

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ SẤY CHUYỂN HÓA LÊN
CẤU TRÚC VI MÔ VÀ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA THÂN TRE**
EFFECT OF DRYING-CONVERSION TEMPERATURE ON THE
MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO

Lê Thị Giang^{1*},
Lê Thế Phương²,
Nguyễn Minh Vương³,
Lương T. Kim Phụng¹,
Nguyễn Lê Thi¹,
Trịnh Thị Huyền¹,
Hà Xuân Giáp¹

¹ Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức;

² Trường THPT Nguyễn Thị Lợi;

³ Trường Đại học Điện Lực;

^{1*} Tác giả liên hệ; Email: lethigiang@hdu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1335>

Ngày nộp bài: 01/05/2026; Ngày gửi phản biện: 06/05/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:

Thân tre, nhiễu xạ tia X, sấy chuyển hóa, độ kết tinh cellulose, tính chất cơ học.

TÓM TẮT

Tre là vật liệu sinh thái tiềm năng nhưng độ ẩm cao và hiện tượng nứt trong sấy gây khó khăn cho ứng dụng công nghiệp. Nghiên cứu dùng nhiễu xạ tia X (XRD) và các phép đo cơ học theo TCVN 8048:2009 để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chuyển hóa (110°C, 130°C, 150°C) đến cấu trúc vi mô và tính chất cơ học của thân tre luồng.

Độ bền uốn tĩnh và nén dọc thớ của các mẫu sấy chuyển hóa tăng đáng kể so với đối chứng nhưng giảm dần khi nhiệt độ tăng, phù hợp xu hướng suy giảm độ kết tinh cellulose. Độ bền kéo dọc thớ giảm nhẹ nhưng vẫn trong khoảng đặc trưng của tre bền cao; 110°C cho hiệu quả tốt nhất.

Kết quả là cơ sở để tối ưu điều kiện sấy chuyển hóa trong sản xuất công nghiệp, rút ngắn thời gian sấy mà vẫn đảm bảo chất lượng. Cần nghiên cứu thêm ở nhiệt độ dưới 110°C để xác định điều kiện tối ưu.

Keywords:

Bamboo culms, X-ray diffraction (XRD), cellulose crystallinity, drying-conversion, mechanical properties

ABSTRACT

Bamboo is a promising ecological material, but its high moisture content and cracking during drying hinder industrial application. This study used X-ray diffraction (XRD) and mechanical tests according to TCVN 8048:2009 to evaluate the effect of drying-conversion temperature (110°C, 130°C, 150°C) on the microstructure and mechanical properties of bamboo culms.

Static bending and longitudinal compressive strength of drying-converted samples increased markedly compared with the control but decreased as the temperature increased, consistent with the declining trend in cellulose relative crystallinity. Longitudinal tensile strength decreased slightly yet remained within the range typical of high-strength bamboo; 110°C gave the best overall performance. These findings provide a basis for optimizing drying-conversion conditions in industrial production, shortening drying time while maintaining product quality. Further research at temperatures below 110°C is needed to determine the optimal drying condition.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tre là một trong những vật liệu sinh thái thay thế cho gỗ với nhiều tiềm năng cũng như thách thức. Thân tre chắc và bền nên rất lý tưởng để sử dụng làm vật liệu xây dựng và đồ gia dụng. Tuy nhiên, giống như gỗ, tre có xu hướng hấp thụ độ ẩm tự nhiên từ không khí xung quanh. Thân tre có thể có độ ẩm lên đến hơn 150% [1]. Sự tồn tại của nước trong tre thúc đẩy hoạt động của vi sinh vật, gây ra sự phân hủy các sợi trong tre, làm giảm hiệu quả độ bền của vật liệu. Do đó, việc làm khô thân tre trở nên cần thiết để bảo quản và đạt được các đặc tính cấu trúc phù hợp cho việc sử dụng sau đó [2]. Sấy thân tre là một quá trình quan trọng trong việc đưa chúng vào các ứng dụng công nghiệp. Các phương pháp sấy tác động trực tiếp đến đặc tính vĩ mô và cấu trúc vi mô của tre [3]. Là một vật liệu gradient, thân tre thay đổi về sự phân bố, kích thước và hình dạng của các mô và tế bào ở các vị trí khác nhau. Những đặc điểm này ảnh hưởng đến sự co ngót không đều của vật liệu và nguyên nhân chính gây ra các vết nứt của thân tre trong quá trình sấy.

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng, sau quá trình nhiệt phân ngắn thân tre trong môi trường khí hoặc môi trường lỏng ở 160°C - 250°C, tất cả các thành phần hóa học trong tre sẽ tham gia vào các quá trình nhiệt phân và trùng hợp ở một mức độ nhất định. Đồng thời làm giảm hàm lượng hemicellulose và hydroxyl trong thành tế bào của tre. Điều này sẽ làm thay đổi các tính chất vật lý và hóa học, đồng thời giảm tính hút ẩm và khả năng hấp thụ nước, do đó cải thiện tính ổn định kích thước và độ bền sinh học của tre [4][5][6]. Rất nhiều phương pháp làm khô thân tre đã được sử dụng nhằm nâng cao tính chất của vật liệu tre tự nhiên bao gồm các phương pháp hóa học, vật lý, hóa lý [7] và sinh học [8]. Các phương pháp sinh học (ví dụ: xử lý bằng enzyme) tốn kém và không phù hợp để xử lý hàng loạt, trong khi các phương pháp hóa học có hiệu quả nhanh chóng; do đó, các phương pháp hóa học, bao gồm xử lý bằng kiềm và axit, phổ biến hơn. Tuy nhiên, quá trình làm khô thân tre bằng phương pháp hóa học tạo ra nhiều sản phẩm độc hại, gây ô nhiễm môi trường và gây nguy hiểm cho sức khỏe con người. So với các phương pháp hóa học, các phương pháp vật lý được áp dụng rộng rãi vì thân thiện hơn với môi trường, đơn giản trong vận hành và an toàn.

Hiện nay, các phương pháp xử lý vật lý nhiệt độ cao chủ yếu bao gồm xử lý thủy nhiệt [9], xử lý nhiệt bằng dầu [10] và xử lý nhiệt pha khí [11]. Mặc dù hai phương pháp đầu đã được áp dụng rộng rãi trong công nghiệp ở quy mô nhỏ nhờ khả năng cải thiện các tính chất vật lý và hóa học của tre, nhưng các phương pháp này có nhiều nhược điểm. Chẳng hạn, một lượng lớn dầu hoặc nước sẽ được hấp thụ trong quá trình xử lý. Những quy trình phức tạp này khiến công đoạn tách hết dầu hoặc nước sau khi xử lý và việc xử lý các chất thải của toàn bộ quá trình trở nên khó khăn. Ngoài ra, các phương pháp này đòi hỏi nhiều nhân công và thời gian sấy dài. Gần đây, phương pháp xử lý nhiệt bằng hơi nước bão hòa được coi là phương pháp xử lý thân thiện với môi trường và có nhiều ưu điểm như diệt được nấm, chống mối mọt và làm đều màu tre thành phẩm. Tuy nhiên, phương pháp này cũng có một số nhược điểm đáng chú ý như: thời gian sấy dài, chi phí vận hành cao và đặc biệt là làm giảm độ bền cơ học của tre [12]. Sấy tre bằng vi sóng cũng là một phương pháp thân thiện với môi trường, ít phụ phẩm, cho tốc độ nhanh. Nhưng yêu cầu đầu tư lớn, giới hạn về mặt kích thước, kiểm soát chặt chẽ và phù hợp hơn với nghiên cứu hoặc sản xuất quy mô nhỏ có chọn lọc, chưa thực sự tối ưu cho sản phẩm sản xuất tre đại trà [13]. Do đó, nghiên cứu các phương pháp sấy mới, có thể rút ngắn thời gian sấy và nâng cao chất lượng sản phẩm hiện đang được các nhà khoa học đặc biệt quan tâm.

Là một vật liệu sinh khối tự nhiên, thân tre chủ yếu bao gồm cellulose, hemicellulose và lignin. Theo Azeez và các cộng sự, tương tự như gỗ, hàm lượng cellulose, hemi-cellulose và lignin chiếm trên 90% tổng khối lượng thân tre [14]. Trong đó, cellulose chiếm khoảng 74%, hemi-cellulose chiếm khoảng 13% và lignin chiếm khoảng 10%. Hàm lượng của từng thành phần hóa học của tre có mối tương quan chặt chẽ với các tính chất vật lý và cơ học của nó. Cellulose là đại phân tử tuyến tính có cấu trúc xoắn kép được hình thành bởi các monome glucose thông qua các liên kết glycosid, bị phá vỡ trong điều kiện axit hoặc ẩm ướt, dẫn đến sự phân hủy của các phân tử cellulose []. Thân tre được xử lý có thể ảnh hưởng đến trạng thái hỗn hợp và liên liên kết của các chất trong thành tế bào, dẫn đến sự khác biệt trong quá trình hóa dẻo của sợi [15]. Do vậy, nghiên cứu sấy chuyển hóa nhằm sử dụng ngay các chất có trong thân tre làm chất kết dính để làm tăng một số đặc tính cơ lý của chúng là một phương án khả thi.

Hiện đã có một số nghiên cứu về ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian xử lý đến các đặc tính của tre được xử lý nhiệt ở nhiệt độ cao [16][17]. Các nghiên cứu cho thấy, nhiệt độ thích hợp có thể cải thiện một số đặc tính cơ lý của tre. Nếu nhiệt độ quá cao, nó sẽ gây ra hiện tượng cứng bề mặt của tre và làm giảm độ bền cơ học, do đó làm giảm độ bền tổng thể của tre và ảnh hưởng đến ứng dụng của nó trong các sản phẩm tre và ngành công nghiệp tre [18][19]. Tuy nhiên, những thay đổi về thành phần hóa học, độ kết tinh và mối quan hệ giữa các thông số quá trình xử lý nhiệt ít được nghiên cứu, điều này sẽ ảnh hưởng đến hiệu suất sản phẩm cuối cùng của vật liệu đã qua xử lý. Do đó, cần nghiên cứu một cách hệ thống ảnh hưởng của điều kiện sấy lên cấu trúc vi mô và

mối liên quan giữa chúng tới các đặc tính cơ lý của thân tre trong quá trình sấy chuyển hóa. Trên cơ sở đó, đưa ra được điều kiện sấy thích hợp và có thể ứng dụng ở quy mô công nghiệp. Nhóm nghiên cứu sử dụng kết hợp giản đồ nhiều xạ tia X và các phép đo tính chất cơ học của các mẫu để khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ sấy chuyển hóa đến độ kết tinh tương đối của cellulose trong thân tre và tính chất cơ học tương ứng sau khi xử lý nhiệt bằng máy sấy áp suất thấp. Trên cơ sở đó, làm sáng tỏ ở cấp độ vi mô cơ chế xử lý nhiệt bằng máy sấy áp suất thấp đối với tre, nhằm cung cấp cơ sở lý thuyết cho việc điều chỉnh các tính chất của tre và tối ưu hóa các thông số của quá trình xử lý nhiệt.

2. PHƯƠNG PHÁP/ VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp lấy mẫu

Tre *dendrocalamus barbatus* (hay còn gọi là luồng Thanh Hóa) 4 năm tuổi được dùng làm đối tượng nghiên cứu. Các mẫu dài khoảng 5 đốt (chiều dài 1 m, đường kính trung bình từ 80 đến 100 mm) và được thu thập từ các thân cây ở độ cao 1,5 đến 2,5 m so với mặt đất. Các mẫu được chọn có tiết diện hình tròn và được đánh dấu ở hai đầu để thí nghiệm.

2.2. Phương pháp sấy

Mẫu đối chứng để khô tự nhiên, các mẫu thí nghiệm được tiến hành xử lý nhiệt theo phương pháp sấy chuyển hóa sử dụng máy sấy công nghiệp áp suất thấp, tự động đối lưu luồng khí tại Công ty TNHH Ánh sáng Sao vàng Việt. Mẫu đối chứng và mẫu thí nghiệm đều có độ ẩm trong khoảng tiêu chuẩn 12% - 13%. Dưới điều kiện áp suất thấp, quá trình bay hơi diễn ra nhanh chóng và do đó đẩy nhanh quá trình làm khô sản phẩm, thời gian sấy giảm xuống đáng kể. Bên cạnh đó, nhờ thực hiện sấy ở nhiệt độ thấp nên tính chất sinh học, màu sắc, hình dáng của sản phẩm được giữ ổn định ở mức cao. Sản phẩm sấy áp suất thấp bảo quản lâu dài và ít bị tác động bởi môi trường.

Theo công bố của H. Lv và cộng sự [13], các tính chất cơ lý như, độ co rút đồng đều, độ kết tinh và các mô đun Yang, mô đun đàn hồi đều tăng khi sấy trong khoảng nhiệt độ từ 70°C - 80°C và cho giá trị cao nhất khi sấy ở 80°C. Chính vì vậy, nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp sấy áp suất thấp, tự động đối lưu luồng khí ở nhiệt độ 80°C là chủ yếu.

Mặt khác, theo kết quả nghiên cứu của Wang và cộng sự [20], sau khi xử lý bằng hơi nước ở 180°C, sự phân hủy hemicellulose xảy ra rất mạnh dẫn đến tỷ phần cellulose tương đối tăng lên. Ở nhiệt độ này, phản ứng ngưng tụ lignin cũng xảy ra trong các mẫu tre làm cho hàm lượng lignin tăng lên. Mà như chúng ta đã biết, lignin có tính kỵ nước và độ trợ phản ứng hóa học tốt hơn do hàm lượng hydroxyl thấp hơn và là thành phần chịu nhiệt tốt nhất trong tre. Ngoài ra, lignin còn đóng vai trò là chất kết dính, tạo nên độ cứng và độ đặc của tre. Hàm lượng cellulose lại có mối tương quan chặt chẽ với độ bền cơ học của mẫu. Tuy nhiên, nếu tăng thời gian xử lý ở 180°C lên hơn 30 phút thì sẽ dẫn đến sự suy giảm hàm lượng cellulose tương đối do sự phân hủy cellulose bắt đầu xảy ra. Thêm vào đó, nghiên cứu khi xử lý bằng dầu nóng ở khoảng nhiệt độ từ 100°C - 200°C [21], các

tác giả vẫn cho thấy nồng độ kết tinh của cellulose cao hơn đáng kể so với mẫu sấy thông thường. Do đó, để chuyển hóa các chất hóa học có trong thân tre với hy vọng chúng sẽ làm chất kết dính để tăng cường độ cơ học thân tre, nhóm nghiên cứu đã lựa chọn điều kiện sấy với ba giai đoạn cụ thể như sau: i) Thực hiện sấy tất cả các mẫu ở nhiệt độ 180°C trong thời gian 30 phút với mục đích làm tăng nồng độ lignin và cellulose trong mẫu; ii) Tiếp tục sấy các mẫu ở các nhiệt độ 150°C, 130°C và 110°C trong cùng khoảng thời gian 30 phút, với mục đích tiếp tục cung cấp nhiệt trên nhiệt độ sôi thông thường để các chất hóa học có trong mẫu tiếp tục tương tác (đặc biệt là tương tác liên kết chéo của lignin), và như vậy, hàm lượng lignin để tiếp tục tăng mà không gây phân hủy cellulose; iii) Cuối cùng, thực hiện sấy ở chế độ áp suất thấp tại nhiệt độ 80°C để làm khô sản phẩm. Trong quá trình này, cứ cách 1h lại đóng ống xả hơi 30 phút cho đến khi khô sản phẩm xuống độ ẩm 12% - 13%. Do nhiệt độ sấy chuyển hóa của các mẫu khác nhau, nên thời gian sấy nhiệt độ thấp sẽ khác nhau để chúng giảm xuống cùng giá trị độ ẩm. Các mẫu M150, M130 và M110 lần lượt là các mẫu sấy chuyển hóa ở các nhiệt độ 150°C, 130°C và 110°C tương ứng. Quy trình sấy mẫu được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Điều kiện sấy thân tre

Tên hệ mẫu	Sấy nhiệt độ cao		Sấy chuyển hóa		Sấy nhiệt độ thấp		Độ ẩm
	Nhiệt độ	Thời gian	Nhiệt độ	Thời gian	Nhiệt độ	Thời gian	
M150	180°C	0,5 h	150°C	0,5h	80°C	10 h	12% - 13%
M130	180°C	0,5 h	130°C	0,5 h	80°C	11 h	12% - 13%
M110	180°C	0,5 h	110°C	0,5 h	80°C	12 h	12% - 13%

2.3. Xác định độ kết tinh tương đối của cellulose bằng giản đồ nhiễu xạ tia X

Tre là một trong những loại cây sản xuất lignocelluloses có chứa tới khoảng 74% cellulose. Cellulose là một polymer của β -glucose với các liên kết β -1-4 giữa các đơn vị glucose. Có hai vùng cellulose trong thân tre. Vùng kết tinh của cellulose bao gồm các phân tử cellulose có trật tự cao đạt tới 2/3 toàn bộ cellulose, trong khi vùng vô định hình chứa các phân tử ít trật tự hơn [22]. Các vùng kết tinh và vùng vô định hình này có thể được xác định bằng phân tích nhiễu xạ tia X chẳng hạn như chỉ số kết tinh, % tinh thể và kích thước tinh thể.

Các mẫu được nghiền nhỏ và sàng với mắt lưới 0.15mm, sau đó được sấy khô trong tủ sấy ở $100 \pm 3^\circ\text{C}$. Các mẫu đã sấy khô được ép thành lát mỏng để xác định đặc trưng nhiễu xạ tia X của chúng. Bột sau đó được đo nhiễu xạ tia X giữa các góc (2θ) từ 5° đến 50° bằng máy đo nhiễu xạ tia X (XRD) Bruker D2 PHASER với bức xạ $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5406\text{\AA}$). Máy phát được sử dụng ở 40KV, 30mA ở mức quét $1,2^\circ/1\text{phút}$. Thiết bị thuộc Phòng thí nghiệm nghiên cứu khoa học vật liệu - Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức.

2.4. Xác định tính chất cơ của tre

Tính chất cơ học của tre bao gồm độ bền uốn tĩnh, cường độ chịu nén, độ bền kéo, được xác định theo TCVN 8048 : 2009. Độ bền uốn tĩnh của tre được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 8048 – 3 : 2009 bằng thiết bị Máy kéo nén vụn năng kèm theo phần mềm SANS Power Test V3.4 ghi nhận và phân tích kết quả. Các thí nghiệm xác định độ bền nén dọc thớ của tre thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 8048 – 5: 2009 bằng thiết bị nén Model: PILOT 50-C34C02. Trong nghiên cứu này, độ bền kéo dọc thớ của tre được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 8048 – 6 : 2009 bằng thiết bị Máy kéo nén vụn năng kèm theo phần mềm SANS Power Test V3.4 ghi nhận và phân tích kết quả.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

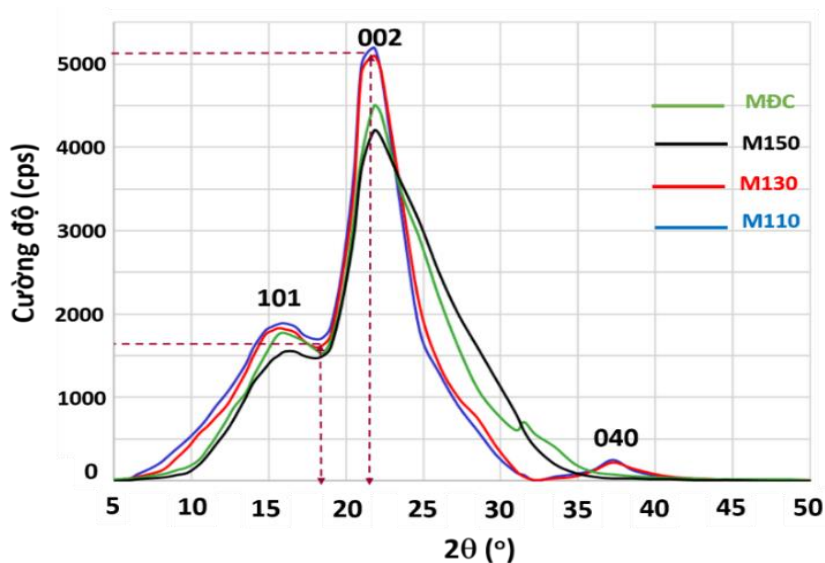
3.1. Độ kết tinh tương đối của cellulose

Từ giản đồ nhiễu xạ tia X trong Hình 1 có thể thấy, tất cả các mẫu đều cho hai đỉnh nhiễu xạ chính, chứng tỏ cellulose trong các mẫu kết tinh khá tốt. Các đỉnh nhiễu xạ 101, 002 lần lượt ở các vị trí 2 trong khoảng 15,4 - 16 và 21,7 - 22, tương ứng. Chứng tỏ cellulose kết tinh trong nghiên cứu hoàn toàn là cellulose loại I [23].

Theo nghiên cứu của Yang và cộng sự [22], độ kết tinh tương đối C_{rl} được xác định thông qua biểu thức:

$$C_{rl} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100\% \quad (1)$$

Với I_{002} là giá trị cường độ nhiễu xạ cực đại của mặt 002 và I_{am} là giá trị cực tiểu giữa hai đỉnh 101 và 002 (được coi là đỉnh nhiễu xạ của vùng vô định hình).



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu

Từ giản đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu trên Hình 1 và dựa vào biểu thức (1), các giá trị độ kết tinh tương đối của các mẫu được xác định trong bảng sau:

Bảng 2. Độ kết tinh tương đối của các mẫu dựa trên kết quả chụp nhiễu xạ tia X

Tên mẫu	I ₀₀₂	I _{am}	C _{rl} (%)
MĐC	4500	1535	65,89
M150	3850	1505	60,91
M130	5205	1700	67,34
M110	5100	1605	68.53

Từ Bảng 2 có thể thấy, độ kết tinh cellulose khá tốt. Tuy nhiên, có một số khác biệt trong mỗi mẫu tùy thuộc vào nhiệt độ sấy chuyển hóa. So với mẫu đối chứng, độ kết tinh tương đối trong mẫu sấy chuyển hóa ở nhiệt độ 150°C giảm đáng kể. Tuy nhiên, khi giảm nhiệt độ xuống 130°C độ kết tinh tương đối tăng lên và lớn hơn độ kết tinh tương đối của mẫu đối chứng. Giảm nhiệt độ xuống 110°C, độ kết tinh tương đối tiếp tục tăng lên.

Về độ kết tinh tương đối khi xử lý nhiệt, Kim và các cộng sự [23] công bố rằng cường độ tương đối của phản xạ tinh thể và nền vô định hình của cellulose được xử lý nhiệt từ 100 đến 360°C giảm dần khi nhiệt độ tăng lên cho đến 320°C. Trên 320°C, cường độ giảm nhanh và bằng 0 ở 360°C. Kết quả được giải thích là do quá trình phân hủy tinh thể ưu tiên dọc theo trục sợi trong khi những phần khác vẫn còn nguyên vẹn ở giai đoạn đầu mới tăng nhiệt độ. Khi nhiệt độ tăng cao hơn 320°C, quá trình phân hủy xảy ra nhanh trong toàn bộ các phần trong sợi tre. Tuy nhiên, Jiang và cộng sự [24] đã nghiên cứu chỉ số kết tinh của các hạt tre moso được xử lý nhiệt và nhận thấy, ở nhiệt độ dưới 265°C, vùng kết tinh của cellulose không bị phân hủy mà bị hấp thụ nước. Hemicellulose phân tử nhỏ và vùng vô định hình của cellulose dần bị thoái hóa dẫn đến việc tăng chỉ số kết tinh khi tăng nhiệt độ.

Trong quy trình sấy chuyển hóa, trước khi sấy ở các nhiệt độ 110°C, 130°C và 150 °C, các mẫu đã được sấy ở 180°C để tạo môi trường ngưng tụ lignin, làm tăng hàm lượng lignin và tỷ phần cellulose trong mẫu. Chính vì vậy, khi thực hiện quá trình sấy ở các nhiệt độ chuyển hóa như trên xảy ra đồng thời cả sự phân hủy tinh thể ưu tiên và sự thoái hóa vùng vô định hình. Với mẫu sấy ở nhiệt độ 150°C, quá trình bay hơi của nước là mạnh nhất nên vùng kết tinh của cellulose sẽ bị phân hủy nhiều nhất và vượt quá so với tỷ lệ thoái hóa của vùng vô định hình dẫn đến giảm độ kết tinh tương đối trên toàn bộ mẫu. Đối với việc độ kết tinh tương đối của các mẫu M130 và M110 lớn hơn so với mẫu đối chứng có thể giải thích là do lúc này lượng cellulose ngậm nước còn nhiều và tỷ lệ thoái hóa của vùng vô định hình lớn hơn tỷ lệ phân hủy của vùng cellulose tinh thể.

3.2. Tính chất cơ học của thân tre sau xử lý

Tính chất cơ học của vật liệu là thuộc tính liên quan đến những thay đổi trong hình dạng của vật liệu khi có lực cản do tác dụng của các ngoại lực tác dụng lên nó. Các tính chất này rất quan trọng để biết độ bền của tre khi được sử dụng làm đồ gia dụng và vật liệu xây dựng. Theo các nghiên cứu trước, độ bền cơ học của tre lại có mối tương quan

chặt chẽ với hàm lượng cellulose trong thân tre [20][24][25]. Các đặc tính cơ học bao gồm độ bền uốn tĩnh, độ bền nén dọc thớ và độ bền kéo của các mẫu tre được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 8048 : 2009. Kết quả được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 3. Kết quả đo một số tính chất cơ của các mẫu tre sấy chuyển hóa

Tên mẫu	Độ bền uốn tĩnh (MPa)	Độ bền nén dọc thớ (MPa)	Độ bền kéo dọc thớ (MPa)
MĐC	260,9	56,8	258,5
M150	338,5	93,2	200,0
M130	357,2	112,6	209,8
M110	362,5	114,8	214,1

3.2.1. Độ bền uốn tĩnh

Độ bền uốn tĩnh là khả năng vật liệu chịu lực làm việc vuông góc với trục kéo dọc thớ ở giữa vật liệu khi chúng được đỡ bởi hai đầu. Biết độ dẻo hoặc độ bền uốn của tre là rất quan trọng vì tre sử dụng làm đồ gia dụng và vật liệu xây dựng thường được uốn cong. Độ bền uốn bị ảnh hưởng bởi một số yếu tố, bao gồm độ ẩm, cấu trúc vi mô, vị trí lấy mẫu và hình dạng và kích thước của đối tượng thử nghiệm. Từ Bảng 3 có thể thấy, độ bền uốn tĩnh của các mẫu đều tăng lên đáng kể so với mẫu đối chứng. Theo nghiên cứu của Wang và cộng sự [21], Sự gia tăng mô đun đàn hồi của các mẫu chủ yếu là do sự mất nước ở vùng vô định hình của cellulose. Sự sắp xếp chặt chẽ hơn của các chuỗi phân tử cellulose và sự hình thành liên kết ester giữa các nhóm hydroxyl của chuỗi phân tử làm tăng độ kết tinh của các phân tử cellulose, do đó cải thiện tính chất cơ học của mẫu. Ngoài ra, do sự phân hủy của hemicellulose, hàm lượng tương đối của cellulose và có thể cả của lignin tăng lên, điều này cũng sẽ dẫn đến sự cải thiện tính chất cơ học của mẫu và cũng hoàn toàn phù hợp với kết quả phân tích giản đồ nhiễu xạ tia X.

3.2.2. Độ bền nén dọc thớ

Bảng 3 cho thấy sự thay đổi độ bền nén dọc thớ của các mẫu sau khi xử lý nhiệt ở các nhiệt độ sấy chuyển hóa khác nhau. Có thể thấy rằng, quá trình sấy làm cho độ bền dọc thớ của mẫu tăng lên rất nhiều. Cũng theo [20], điều này chủ yếu là do cellulose đóng vai trò hỗ trợ trong ba thành phần chính của thành tế bào tre, mang lại độ đàn hồi và độ bền cho mẫu. Ngoài ra, lignin còn đóng vai trò là chất đóng rắn, tạo nên độ cứng và độ đặc của mẫu. Cả hai đều đóng vai trò tích cực trong khả năng chịu nén dọc thớ của mẫu. Kết quả trên Bảng 2 cho thấy hàm lượng cellulose kết tinh tương đối giảm theo chiều tăng của nhiệt độ sấy chuyển hóa. Nguyên nhân chính làm giảm cường độ nén dọc thớ của mẫu theo chiều tăng của nhiệt độ là do việc sấy chuyển hóa ở nhiệt độ cao hơn, một lượng hemicellulose lớn hơn bị phân hủy dẫn đến độ bền nén dọc theo thớ giảm [20].

3.2.3. Độ bền kéo dọc thớ

Độ bền kéo dọc thớ là thước đo sức bền của mẫu trong việc chống lại các lực có xu hướng làm cho các phần trong mẫu tách ra khỏi nhau và phụ thuộc rất lớn vào độ ẩm. Từ Bảng 3 ta thấy, độ bền kéo dọc thớ của các mẫu sau khi sấy giảm nhiều so với mẫu

đối chứng. Khi nhiệt độ sấy tăng lên, độ bền kéo dọc thớ giảm xuống. Điều này chủ yếu là do khi nhiệt độ sấy chuyển hóa tăng lên, hàm lượng hemicellulose trong mẫu, yếu tố quyết định độ bền kéo dọc thớ của mẫu, giảm dần [21]. Ngoài ra, việc để nhiệt độ sấy chuyển hóa cao hơn sẽ làm tăng cường sự hình thành liên kết ete giữa cellulose dẫn đến giảm số lượng liên kết hydro. Đây cũng là một trong những nguyên nhân khiến độ bền kéo dọc thớ của mẫu bị giảm. Tuy nhiên, giá trị độ bền kéo dọc thớ của các mẫu vẫn nằm trong khoảng của các mẫu tre luồng có độ bền cao (từ 67,3 đến 288,3 MPa) [25].

4. KẾT LUẬN

Kết quả phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) kết hợp với các phép đo cơ học cho thấy độ kết tinh tương đối của cellulose có mối tương quan chặt chẽ với các tính chất cơ học của tre, bao gồm độ bền uốn tĩnh, độ bền nén dọc thớ và độ bền kéo dọc thớ. Sau quá trình sấy, tất cả các mẫu đều ghi nhận sự gia tăng đáng kể về độ bền uốn tĩnh và độ bền nén dọc thớ so với mẫu đối chứng. Tuy nhiên, các giá trị này giảm dần khi nhiệt độ sấy chuyển hóa tăng, điều này phù hợp với xu hướng suy giảm độ kết tinh tương đối của cellulose. Nguyên nhân chủ yếu là do sự phân hủy hemicellulose ở nhiệt độ cao, tạo ra axit axetic xúc tác cho quá trình phân hủy cellulose, đồng thời làm suy yếu liên kết giữa hemicellulose, lignin và cellulose, dẫn đến tách lớp gian bào và suy giảm tính chất cơ học. Mặc dù độ bền kéo dọc thớ của các mẫu thấp hơn mẫu đối chứng, nhưng vẫn nằm trong khoảng của tre có độ bền cao. Trong ba điều kiện khảo sát, nhiệt độ sấy chuyển hóa 110°C cho thấy hiệu quả tối ưu nhất. Tuy nhiên, cần tiếp tục nghiên cứu ở các mức nhiệt thấp hơn 110°C để xác định chính xác điều kiện sấy tối ưu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Xiaobo, L, Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Theses, Louisiana State University, 2004.
- [2] Tang, T. K. H., Welling, J., & Liese, W, Kiln drying for bamboo culm parts of the species *Bambusa stenostachya*, *Dendrocalamus asper* and *Thyrsostachys siamensis*. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*. 10(1):26-31, 2013. DOI: 10.1007/s13196-013-0089-4.
- [3] Yan, Y., Fei, B. H., & Liu, S. Q, The relationship between moisture content and shrinkage strain in the process of bamboo air seasoning and cracking. *Drying Technology*. 40:571-580, 2022. DOI: 10.1080/07373937.2020.1819307.
- [4] Tang, T., Zhang, B., Liu, X., Wang, W., Chen, X., & Fei, B, Synergistic effects of tung oil and heat treatment on physicochemical properties of bamboo materials. *Scientific Reports*. 9:1-11, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-49240-8.
- [5] Fatrawana, A., Maulana, S., Nawawi, D. S., Sari, R. K., Hidayat, W., Park, S. H., Febrianto, F., Lee, S. H., & Kim, N. H, Changes in chemical components of steam-treated betung bamboo strands and their effects on the physical and mechanical properties of bamboo-oriented strand boards. *European Journal of Wood and Wood Products*. 77:731–739, 2019. DOI: 10.1007/s00107-019-01426-7.

- [6] Huang, Y., Ji, Y., & Yu, W, Development of bamboo scrimber: A literature review. *Journal of Wood Science*. 65:1-10, 2019. DOI: 10.1186/s10086-019-1806-4.
- [7] Manalo, R. D., & Acda, M. N, Effects of hot oil treatment on physical and mechanical properties of three species of Philippine bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*. 21(1):19-24, 2009.
- [8] Feng, Q., Huang, Y., Ye, C., Fei, B., & Yang, S, Impact of hygrothermal treatment on the physical properties and chemical composition of Moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *Holzforschung*. 75(7):614-625, 2021. DOI: 10.1515/hf-2020-0017.
- [9] Cheng, D., Jiang, S., & Zhang, Q, Effect of hydrothermal treatment with different aqueous solutions on the mold resistance of Moso bamboo with chemical and FTIR analysis. *BioResources*. 8:371-382, 2013. DOI: 10.15376/biores.8.1.371-382.
- [10] Tang, T., Chen, X., Zhang, B., Liu, X., & Fei, B, Research on the physico-mechanical properties of Moso bamboo with thermal treatment in tung oil and its influencing factors. *Materials*. 12:599, 2019. DOI: 10.3390/ma12040599.
- [11] Chung, M. J., & Wang, S. Y, Effects of peeling and steam-heating treatment on basic properties of two types of bamboo culms (*Phyllostachys makinoi* and *Phyllostachys pubescens*). *Journal of Wood Science*. 63:473-482, 2017. DOI: 10.1007/s10086-017-1647-y.
- [12] Zhu, R., Zhang, Y., & Yu, W, Changes in the chemical properties of *Phyllostachys iridescens* bamboo with steam treatment. *Bioresources*. 10(3):5987-5993, 2015. DOI: 10.15376/biores.10.3.5987-5993.
- [13] Lv, H., Chen, X., Liu, X., Fang, C., Liu, H., Zhang, B., & Fei, B, The vacuum-assisted microwave drying of round bamboos: Drying kinetics, color and mechanical property. *Materials Letters*. 223:159-162, 2018. DOI: 10.1016/j.matlet.2018.04.038.
- [14] Azeez, M. A., & Orege, J. I, Bamboo, its chemical modification and products, in *Bamboo - Current and Future Prospects*, 25-48, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.76359.
- [15] Kang, X., Kirui, A., Dickwella Widanage, M. C., et al, Lignin-polysaccharide interactions in plant secondary cell walls revealed by solid-state NMR. *Nature Communications*. 10:1-9, 2019. DOI: 10.1038/s41467-018-08252-0.
- [16] Nguyen, Q., Nguyen, T., & Nguyen, N, Effects of bleaching and heat treatments on *Indosasa angustata* bamboo in Vietnam. *BioResources*. 14:6608-6618, 2019. DOI: 10.15376/biores.14.3.6608-6618.
- [17] Brito, F. M. S., Paes, J. B., da Oliveira, J. T. S., Arantes, M. D. C., Vidaurre, G. B., & Brocco, V. F, Physico-mechanical characterization of heat-treated glued laminated bamboo. *Construction and Building Materials*. 190:719-727, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.057.
- [18] Azadeh, A., & Ghavami, K, The influence of heat on shrinkage and water absorption of *Dendrocalamus giganteus* bamboo as a functionally graded material. *Construction and Building Materials*. 186:145-154, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.011.

- [19] Zhang, Y. M., Yu, Y. L., & Yu, W. J, Effect of thermal treatment on the physical and mechanical properties of *Phyllostachys pubescens* bamboo. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71:61-67, 2013. DOI: 10.1007/s00107-012-0643-6.
- [20] Wang, Q., Wu, X., Yuan, C., Lou, Z., & Li, Y, Effect of saturated steam heat treatment on physical and chemical properties of bamboo. *Molecules*. 25(8):1999, 2020. DOI: 10.3390/molecules25081999.
- [21] Li, J., Chen, Y., Xu, J., Ren, D., Yu, H., Guo, F., & Wu, Z, The influence of media treatments on color changes, dimensional stability, and cracking behavior of bamboo scrimber. *International Journal of Polymer Science*. 2018:1-7, 2018. DOI: 10.1155/2018/6068589.
- [22] Yang, S. M., Jiang, Z. H., Ren, Q. H., & Fei, B. H, Determination of cellulose crystallinity of bamboo culms with X-ray diffraction spectrum. *Journal of Northeast Forestry University*. 38(8):75-77, 2010. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2010.08.036.
- [23] Kim, D. Y., Nishiyama, Y., Wada, M., Kuga, S., & Okano, T, Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood. *Holzforschung*. 55(5):521-524, 2001. DOI: 10.1515/HF.2001.084.
- [24] Jiang, Z., Liu, Z., Fei, B., Cai, Z., & Yu, Y, The pyrolysis characteristics of moso bamboo. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 94:48-52, 2012. DOI: 10.1016/j.jaap.2011.10.010.
- [25] Surian, E, A study of the physical-mechanical properties of bamboo in Indonesia, in Proceedings of the Built Environment, Science and Technology International Conference, pp. 154-162, 2018. DOI: 10.5220/0008904601540162.

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Thông tin tài trợ (nếu có): Nghiên cứu này không nhận được tài trợ từ bên ngoài.