng ứng dụng của vật liệu trong công nghiệp chế biến gỗ [1, 2].

Gỗ Quế (*Cinnamomum cassia* Blume) là một trong những loài cây trồng lâm nghiệp có giá trị kinh tế cao tại Việt Nam, trong đó giá trị thương mại hiện nay chủ yếu tập trung ở phần vỏ dùng làm gia vị, dược liệu và nguyên liệu sản xuất tinh dầu [3-5]. Trong khi đó, phần thân gỗ sau khai thác vẫn chưa được sử dụng tương xứng với tiềm năng, chủ yếu phục vụ các mục đích thông thường hoặc các sản phẩm có giá trị gia tăng thấp như vật liệu phụ trợ xây dựng hoặc một số đồ thủ công mỹ nghệ [6]. Do đó, việc mở rộng ứng dụng của nguồn nguyên liệu này đòi hỏi các giải pháp công nghệ nhằm cải thiện độ ổn định kích thước, giảm tính hút ẩm và duy trì các tính chất cơ học ở mức phù hợp.

Trong những năm gần đây, nhiều công trình nghiên cứu đã áp dụng các phương pháp xử lý nhiệt khô và thủy nhiệt cho nhiều loài gỗ như Western Hemlock, *Cryptomeria japonica*, Sồi, Ayou, Iroko và Dẻ gai, nhằm nâng cao độ ổn định kích thước, giảm tính hút ẩm, cải thiện độ bền sinh học của vật liệu [7-11]. Tuy nhiên, đối với cây Quế, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào thành phần hóa học, hoạt tính sinh học, giá trị dược liệu và tinh dầu của vỏ, lá hoặc cành, trong khi các nghiên cứu liên quan đến nâng cao giá trị sử dụng của phần thân gỗ còn khá hạn chế, đặc biệt là các nghiên cứu về biến tính nhiệt phục vụ công nghiệp chế biến gỗ.

Trong số các hướng xử lý hiện có, biến tính nhiệt khô được quan tâm nhờ khả năng cải thiện độ ổn định kích thước, giảm tính hút ẩm và nâng cao độ bền sinh học của gỗ mà không cần sử dụng hóa chất, phù hợp với định hướng sản xuất vật liệu bền vững [12, 13]. Đối với phần thân gỗ Quế sau khai thác vỏ, đây là hướng tiếp

cận có tiềm năng nhằm nâng cao giá trị sử dụng của nguồn nguyên liệu hiện còn chủ yếu được tiêu thụ ở phân khúc giá trị thấp. Nếu được xử lý phù hợp, phần thân gỗ này có thể được định hướng sử dụng cho các sản phẩm có yêu cầu chất lượng cao hơn, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả khai thác tổng thể cây Quế.

Tuy nhiên, thách thức của công nghệ biến tính nhiệt là khi mức độ xử lý tăng lên, khả năng ổn định vật liệu thường được cải thiện nhưng một số tính chất cơ học có thể suy giảm. Vì vậy, cần có các nghiên cứu đánh giá toàn diện sự thay đổi của vật liệu sau xử lý, đồng thời xác định chế độ công nghệ phù hợp để đạt được sự cân bằng giữa cải thiện tính ổn định kích thước và duy trì khả năng chịu lực của gỗ. Kết quả của các nghiên cứu này không chỉ có ý nghĩa khoa học trong việc lựa chọn thông số xử lý, mà còn góp phần nâng cao giá trị gia tăng của phần thân gỗ Quế sau khai thác.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của hai thông số công nghệ chính là nhiệt độ và thời gian xử lý nhiệt khô đến một số tính chất cơ lý quan trọng của gỗ Quế, bao gồm độ ẩm thăng bằng (EMC), hiệu suất chống hút nước (WRE), hiệu suất chống trương nở (ASE), độ cứng Brinell (BH), độ bền uốn tĩnh (MOR) và mô-đun đàn hồi (MOE). Trong đó, nhóm chỉ tiêu EMC, WRE và ASE phản ánh khả năng ổn định ẩm và ổn định kích thước của vật liệu, còn BH, MOR và MOE phản ánh mức độ duy trì tính chất cơ học sau biến tính. Thông qua phương pháp đáp ứng bề mặt, nghiên cứu hướng tới xác định vùng điều kiện xử lý phù hợp, làm cơ sở khoa học cho việc sử dụng hiệu quả gỗ Quế trong sản xuất vật liệu và các sản phẩm gỗ có giá trị gia tăng cao hơn.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Vật liệu

Gỗ xẻ từ cây Quế (*Cinnamomum cassia* Blume) 9 năm tuổi được thu từ rừng trồng tại tỉnh Lào Cai. Các mẫu dùng cho nghiên cứu được lấy từ các thanh gỗ không có khuyết tật và được gia công với kích thước 25 × 65 × 500 mm (dày × rộng × dài). Sau đó các mẫu gỗ được sấy trong lò ở nhiệt độ 65°C, thời gian 10 ngày để đạt độ ẩm từ 10% đến 12%. Sau khi sấy, các

mẫu được chia thành 11 nhóm thí nghiệm và 1 nhóm đối chứng chưa xử lý, mỗi nhóm gồm 5 mẫu.

**2.2. Phương pháp nghiên cứu**

**2.2.1. Phương pháp đáp ứng bề mặt và thiết kế cấu trúc có tâm**

Các thí nghiệm được thực hiện tại Phòng Thực nghiệm Xử lý Bảo quản và Sản xuất Ván nhân tạo, Khoa Lâm nghiệp, Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh. Trong nghiên cứu này, phương pháp đáp ứng bề mặt (Response Surface Methodology – RSM) được áp dụng kết hợp với thiết kế cấu trúc có tâm (Central Composite Design – CCD) nhằm đánh giá ảnh hưởng của hai yếu tố công nghệ chính là nhiệt độ xử lý (T) và thời gian xử lý (t) đến các tính chất cơ lý của gỗ Quế. Các chỉ tiêu được xem xét bao gồm độ ẩm thăng bằng (EMC), hiệu suất chống hút nước (WRE), hiệu suất chống trương nở (ASE), độ cứng Brinell (BH), độ bền uốn tĩnh (MOR) và mô-đun đàn hồi (MOE).

Ma trận thí nghiệm được xây dựng theo

thiết kế CCD với tổng cộng 11 nghiệm thức, trong đó có 3 nghiệm thức lặp tại tâm nhằm ước lượng sai số thực nghiệm, đánh giá độ lặp lại của kết quả và nâng cao độ tin cậy của mô hình hồi quy. Thiết kế thí nghiệm được xây dựng bằng phần mềm Minitab (phiên bản 21.2). Nhiệt độ xử lý được khảo sát trong khoảng 140–210°C, còn thời gian xử lý thay đổi từ 8–22 giờ. Các mức khảo nghiệm cụ thể của từng yếu tố được trình bày trong Bảng 1.

Quá trình xử lý nhiệt khô được thực hiện trong tủ sấy Memmert UN260, có kích thước buồng sấy 640 × 800 × 500 mm, có khả năng tự động điều chỉnh nhiệt độ trong khoảng từ 20–300°C với độ chính xác ±0,5°C. Trong suốt quá trình thí nghiệm, các yếu tố công nghệ ngoài hai biến khảo sát chính (nhiệt độ và thời gian), bao gồm tốc độ gia nhiệt, mức thông gió và điều kiện môi trường trong buồng xử lý, được giữ ổn định theo cùng một chế độ vận hành cho tất cả các nghiệm thức nhằm hạn chế sai số ảnh hưởng đến kết quả nghiên cứu.

**Bảng 1. Các mức nhiệt độ và thời gian xử lý áp dụng để biến tính nhiệt khô gỗ Quế**

Các thông số nghiên cứu	Các mức giá trị thực – mã hóa				
	-α	-1	0	1	α
Nhiệt độ (T, °C)	140	150	175	200	210
Thời gian (t, giờ)	8	10	15	20	22

Ghi chú: Các giá trị mã hóa bao gồm: -α là mức điểm sao dưới, -1 là mức dưới, 0 là mức cơ sở, 1 là mức trên, và α là mức điểm sao trên.

**2.2.2. Xác định các chỉ tiêu cơ lý của gỗ Quế sau xử lý nhiệt khô**

Để đánh giá các chỉ tiêu EMC, WRE và ASE, mẫu thử được gia công từ cả gỗ Quế đã xử lý và chưa xử lý, với kích thước 20 × 20 × 23 mm lần lượt theo chiều xuyên tâm, tiếp tuyến và dọc thớ.

Việc xác định WRE và ASE được thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 13352:2021 [14]. Đối với xác định EMC, mẫu được ổn định trong buồng điều hòa khí hậu Memmert HPP260eco ở điều kiện ẩm tương đối 65% và nhiệt độ 20°C cho đến khi đạt khối lượng không đổi, sau đó được cân để xác định khối lượng ở độ ẩm thăng bằng ( $m_{eq}$ ). Mẫu gỗ sau đó được sấy trong tủ sấy Memmert UN260 ở 103°C đến khi đạt khối lượng khô kiệt ( $m_0$ ). Giá trị EMC được tính theo

Phương trình (1), dựa trên tiêu chuẩn ASTM D4442-20 [15].

$$EMC = \frac{m_{eq} - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

Việc xác định MOR và MOE được thực hiện theo tiêu chuẩn ASTM D143-23 [16], với mẫu thử có kích thước 20 × 20 × 330 mm, sử dụng máy thử cơ học Instron 3367.

Việc xác định BH được thực hiện theo tiêu chuẩn EN 1534:2020 [17], với mẫu thử có kích thước 25 × 50 × 50 mm, trên cùng hệ thiết bị Instron 3367 với đầu nén phù hợp theo yêu cầu tiêu chuẩn.

Mỗi chỉ tiêu EMC, WRE, ASE, BH, MOR và MOE được đánh giá với 5 mẫu lặp lại cho mỗi nghiệm thức. Các giá trị trung bình và độ lệch chuẩn được tính toán để phân tích các đặc tính cơ lý của gỗ.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các giá trị độ ẩm thăng bằng (EMC), hiệu suất chống hút nước (WRE), hiệu suất chống trương nở (ASE), độ cứng Brinell (BH), độ bền uốn tĩnh (MOR) và mô-đun đàn hồi (MOE) của mẫu gỗ Quế sau xử lý nhiệt khô cùng với mẫu đối chứng chưa xử lý được trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy điều kiện xử lý nhiệt ảnh hưởng rõ rệt đến các tính chất cơ lý của gỗ Quế.

Trong khoảng nhiệt độ 140–210°C, giá trị EMC của các mẫu xử lý đều thấp hơn mẫu đối chứng (12,05%). Giá trị thấp nhất được ghi nhận tại NT1 (200°C, 20 giờ) đạt 8,08%, tương ứng giảm 32,9% so với đối chứng, trong khi giá trị cao nhất trong nhóm xử lý là 10,13% tại NT6 (140°C, 15 giờ), vẫn giảm 15,9%. Kết quả này cho thấy xử lý nhiệt có tác dụng rõ rệt trong việc giảm khả năng hút ẩm của gỗ. Tương ứng với xu hướng đó, WRE tăng theo mức độ xử lý nhiệt, dao động từ 3,86% (NT6) đến 34,61% (NT1). Giá trị ASE cũng tăng đáng kể, đạt cao nhất 46,50% tại NT1 và thấp nhất 7,98% tại NT6, phản ánh sự cải thiện rõ rệt về khả năng ổn định

kích thước của vật liệu sau xử lý.

Đối với tính chất cơ học, độ cứng Brinell biến động tùy theo mức độ xử lý. Giá trị BH cao nhất đạt 13,44 N/mm<sup>2</sup> tại NT6, tăng nhẹ 0,8% so với mẫu đối chứng (13,33 N/mm<sup>2</sup>), trong khi giảm xuống còn 9,56 N/mm<sup>2</sup> tại NT5, tương ứng giảm 28,3%. Kết quả cho thấy giá trị BH nhìn chung có xu hướng giảm sau xử lý nhiệt. Ở một số điều kiện xử lý nhẹ, giá trị BH vẫn được duy trì gần tương đương so với mẫu đối chứng hoặc chỉ tăng không đáng kể; tuy nhiên, chỉ tiêu này giảm rõ rệt khi điều kiện xử lý trở nên khắc nghiệt hơn.

Các chỉ tiêu chịu uốn gồm MOR và MOE nhìn chung có xu hướng giảm sau xử lý nhiệt. Tuy nhiên, tại các nghiệm thức xử lý trung bình, mức suy giảm còn tương đối thấp. Cụ thể, MOR cao nhất đạt 99,12 MPa tại NT6, giảm 5,2% so với đối chứng (104,57 MPa), trong khi MOE cao nhất cũng ghi nhận tại NT6 với 9,45 GPa, giảm 3,4% so với đối chứng (9,78 GPa). Ngược lại, ở các điều kiện xử lý nghiêm ngặt hơn như NT1 và NT5, cả MOR và MOE đều giảm mạnh.

**Bảng 2. Giá trị EMC, WRE, ASE, BH, MOR và MOE của các mẫu gỗ Quế tại các nghiệm thức thực hiện**

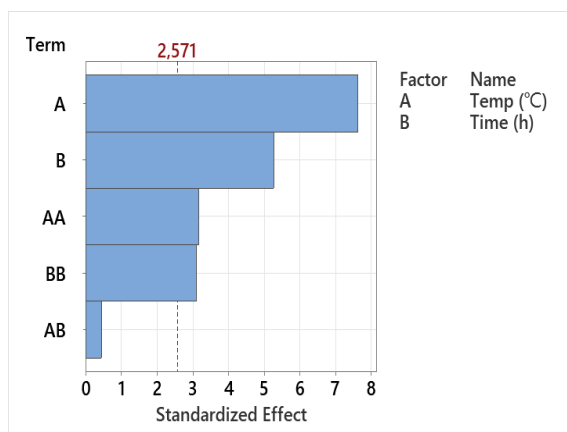
Nghiệm thức	T (°C)	t (giờ)	EMC (%)	WRE (%)	ASE (%)	BH (N/mm <sup>2</sup> )	MOR (MPa)	MOE (GPa)
NT1	200	20	8,08 ±0,13	34,61 ±1,23	46,5 ±0,29	10,08 ±0,95	39,54 ±2,35	7,05 ±0,18
NT2	200	10	8,8 ±0,29	15,27 ±2,14	19,05 ±1,78	10,71 ±1,32	66,81 ±3,1	7,55 ±1,35
NT3	150	20	9,2 ±0,28	12,21 ±1,36	15,22 ±0,95	12,71 ±0,38	89,56 ±2,78	8,95 ±0,45
NT4	150	10	9,72 ±0,13	5,33 ±1,35	9,25 ±0,68	13,23 ±0,15	97,22 ±1,36	9,35 ±0,95
NT5	210	15	8,19 ±0,3	22,48 ±2,78	31,97 ±1,23	9,56 ±0,29	50,21 ±2,98	6,65 ±1,36
NT6	140	15	10,13 ±0,38	3,86 ±0,98	7,98 ±1,58	13,44 ±1,01	99,12 ±1,25	9,45 ±0,54
NT7	175	22	8,42 ±0,11	33,82 ±1,56	44,86 ±1,64	11,13 ±0,78	73,57 ±2,52	8,05 ±0,25
NT8	175	8	9,88 ±0,14	8,25 ±2,14	11,79 ±2,09	12,5 ±0,65	91,58 ±1,63	9,15 ±0,39
NT9	175	15	8,46 ±0,16	13,53 ±2,87	17,63 ±1,87	11,76 ±1,21	80,88 ±1,15	8,62 ±0,64
NT10	175	15	8,47 ±0,19	13,48 ±3,05	17,57 ±1,69	11,66 ±0,87	80,19 ±0,36	8,55 ±0,22
NT11	175	15	8,45 ±0,21	13,13 ±2,98	17,45 ±2,12	11,71 ±0,75	80,55 ±0,95	8,58 ±0,39
Đối chứng	-	-	12,05 ±0,11	-	-	13,33 ±0,98	104,57 ±2,51	9,78 ±0,48

Ghi chú: Các giá trị sau dấu ± biểu thị độ lệch chuẩn.

### 3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến EMC của gỗ Quế

Ảnh hưởng của nhiệt độ (T) và thời gian xử lý (t) đến độ ẩm thăng bằng (EMC) của gỗ Quế được thể hiện ở Hình 1 và Hình 2. Kết quả từ biểu đồ Pareto cho thấy cả hai yếu tố đều ảnh hưởng có ý nghĩa đến EMC, trong đó nhiệt độ tác động mạnh hơn thời gian xử lý. Các thành phần bậc hai (AA, BB) cũng có ý nghĩa thống kê, trong khi tương tác giữa hai yếu tố (AB) không đáng kể.

Bề mặt đáp ứng cho thấy EMC có xu hướng giảm khi nhiệt độ và thời gian xử lý tăng. Giá trị



Hình 1. Biểu đồ Pareto cho EMC

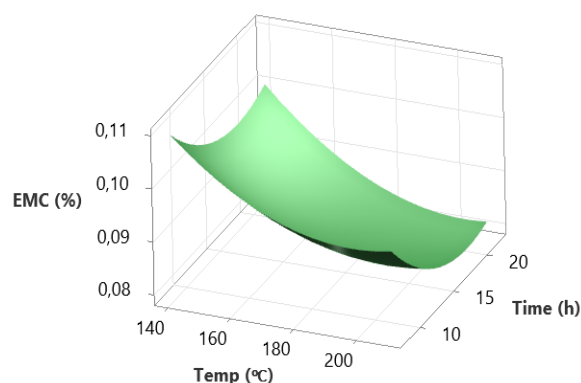
### 3.2. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến WRE và ASE của gỗ Quế

Mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ (T) và thời gian xử lý (t) đến hiệu suất chống hút nước (WRE) và hiệu suất chống trương nở (ASE) được trình bày ở các Hình 3–6. Kết quả phân tích Pareto cho thấy cả hai yếu tố công nghệ đều tác động có ý nghĩa đến hai chỉ tiêu này, trong đó thời gian xử lý thể hiện ảnh hưởng mạnh hơn nhiệt độ. Ngoài ra, thành phần bậc hai của thời gian (BB) và tương tác giữa nhiệt độ với thời gian (AB) cũng có vai trò đáng kể, cho thấy đáp ứng của vật liệu thay đổi theo hướng phi tuyến khi tăng mức độ xử lý.

Các đồ thị bề mặt đáp ứng cho thấy WRE và

EMC thấp nhất xuất hiện ở vùng nhiệt độ cao kết hợp với thời gian xử lý dài, phù hợp với số liệu thực nghiệm trong Bảng 2.

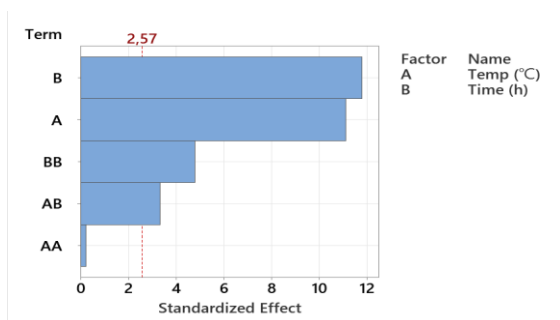
Sự suy giảm EMC sau xử lý nhiệt chủ yếu do sự giảm số lượng nhóm hydroxyl hút ẩm trong thành tế bào gỗ, làm hạn chế khả năng hấp phụ hơi nước. Bên cạnh đó, sự biến đổi cấu trúc của hemicellulose, cellulose và lignin dưới tác động của nhiệt cũng góp phần làm giảm tính hút ẩm của vật liệu. Xu hướng tương tự đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây [2, 9, 13, 18-21].



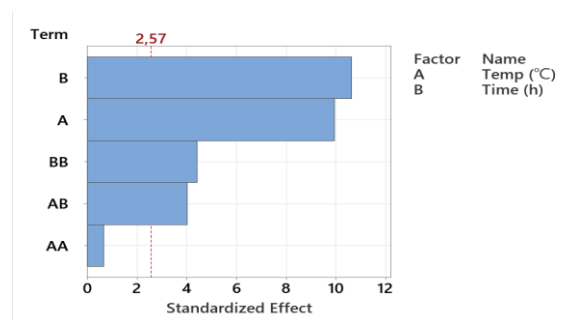
Hình 2. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến EMC

ASE cùng gia tăng theo chiều tăng của nhiệt độ và thời gian, đặc biệt rõ khi thời gian xử lý kéo dài kết hợp với vùng nhiệt độ cao. Điều này cho thấy mức độ xử lý càng lớn thì khả năng hạn chế hút nước và ổn định kích thước của gỗ Quế càng được cải thiện.

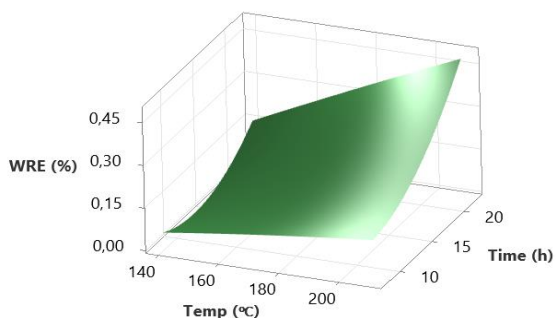
Nguyên nhân chủ yếu là do quá trình xử lý nhiệt làm suy giảm một phần hemicellulose và giảm số lượng nhóm hydroxyl tự do trong thành tế bào, từ đó hạn chế khả năng liên kết với nước. Đồng thời, xử lý nhiệt góp phần ổn định cấu trúc thành tế bào, từ đó hạn chế sự trương nở của gỗ khi tiếp xúc với nước. Kết quả này phù hợp với xu hướng đã được công bố trong các nghiên cứu trước đây [2, 8, 13, 21].



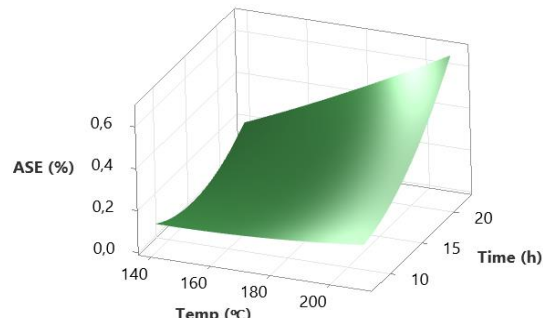
Hình 3. Biểu đồ Pareto cho WRE



Hình 4. Biểu đồ Pareto cho ASE



Hình 5. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến WRE



Hình 6. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến ASE

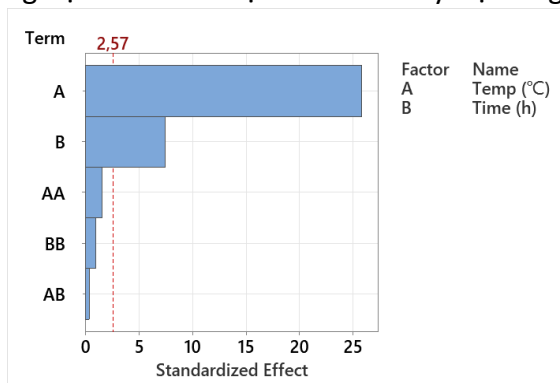
### 3.3. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến BH của gỗ Quế

Ảnh hưởng của nhiệt độ (T) và thời gian xử lý (t) đến độ cứng Brinell (BH) của gỗ Quế được thể hiện ở Hình 7 và Hình 8. Kết quả phân tích Pareto cho thấy cả hai yếu tố đều có ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến BH, trong đó nhiệt độ là yếu tố chi phối mạnh hơn thời gian xử lý. Các thành phần bậc hai và tương tác giữa hai yếu tố không đáng kể.

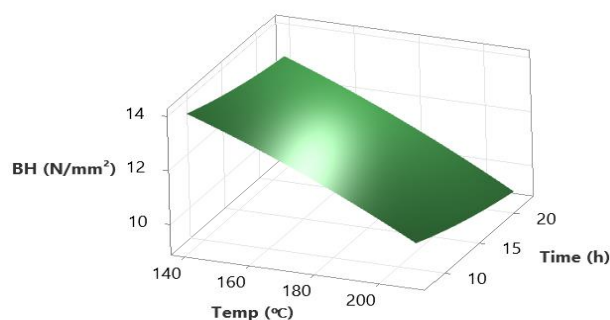
Bề mặt đáp ứng cho thấy BH có xu hướng giảm dần khi nhiệt độ và thời gian xử lý tăng. So với mẫu đối chứng, chỉ ghi nhận một nghiệm thức có giá trị BH tăng nhẹ, trong khi phần lớn các nghiệm thức còn lại đều cho thấy độ cứng

giảm, đặc biệt ở các điều kiện xử lý khắc nghiệt hơn. Xu hướng này phù hợp với số liệu thực nghiệm trong Bảng 2.

Sự thay đổi BH có thể liên quan đến biến đổi cấu trúc thành tế bào gỗ trong quá trình xử lý nhiệt. Ở mức xử lý nhẹ, sự giảm độ ẩm và tái sắp xếp cấu trúc vi mô có thể giúp duy trì độ cứng ở mức cao hoặc cao hơn mẫu đối chứng. Ngược lại, khi nhiệt độ cao hoặc thời gian xử lý kéo dài, sự phân hủy một phần hemicellulose và biến đổi cellulose có thể làm giảm khả năng chống biến dạng bề mặt của vật liệu. Xu hướng tương tự cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây [2, 22, 23].



Hình 7. Biểu đồ Pareto cho BH



Hình 8. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến BH

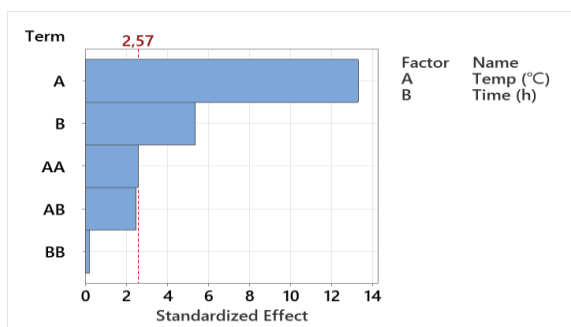
### 3.4. Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến MOR và MOE của gỗ Quế

Ảnh hưởng của nhiệt độ (T) và thời gian xử lý (t) đến độ bền uốn tĩnh (MOR) và mô-đun đàn hồi (MOE) của gỗ Quế được thể hiện ở các Hình 9–12. Kết quả phân tích Pareto cho thấy cả hai yếu tố đều ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến MOR và MOE, trong đó nhiệt độ là yếu tố chi phối mạnh hơn thời gian xử lý. Thành phần bậc hai của nhiệt độ (AA) cũng có ảnh hưởng đáng kể, trong khi tương tác giữa hai yếu tố và thành phần bậc hai của thời gian ít tác động hơn.

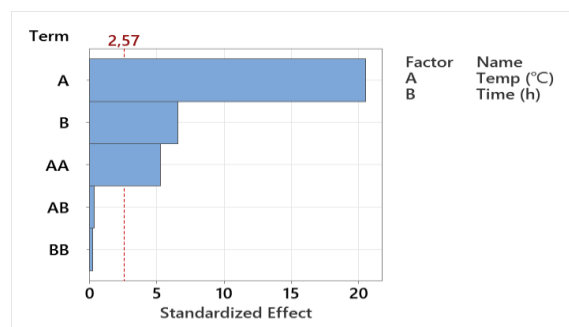
Các đồ thị bề mặt đáp ứng cho thấy MOR và MOE đều có xu hướng giảm khi nhiệt độ và thời

gian xử lý tăng. Giá trị cao hơn được duy trì ở vùng xử lý nhẹ, trong khi tại nhiệt độ cao và thời gian xử lý lâu hơn, cả hai chỉ tiêu giảm rõ rệt. Kết quả này phù hợp với số liệu thực nghiệm trong Bảng 2.

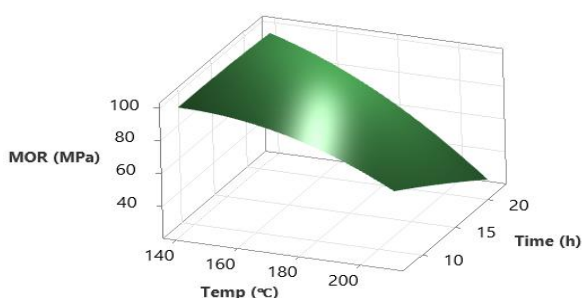
Sự suy giảm MOR và MOE chủ yếu liên quan đến sự phân hủy một phần hemicellulose và biến đổi cấu trúc cellulose dưới tác động của nhiệt, làm giảm khả năng liên kết trong thành tế bào và khả năng chịu tải của vật liệu. Do đó, khi mức độ xử lý tăng lên, độ bền uốn tĩnh và mô-đun đàn hồi của gỗ có xu hướng giảm. Xu hướng tương tự cũng đã được ghi nhận trong các nghiên cứu trước đây [2, 7, 24, 25].



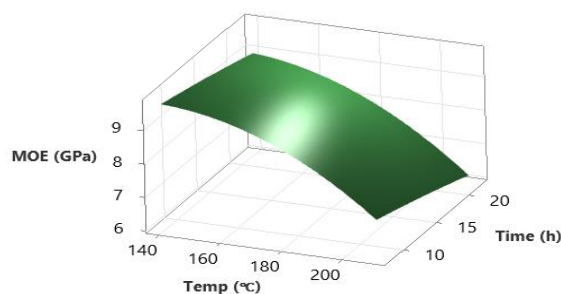
Hình 9. Biểu đồ Pareto cho MOR



Hình 10. Biểu đồ Pareto cho MOE



Hình 11. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến MOR



Hình 12. Đồ thị biểu hiện sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến MOE

### 3.5. Phân tích hồi quy và mức độ phù hợp của mô hình

Mức độ phù hợp giữa các mô hình hồi quy và số liệu thực nghiệm được xem xét thông qua hệ số xác định  $R^2$ , đại diện cho tỷ lệ biến thiên của dữ liệu đầu ra được mô hình giải thích. Kết quả phân tích cho thấy các giá trị  $R^2$  đạt 95,24% đối với EMC, 98,35% đối với WRE, 98,02% đối với ASE, 99,32% đối với BH, 97,76% đối với

MOR và 99,00% đối với MOE. Các giá trị này chứng tỏ mô hình hồi quy có khả năng mô tả tốt mối quan hệ giữa các thông số xử lý và các tính chất cơ lý của gỗ Quế, trong khi phần sai lệch còn lại là tương đối nhỏ.

Trên cơ sở loại bỏ các hệ số không có ý nghĩa thống kê, các phương trình hồi quy cuối cùng được thiết lập nhằm biểu diễn ảnh hưởng của nhiệt độ xử lý (T) và thời gian xử lý (t) đến từng

chỉ tiêu cơ lý tương ứng. Các phương trình này được sử dụng làm cơ sở cho việc phân tích xu hướng biến thiên, xây dựng đồ thị đáp ứng và

thực hiện tối ưu hóa trong các phần tiếp theo (Phương trình 2–7).

$$EMC (\%) = 0,3125 - 0,001919T - 0,00437t + 0,000005T^2 + 0,000118t^2 \quad (2)$$

$$WRE (\%) = 0,384 - 0,00079T - 0,0745t + 0,00155t^2 + 0,000249Tt \quad (3)$$

$$ASE (\%) = 0,782 - 0,00267T - 0,1128t + 0,001925t^2 + 0,00043Tt \quad (4)$$

$$BH (N/mm^2) = 22,196 - 0,05344T - 0,0775t \quad (5)$$

$$MOR (MPa) = -78,2 + 2,236T + 5,34t - 0,00686T^2 - 0,0392Tt \quad (6)$$

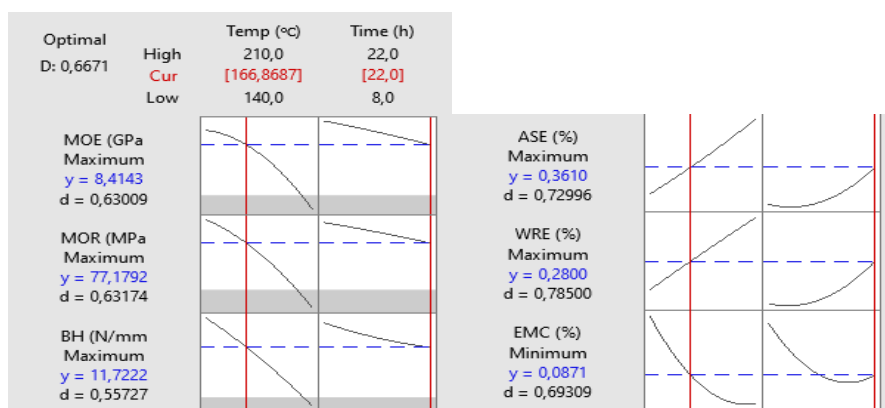
$$MOE (GPa) = 1,91 + 0,1252T - 0,06162t - 0,000468T^2 \quad (7)$$

### 3.6. Tối ưu hóa đa mục tiêu theo hàm độ mong muốn

Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu cho thấy tổ hợp thông số xử lý nhiệt khô gồm nhiệt độ 167°C và thời gian 22 giờ đạt giá trị độ mong muốn tổng hợp  $D = 0,6671$  (Hình 13). Ở điều kiện tối ưu này, các giá trị dự đoán của các chỉ tiêu cơ lý lần lượt là  $MOE = 8,41$  GPa,  $MOR = 77,18$  MPa,  $BH = 11,72$  N/mm<sup>2</sup>,  $ASE = 36,1\%$ ,

$WRE = 28,0\%$ , trong khi  $EMC$  giảm xuống còn  $8,71\%$ .

Tổ hợp thông số này cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa việc nâng cao tính ổn định kích thước, giảm khả năng hút ẩm và duy trì các tính chất cơ học của gỗ Quế ở mức phù hợp cho các ứng dụng kỹ thuật. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học để đề xuất quy trình biến tính nhiệt khô trong sản xuất.



Hình 13. Mặt cắt của bề mặt đáp ứng tại điểm tối ưu cho EMC, WRE, ASE, BH, MOR và MOE của biến tính nhiệt khô gỗ Quế

## 4. KẾT LUẬN

Xử lý nhiệt khô có ảnh hưởng rõ rệt đến các tính chất cơ lý của gỗ Quế theo hướng làm giảm độ ẩm thẳng bằng và cải thiện độ ổn định kích thước, trong khi các tính chất cơ học chịu uốn có xu hướng suy giảm khi mức độ xử lý tăng. Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu xác định điều kiện xử lý thích hợp ở 167°C trong 22 giờ. Tại điều kiện này, các giá trị dự đoán đạt  $EMC = 8,71\%$ ,  $WRE = 28,0\%$ ,  $ASE = 36,1\%$ ,  $BH = 11,72$  N/mm<sup>2</sup>,  $MOR = 77,18$  MPa và  $MOE =$

$8,41$  GPa. Đây là cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn chế độ xử lý nhiệt khô phù hợp, nhằm nâng cao khả năng chống ẩm, tăng độ ổn định kích thước và gia tăng giá trị sử dụng của gỗ Quế, đồng thời mở rộng tiềm năng ứng dụng trong sản xuất vật liệu và các sản phẩm gỗ yêu cầu độ ổn định kích thước cao.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Acosta-Acosta R., Montoya-Arango J. A. & Jomada-Silva E. (2021). Technologies Applied to Wood Heat Treatments, a Review. Scientia et Technica. 26(2): 127-136. DOI: 10.22517/23447214.22641.

- [2]. Jančíková V. & Jablonský M. (2025). Thermal Modification of Wood—A Review. *Sustainable Chemistry*. 6(3): 19. DOI: 10.3390/suschem6030019.
- [3]. Thủ tướng Chính phủ (2023). Quyết định số 316/QĐ-TTg ngày 29/3/2023 về việc phê duyệt Quy hoạch tỉnh Lào Cai thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050.
- [4]. Ủy ban Nhân dân tỉnh Lào Cai (2023). Báo cáo tổng hợp Quy hoạch tỉnh Lào Cai thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050.
- [5]. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2024). Quyết định số 816/QĐ-BNN-KL ngày 20/3/2024 công bố hiện trạng rừng toàn quốc năm 2023.
- [6]. Phạm Văn Chương (2020). Nghiên cứu công nghệ biến tính và bảo quản gỗ rừng trồng nâng cao độ bền cơ học, độ ổn định kích thước của gỗ đáp ứng yêu cầu nguyên liệu sản xuất đồ mộc, ván sàn chất lượng cao. Báo cáo kết quả Đề tài cấp Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn.
- [7]. Nakagawa T., Poulin E., Rueppel T., Chen Z., Swinea J., O'Brien M., Houser G., Wood G., Weinheimer M., Bahmani P., Stynoski P. & Salviato M. (2024). Effects of thermal modification on the flexure properties, fracture energy, and hardness of western hemlock. *Wood Science and Technology*. 58(1): 109-133. DOI: 10.1007/s00226-023-01511-4.
- [8]. Esteves B., Nunes L., Lopes R. & Cruz-Lopes L. (2025). Enhanced Properties of *Cryptomeria japonica* (Thunb ex Lf) D. Don from the Azores Through Heat-Treatment. *Forests*. 16(1): 166. DOI: 10.3390/f16010166.
- [9]. Laskowska A., Kłosińska T., & Skirko D. (2025). Equilibrium moisture content of hydrothermally and thermo-mechanically modified oak wood. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*. 130: 16-25. DOI: 10.5604/01.3001.0055.4347.
- [10]. Tomak E. D. & Ermeydan M. A. (2025). Measuring dimensional stability of thermally modified ayous and iroko wood: Comparison of the three test methods. *Cellulose*. 32: 2581–2597. DOI: 10.1007/s10570-025-06404-2.
- [11]. Vidholdová Z., Dudiak M., Slabejová G. and Výbohá E. (2026). Hydrothermal Modification of Beech Wood. In *Wood Science and Processing Engineering [Working Title]*. IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.1015232.
- [12]. Hill C. A. S. (2006). *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Wiley, Chichester.
- [13]. Esteves B. & Pereira H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources*. 4(1): 370-404.
- [14]. TCVN (2021). TCVN 13352-2021: Gỗ biến tính – Phương pháp thử cơ lý.
- [15]. ASTM International (2020). *ASTM D4442-20: Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM International, Pennsylvania.
- [16]. ASTM International (2023). *ASTM D143-23: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. ASTM International, Pennsylvania.
- [17]. European Committee for Standardization (2020). *EN 1534:2020 Wood flooring and parquet - Determination of resistance to indentation - Test method*. European Committee for Standardization, Brussels.
- [18]. Tjeerdsma B. F. & Militz H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 63: 102-111. DOI: 10.1007/s00107-004-0532-8.
- [19]. Bhuiyan T. & Hirai N. (2005). Study of crystalline behaviour of heat-treated wood cellulose during treatments in water. *Journal of Wood Science*. 51: 42-47. DOI: 10.1007/s10086-003-0615-x.
- [20]. Boonstra M. J. & Tjeerdsma B. (2006). Chemical analysis of heat treated softwoods. *European Journal of Wood and Wood Products*. 64: 204-211. DOI: 10.1007/s00107-005-0078-4.
- [21]. Tang Thi Kim Hong & Nguyen Nhat Quang (2025). Optimization of natural oleoresin and waste cooking oil heat treatment conditions for rubberwood using response surface methodology. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. 22(1): 243-252. DOI: 10.1007/s13196-025-00378-1.
- [22]. Sosins G., Grinins J., Brazdauskis P. & Zicans J. (2024). Aspen wood characteristics following thermal modification in closed process under pressure in nitrogen. *Materials*. 17(23): 5930. DOI: 10.3390/ma17235930.
- [23]. Adamčík L., Giudice V. L., Todaro L., Dudiak M. & Kminiak R. (2025). Surface roughness of thermally modified and unmodified selected wood species after sanding. *European Journal of Wood and Wood Products*. 83: 105. DOI: 10.1007/s00107-025-02260-w.
- [24]. Nhacila F., Siteo E., Uetimane E., Manhica A., Egas A. & Möttönen V. (2020). Effects of thermal modification on physical and mechanical properties of Mozambican *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* wood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 78: 871-878. DOI: 10.1007/s00107-020-01576-z.
- [25]. Donkor Marfo E. (2022). Evaluating the effect of thermal treatment on some mechanical properties of two lesser used wood species grown in Ghana. *Journal of Materials Science Research and Reviews*. 5(3): 360-365.